

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	V
<b>Einleitung</b>	XI
<b>1. Physikalische Grundlagen</b>	1
1.1. Die Natur ionisierender Strahlen	1
1.1.1. Photonenstrahlung	1
1.1.2. Korpuskularstrahlen	2
1.2. Natürliche und künstliche Radioaktivität	3
1.2.1. Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls	5
1.2.2. Die Einheit der Aktivität	6
1.2.3. Radioaktive Familien oder Reihen	6
1.3. Wechselwirkung von Strahlung und Materie	7
1.3.1. Elektronenanregung und Ionisation	7
1.3.1.1. Reichweite direkt ionisierender Teilchen	8
1.3.1.2. Streuung und Absorption von Röntgen- und $\gamma$ -Strahlen	9
1.3.1.3. Absorption schneller Neutronen	12
1.3.2. Kernprozesse (außer radioaktivem Zerfall)	12
1.3.2.1. Kernumwandlung und induzierte Radioaktivität	12
1.3.2.2. Kernspaltung, Kernzertrümmerung	13
1.4. Strahlenquellen	14
1.4.1. Natürliche Strahlenquellen	14
1.4.1.1. Die kosmische Strahlung	14
1.4.1.2. Die terrestrische Strahlung	15
1.4.2. Die medizinische Verwendung von Radionukliden	15
1.4.3. Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen.	15
1.4.3.1. Die Röntgenröhre	15
1.4.3.2. Geräte zur Erzeugung hochenergetischer Strahlen.	17
1.5. Die Strahlendosis und verwandte Begriffe	18
1.5.1. Die Energiedosis und die Einheit „Rad“	18
1.5.2. Die Ionendosis und die Einheit „Röntgen“ (R)	18
1.5.3. Beziehung zwischen Ionendosis und Energiedosis	19
1.5.4. Die Dosisleistung	19
1.5.5. Mittlere Dosis und Integraldosis	19
1.5.6. Die makroskopisch-räumlichen Dosisverhältnisse bei Photonenbestrahlung	20
1.5.7. Die Dosis in der Umgebung einer $\gamma$ -Strahlenquelle	20
1.5.8. Die Dosis in der Umgebung einer Quelle von Teilchenstrahlung	21
1.5.9. Berechnung der Dosis bei Inkorporation radioaktiver Nuklide	21
1.5.9.1. Die Dosis bei Inkorporation von $\alpha$ - und $\beta$ -Strahlern	21
1.5.9.2. Die Dosis bei Inkorporation $\gamma$ -strahlender Nuklide	22
1.5.9.3. Die Dosis bei inhomogener Verteilung von Radionukliden im Körper	22

## Inhaltsverzeichnis

1.5.10.	Das mikrogeometrische Muster der Energiedeposition . . . . .	23
1.5.10.1.	Ionisationsdichte und linearer Energietransfer (LET) . . . . .	23
1.5.10.2.	Die „spezifische Energie“; Mikrodosimetrie . . . . .	27
1.6.	Messungen der Radioaktivität und der Dosis . . . . .	29
1.6.1.	Geräte zur Messung der Radioaktivität . . . . .	29
1.6.2.	Dosimetrie und Dosimeter . . . . .	30
1.6.2.1.	Die Ionisationsmethode . . . . .	30
1.6.2.2.	Photographische und chemische Dosimetrie . . . . .	30
1.6.2.3.	Thermolumineszenzdosimetrie . . . . .	31
1.6.2.4.	Halbleiter-Dosimeter . . . . .	31
1.6.2.5.	„Biologische Dosimetrie“ . . . . .	31
1.7.	Zur Methode der Autoradiographie . . . . .	31
<b>2.</b>	<b>Dosiswirkungsbeziehungen . . . . .</b>	<b>33</b>
2.1.	Verschiedene Formen von Dosiswirkungsbeziehungen . . . . .	34
2.2.	Grundlagen der Treffertheorie . . . . .	36
2.2.1.	Eintreffermechanismen . . . . .	36
2.2.2.	Mehrtreffer- und Mehrbereichsmechanismen . . . . .	38
2.3.	Allgemeine Stochastik der Strahlenwirkung . . . . .	39
2.3.1.	Generelle Beschreibung von Dosiswirkungskurven . . . . .	40
2.3.2.	Einfachste Deutung der Dosiswirkungsbeziehungen . . . . .	41
2.3.3.	Gebräuchliche Kenngrößen von Dosiswirkungsbeziehungen . . . . .	42
2.3.4.	Weitere empfohlene Kenngrößen der Dosiswirkungskurven . . . . .	43
2.4.	Darstellung der Dosiswirkungsbeziehung im Bereich relativ kleiner Wirkungen bzw. kleiner Dosen . . . . .	45
<b>3.</b>	<b>Die relative biologische Wirksamkeit (RBW) von Strahlen verschiedener Art und Energie . . . . .</b>	<b>47</b>
3.1.	Allgemeines . . . . .	47
3.2.	Die Abhängigkeit der RBW von der Strahlendosis . . . . .	48
3.3.	RBW und spezifische Energie . . . . .	50
3.4.	RBW in der radiologischen Praxis . . . . .	51
3.5.	RBW und Qualitätsfaktor im Strahlenschutz . . . . .	51
<b>4.</b>	<b>Die Kinetik der Strahlenwirkung; Restitutionsvorgänge und Zeitfaktor . . . . .</b>	<b>53</b>
4.1.	Die Dynamik der Strahlenwirkung . . . . .	53
4.2.	Der Zeitfaktor der Strahlenwirkung . . . . .	56
4.2.1.	Erläuterung einiger Begriffe . . . . .	56
4.2.2.	Biophysikalische Voraussetzungen eines Zeitfaktors . . . . .	57
4.3.	Reversible und irreversible Komponenten der Strahlenwirkung . . . . .	59
4.4.	Die gegenseitige Abhängigkeit von Zeitfaktor und RBW . . . . .	59
4.5.	Zusammenfassung und praktische Schlußfolgerungen . . . . .	60
<b>5.</b>	<b>Die physikalisch-chemischen Primärwirkungen ionisierender Strahlen . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1.	Allgemeines . . . . .	63
5.2.	Strahlenchemie des Wassers . . . . .	66
5.3.	Die Ausbeute strahlenchemischer Reaktionen . . . . .	67
5.4.	Die räumliche Verteilung strahleninduzierter Radikale (in Abhängigkeit vom LET) . . . . .	67
5.5.	Die Wechselwirkung von Radikalen und ihre zeitliche Verteilung . . . . .	69

5.6.	Indirekte Wirkung auf in Wasser gelöste Stoffe . . . . .	70
5.7.	Direkte Wirkung auf organische Moleküle . . . . .	71
5.8.	Unterscheidung zwischen direkter und indirekter Strahlenwirkung . . . . .	72
5.9.	Effekt-modifizierende Substanzen: Strahlenschutzsubstanzen, Sensibilisatoren . . . . .	73
5.10.	Die Messung freier Radikale . . . . .	73
<b>6.</b>	<b>Strahlenchemie organischer Zellbestandteile . . . . .</b>	<b>75</b>
6.1.	Aminosäuren, Peptide und Proteine . . . . .	75
6.1.1.	Chemisch nachweisbare Änderungen der Primärstruktur . . . . .	75
6.1.2.	Störungen der sekundären und höheren Strukturen organischer Moleküle .	77
6.1.3.	Enzymaktivierung . . . . .	77
6.1.4.	Schlußfolgerungen . . . . .	79
6.2.	Nukleinsäuren und Nukleotide . . . . .	80
6.2.1.	Molekülbrüche . . . . .	80
6.2.2.	Veränderung der Purin- und Pyrimidinbasen . . . . .	81
6.2.3.	Nachweis freier Radikale bei Purin- und Pyrimidinbasen und ihren Verbindungen . . . . .	82
6.2.4.	Störungen der Konfiguration der DNA-Moleküle . . . . .	83
6.2.5.	Zusammenhang zwischen chemischen Veränderungen der DNA und biologischen Strahleneffekten . . . . .	83
6.2.6.	Nukleotide des Stoffwechsels . . . . .	84
6.3.	Fettsäuren, Fette und Lipoide . . . . .	84
6.3.1.	Fette und Fettsäuren . . . . .	84
6.3.2.	Lipoide . . . . .	85
6.4.	Kohlenhydrate und ihre Verbindungen . . . . .	85
<b>7.</b>	<b>Strahleninduzierte Synthesestörungen und die Reparation molekularer Strahlenschäden . . . . .</b>	<b>87</b>
7.1.	Störungen der DNA-Synthese . . . . .	87
7.2.	Störungen der Protein-Synthese . . . . .	89
7.3.	Die Reparation von DNA-Schäden in der Zelle . . . . .	91
<b>8.</b>	<b>Strahlenwirkungen auf die Kinetik biochemischer Prozesse und den Betriebsstoffwechsel der Zelle . . . . .</b>	<b>95</b>
8.1.	Veränderungen der Enzymkinetik . . . . .	95
8.2.	Die Glykolyse . . . . .	96
8.3.	Die oxidative Phosphorylierung . . . . .	96
8.4.	Die Zellatmung . . . . .	97
<b>9.</b>	<b>Strahlenzytologie: Proliferationsstörungen und Zelltod . . . . .</b>	<b>99</b>
9.1.	Der Begriff der Strahlenempfindlichkeit . . . . .	100
9.2.	Proliferationsstörungen . . . . .	100
9.2.1.	Zur Kinetik der Zellproliferation . . . . .	100
9.2.1.1.	Der Zellzyklus . . . . .	100
9.2.1.2.	Wachstumscharakteristika von Zellpopulationen . . . . .	101
9.2.1.3.	Methoden der Erfassung der Zellkinetik . . . . .	102
9.2.2.	Strahleninduzierte Hemmung der Zellvermehrung . . . . .	103
9.2.3.1.	Beeinflussung der mitotischen Aktivität . . . . .	103
9.2.3.2.	Pathologische Mitoseformen . . . . .	105
9.3.	Zelltod und Zellaktivierung . . . . .	105
9.3.1.	Inaktivierung von Säugetierzellen in vitro . . . . .	107

## Inhaltsverzeichnis

9.3.1.1. Methodisches . . . . .	107
9.3.1.2. Dosiswirkungsbeziehung der Zellinaktivierung . . . . .	108
9.3.1.3. Abhängigkeit der Wirkung von der Strahlenqualität . . . . .	109
9.3.1.4. Intrazelluläre Erholungsvorgange . . . . .	110
9.3.1.5. Die Rolle der Erholung für den Zeitfaktor der zellulären Strahlenwirkung . . . . .	112
9.3.1.6. Der Sauerstoffeffekt . . . . .	114
9.3.1.7. Die chemische Beeinflussbarkeit der Strahlenempfindlichkeit . . . . .	116
9.3.1.8. Die Abhängigkeit der Strahlenempfindlichkeit vom Zellzyklus . . . . .	117
9.3.2. Die Zellinaktivierung bei Bestrahlung <i>in vivo</i> . . . . .	119
9.3.3. Die Interpretation der zellulären Dosiswirkungskurven . . . . .	121
<b>10. Zytophysiolgische Störungen . . . . .</b>	<b>125</b>
10.1. Störungen der Zellpermeabilität . . . . .	125
10.1.1. Elektrolytverschiebungen . . . . .	125
10.1.2. Bioelektrische und verwandte Phänomene . . . . .	126
10.3. Funktionsstörungen peripherer Nerven . . . . .	127
10.4. Motilitätsstörungen, insbesondere von Muskelzellen . . . . .	128
10.5. Strahlenwirkung auf Sinnesrezeptoren . . . . .	129
10.6. Durch Bestrahlung ausgelöste reflexartige Sofortreaktionen . . . . .	130
10.7. Mögliche Wirkungsmechanismen und Folgen zytophysiolgischer Störungen . . . . .	131
<b>11. Zytogenetische Strahlenwirkungen . . . . .</b>	<b>133</b>
11.1. Numerische Chromosomenaberrationen . . . . .	134
11.2. Strukturelle Chromosomenaberrationen . . . . .	135
11.3. Mögliche Wirkungsmechanismen . . . . .	137
11.4. Die Dosiswirkungsbeziehung der Chromosomenaberrationen . . . . .	138
11.5. Die Abhängigkeit von der zeitlichen Dosisverteilung . . . . .	138
11.6. Die Abhängigkeit von der Strahlenqualität . . . . .	139
11.7. Andere, den Effekt beeinflussende Faktoren . . . . .	139
11.8. Chromosomenaberrationen menschlicher Zellen . . . . .	140
11.8.1. Nach Bestrahlung von Blutproben <i>in vitro</i> . . . . .	140
11.8.2. Chromosomenaberrationen nach Strahlenexposition des Menschen . . . . .	140
11.9. Der Zeitverlauf strahleninduzierter Chromosomenaberrationen . . . . .	142
11.10. Die Folgen strahleninduzierter Chromosomenaberrationen im Organismus	143
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>147</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>153</b>