

Dosimetrie und Strahlenschutz

Physikalisch-technische Daten und Methoden
für die Praxis

Herausgegeben von R. G. Jaeger und W. Hübner

Mit Beiträgen von H. H. Eisenlohr, D. Harder, W. Hübner
R. G. Jaeger, L. Lanzl, J. Mehl, S. Wagner

2., völlig neubearbeitete Auflage
193 Abbildungen, 173 Tabellen



Georg Thieme Verlag Stuttgart 1974

Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiterverzeichnis	VII
Vorwort zur 2. Auflage	VIII

1	Allgemeines	1
	Von W. HÜBNER	
1.1	Mathematische Formeln, Fehlerrechnung, Größen, Einheiten, Kurzzeichen und Umrechnungsfaktoren für Einheiten	1
1.1.1	Einfache mathematische Formeln und Formeln für Fehlerrechnung	1
1.1.2	Physikalische Größen und Einheiten	3
1.1.3	Atomphysikalische Einheiten für Stoffmenge, Masse und Energie	4
1.1.4	Namen, Kurzzeichen und Umrechnungsfaktoren für Einheiten	5
1.2	Elektrische und magnetische Größen und Einheiten	14
1.3	Frequenz, Wellenlänge, Teilchenenergie, Ruheenergie, Bewegungsenergie (kinetische Energie), Impuls	14
1.3.1	Frequenz, Wellenlänge, Photonenenergie, Impuls	14
1.3.2	Ruheenergie, Bewegungsenergie, relativistische Energie, Impuls	15
1.4	Physikalische Konstanten, Eigenschaften von Elementarteilchen und Periodisches System der Elemente	16
2	Atombau und Radioaktivität	22
	Von H. H. EISENLOHR und R. G. JAEGER	
2.1	Aufbau des Atoms	22
2.2	Stabilitätskriterien	23
2.2.1	Empirische Fakten	23
2.2.2	Massendefekt, Bindungsenergie und Stabilität	25
2.3	Radioaktivität	25
2.3.1	Zerfallsgesetz, Zerfallskonstante, Aktivität und die Einheit Curie	25
2.3.2	Mittlere Lebensdauer und Halbwertszeit	27
2.3.3	Spezifische Aktivität	28
2.3.4	Aktivitätskonzentration	28
2.3.5	Radioaktives Gleichgewicht	29
2.4	Radioaktive Quellen	29
2.4.1	Allgemeines, Umwandlungsarten und entstehende Strahlen	29
2.4.2	Alphastrahlung	31
2.4.3	Betastrahlung	31
2.4.4	Gammastrahlung	32
2.4.5	Innere Umwandlung	34
2.4.6	Andere Strahlenarten	34
2.4.7	Radioaktive Stromstandards und einige Konstanten radioaktiver Stoffe	34
2.4.8	Radioaktive Heilwässer, Emanationstherapie	35

2.5	Bezugsnachweis für Radionuklide, Standardpräparate und radioaktiv markierte Verbindungen	37
2.6	Alte Definition des Curie sowie veraltete Einheiten der Aktivität und Aktivitätskonzentration	44
3	Anregung und Ionisierung von Atomen und Molekülen; Ionen	46
	Von W. HÜBNER und R. G. JAEGER	
3.1	Allgemeines	46
3.2	Ionenzahldichte, Ionisierungsstärke, spezifisches Ionisierungsvermögen, Rekombination, Sättigung	46
3.2.1	Strahlung und Ionisation in der freien Atmosphäre und im galaktischen Raum	48
3.2.2	Ionenart, -größe, -ladung und -beweglichkeit	50
3.3	Ionisierungsenergie; Energieaufwand zur Bildung eines Ionenpaares und Ionisierungskonstante	50
3.3.1	Ionisierungsenergie	50
3.3.2	Energieaufwand zur Bildung eines Ionenpaares und Ionisierungskonstante	51
4	Strahlungsfeldgrößen und Einheiten, Dosisgrößen und Dosiseinheiten	53
	Von W. HÜBNER und R. G. JAEGER	
4.1	Allgemeines	53
4.1.1	Ionisierende Strahlen, ionisierende Teilchen	53
4.1.2	Strahlenquelle, Strahlungsfeld, Strahlenwirkung	54
4.1.3	Strahlenausbreitung	54
4.2	Größen und Einheiten zur Beschreibung von Strahlenquellen und Strahlungsfeldern	55
4.2.1	Quellstärke und Strahlungsleistung	55
4.2.2	Teilchenflußdichte und Teilchenfluenz	56
4.2.3	Energieflußdichte und Energiefluenz	58
4.2.4	Beziehungen zwischen Teilchenflußdichte φ und Energieflußdichte ψ sowie zwischen Teilchenfluenz Φ und Energiefluenz Ψ	59
4.2.5	Teilchenstromdichte, Teilchenstrom und Energiestromdichte	59
4.3	Energieübertragung, Energieumwandlung	60
4.3.1	Allgemeines	60
4.3.2	Auf das Material übertragene Energie	60
4.4	Dosisgrößen, Dosiseinheiten und zugehörige Begriffe	61
4.4.1	Allgemeines	61
4.4.2	Energiedosis, Energiedosisleistung und die Einheit Rad, Integraldosis	61
4.4.3	Sekundärteilchengleichgewicht	62
4.4.4	Bragg-Gray-Bedingungen und Fano-Theorem	63
4.4.5	Ionendosis, Ionendosisleistung und die Einheit Röntgen	64
4.4.6	Spezifische Gammastrahlenkonstante (Dosisleistungskonstante)	67
4.4.7	Kenndosisleistung	69
4.4.8	Relative Biologische Wirksamkeit, lineares Energieübertragungsvermögen, Äquivalentdosis, Bewertungsfaktor und deren Einheiten	70
4.4.9	Medizinische Dosisbegriffe	73
4.4.10	Dosisbegriffe für den Strahlenschutz	74
4.5	Kerma, Kermaleistung und deren Einheiten	75
4.6	Beziehungen zwischen Strahlungsfeldgrößen, Kerma (Kermaleistung) und Energiedosis (Energiedosisleistung)	75

4.6.1	Beziehungen zwischen Teilchenflußdichte und Energiedosisleistung bzw. zwischen Teilchenfluenz und Energiedosis bei direkt ionisierenden (geladenen) Teilchen	75
4.6.2	Beziehungen zwischen Energieflußdichte, Kermaleistung und Energiedosisleistung bzw. zwischen Energiefluenz, Kerma und Energiedosis bei indirekt ionisierenden Teilchen	77
4.6.3	Historische Entwicklung von Größen und Einheiten der Dosimetrie . . .	79
5	Korpuskularstrahlen	84
5.1	Allgemeines Von D. HARDER	84
5.1.1	Masse, Energie und Geschwindigkeit	84
5.1.2	Ablenkung im Magnetfeld	84
5.1.3	Materiewellen	87
5.1.4	Der elektromagnetische Impuls	88
5.1.5	Die Cerenkov-Strahlung	89
5.1.6	Die Synchrotronstrahlung	89
5.2	Elektronen und Betateilchen Von D. HARDER	90
5.2.1	Energieverlust	90
5.2.2	Richtungsänderungen	97
5.2.3	Transmission und Rückdiffusion	104
5.2.4	Bahnlänge und Reichweite	107
5.2.5	Sekundärelektronen	112
5.2.6	Elektronenspektren im bestrahlten Material	113
5.2.7	Schwellenenergien für Kernreaktionen (Energiebestimmung)	116
5.3	Protonen, Deuteronen, Alphateilchen Von H. H. EISENLOHR und L. LANZL	117
5.3.1	Physikalische Eigenschaften	117
5.3.2	Bremsvermögen	117
5.3.3	Reichweite und Bahnlänge	119
5.4	Neutronen Von S. WAGNER	122
5.4.1	Physikalische Eigenschaften	122
5.4.2	Neutronenquellen	123
5.4.3	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie, Wirkungsquerschnitte . .	128
5.4.4	Neutronennachweis und Flußdichtemessung	133
6	Photonenstrahlen (Röntgen- und Gammastrahlen)	141
	Von W. HÜBNER	
6.1	Allgemeines und Definitionen	141
6.1.1	Röntgenstrahlung	141
6.1.2	Gammastrahlung	141
6.2	Erzeugung von Röntgenstrahlen	142
6.2.1	Allgemeines	142
6.2.2	Strahlungsleistung und Wirkungsgrad	142
6.2.3	Charakteristische Röntgenstrahlung	143
6.3	Spektrale Verteilungen (Spektren)	146
6.3.1	Energie-, Frequenz- und Wellenlängenverteilung der Teilchen- und Energieflußdichte von Röntgenstrahlen	146
6.3.2	Energiespektrum von Gammastrahlern	148

6.3.3	Richtungsverteilung der Röntgenbremsstrahlung	148
6.4	Wechselwirkungen zwischen Photonen und Materie	150
6.4.1	Allgemeines	150
6.4.2	Schwächung, Schwächungsgesetz, Schwächungskoeffizient	150
6.4.3	Energieumwandlung und Energieumwandlungskoeffizient	158
6.4.4	Massenschwächungskoeffizient und Massen-Energieumwandlungskoeffizient für Spektren	159
6.4.5	Energieabsorptionskoeffizient	160
6.4.6	Tabellen und Abbildungen zum Massen-Schwächungskoeffizienten, Massen- Energieumwandlungskoeffizienten und Massen-Energieabsorptionskoeffi- zienten	161
6.4.7	Materialäquivalenz	163
6.5	Strahlenqualität	170
6.5.1	Allgemeines	170
6.5.2	Praktische Charakterisierung der Strahlenqualität	170
6.5.3	Filterungen	175
6.6	Sekundärelektronen von Photonen	178
6.6.1	Allgemeines	178
6.6.2	Reichweite von Sekundärelektronen	178
6.6.3	Relative Anzahlen und mittlere relative Energien	179
7	Dosimetrie	183
7.1	Allgemeines	183
	Von W. HÜBNER	
7.1.1	Dosimetrie und Dosierung	183
7.1.2	Ziel der Dosimetrie	183
7.1.3	Grundprinzipien der Dosimetrie	184
7.1.4	Absolut-, Fundamental- und Relativmethoden	185
7.2	Fundamentalverfahren und Standard-Dosimetrie	186
	Von W. HÜBNER	
7.2.1	Allgemeines und Staatsinstitute	186
7.2.2	Ionisationsmethoden	187
7.2.3	Kalorimetrische Methoden	187
7.3	Relativmethoden	188
	Von W. HÜBNER, H. H. EISENLOHR und R. G. JAEGER	
7.3.1	Allgemeine Anforderungen an Meßsonden	188
7.3.2	Für die Dosimetrie ausnutzbare Effekte und Methoden	189
7.3.3	Übersicht über Dosismeßverfahren	210
7.4	Röntgen- und Gammastrahlendosimetrie	212
	Von W. HÜBNER, H. H. EISENLOHR und L. LANZL	
7.4.1	Relativmethoden	213
7.4.2	Meßsonden	213
7.4.3	Tiefendosis und Dosisaufbaueffekt	219
7.4.4	Grenzflächen und Inhomogenitäten	221
7.4.5	Umrechnung des Meßwertes in die gesuchte Dosisgröße	223
7.4.6	Dosisleistungsspektren	230
7.4.7	Messung der Kenndosisleistung	231
7.4.8	Patientendosimetrie in der Diagnostik	231
7.4.9	Abweichungen vom Abstandsquadratgesetz	232
7.4.10	Dosisverteilung	233

7.5	Elektronendosimetrie	248
	Von D. HARDER	
7.5.1	Anwendungsbereiche der Elektronenstrahlung	249
7.5.2	Strahlparameter	249
7.5.3	Monitore	254
7.5.4	Dosismeßmethoden	256
7.5.5	Dosisberechnungsmethoden	263
7.5.6	Dosisverteilungen	263
7.6	Neutronendosimetrie	272
	Von S. WAGNER	
7.6.1	Größen für die Neutronendosimetrie	272
7.6.2	Tiefendosisverteilungen	274
7.6.3	Meßverfahren der Neutronendosimetrie	276
7.7	Dosimetrie schwerer geladener Teilchen	282
	Von L. LANZL und H. H. EISENLOHR	
7.7.1	Allgemeines	282
7.7.2	Dosimetrie von Protonen und Deuteronen	283
7.8	Dosimetrie bei Kontakttherapie, intrakavitärer und interstitieller Therapie mit geschlossenen radioaktiven Präparaten	287
	Von R. G. JAEGER und W. HÜBNER	
7.8.1	Allgemeines	287
7.8.2	Dosimetrie von Betastrahlern	288
7.8.3	Dosimetrie von Gammastrahlern	294
7.8.4	Dosimetrie von kombinierten Beta-Gamma-Quellen	298
7.8.5	Dosimetrie von Alphastrahlern	299
7.9	Dosimetrie offener radioaktiver Stoffe bei Inkorporation und bei Haut- kontamination	299
	Von W. HÜBNER und R. G. JAEGER	
7.9.1	Allgemeines	299
7.9.2	Dosimetrie von offenen inkorporierten Alpha- und Betateilchen sowie von Punktquellen und Dosisberechnung bei oberflächlich kontaminierter Haut	300
7.9.3	Dosimetrie offener inkorporierter Betastrahler	306
7.9.4	Dosimetrie offener inkorporierter Gammastrahler	308
7.9.5	Beispiele zur Berechnung der Energiedosis eines ($\beta + \gamma$)-Strahlers und der einer vorgegebenen Energiedosis entsprechenden Aktivität	310
7.10	Mikroskopische Energieverteilung im bestrahlten Material (Mikrodosi- metrie)	313
	Von H. H. EISENLOHR	
7.11	Gleichungen und Nomogramme zur Umrechnung zwischen den gebräuch- lichen Einheiten der Aktivität, der Dosis und Dosisleistung und den SI- Einheiten	316
	Von W. HÜBNER	
8	Strahlenschutz	319
	Von J. MEHL	
8.1	Strahlenschutzregelungen	319
8.1.1	Regelungen internationaler Organisationen	319
8.1.2	Regelungen europäischer Organisationen	322
8.1.3	Regelungen der Bundesrepublik Deutschland	322
8.1.4	Richtlinien und Normen anderer Länder	329

8.2	Wirkungen ionisierender Strahlung	329
8.2.1	Wirkungen auf den Menschen	329
8.2.2	Wirkungen auf sonstige Lebewesen	334
8.2.3	Wirkungen auf unbelebte Objekte	335
8.3	Primäre Grenzwerte der Strahlenbelastung des Menschen	340
8.3.1	Natürliche Strahlenbelastung auf der Erdoberfläche	341
8.3.2	Höchstzulässige Äquivalentdosen für beruflich strahlenexponierte Personen	342
8.3.3	Dosisgrenzen für einzelne Personen der Bevölkerung	343
8.3.4	Grenzwerte für die Strahlenbelastung der Gesamtbevölkerung	344
8.4	Sekundäre Grenzwerte der Strahlenbelastung des Menschen	344
8.4.1	Grenzwerte der Dosisleistung von äußeren Strahlenquellen	345
8.4.2	Grenzwerte für die innere Kontamination des Menschen	346
8.4.3	Grenzwerte für die äußere Kontamination des Menschen und für die Kon- tamination von Oberflächen	358
8.5	Praktischer Strahlenschutz	363
8.5.1	Administration	363
8.5.2	Abschätzung des Risikos	366
8.5.3	Allgemeiner technischer Strahlenschutz	377
8.5.4	Technischer Personenschutz	399
8.5.5	Meßtechnische Überwachung	401
8.5.6	Maßnahmen bei Störungen und Unfällen — Planung, Ausführung, Er- fahrungen und Lehren	407
8.6	Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung infolge von Anwendungen ionisierender Strahlungen	408
8.6.1	Strahlenbelastung durch künstlich radioaktive Stoffe in der Umwelt . . .	408
8.6.2	Strahlenbelastung infolge medizinischer Anwendungen von Röntgenstrahlen und radioaktiven Stoffen	410
8.6.3	Strahlenbelastung durch berufliche Tätigkeit in Strahlenbetrieben . . .	412
8.6.4	Strahlenbelastung durch sonstige Einflüsse	412
8.6.5	Zusammenfassung	413

Abkürzungen von nationalen und internationalen Organisationen, Kommissionen, Gesellschaften, Instituten, Ausschüssen usw.	415
--	------------

Literatur	417
----------------------------	------------

Kapitel 1	417
Kapitel 2	417
Kapitel 3	417
Kapitel 4	418
Kapitel 5	420
Kapitel 6	428
Kapitel 7	431
Kapitel 8	454
Allgemeine und zusammenfassende Literatur	466

Sachverzeichnis	467
----------------------------------	------------