

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2., vollständig überarbeiteten und ergänzten Auflage . . . . .	11
Vorwort zur 1. Auflage . . . . .	12
Einleitung . . . . .	14
1. Einige physikalische Grundlagen . . . . .	19
1.1 Atom-Struktur . . . . .	19
1.2 Ionisation und Anregung . . . . .	21
1.3 Strahlenarten . . . . .	22
1.3.1 Korpuskularstrahlung . . . . .	23
1.3.2 Elektromagnetische Wellenstrahlungen . . . . .	25
1.4 Verhalten der ionisierenden Strahlen in der Materie . . . . .	27
1.4.1 Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit der Materie . . . . .	28
1.4.1.1 Bremsvermögen . . . . .	29
1.4.1.2 Reichweite . . . . .	31
1.4.2 Wechselwirkung von Neutronen mit der Materie . . . . .	33
1.4.3 Elektromagnetische Wellenstrahlung (Quantenstrahlung) . . . . .	33
1.4.3.1 Reichweite (Durchdringungsfähigkeit) . . . . .	36
1.4.3.2 Schwächung . . . . .	36
1.5 Linearer Energieverlust . . . . .	37
1.6 Lineale Energie . . . . .	41
1.7 Radioaktivität . . . . .	41
1.7.1 Einige Gesetze der Radioaktivität . . . . .	43
1.7.2 Strahlenemission . . . . .	43
2. Strahlendosis: Einheiten und Messungen . . . . .	47
2.1 Dosisseinheiten . . . . .	47
2.2 Dosismessungen . . . . .	54
2.2.1 Kalorimetrische Methode . . . . .	55
2.2.2 Ionisationskammern . . . . .	56
2.2.3 Zählrohrmethoden . . . . .	56
2.2.4 Festkörper-Detektoren . . . . .	57
2.2.5 Szintillationszähler . . . . .	57
2.2.6 Leitfähigkeitsänderung . . . . .	58
2.2.7 Photographische Methoden . . . . .	58
2.2.8 Chemische Dosimeter . . . . .	58

3.	Strahlenbiologische Wirkungskette . . . . .	61
3.1	Strahlenchemie . . . . .	65
3.1.1	Strahlenchemie des Wassers und wässriger Lösungen . . . . .	66
3.2	Strahlenbiochemie . . . . .	70
3.2.1	Desoxyribonukleinsäure und ionisierende Strahlung . . . . .	71
3.3	Erholungsvorgänge und Abhängigkeit der Strahlenwirkung von der zeitlichen Verteilung der Dosis (Zeitfaktor) . . . . .	73
3.3.1	Erholungsvorgänge . . . . .	73
3.3.2	Zeitfaktor (Verdünnung und Fraktionierung) . . . . .	75
3.4	Abhängigkeit der Strahlenwirkung von der räumlichen Verteilung der Dosis (LET) . . . . .	78
3.5	Abhängigkeit der Strahlenwirkung vom Milieu, z. B. Sauerstoffgehalt: Sauerstoffeffekt . . . . .	79
3.6	Stochastische und nicht-stochastische Wirkungsweisen . . . . .	81
4.	Zelluläre Strahlenbiologie (Experimentelle Grundlagen für die Strahlentherapie des Krebses) . . . . .	83
4.1	Zelltod . . . . .	85
4.1.1	Einige Methoden zur Feststellung strahleninduzierter Zell-Letalität (respektive Inaktivierung) . . . . .	86
4.1.2	Mechanismen, die zum Zelltod führen . . . . .	87
4.1.3	Zelltod und Zellzyklus . . . . .	88
4.1.4	Dosis-Effekt: Interpretation von Dosis-Effekt-Kurven . . . . .	89
4.1.5	Zelltod und Zeitfaktor (Verdünnung, Fraktionierung) . . . . .	91
4.1.6	Erholung vom subletalen und potentiell letalen Schaden . . . . .	92
4.1.7	OER . . . . .	93
4.1.8	LET . . . . .	94
4.2	Strahlenwirkung auf die mitotische Aktivität der Zelle . . . . .	94
4.3	Hormesis . . . . .	95
5.	Strahlenpathologie und Strahlensyndrom: Nicht-stochastische Wirkungen . . . . .	99
5.1	Strahlentod . . . . .	99
5.2	Strahlenempfindlichkeit von Zellsystemen und Organen . . . . .	99
5.3	Schwellendosen und Toleranzdosen . . . . .	102
5.4	Strahlenreaktionen einiger Zellsysteme und Organe . . . . .	102
5.4.1	Hämatopoetisches System . . . . .	102
5.4.2	Verdauungssystem . . . . .	107
5.4.3	Reproduktive Organe . . . . .	107
5.4.4	Auge . . . . .	112
5.4.5	Haut . . . . .	113
5.4.6	Respirationstrakt . . . . .	114
5.4.7	Niere . . . . .	115
5.4.8	Nervensystem . . . . .	115
5.4.9	Schilddrüse . . . . .	115
5.4.10	Skelettsystem . . . . .	116
5.5	Immunologischer Aspekt . . . . .	116
5.6	Strahlensyndrome . . . . .	118
5.7	Biologisch-chemischer Strahlenschutz . . . . .	123

6.	Strahlentherapie des Krebses: Strahlenbiologische Grundlagen . . . . .	129
6.1	Strahlenempfindlichkeit der Tumoren . . . . .	130
6.2	Möglichkeiten zur Verbesserung der Therapie des Krebses . . . . .	133
6.2.1	Optimale Fraktionierung . . . . .	133
6.2.2	Hyperbare Sauerstofftherapie . . . . .	135
6.2.3	Chemische Strahlenmodifikatoren . . . . .	135
6.2.4	Ganzkörperbestrahlung . . . . .	136
6.2.5	Hyperthermie . . . . .	137
6.2.6	Wahl geeigneter Strahlenarten . . . . .	138
6.2.7	Neutroneneinfang . . . . .	145
7.	Strahlengenetik . . . . .	148
7.1	Allgemeine Tatsachen . . . . .	149
7.1.1	Grundphänomene . . . . .	149
7.1.2	Systematik der Mutation . . . . .	149
7.1.3	Mutationsentstehung . . . . .	152
7.1.4	Reparatur genetischer Schäden . . . . .	152
7.1.5	Reparatur und Krankheit . . . . .	155
7.1.6	Mutationen und Krebsentstehung . . . . .	156
7.2	Somatische Mutationen . . . . .	156
7.2.1	Nomenklatur und Methode . . . . .	157
7.2.2	Abhängigkeit somatischer Mutationen vom Alter und anderen Faktoren	159
7.2.3	Dosis-Effektbeziehungen . . . . .	161
7.2.4	Biologisches Strahlendosimeter . . . . .	162
7.2.5	Chromosomen-Aberrationen in Bevölkerungsgruppen mit erhöhter natürlicher Strahlenbelastung . . . . .	164
7.2.6	Genmutationen und biochemische Mutationen . . . . .	164
7.2.7	Mitotische Rekombination und Schwester-Chromatiden-Austausch . . .	164
7.3	Genetische Wirkungen in den Keimzellen . . . . .	164
7.3.1	Bestimmung von Mutationsraten . . . . .	165
7.3.2	Strahleninduzierte Mutationsrate . . . . .	169
7.3.2.1	Abhängigkeit der Mutationsrate vom Entwicklungsstadium und Geschlecht der bestrahlten Keimzellen . . . . .	169
7.3.2.2	Abhängigkeit der Mutationsrate vom Zeitfaktor . . . . .	173
7.3.2.3	Abhängigkeit der Mutationsrate vom LET . . . . .	173
7.3.2.4	Reparatur und mütterlicher Effekt . . . . .	175
7.3.2.5	Abhängigkeit der Mutationsrate von Milieufaktoren . . . . .	176
7.3.3	Genetische Risikoschätzungen für den Menschen . . . . .	176
7.3.3.1	Natürliche Mutationsrate . . . . .	176
7.3.3.2	Strahleninduzierte Mutationen . . . . .	177
7.3.3.3	Dosis-Wirkungsbeziehung als Grundlage für die Schätzung der Strahlenrisiken durch kleine Strahlenmengen . . . . .	178
7.3.3.4	Genetisches Risiko kleiner Strahlendosen . . . . .	180
8.	Induktion von Krebs durch ionisierende Strahlen . . . . .	184
8.1	Krebsinzidenz und Krebsmortalität . . . . .	187
8.2	Relatives und absolutes Risiko . . . . .	187
8.3	Organspezifische Risiken . . . . .	188
8.4	Latenzzeiten . . . . .	189

8.5	Altersabhängigkeit des Risikos einer Krebsinduktion . . . . .	190
8.6	Strahleninduzierte Tumoren . . . . .	190
8.6.1	Leukämie . . . . .	191
8.6.2	Brustkrebs . . . . .	192
8.6.3	Schilddrüsenkrebs . . . . .	193
8.6.4	Bronchial-Karzinom . . . . .	194
8.7	Krebsinduktion durch kleine Dosen: Risikoschätzungen . . . . .	195
8.7.1	Krebsentstehung als stochastisches Ereignis ohne Schwellendosis . . . . .	195
8.7.2	Modelle von Dosis-Wirkungsbeziehungen . . . . .	196
8.7.3	Risikoschätzungen . . . . .	197
9.	Strahlenwirkung auf das sich entwickelnde Lebewesen . . . . .	201
9.1	Allgemeines . . . . .	201
9.2	Strahlenbedingte Entwicklungsstörungen . . . . .	202
9.2.1	Abhängigkeit der Wirkung vom Entwicklungsstadium . . . . .	203
9.2.2	Interne Bestrahlung . . . . .	209
9.2.3	Abhängigkeit der Wirkung von der örtlichen Energieverteilung (LET) . . . . .	210
9.2.4	Abhängigkeit der Wirkung von der zeitlichen Verteilung der Dosis . . . . .	211
9.2.5	Milieufaktoren und Wechselwirkungen mit chemischen Substanzen . . . . .	213
9.3	Tumorinduktion . . . . .	214
9.4	Gesamtrisikoschätzung für den Menschen . . . . .	216
9.4.1	Natürliche Rate von Entwicklungsstörungen . . . . .	216
9.4.2	Strahlenbedingtes Risiko . . . . .	217
9.5	Probleme des Strahlenschutzes . . . . .	217
9.5.1	Dosis-Grenzwerte . . . . .	217
9.5.2	Indikationen zum Abbruch der Schwangerschaft . . . . .	218
10.	Strahlenexposition durch natürliche und künstliche Strahlenquellen . . . . .	222
10.1	Natürliche Strahlenquellen . . . . .	222
10.1.1	Kosmische Strahlenexposition . . . . .	223
10.1.2	Terrestrische Strahlenexposition . . . . .	223
10.1.3	Exposition durch Radon . . . . .	226
10.1.4	Mittlere natürliche Strahlenexposition . . . . .	228
10.2	Künstliche, zivilisatorisch bedingte Strahlenquellen . . . . .	230
10.2.1	Strahlenexposition durch nukleare Explosionen . . . . .	230
10.2.2	Nahrungsmittel, Wasser und Konsumgüter . . . . .	233
10.2.3	Technik, Forschung und Luftfahrt . . . . .	233
10.2.4	Energieproduktion . . . . .	234
10.2.5	Berufliche Beschäftigung mit ionisierenden Strahlen . . . . .	237
10.2.6	Medizinische Strahlenexposition . . . . .	238
10.3	Durchschnittliche jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung in der Schweiz . . . . .	249
11.	Strahlenschutz: Grundsätze und Grenzwerte . . . . .	253
11.1	Grundsätze . . . . .	253
11.2	Empfehlungen der ICRP für Grenzwerte . . . . .	254
11.3	Empfehlungen der Schweizerischen Strahlenschutzverordnung . . . . .	258
11.4	Grenzwerte für Radionuklide . . . . .	259

12.	Praktische Probleme des Strahlenschutzes . . . . .	261
12.1	Strahlenschutz vor nicht kontrollierbaren Quellen . . . . .	261
12.2	Strahlenschutz vor kontrollierbaren Quellen . . . . .	262
12.2.1	Strahlenschutz beruflich exponierter Personen . . . . .	262
12.2.2	Strahlenschutz des Patienten . . . . .	265
12.2.3	Strahlenschutz bei der Anwendung von Radiopharmaka und Radiodiagnostika . . . . .	271
	Anhang . . . . .	272
	Sachregister . . . . .	274