

# Inhalt

## Abschnitt I: Physikalische Grundlagen

<b>1 Strahlungsarten und Strahlungsfelder</b>	11
1.1 Die atomare Energieeinheit eV	12
1.2 Korpuskeln	13
1.2.1 Relativistische Massenzunahme von Korpuskeln	16
1.2.2 Der klassische Grenzfall*	20
1.3 Photonen	21
1.3.1 Das klassische Wellenbild	22
1.3.2 Elektromagnetische Wellenpakete (Photonen)	26
1.4 Dualismus Teilchen-Welle*	29
1.5 Beschreibung von Strahlungsfeldern*	33
1.5.1 Der stochastische Charakter von Strahlungsfeldern*	35
1.5.2 Nichtstochastische Strahlungsfeldgrößen*	37
1.5.3 Der Wirkungsquerschnitt*	39
<b>2 Atombau</b>	44
2.1 Historische Atommodelle*	44
2.2 Die Atomhülle	48
2.2.1 Aufbau der Atomhülle	48
2.2.2 Anregung und Ionisation von Atomhüllen	57
2.2.3 Hüllenstrahlung	58
2.2.3.1 Charakteristische Photonenstrahlung	60
2.2.3.2 Augerelektronen	62
2.2.3.3 Fluoreszenz- und Augerelektronenausbeuten	63
2.3 Der Atomkern	66
2.3.1 Atomkernmodelle	69
2.3.2 Bindungsenergie und Massendefekt von Atomkernen	73
2.3.3 Anregung von Atomkernen und Separation von Nukleonen	76
2.4 Wichtige Begriffe der Atom- und Kernphysik	78
<b>3 Radioaktivität</b>	82
3.1 Radioaktive Umwandlungsarten	82

3.1.1	Der Alphazerfall	88
3.1.2	Die $\beta$ -Umwandlungen	93
3.1.2.1	Die $\beta^-$ -Umwandlung	98
3.1.2.2	Die $\beta^+$ -Umwandlung	100
3.1.2.3	Der Elektroneneinfang (EC)	103
3.1.3	Die Gammaumwandlung	104
3.1.4	Die Innere Konversion (IC)	108
3.1.5	Spontane Kernspaltung, Neutronenquellen, Protonenzerfall	110
3.2	Das Zeitgesetz für den radioaktiven Zerfall	115
3.2.1	Aktivitätsdefinitionen	115
3.2.2	Formulierung des Zerfallsgesetzes	118
3.2.3	Aktivitätsanalyse und radioaktives Gleichgewicht*	125
3.3	Natürliche Radioaktivität	135
3.3.1	Die kosmogenen Radionuklide	135
3.3.2	Die primordialen Radionuklide	139
3.4	Künstliche Radioaktivität	146
<b>4</b>	<b>Wechselwirkung ionisierender Photonenstrahlung</b>	149
4.1	Der Photoeffekt	151
4.2	Der Comptoneffekt	155
4.2.1	Überblick über die Theorie des Comptoneffektes*	157
4.2.1.1	Berechnung der Energie des gestreuten Photons*	157
4.2.1.2	Winkelverteilungen der Comptonphotonen*	160
4.2.1.3	Energie- und Winkelverteilungen der Comptonelektronen*	165
4.3	Die Paarbildung durch Photonen im Coulombfeld	170
4.4	Die klassische Streuung	173
4.5	Kernphotoreaktionen	174
4.6	Der Schwächungskoeffizient für Photonenstrahlung	178
4.7	Schwächungskoeffizient bei Stoffgemischen und Verbindungen*	184
4.8	Der Energieumwandlungskoeffizient für Photonenstrahlung	184
4.9	Der Energieabsorptionskoeffizient für Photonenstrahlung	189
<b>5</b>	<b>Schwächung von Strahlenbündeln ungeladener Teilchen</b>	193
5.1	Exponentielle Schwächung	193
5.2	Schwächung schmaler heterogener Strahlenbündel ungeladener Teilchen*	200

5.3	Aufhärtung und Homogenität heterogener Photonenstrahlung*	201
5.4	Schwächung ausgedehnter, divergenter Strahlenbündel in dicken Absorbern*	206
<b>6</b>	<b>Wechselwirkung von Neutronenstrahlung mit Materie</b>	213
6.1	Elastische Neutronenstreuung	218
6.1.1	Labor- und Schwerpunktssystem*	218
6.1.2	Neutronenrestenergie*	219
6.1.3	Energieübertrag durch Neutronen	221
6.1.4	Vielfachstreuung von Neutronen	221
6.1.5	Moderation und Lethargie von Neutronen*	221
6.1.6	Neutronenwechselwirkungen mit menschlichem Gewebe	224
6.2	Inelastische Neutronenstreuung	225
6.3	Neutroneneinfangreaktionen	225
6.3.1	Einfang langsamer Neutronen	225
6.3.2	Einfang schneller Neutronen	229
6.4	Neutroneninduzierte Kernspaltung und Spallation	230
<b>7</b>	<b>Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie</b>	232
7.1	Das Bremsvermögen für geladene Teilchen	238
7.1.1	Das Stoßbremsvermögen	238
7.1.2	Das Strahlungsbremsvermögen	247
7.1.3	Richtungsverteilung der Bremsstrahlungsphotonen für Elektronenstrahlung	251
7.1.4	Verhältnis von Stoß- und Strahlungsbremsvermögen für Elektronen	252
7.2	Energiespektren von Elektronen in Materie	255
7.3	Das Streuvermögen für Elektronen	258
7.3.1	Transmission und Rückstreuung von Elektronen	261
7.4	Reichweiten geladener Teilchen	264
7.4.1	Reichweiten schwerer geladener Teilchen	264
7.4.2	Bahnlänge und Reichweiten monoenergetischer Elektronen	268
7.4.3	Reichweiten und Transmission von $\beta$ -Strahlung	272
7.5	Wechselwirkungen negativer Pi-Mesonen	275
<b>8</b>	<b>Ionisierung und Energieübertragung</b>	277
8.1	Ionisierungsvermögen und Ionisierungsdichte	277
8.2	Der Lineare Energietransfer (LET)	282

8.3 Stochastische Messgrößen für die Mikrodosimetrie*	284
<b>9 Strahlenschutzbegriffe, Dosisgrößen und Dosisleistungskonstanten</b>	288
9.1 Allgemeine Strahlenschutzbegriffe	288
9.2 Physikalische Dosisgrößen	291
9.3 Die Dosisgrößen im Strahlenschutz	293
9.3.1 Die Äquivalentdosis	295
9.3.2 Die Ortsdosisgrößen	297
9.3.3 Die Personendosisgrößen	300
9.3.4 Die Organdosen	301
9.3.5 Die Effektive Dosis	304
9.4 Die bisherigen Dosisgrößen im Strahlenschutz*	307
9.4.1 Die bisherigen Dosismessgrößen*	307
9.4.2 Die bisherige Größe Äquivalentdosis*	308
9.4.3 Die bisherige Größe Effektive Äquivalentdosis*	310
9.5 Dosisleistungskonstanten	311
9.5.1 Kermaleistungskonstanten für Gammastrahler	311
9.5.2 Photonen-Dosisleistungskonstanten im Strahlenschutz	318
9.5.2.1 Dosisleistungskonstanten von Gammastrahlern	318
9.5.2.2 Dosisleistungskonstanten für Bremsstrahlungen	320
9.5.3 Dosisleistungskonstanten für Röntgenstrahler	322
9.5.4 Dosisleistungskonstanten für reine Betastrahler	323

## **Abschnitt II: Biologische und epidemiologische Grundlagen**

<b>10 Grundlagen zur Strahlenbiologie der Zelle</b>	325
10.1 Aufbau menschlicher Zellen	326
10.2 Die strahlenbiologische Wirkungskette in Zellen	339
10.3 DNS-Schäden und ihre Reparatur	345
10.4 Dosiseffekt-Beziehungen	354
10.4.1 Beschreibung von Dosiswirkungskurven*	357
10.4.2 Mathematische Beschreibung von Überlebenskurven*	358
10.5 Parameter der Strahlenwirkung	366
10.5.1 Der Sauerstoffeffekt	366
10.5.2 Chemische Modifikatoren der Strahlenwirkung	368

10.5.3 Abhängigkeit der Strahlenwirkungen von der Zellzyklusphase	371
10.5.4 Abhängigkeit der Strahlenwirkung vom zeitlichen Bestrahlungsmuster	373
10.5.5 Einflusse des morphologischen Zelldifferenzierungsgrades	377
10.5.6 Volumeneffekte der Strahlenwirkung	378
10.5.7 Temperaturabhängigkeit der Strahlenwirkung	379
10.6 Die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW)	382
10.6.1 Die Dosisabhängigkeit der RBW*	383
10.6.2 Abhängigkeit der RBW vom Linearen Energietransfer LET*	387
10.6.3 RBW und Wichtungsfaktoren Q und $w_T$ im Strahlenschutz*	388
<b>11 Strahlenwirkung und Strahlenrisiko</b>	391
11.1 Deterministische Strahlenwirkungen	392
11.2 Stochastische Strahlenwirkungen	404
11.2.1 Dosis-Wahrscheinlichkeitskurven für stochastische Schäden	405
11.2.2 Abschätzungen des stochastischen Stahlenrisikos	407
11.2.2.1 Abschätzung des Krebsrisikos	408
11.2.2.2 Hereditäres Schadensrisiko	414
11.3 Risiken pränataler Strahlenexposition	415
11.4 Altersabhängigkeit des stochastischen Strahlenrisikos	417
<b>12 Strahlenschutzphantome</b>	421
<b>13 Strahlenexposition des Menschen</b>	429
13.1 Natürliche Strahlenexposition	430
13.1.1 Externe terrestrische Strahlenexposition	430
13.1.2 Externe kosmische Strahlenexposition	436
13.1.3 Interne Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide	441
13.1.3.1 Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	442
13.1.3.2 Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	444
13.1.4 Zusammenfassung zur natürlichen Strahlenexposition	451
13.2 Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition	453
13.2.1 Medizinische Strahlenexposition	454
13.2.2 Kernwaffentests	457
13.2.3 Kernenergie	461
13.2.4 Energie- und Wärmeerzeugung durch fossile Brennstoffe	463

13.2.5 Weitere zivilisatorische Strahlungsquellen	464
13.2.6 Baumaterialien*	465
13.2.7 Berufliche Strahlenexposition	467
13.3 Zusammenfassung natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition	469

## **Abschnitt III: Praktischer Strahlenschutz**

<b>14 Strahlenschutzrecht</b>	472
14.1 Das System des Strahlenschutzrechtes	472
14.2 Strahlenschutzverantwortliche und Beauftragte, Anwender	475
14.3 Fachkunde im Strahlenschutz	478
14.4 Strahlenschutzbereiche	479
14.5 Grenzwerte	481
<b>15 Praktischer Strahlenschutz</b>	488
15.1 Allgemeine Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition	488
15.2 Berechnung von Abschirmungen und Schutzwänden*	492
15.2.1 Abschirmung direkt ionisierender Strahlung*	492
15.2.2 Abschirmungen von Neutronenstrahlung*	494
15.2.3 Berechnung von Gamma-Abschirmungen und Schutzwänden*	495
15.2.4 Berechnung von Abschirmungen für Röntgenstrahlung*	500
15.2.5 Berechnung von Abschirmungen in der Nuklearmedizin*	506
<b>16 Strahlenexpositionen in der medizinischen Radiologie</b>	511
16.1 Strahlenexposition in der Projektionsradiografie	512
16.1.1 Körperdosisabschätzungen für Patienten	512
16.1.2 Expositionen des Personals in der Projektionsradiografie	520
16.1.2.1 Exposition im Nutzstrahl von Projektionsradiografieanlagen	520
16.1.2.2 Strahlenexposition des Personals im Streustrahlungsfeld von Anlagen zur Projektionsradiografie	523
16.2 Strahlenexpositionen in der Computertomografie	525
16.2.1 Expositionen von Patienten bei CT-Untersuchungen	525
16.2.1.1 CTDI und Dosislängenprodukt bei CT-Untersuchungen*	526
16.2.1.2 Abschätzung der Patientendosis bei CT-Untersuchungen	530
16.2.2 Strahlenexposition des Personals bei der Computertomografie	541
16.3 Strahlenexpositionen in der Nuklearmedizin	543
16.3.1 Strahlenexpositionen von Patienten	543

16.3.2 Strahlenexpositionen des nuklearmedizinischen Personals	545
<b>17 Anhang</b>	552
17.1 Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI, abgeleitete Einheiten	552
17.2 Physikalische Fundamentalkonstanten	556
17.3 Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	557
17.4 Massenschwächungskoeffizienten $\mu/\rho$ für monoenergetische Photonen	558
17.5 Zusammensetzung der Massenphotonenwechselwirkungskoeffizienten für Stickstoff und Blei	560
17.6 Massenenergieabsorptionskoeffizienten $\mu_{en}/\rho$ für monoenergetische Photonen	563
17.7 Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	566
17.8 Massenstrahlungsbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	569
17.9 Bremsstrahlungsausbeuten für monoenergetische Elektronen	570
17.10 Reichweiten von Elektronen, Protonen und Alphateilchen in Luft und Wasser	571
17.11 Dichten wichtiger dosimetrischer Substanzen	571
17.12 Gewebe-Luft-Verhältnisse für diagnostische Röntgenstrahlung	572
17.13 Patientenschwächungsfaktoren und Konversionsfaktoren für diagnostische Röntgenstrahlung	574
17.14 Ortsdosisleistungen im Streustrahlungsfeld eines Computertomografen	575
17.15 Daten zum ICRP Referenzmenschen	576
17.16 Elemente des Periodensystems	579
<b>18 Literatur</b>	582
18.1 Lehrbücher und Monografien	582
18.2 Wissenschaftliche Einzelarbeiten	585
18.3 Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	593
18.4 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	598
18.5 Deutsche Industrie-Normen zu Dosimetrie und Strahlenschutz	600
18.6 Wichtige Internetadressen	603
<b>Sachregister</b>	605