

# Inhaltsverzeichnis

## Abschnitt I: Physikalische Grundlagen

<b>1</b>	<b>Strahlungsarten und Strahlungsfelder</b>	<b>15</b>
1.1	Die atomare Energieeinheit Elektronvolt (eV)	16
1.2	Begriffe und einfache Rechenregeln der Relativitätstheorie	17
1.3	Korpuskeln	24
1.4	Photonen	26
1.4.1	Das klassische Wellenbild	27
1.4.2	Elektromagnetische Wellenpakete (Photonen)	31
1.5	Dualismus Teilchen-Welle*	34
1.6	Beschreibung von Strahlungsfeldern*	38
1.6.1	Der stochastische Charakter von Strahlungsfeldern*	40
1.6.2	Nichtstochastische Strahlungsfeldgrößen*	42
1.6.3	Der Wirkungsquerschnitt*	44
	Aufgaben	49
	Aufgabenlösungen	51
<b>2</b>	<b>Atomaufbau</b>	<b>53</b>
2.1	Historische Atommodelle*	53
2.2	Die Atomhülle	57
2.2.1	Aufbau der Atomhülle	57
2.2.2	Anregung und Ionisation von Atomhüllen	66
2.2.3	Hüllenstrahlungen	67
2.2.3.1	Charakteristische Photonenstrahlung	69
2.2.3.2	Augerelektronen	71
2.2.3.3	Fluoreszenz- und Augerelektronenausbeuten	72
2.3	Der Atomkern	75
2.3.1	Atomkernmodelle	78
2.3.2	Bindungsenergie und Massendefekt von Atomkernen	82
2.3.3	Anregung von Atomkernen und Separation von Nukleonen	85

2.4	Wichtige Begriffe der Atom- und Kernphysik	88
	Aufgaben	91
	Aufgabenlösungen	93
<b>3</b>	<b>Die radioaktiven Umwandlungen</b>	<b>95</b>
3.1	Der Alphazerfall	101
3.2	Die $\beta$ -Umwandlungen	106
	3.2.1 Die $\beta^-$ -Umwandlung	112
	3.2.2 Die $\beta^+$ -Umwandlung	114
3.3	Der Elektroneinfang (EC)	117
3.4	Die Gammaemission	118
3.5	Die Innere Konversion (IC)	122
3.6	Spontane Kernspaltung	125
3.7	Protonenemission, Neutronenemission, Cluster-Emission*	126
3.8	Betaverzögerte Prozesse*	128
	Aufgaben	131
	Aufgabenlösungen	132
<b>4</b>	<b>Das Zerfallsgesetz</b>	<b>135</b>
4.1	Aktivitätsdefinitionen	135
4.2	Formulierung des Zerfallsgesetzes	138
4.3	Aktivitätsanalyse und radioaktives Gleichgewicht*	146
4.4	Experimentelle Bestimmung von Halbwertszeiten	154
4.5	Aktivierungsanalyse, Fluoreszenzanalyse*	155
	Aufgaben	157
	Aufgabenlösungen	158
<b>5</b>	<b>Natürliche und künstliche Radioaktivität</b>	<b>159</b>
5.1	Natürliche Radioaktivität	159
	5.1.1 Die primordialen Radionuklide	159
	5.1.2 Die kosmogenen Radionuklide	166
5.2	Künstliche Radioaktivität	170

Aufgaben	176
Aufgabenlösungen	177
<b>Abschnitt II: Physikalische Wechselwirkungen</b>	
<b>6 Größen zu den physikalischen Strahlungswirkungen</b>	179
6.1 Ionisierungsvermögen und Ionisierungsdichte	180
6.2 Der Lineare Energietransfer (LET)	185
6.3 Stochastische Messgrößen für die Mikrodosimetrie*	180
Aufgaben	192
Aufgabenlösungen	193
<b>7 Wechselwirkungen ionisierender Photonenstrahlung</b>	195
7.1 Der Photoeffekt	196
7.2 Der Comptoneffekt	202
7.2.1 Überblick über die Theorie des Comptoneffekts*	203
7.2.1.1 Berechnung der Energie des gestreuten Photons*	203
7.2.1.2 Winkelverteilungen der Comptonphotonen*	207
7.2.1.3 Energie- und Winkelverteilungen der Comptonelektronen*	213
7.3 Die Paarbildung durch Photonen im Coulombfeld	219
7.4 Die kohärente Streuung	223
7.5 Kernphotoreaktionen	225
7.6 Überblick zu den Photonenwechselwirkungen	229
7.7 Der Schwächungskoeffizient für Photonenstrahlung	222
7.8 Der Schwächungskoeffizient bei Stoffgemischen und Verbindungen*	237
7.9 Der Energieumwandlungskoeffizient für Photonenstrahlung	237
7.10 Der Energieabsorptionskoeffizient für Photonenstrahlung	242
Aufgaben	246
Aufgabenlösungen	248
<b>8 Schwächung von Strahlenbündeln ungeladener Teilchen</b>	251
8.1 Exponentielle Schwächung	252

8.2	Schwächung schmaler heterogener Strahlenbündel ungeladener Teilchen*	258
8.3	Aufhärtung und Homogenität heterogener Photonenstrahlung*	259
8.4	Veränderungen ausgedehnter, divergenter Strahlenbündel in dicken Absorbern*	264
	Aufgaben	271
	Aufgabenlösungen	273
<b>9</b>	<b>Wechselwirkungen von Neutronenstrahlung</b>	<b>275</b>
9.1	Elastische Neutronenstreuung	280
9.1.1	Labor- und Schwerpunktsystem*	280
9.1.2	Neutronenrestenergie bei der elastischen Streuung*	281
9.1.3	Energieübertrag durch Neutronen	283
9.1.4	Elastische Vielfachstreuung von Neutronen	283
9.1.5	Moderation und Lethargie von Neutronen*	283
9.1.6	Elastische Neutronenwechselwirkungen mit menschlichem Gewebe	286
9.2	Inelastische Neutronenstreuung	287
9.3	Neutroneneinfangreaktionen	287
9.3.1	Einfang langsamer Neutronen	287
9.3.2	Einfang schneller Neutronen	291
9.4	Neutroneninduzierte Kernspaltung und Spallation	292
	Aufgaben	295
	Aufgabenlösungen	297
<b>10</b>	<b>Wechselwirkungen geladener Teilchen</b>	<b>299</b>
10.1	Anhängigkeit der Wechselwirkungen vom Stoßparameter	299
10.2	Das Bremsvermögen für geladene Teilchen	306
10.2.1	Das Stoßbremsvermögen	306
10.2.2	Das Strahlungsbremsvermögen	315
10.3	Besonderheiten bei der Bremsung von Elektronen	320
10.3.1	Richtungsverteilung der Bremsstrahlungsphotonen für Elektronenstrahlung	320

10.3.2	Verhältnis von Stoßbremsvermögen und Strahlungsbremsvermögen für Elektronen	322
10.3.3	Energiespektren von Elektronen in Materie	324
10.4	Das Streuvermögen für geladene Teilchen	327
10.4.1	Das Streuvermögen für Elektronen	327
10.4.2	Transmission und Rückstreuung von Elektronen	330
10.4.3	Streuung von Protonen am Coulombfeld der Kerne	333
10.4.4	Nukleare Wechselwirkungen von Protonen	334
10.5	Reichweiten geladener Teilchen	336
10.5.1	Reichweiten schwerer geladener Teilchen	336
10.5.2	Bahnlänge und Reichweiten monoenergetischer Elektronen	340
10.5.3	Reichweiten und Transmission von $\beta$ -Strahlung	344
10.6	Wechselwirkungen negativer Pi-Mesonen	347
	Aufgaben	348
	Aufgabenlösungen	349

## **Abschnitt III: Dosisgrößen und Dosisberechnungen**

<b>11</b>	<b>Dosisgrößen</b>	<b>351</b>
11.1	Die physikalischen Dosisgrößen	351
11.2	Die Dosisgrößen im Strahlenschutz	353
11.2.1	Die Mess-Äquivalentdosis	356
11.2.2	Die Ortsdosisgrößen	358
11.2.3	Die Personendosisgrößen	361
11.2.4	Die Organ-Äquivalentdosen	362
11.2.5	Die Effektive Dosis	365
11.2.6	Probleme mit den aktuellen Strahlenschutzdosisgrößen	370
11.3	Änderungen der Dosisgrößen im Strahlenschutz*	371
11.3.1	Die ehemaligen Dosismessgrößen im Strahlenschutz*	371
11.3.2	Die ehemalige Größe Äquivalentdosis*	372
11.3.3	Die ehemalige Größe effektive Äquivalentdosis*	374
11.3.4	Die Entwicklung der Gewebe-Wichtungsfaktoren*	375

Aufgaben	378
Aufgabenlösungen	379

## **12 Strahlenschutzphantome** 381

## **13 Dosisleistungskonstanten, Hautdosisfaktoren und Inkorporationsfaktoren** 391

13.1 Dosisleistungskonstanten für ionisierende Photonenstrahlungen	391
13.1.1 Kermaleistungskonstanten für Gammastrahler	391
13.1.2 Strahlenschutz-Dosisleistungskonstanten für Gammastrahler	398
13.1.3 Dosisleistungskonstanten für Beta-Bremsstrahlungen	400
13.1.4 Dosisleistungskonstanten für Röntgenstrahler	401
13.1.5 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Photonen	403
13.2 Dosisleistungsfunktionen für reine Betastrahler	406
13.2.1 Dosisleistungsfunktionen für Betapunktstrahler	406
13.2.2 Dosisleistungen für Beta-Linien- und Beta-Flächenstrahler	410
13.2.3 Dosisleistungen in betakontaminierten Luftvolumina	412
13.2.4 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Betastrahler*	414
13.3 Dosisfaktoren bei Hautkontaminationen	416
13.4 Dosisfaktoren bei Radionuklidinkorporation	423
Aufgaben	426
Aufgabenlösungen	427

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

### **14 Grundlagen zur Biologie menschlicher Zellen** 429

14.1 Aufbau menschlicher Zellen	429
14.2 Die Zellorganellen*	432
14.3 Struktur und Replikation der DNS	435
14.4 Erzeugung von Proteinen*	440
14.5 Chromosomen*	443
14.6 Die Phasen des Zellzyklus	445

14.7 Wichtige Begriffe der Zellbiologie	448
Aufgaben	451
Aufgabenlösungen	452
<b>15 Strahlenbiologie der Zelle</b>	<b>453</b>
15.1 Die strahlenbiologische Wirkungskette in Zellen	454
15.2 Direkte und indirekte Strahlenwirkungen	456
15.3 DNS-Schäden	461
15.3.1 Arten von DNS-Schäden	462
15.4 Die Reparaturen von DNS-Schäden	467
15.4.1 Direktreparaturen von Basenschäden	469
15.4.2 Exzisionsreparaturen von Basenschäden	470
15.4.3 Reparaturen von DNS-Strangbrüchen	474
15.4.4 Genetische Defekte der DNS-Reparaturmechanismen*	482
15.5 Wichtige Begriffe der Strahlenbiologie	484
Aufgaben	487
Aufgabenlösungen	488
<b>16 Dosiswirkungsbeziehungen und RBW</b>	<b>491</b>
16.1 Dosiswirkungskurven und Überlebenskurven	492
16.1.1 Mathematische Beschreibung von Überlebenskurven*	495
16.2 Parameter der Strahlenwirkung	502
16.2.1 Der Sauerstoffeffekt	503
16.2.2 Chemische Modifikatoren der Strahlenwirkung	505
16.2.3 Abhängigkeit der Strahlenwirkung von der Zellzyklusphase	508
16.2.4 Abhängigkeit der Strahlenwirkung vom zeitlichen Bestrahlungsmuster	510
16.2.5 Einflüsse des morphologischen Zelldifferenzierungsgrades	515
16.2.6 Volumeneffekte der Strahlenwirkung	516
16.2.7 Temperaturabhängigkeit der Strahlenwirkung	516
16.3 Die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW)	520
16.3.1 Die Dosisabhängigkeit der RBW*	521

16.3.2	Abhängigkeit der RBW vom Linearen Energietransfer LET*	525
16.3.3	RBW und Wichtungsfaktoren Q und $w_R$ im Strahlenschutz*	527
	Aufgaben	530
	Aufgabenlösungen	531
<b>17</b>	<b>Risiken und Wirkungen ionisierender Strahlung</b>	<b>533</b>
17.1	Allgemeine Strahlenschutzbegriffe	534
17.2	Der Risikobegriff im Strahlenschutz*	538
17.3	Gewebereaktionen - Deterministische Strahlenwirkungen	541
17.4	Stochastische Strahlenwirkungen	554
17.4.1	Dosis- Wahrscheinlichkeitskurven für stochastische Schäden	556
17.4.2	Abschätzungen des stochastischen Strahlenrisikos	558
17.4.2.1	Abschätzung des Krebsrisikos	559
17.4.2.2	Das hereditäre Strahlenrisiko	565
17.4.3	Altersabhängigkeit des stochastischen Strahlenrisikos	567
17.5	Risiken pränataler Strahlenexposition	571
	Aufgaben	574
	Aufgabenlösungen	576
<b>18</b>	<b>Mittlere Strahlenexpositionen des Menschen</b>	<b>579</b>
18.1	Natürliche Strahlenexposition	580
18.1.1	Externe terrestrische Strahlenexposition	580
18.1.2	Externe kosmische Strahlenexposition	589
18.1.3	Interne Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide	598
18.1.3.1	Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	599
18.1.3.2	Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	600
18.1.4	Zusammenfassung zur mittleren natürlichen Strahlenexposition	610
18.2	Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition	612
18.2.1	Medizinische Strahlenexpositionen	613
18.2.2	Kernwaffentests	623

18.2.3 Kernenergie	626
18.2.4 Energie- und Wärmeerzeugung durch fossile Brennstoffe	629
18.2.5 Weitere zivilisatorische Strahlungsquellen	629
18.2.6 Baumaterialien*	630
18.2.7 Berufliche Strahlenexposition	633
18.3 Überblick zur natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexposition	634
Aufgaben	638
Aufgabenlösungen	639

## **Abschnitt V: Praktischer Strahlenschutz**

<b>19 Strahlenschutzrecht</b>	<b>641</b>
19.1 Das neue System des Strahlenschutzrechts	641
19.2 Strahlenschutzverantwortliche und Beauftragte, Anwender	644
19.3 Fachkunde im Strahlenschutz	647
19.4 Unterweisungen und Dokumentationen	648
19.5 Medizinphysik-Experten - MPE	651
19.6 Strahlenschutzbereiche	652
19.7 Grenzwerte	653
19.8 Diagnostische Referenzwerte - DRW	661
Aufgaben	664
Aufgabenlösungen	665
<b>20 Regeln und Verfahren zum praktischen Strahlenschutz</b>	<b>669</b>
20.1 Allgemeine Regeln zur Verringerung der Strahlenexposition	669
20.2 Abschirmung direkt ionisierender Strahlungen	672
20.3 Abschirmung von Neutronenstrahlung	675
20.4 Abschirmung von Photonenstrahlungen	675
20.4.1 Abschirmung niederenergetischer Röntgenstrahlung	676
20.4.1.1 Bleigleichwerte von Strahlenschutzmitteln im Röntgen	683
20.4.2 Abschirmung von Gammastrahlung in der Nuklearmedizin	689
20.4.3 Auslegung von Abschirmungen und Schutzwänden für harte und ultraharte Gammastrahlung	694

Aufgaben	698
Aufgabenlösungen	700
<b>21 Strahlenexpositionen und Strahlenschutz in der Projektionsradiografie</b>	<b>703</b>
21.1 Dosisbedarf von Detektoren für die Projektionsradiografie	704
21.2 Körperdosisabschätzungen für Patienten	708
21.3 Expositionen des Personals in der Projektionsradiografie	717
21.3.1 Exposition im Nutzstrahl von Projektionsradiografieanlagen	717
21.3.2 Strahlenexposition des Personals im Streustrahlungsfeld von Anlagen zur Projektionsradiografie	720
21.4 Einfluss von Positionierung und Feldgröße bei Durchleuchtungen auf die Strahlenexposition	723
21.5 Umgang mit Bleischürzen in der radiologischen Praxis	725
Aufgaben	730
Aufgabenlösungen	731
<b>22 Strahlenexpositionen und Strahlenschutz in der Computertomografie</b>	<b>733</b>
22.1 Der Pitchfaktor bei CT-Untersuchungen	734
22.2 CTDI und Dosislängenprodukt bei CT-Untersuchungen	734
22.3 Abschätzung der Patientendosis bei CT-Untersuchungen*	739
22.4 Strahlenexposition des Personals bei der Computertomografie	751
Aufgaben	754
Aufgabenlösungen	754
<b>23 Strahlenexpositionen und Strahlenschutz in der Nuklearmedizin</b>	<b>755</b>
23.1 Strahlenexpositionen von Patienten	756
23.2 Strahlenexpositionen des nuklearmedizinischen Personals	759
23.2.1 Externe Strahlenexpositionen durch Gammastrahler	760
23.2.2 Strahlenexpositionen beim Hantieren von Betastrahlern	767
23.2.3 Strahlenexposition bei Inkorporation von Radionukliden	772
Aufgaben	775
Aufgabenlösungen	776

## Abschnitt VI: Daten

<b>24 Anhang</b>	777
24.1 Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI, abgeleitete Einheiten	777
24.2 Praktische physikalische Konstanten und Einheiten	780
24.3 Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	783
24.4 Massenschwächungskoeffizienten für monoenergetische Photonen	784
24.5 Zusammensetzung der Massenphotonenwechselwirkungskoeffizienten für Stickstoff und Blei	789
24.6 Massenenergieabsorptionskoeffizienten $\mu_{\text{en}}/\rho$ für monoenergetische Photonen	792
24.7 Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	795
24.8 Massenstrahlungsbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	798
24.9 Bremsstrahlungsausbeuten für monoenergetische Elektronen	799
24.10 Massenstoßbremsvermögen und Massenreichweiten für Alphateilchen, Protonen und Reichweitenvergleich	800
24.11 Massendichten wichtiger dosimetrischer Substanzen	807
24.12 Gewebe-Luft-Verhältnisse für diagnostische Röntgenstrahlung	808
24.13 Patientenschwächungsfaktoren und Konversionsfaktoren für diagnostische Röntgenstrahlung	810
24.14 Ortsdosisleistungen im Streustrahlungsfeld eines Computertomografen	811
24.15 Daten zum ICRP Referenzmenschen	812
24.16 Elemente des Periodensystems	815
24.17 Bindungsenergien von Valenzelektronen	818
24.18 Dosisleistungsfaktoren bei Hautkontamination mit Radionukliden	819
24.19 Dosisfaktoren bei Inkorporation von Radionukliden	821
24.20 Halbwertszeiten wichtiger Radionuklide	824
<b>25 Literatur</b>	825
25.1 Lehrbücher und Monografien	825
25.2 Wissenschaftliche Einzelarbeiten	830
25.3 Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	843

25.4	Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	850
25.5	Deutsche Industrie-Normen zu Dosimetrie und Strahlenschutz	854
25.6	Wichtige Internetadressen	857
	<b>Wichtige Abkürzungen</b>	<b>861</b>
	<b>Sachregister</b>	<b>863</b>