

# Inhaltsverzeichnis

## Abschnitt I: Strahlungsdetektoren

<b>1</b>	<b>Überblick über Messaufgaben und Strahlungsdetektoren</b>	<b>17</b>
1.1	Aufgaben der Strahlungsmessung	17
1.2	Anforderungen an die Strahlungsmessungen	20
1.3	Überblick über die Detektorarten	21
<b>2</b>	<b>Detektoren mit Gasfüllung</b>	<b>25</b>
2.1	Ionisationskammern	25
2.1.1	Funktionsweise von Ionisationskammern	27
2.1.2	Bauformen von Ionisationskammern	30
2.2	Detektoren mit Gasverstärkung	40
	Aufgaben	54
<b>3</b>	<b>Theorie der Ionisationskammern*</b>	<b>55</b>
3.1	Thermische Diffusion und Beweglichkeiten der Ladungen im Füllgas*	56
3.2	Ladungsaustausch und Rekombination*	58
3.3	Grundzüge der Rekombinationstheorie*	63
	Aufgaben	74
<b>4</b>	<b>Festkörperdetektoren</b>	<b>75</b>
4.1	Das Bändermodell für Festkörper	76
4.1.1	Ideale und reale Kristalle	79
4.1.2	Anregung von Festkörpern	81
4.1.3	Halbleiter	83
4.2	Halbleiter-Ionisationsdetektoren	87
4.3	Leitfähigkeitsdetektoren	89
4.4	Lumineszenzdetektoren	91
4.4.1	Szintillatoren	92
4.4.2	Leuchtschirme und Leuchtfolien	97

4.4.3	Thermolumineszenz-Detektoren	99
4.4.4	Radiophotolumineszenz-Detektoren	100
	Aufgaben	103
<b>5</b>	<b>Weitere Detektorarten</b>	<b>104</b>
5.1	Chemische Detektoren	104
5.2	Elektronenspinresonanz	107
5.3	Filmemulsionen	108
5.3.1	Transmission und optische Dichte	108
5.3.2	Messung der optischen Dichte	109
5.4	Kalorimeter	113
5.5	Lyolumineszenz	116
5.6	Exoelektronenemission	117
5.7	Flüssigkeits-Ionisationsdetektoren	118
	Aufgaben	120
<b>6</b>	<b>Messreihen und Messfehler</b>	<b>121</b>
6.1	Eigenschaften von Messreihen	122
6.2	Maßzahlen zur Beschreibung von Messreihen	126
6.2.1	Die Lagemaße	126
6.2.2	Die Streumaße	129
6.3	Statistische Modelle für Zufallsexperimente	132
6.3.1	Die Binomialverteilung	134
6.3.2	Die Poissonverteilung	135
6.3.3	Die Gaußverteilung	138
6.3.4	Anwendungen auf die Messung der Radioaktivität	142
6.3.5	Anwendung auf die Verteilung von Zeitintervallen	143
6.4	Fehlerfortpflanzung	146
6.4.1	Summe oder Differenz von Messwerten	147
6.4.2	Multiplikation oder Division mit einer Konstanten	148
6.4.3	Multiplikation oder Division von Messergebnissen	148
6.4.4	Varianz und Mittelwertbildung bei unabhängigen Ergebnissen	150
6.4.5	Fehlergewichtete Mittelwerte	151
6.4.6	Typische Anwendungen der Fehlerfortpflanzung	152

6.5	Totzeiten	155
	Aufgaben	163

## **Abschnitt II: Konzepte und Verfahren der Dosimetrie**

<b>7</b>	<b>Aufgaben und Genauigkeit der klinischen Dosimetrie</b>	<b>164</b>
7.1	Aufgaben der klinischen Dosimetrie	164
7.2	Anforderungen an die Genauigkeit der klinischen Dosimetrie	167
<b>8</b>	<b>Strahlungsfelder und Strahlungsqualitäten</b>	<b>171</b>
8.1	Strahlungsfeldgrößen*	171
8.2	Charakterisierungen der Strahlungsqualität	178
8.2.1	Strahlungsqualitäten von Photonenstrahlungen	179
8.2.1.1	Strahlungsqualitäten weicher und harter Röntgenstrahlung	181
8.2.1.2	Strahlungsqualität ultraharter Röntgenstrahlung	185
8.2.2	Strahlungsqualitäten von Elektronenstrahlung und Betastrahlungen	189
8.2.3	Strahlungsqualität von Neutronenstrahlung	190
8.2.4	Strahlungsqualität von Protonenstrahlung	191
	Aufgaben	194
<b>9</b>	<b>Dosisgrößen</b>	<b>195</b>
9.1	Dosisgrößen der klinischen Dosimetrie	195
9.2	Der Zusammenhang von Kerma und Teilchenfluenz*	199
9.3	Spezielle Dosisgrößen in der bildgebenden Radiologie	200
9.4	Dosisgrößen im Strahlenschutz	204
	Aufgaben	209
<b>10</b>	<b>Strahlungsfeldbedingungen bei der Ionisationsdosimetrie</b>	<b>210</b>
10.1	Sekundärelektronengleichgewicht	212
10.2	BRAGG-GRAY-Bedingungen	215
<b>11</b>	<b>Dosimetrische Konzepte</b>	<b>217</b>
11.1	Photonendosismessungen unter Elektronengleichgewicht	217

11.1.1	Messung der Standardionendosis	217
11.1.2	Messung der Luftkerma	218
11.1.2.1	Das Luftkermakonzept für Photonenstrahlung unter 600 keV	220
11.1.3	Das Wasserenergiedosiskonzept für Photonenenergien unter 3 MeV	222
11.2	Photonendosismessungen unter BRAGG-GRAY-Bedingungen	223
11.2.1	Die $C_{\lambda}$ -Methode für Photonenstrahlung*	223
11.2.2	Das Wasserenergiedosiskonzept für Photonenstrahlung unter Hohlraumbedingungen	224
11.3	Elektronendosismessungen unter BRAGG-GRAY-Bedingungen	225
11.3.1	Das Wasserenergiedosiskonzept für Elektronenstrahlung	226
11.3.2	Die $C_E$ -Methode*	229
11.4	Protonendosismessungen unter BRAGG-GRAY-Bedingungen	229
11.4.1	Protonendosimetrie nach dem Luftkermakonzept	230
11.4.2	Protonendosimetrie nach dem Wasserenergiedosiskonzept	231
	Aufgaben	232

<b>12</b>	<b>Praktische Referenzdosimetrie mit Ionisationskammern</b>	<b>233</b>
12.1	Kammerpositionierung	234
12.2	Messwertkorrekturen bei der praktischen Ionisationsdosimetrie	239
12.2.1	Feldstörung, Feldverdrängung	242
12.2.2	Luftdruck- und Temperaturkorrekturen	244
12.2.3	Luftfeuchtekorrektur	246
12.2.4	Polaritätskorrektur	248
12.2.5	Sättigungskorrekturen	249
12.2.6	Richtungsabhängigkeit der Dosimeteranzeigen	256
12.3	Praktische Photonendosimetrie nach dem Wasserenergiedosiskonzept	259
12.3.1	Dosimetrie weicher und harter Röntgenstrahlungen	260
12.3.2	Dosimetrie ultraharter Photonenstrahlungen	263
12.4	Elektronendosimetrie nach dem Wasserenergiedosiskonzept	268
12.5	Protonendosimetrie nach dem Luftkerma- und Wasserenergiedosiskonzept	272
12.6	Messung der Kennndosisleistung von Afterloadingstrahlern	277
	Aufgaben	281

<b>13 Dosimetrische Materialäquivalenz</b>	283
Aufgaben	290
<b>14 Thermolumineszenzdosimetrie</b>	291
14.1 Thermolumineszenzdetektoren	291
14.2 Praktische Aspekte der Thermolumineszenzdosimetrie	297
Aufgaben	310
<b>15 Hinweise zur klinischen Dosimetrie</b>	311
15.1 Gesetzliche Vorschriften	311
15.2 Geräteausstattung für die Dosimetrie therapeutischer Bestrahlungsanlagen	312
15.3 Erstdosimetrie an einem Elektronenlinearbeschleuniger	319
15.4 Physikalische Qualitätssicherung in der Strahlentherapie	321
15.4.1 Dosimetrische Qualitätskontrollen und Sicherheitsüberprüfungen	322
15.4.2 Geometrische Kontrollen an Lokalisationseinrichtungen	324
15.4.3 Qualitätssicherung am Bestrahlungsplanungssystem	325
15.5 Personalbedarf	326
Aufgaben	327

### **Abschnitt III: Dosisverteilungen**

<b>16 Dosisverteilungen perkutaner Photonenstrahlungen</b>	328
16.1 Absolute Dosisleistungen von Photonenstrahlungsquellen	331
16.1.1 Definition und Messung der Kenndosisleistungen	331
16.1.2 Feldgrößenabhängigkeit der Zentralstrahldosisleistungen	335
16.1.3 Die Methode der äquivalenten Quadratfelder für ultraharte Photonenstrahlung	350
16.1.4 Dosimetrie asymmetrischer Photonenfelder*	355
16.1.5 Dosimetrie irregulärer Photonenfelder*	359
16.1.6 Gültigkeit des Abstandsquadratgesetzes für die Kenndosisleistungen perkutaner Photonenstrahlungsquellen	364

16.2	Tiefendosisverteilungen von Photonenstrahlungen	373
16.2.1	Messung der Photonentiefendosisverläufe	374
16.2.2	Der Dosisaufbaueffekt von Photonen in Materie	377
16.2.3	Entstehung der Phantomoberflächendosis	384
16.2.4	Verlauf der Photonenenergiedosis in der Tiefe des Phantoms	388
16.2.5	Weitere Tiefendosisgrößen	395
16.2.6	Umrechnung der Tiefendosisgrößen*	404
16.3	Dosisquerverteilungen	411
16.4	Isodosendarstellung perkutaner Photonendosisverteilungen	417
16.5	Auswirkungen von Inhomogenitäten auf die Photonendosisverteilungen	418
16.6	Keilfilter für perkutane Photonenstrahlungen	423
	Aufgaben	435
<b>17</b>	<b>Dosisverteilungen perkutaner Elektronenstrahlung</b>	<b>437</b>
17.1	Absolute Elektronendosisleistungen	437
17.2	Elektronen-Tiefendosisverteilungen	442
17.2.1	Messung der Tiefendosisverteilungen	442
17.2.2	Beschreibung der Elektronentiefendosiskurven	445
17.2.3	Entstehung des Dosismaximums	446
17.2.4	Tiefendosis hinter dem Dosismaximum und Reichweiten	448
17.2.5	Kontamination des Elektronenstrahlenbündels mit Bremsstrahlung	452
17.2.6	Einfluss des Elektronenspektrums auf die Tiefendosiskurve	454
17.2.7	Abhängigkeit der Elektronentiefendosis von der Feldgröße	455
17.2.8	Abhängigkeit der Elektronentiefendosis vom Fokus-Oberflächen- abstand	456
17.2.9	Veränderungen des Tiefendosisverlaufs bei schrägem Strahleinfall	460
17.3	Isodosenverteilungen von Elektronenstrahlung	463
17.4	Auswirkungen von Inhomogenitäten auf Elektronendosisverteilungen	465
17.5	Berechnung der Elektronendosisverteilungen*	469
	Aufgaben	471
<b>18</b>	<b>Dosisverteilungen um Afterloadingstrahler</b>	<b>472</b>
18.1	Kenndosisleistungen von HDR-Afterloadingstrahlern	473

18.1.1 Charakterisierung der Strahlerstärke	474
18.1.2 Messung der Kenndosisleistung von Afterloadingstrahlern	475
18.2 Messung der Energiedosisverteilungen um ruhende Afterloadingstrahler	479
18.3 Berechnung der Afterloading-Dosisverteilungen*	484
18.3.1 Die Quantisierungsmethode*	485
18.3.2 Eine empirische Näherungsformel zur Dosisleistungsberechnung*	490
Aufgaben	494
<b>19 Dosisverteilungen perkutaner Neutronenstrahlung</b>	<b>495</b>
19.1 Dosimetrie von Neutronenstrahlung	496
19.2 Energiedosisverteilungen von Neutronen in Wasser	499
Aufgaben	503
<b>20 Dosisverteilungen perkutaner Protonenstrahlungen</b>	<b>504</b>
20.1 Wechselwirkungsprozesse für Protonen	505
20.2 Tiefendosisverteilungen von Protonen	516
20.3 Feldgrößenabhängigkeit der Protonentiefendosiskurven	520
20.4 Querprofile und Isodosen von Protonenfeldern	521
20.5 Auswirkungen von Gewebeinhomogenitäten	523
20.6 Aufbereitung des therapeutischen Strahlenbündels	525
20.6.1 Strahlaufweitung	526
20.6.2 Energievariation	530
Aufgaben	536
<b>Abschnitt IV: Sonstige Messaufgaben</b>	
<b>21 Spektrometrie, Aktivitäts- und Strahlenschutzmessungen</b>	<b>537</b>
21.1 Spektrometrie ionisierender Strahlungen	537
21.2 Aktivitätsmessungen	544
21.3 Personendosimetrie im Strahlenschutz	546
21.4 Biologischer Nachweis einer Strahlenexposition	550
21.5 Dosisleistungs- und Kontaminationsmessungen im Strahlenschutz	552

Aufgaben	554
<b>22 Messsysteme für die Bildgebung mit Röntgenstrahlung</b>	<b>555</b>
22.1 Detektoren für die Projektionsradiografie	557
22.1.1 Analoge Film-Verstärkungsfolien-Kombinationen	559
22.1.2 Leuchtschirmverfahren	562
22.1.3 Speicherfolien	565
22.1.4 Selendetektoren	567
22.1.5 Digitale direkte Flachbild-Festkörper-Detektoren	569
22.1.6 Bearbeitung der Rohdaten bei digitalen Systemen	573
22.2 Dosisbedarf von Röntgendetektoren	576
22.2.1 Empfindlichkeitsklassen von Film-Folien-Kombinationen	576
22.2.2 Dosisindikator bei digitalen Detektorsystemen	577
22.3 Funktionsprinzip der Computertomografie	582
22.3.1 Gerätegenerationen	582
22.3.2 CT-Detektoren	584
22.3.3 Rechenverfahren	587
22.3.4 Die Hounsfield-Einheiten	592
22.3.5 Mittlere Schwächungskoeffizienten bei heterogenen Röntgenspektren*	593
22.3.6 Artefakte bei der Rückprojektion	595
Aufgaben	603
<b>23 Aufgabenlösungen</b>	<b>604</b>
<b>24 Tabellenanhang</b>	<b>629</b>
24.1 Referenz-Strahlungsqualitäten und Vorschaltsschichten	629
24.1.1 Strahlungsqualitäten von Referenzstrahlungen	629
24.1.2 Vorschaltsschichten für die Weichstrahldosimetrie	630
24.2 Korrekturfaktoren für die Hartstrahldosimetrie (100 - 400 kV)	630
24.2.1 Korrekturen bei Co-Kalibrierungen	630
24.2.2 Korrekturen für von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ abweichende Feldgrößen	631
24.3 Umgebungskorrekturfaktoren für die Weichstrahl- und Hartstrahldosimetrie für handelsübliche Ionisationskammern	631



24.4	Verhältnisse von Massenenergieabsorptionskoeffizienten für Photonen	633
24.5	Faktoren zur Umrechnung der Standardionendosis in Luft- und Wasser-Kerma für Photonenenergien bis 3 MeV	635
24.6	Faktoren zur Photonendosimetrie nach der $C_\lambda$ -Methode	636
24.7	Verhältnisse von Massenstoßbremsvermögen für Sekundärelektronen hoch-energetischer Photonenstrahlung für verschiedene Phantommaterialien	637
24.8	Bestimmung der wahrscheinlichsten Elektronen-Eintrittsenergie aus der Reichweite in Wasser	638
24.9	Verhältnisse von Massenstoßbremsvermögen für Elektronen in Wasser und Luft	639
24.10	Kammerfaktoren zur Elektronendosimetrie	641
24.11	Verhältnisse von Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	642
24.12	Atomare Zusammensetzung verschiedener Gewebe, Phantommaterialien und Dosimetersubstanzen	643
24.13	Äquivalentfeldgrößen für Rechteckfelder für Anlagen zur Erzeugung ultraharter Photonenstrahlungen	644
24.14	Tiefendosisdaten für $^{60}\text{Co}$ -Gammastrahlung in Wasser	646
24.14.1	Relative Tiefendosisverläufe in Wasser	646
24.14.2	Gewebe-Luft-Verhältnisse für $^{60}\text{Co}$ -Gammastrahlung	650
24.15	Tiefendosisdaten für X6-Photonenstrahlung in Wasser	652
24.15.1	Relative Tiefendosisverläufe in Wasser	652
24.15.2	Gewebe-Maximum-Verhältnisse für X6-Photonenstrahlung	655
24.16	Tiefendosisdaten für X18-Photonenstrahlung in Wasser	657
24.16.1	Relative Tiefendosisverläufe in Wasser	657
24.16.2	Gewebe-Maximum-Verhältnisse für X18-Photonenstrahlung	662
24.17	Das griechische Alphabet	663
24.18	Tiefendosisdaten für Protonenstrahlung in Wasser	664
24.18.1	Kennzeichnung der Protonentiefendosisverteilungen	665
24.18.2	TDK für $E_p = 71 \text{ MeV}$ , $R_p = 4 \text{ cm}$	665
24.18.3	TDK für $E_p = 89 \text{ MeV}$ , $R_p = 6 \text{ cm}$	665
24.18.4	TDK für $E_p = 104 \text{ MeV}$ , $R_p = 8 \text{ cm}$	666
24.18.5	TDK für $E_p = 118 \text{ MeV}$ , $R_p = 10 \text{ cm}$	666
24.18.6	TDK für $E_p = 130 \text{ MeV}$ , $R_p = 12 \text{ cm}$	667
24.18.7	TDK für $E_p = 142 \text{ MeV}$ , $R_p = 14 \text{ cm}$	668
24.18.8	TDK für $E_p = 153 \text{ MeV}$ , $R_p = 16 \text{ cm}$	669

24.18.9	TDK für $E_p = 164$ MeV, $R_p = 18$ cm	670
24.18.10	TDK für $E_p = 174$ MeV, $R_p = 20$ cm	671
24.18.11	TDK für $E_p = 183$ MeV, $R_p = 22$ cm	672
24.18.12	TDK für $E_p = 192$ MeV, $R_p = 24$ cm	673
24.18.13	TDK für $E_p = 201$ MeV, $R_p = 26$ cm	674
24.18.14	TDK für $E_p = 210$ MeV, $R_p = 28$ cm	675
24.18.15	TDK für $E_p = 218$ MeV, $R_p = 30$ cm	676
24.18.16	TDK für $E_p = 226$ MeV, $R_p = 32$ cm	677
<b>25</b>	<b>Literatur</b>	678
25.1	Lehrbücher und Monografien	678
25.2	Wissenschaftliche Einzelarbeiten	680
25.3	Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz gültig für die Bundesrepublik Deutschland	687
25.4	Deutsche Normen zu Dosimetrie und Strahlenschutz	689
25.5	Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	696
25.6	Wichtige Internetadressen	702
	<b>Sachregister</b>	704