

# Inhalt

## Abschnitt I: Physikalische Grundlagen

<b>1 Strahlungsarten und Strahlungsfelder</b>	17
1.1 Die atomare Energieeinheit eV	18
1.2 Korpuskeln	19
1.2.1 Relativistische Massenzunahme von Korpuskeln	22
1.2.2 Der klassische Grenzfall*	26
1.3 Photonen	27
1.3.1 Das klassische Wellenbild	28
1.3.2 Elektromagnetische Wellenpakete (Photonen)	32
1.4 Dualismus Teilchen-Welle*	35
1.5 Beschreibung von Strahlungsfeldern*	39
1.5.1 Der stochastische Charakter von Strahlungsfeldern*	41
1.5.2 Nichtstochastische Strahlungsfeldgrößen*	43
1.5.3 Der Wirkungsquerschnitt*	45
Aufgaben	50
<b>2 Atombau</b>	51
2.1 Historische Atommodelle*	51
2.2 Die Atomhülle	55
2.2.1 Aufbau der Atomhülle	55
2.2.2 Anregung und Ionisation von Atomhüllen	64
2.2.3 Hüllenstrahlung	65
2.2.3.1 Charakteristische Photonenstrahlung	67
2.2.3.2 Augerelektronen	69
2.2.3.3 Fluoreszenz- und Augerelektronenausbeuten	70
2.3 Der Atomkern	73
2.3.1 Atomkernmodelle	76
2.3.2 Bindungsenergie und Massendefekt von Atomkernen	80
2.3.3 Anregung von Atomkernen und Separation von Nukleonen	83

2.4 Wichtige Begriffe der Atom- und Kernphysik	85
Aufgaben	89
<b>3 Radioaktivität</b>	90
3.1 Radioaktive Umwandlungsarten	90
3.1.1 Der Alphazerfall	96
3.1.2 Die $\beta$ -Umwandlungen	101
3.1.2.1 Die $\beta^-$ -Umwandlung	106
3.1.2.2 Die $\beta^+$ -Umwandlung	108
3.1.2.3 Der Elektroneneinfang (EC)	111
3.1.3 Die Gammaumwandlung	112
3.1.4 Die Innere Konversion (IC)	116
3.1.5 Spontane Kernspaltung, Neutronenquellen, Protonenzerfall	118
3.2 Das Zeitgesetz für den radioaktiven Zerfall	123
3.2.1 Aktivitätsdefinitionen	123
3.2.2 Formulierung des Zerfallsgesetzes	126
3.2.3 Aktivitätsanalyse und radioaktives Gleichgewicht*	133
3.3 Natürliche Radioaktivität	143
3.3.1 Die kosmogenen Radionuklide	143
3.3.2 Die primordialen Radionuklide	147
3.4 Künstliche Radioaktivität	154
Aufgaben	157
<b>4 Wechselwirkung ionisierender Photonenstrahlung</b>	158
4.1 Der Photoeffekt	160
4.2 Der Comptoneffekt	165
4.2.1 Überblick über die Theorie des Comptoneffekts*	166
4.2.1.1 Berechnung der Energie des gestreuten Photons*	166
4.2.1.2 Winkelverteilungen der Comptonphotonen*	169
4.2.1.3 Energie- und Winkelverteilungen der Comptonelektronen*	176
4.3 Die Paarbildung durch Photonen im Coulombfeld	182
4.4 Die klassische Streuung	185

4.5	Kernphotoreaktionen	186
4.6	Der Schwächungskoeffizient für Photonenstrahlung	190
4.7	Schwächungskoeffizient bei Stoffgemischen und Verbindungen*	196
4.8	Der Energieumwandlungskoeffizient für Photonenstrahlung	196
4.9	Der Energieabsorptionskoeffizient für Photonenstrahlung	202
	Aufgaben	206
<b>5</b>	<b>Schwächung von Strahlenbündeln ungeladener Teilchen</b>	207
5.1	Exponentielle Schwächung	207
5.2	Schwächung schmaler heterogener Strahlenbündel ungeladener Teilchen*	214
5.3	Aufhärtung und Homogenität heterogener Photonenstrahlung*	215
5.4	Schwächung ausgedehnter, divergenter Strahlenbündel in dicken Absorbern*	220
	Aufgaben	227
<b>6</b>	<b>Wechselwirkung von Neutronenstrahlung mit Materie</b>	228
6.1	Elastische Neutronenstreuung	233
6.1.1	Labor- und Schwerpunktssystem*	233
6.1.2	Neutronenrestenergie*	234
6.1.3	Energieübertrag durch Neutronen	236
6.1.4	Vielfachstreuung von Neutronen	236
6.1.5	Moderation und Lethargie von Neutronen*	236
6.1.6	Neutronenwechselwirkungen mit menschlichem Gewebe	239
6.2	Inelastische Neutronenstreuung	240
6.3	Neutroneneinfangreaktionen	240
6.3.1	Einfang langsamer Neutronen	240
6.3.2	Einfang schneller Neutronen	244
6.4	Neutroneninduzierte Kernspaltung und Spallation	245
	Aufgaben	247
<b>7</b>	<b>Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie</b>	248
7.1	Das Bremsvermögen für geladene Teilchen	254
7.1.1	Das Stoßbremsvermögen	254

7.1.2 Das Strahlungsbremsvermögen	263
7.1.3 Richtungsverteilung der Bremsstrahlungsphotonen für Elektronenstrahlung	267
7.1.4 Verhältnis von Stoß- und Strahlungsbremsvermögen für Elektronen	268
7.2 Energiespektren von Elektronen in Materie	271
7.3 Das Streuvermögen für Elektronen	274
7.3.1 Transmission und Rückstreuung von Elektronen	277
7.4 Reichweiten geladener Teilchen	280
7.4.1 Reichweiten schwerer geladener Teilchen	280
7.4.2 Bahnlänge und Reichweiten monoenergetischer Elektronen	284
7.4.3 Reichweiten und Transmission von $\beta$ -Strahlung	288
7.5 Wechselwirkungen negativer Pi-Mesonen	291
Aufgaben	292
<b>8 Ionisierung und Energieübertragung</b>	293
8.1 Ionisierungsvermögen und Ionisierungsdichte	293
8.2 Der Lineare Energietransfer (LET)	298
8.3 Stochastische Messgrößen für die Mikrodosimetrie*	300
Aufgaben	304
<b>9 Strahlenschutzbegriffe und Dosisgrößen</b>	305
9.1 Allgemeine Strahlenschutzbegriffe	305
9.2 Physikalische Dosisgrößen	308
9.3 Die Dosisgrößen im Strahlenschutz	310
9.3.1 Die Äquivalentdosis	313
9.3.2 Die Ortsdosisgrößen	315
9.3.3 Die Personendosisgrößen	318
9.3.4 Die Organdosen	319
9.3.5 Die Effektive Dosis	322
9.3.6 Probleme mit den aktuellen Strahlenschutzdosisgrößen	325
9.4 Die bisherigen Dosisgrößen im Strahlenschutz*	326
9.4.1 Die bisherigen Dosismessgrößen*	326

9.4.2 Die bisherige Größe Äquivalentdosis*	327
9.4.3 Die bisherige Größe Effektive Äquivalentdosis*	329
Aufgaben	330
<b>10 Dosisleistungskonstanten, Hautdosisfaktoren und Inkorporationsfaktoren</b>	<b>331</b>
10.1 Dosisleistungskonstanten für Photonenstrahlungen	331
10.1.1 Kermaleistungskonstanten für Gammastrahler	331
10.1.2 Strahlenschutz-Dosisleistungskonstanten für Gammastrahler	338
10.1.3 Dosisleistungskonstanten für Bremsstrahlungen	340
10.1.4 Dosisleistungskonstanten für Röntgenstrahler	342
10.1.5 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Photonen	343
10.2 Dosisleistungskonstanten für reine Betastrahler	346
10.2.1 Dosisleistungskonstanten für Betapunktstrahler	346
10.2.2 Dosisleistungen für Beta-Linien- und Beta-Flächenstrahler	350
10.2.3 Dosisleistungen in betakontaminierten Luftvolumina	352
10.2.4 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Betastrahler*	354
10.3 Dosisfaktoren bei Hautkontaminationen	357
10.4 Dosisfaktoren bei Radionuklidinkorporation	363
Aufgaben	365

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

<b>11 Grundlagen zur Strahlenbiologie der Zelle</b>	<b>366</b>
11.1 Aufbau menschlicher Zellen	367
11.2 Die strahlenbiologische Wirkungskette in Zellen	381
11.3 DNS-Schäden und ihre Reparatur	387
11.4 Dosiseffekt-Beziehungen	397
11.4.1 Beschreibung von Dosiswirkungskurven*	399
11.4.2 Mathematische Beschreibung von Überlebenskurven*	401
11.5 Parameter der Strahlenwirkung	408
11.5.1 Der Sauerstoffeffekt	409

11.5.2 Chemische Modifikatoren der Strahlenwirkung	411
11.5.3 Abhängigkeit der Strahlenwirkungen von der Zellzyklusphase	414
11.5.4 Abhängigkeit der Strahlenwirkung vom zeitlichen Bestrahlungsmuster	416
11.5.5 Einflusse des morphologischen Zelldifferenzierungsgrades	420
11.5.6 Volumeneffekte der Strahlenwirkung	421
11.5.7 Temperaturabhängigkeit der Strahlenwirkung	422
11.6 Die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW)	425
11.6.1 Die Dosisabhängigkeit der RBW*	426
11.6.2 Abhängigkeit der RBW vom Linearen Energietransfer LET*	430
11.6.3 RBW und Wichtungsfaktoren Q und $w_T$ im Strahlenschutz*	431
Aufgaben	434
<b>12 Strahlenwirkung und Strahlenrisiko</b>	435
12.1 Deterministische Strahlenwirkungen	436
12.2 Stochastische Strahlenwirkungen	449
12.2.1 Dosis-Wahrscheinlichkeitskurven für stochastische Schäden	450
12.2.2 Abschätzungen des stochastischen Strahlenrisikos	452
12.2.2.1 Abschätzung des Krebsrisikos	453
12.2.2.2 Hereditäres Schadensrisiko	459
12.3 Risiken pränataler Strahlenexposition	460
12.4 Altersabhängigkeit des stochastischen Strahlenrisikos	462
Aufgaben	466
<b>13 Strahlenschutzphantome</b>	467
<b>14 Strahlenexposition des Menschen mit ionisierender Strahlung</b>	475
14.1 Natürliche Strahlenexposition	476
14.1.1 Externe terrestrische Strahlenexposition	476
14.1.2 Externe kosmische Strahlenexposition	482
14.1.3 Interne Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide	488

14.1.3.1 Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	489
14.1.3.2 Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	490
14.2 Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition	501
14.2.1 Medizinische Strahlenexpositionen	502
14.2.2 Kernwaffentests	511
14.2.3 Kernenergie	514
14.2.4 Energie- und Wärmeerzeugung durch fossile Brennstoffe	516
14.2.5 Weitere zivilisatorische Strahlungsquellen	517
14.2.6 Baumaterialien*	518
14.2.7 Berufliche Strahlenexposition	521
14.3 Zusammenfassung natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition	522
Aufgaben	525

## Abschnitt III: Praktischer Strahlenschutz

<b>15 Strahlenschutzrecht</b>	526
15.1 Das System des Strahlenschutzrechts	526
15.2 Strahlenschutzverantwortliche und Beauftragte, Anwender	529
15.3 Fachkunde im Strahlenschutz	532
15.4 Strahlenschutzbereiche	533
15.5 Grenzwerte	535
Aufgaben	542

<b>16 Praktischer Strahlenschutz</b>	543
16.1 Allgemeine Regeln zur Verringerung der Strahlenexposition	543
16.2 Abschirmung direkt ionisierender Strahlungen	547
16.3 Abschirmungen von Neutronenstrahlung	550
16.4 Auslegung von Gamma-Abschirmungen und Schutzwänden	550
16.5 Abschirmungen für Röntgenstrahlung	555
16.5.1 Bleigleichwerte von Strahlenschutzschürzen im Röntgen	561
16.5.2 Umgang mit Bleischürzen in der radiologischen Praxis	566
16.6 Abschirmungen in der Nuklearmedizin	569

Aufgaben	573
<b>17 Strahlenexpositionen in der medizinischen Radiologie</b>	574
17.1 Strahlenexpositionen in der Projektionsradiografie	575
17.1.1 Körperdosisabschätzungen für Patienten	575
17.1.2 Expositionen des Personals in der Projektionsradiografie	583
17.1.2.1 Exposition im Nutzstrahl von Projektionsradiografieanlagen	583
17.1.2.2 Strahlenexposition des Personals im Streustrahlungsfeld von Anlagen zur Projektionsradiografie	586
17.2 Strahlenexpositionen in der Computertomografie	589
17.2.1 Expositionen von Patienten bei CT-Untersuchungen	589
17.2.1.1 CTDI und Dosislängenprodukt bei CT-Untersuchungen*	590
17.2.1.2 Abschätzung der Patientendosis bei CT-Untersuchungen	594
17.2.2 Strahlenexposition des Personals bei der Computertomografie	605
17.3 Strahlenexpositionen in der Nuklearmedizin	607
17.3.1 Strahlenexpositionen von Patienten	607
17.3.2 Strahlenexpositionen des nuklearmedizinischen Personals	610
Aufgaben	616
<b>18 Anhang</b>	618
18.1 Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI. abgeleitete Einheiten	618
18.2 Physikalische Fundamentalkonstanten	622
18.3 Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	623
18.4 Massenschwächungskoeffizienten $\mu/\rho$ für monoenergetische Photonen	624
18.5 Zusammensetzung der Massenphotonenwechselwirkungskoeffizienten für Stickstoff und Blei	627
18.6 Massenenergieabsorptionskoeffizienten $\mu_{\text{en}}/\rho$ für monoenergetische Photonen	630
18.7 Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	633
18.8 Massenstrahlungsbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	636
18.9 Bremsstrahlungsausbeuten für monoenergetische Elektronen	637
18.10 Massenstoßbremsvermögen und Massenreichweiten für Alphateilchen, Protonen und Reichweitenvergleich	638
18.11 Dichten wichtiger dosimetrischer Substanzen	642

18.12 Gewebe-Luft-Verhältnisse für diagnostische Röntgenstrahlung	643
18.13 Patientenschwächungsfaktoren und Konversionsfaktoren für diagnostische Röntgenstrahlung	645
18.14 Ortsdosisleistungen im Streustrahlungsfeld eines Computertomografen	646
18.15 Daten zum ICRP Referenzmenschen	647
18.16 Elemente des Periodensystems	650
18.17 Bindungsenergien von Valenzelektronen	653
18.18 Dosisleistungsfaktoren bei Hautkontamination mit Radionukliden	654
18.19 Dosisfaktoren bei Inkorporation von Radionukliden	656
<b>19 Aufgabenlösungen</b>	659
<b>20 Literatur</b>	678
20.1 Lehrbücher und Monografien	678
20.2 Wissenschaftliche Einzelarbeiten	681
20.3 Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	690
20.4 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	696
20.5 Deutsche Industrie-Normen zu Dosimetrie und Strahlenschutz	698
20.6 Wichtige Internetadressen	702
<b>Sachregister</b>	704