

# Inhalt

## Abschnitt I: Teilchenbeschleuniger

<b>1</b>	<b>Überblick über die Strahlungsquellen</b>	<b>9</b>
1.1	Einsatzbereiche ionisierender Strahlungsquellen	9
1.2	Arten ionisierender Strahlungsquellen	13
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Teilchenbeschleunigung und Strahloptik</b>	<b>17</b>
2.1	Relativistische Energien und Massen	17
2.2	Prinzip der Beschleunigung geladener Teilchen	20
2.3	Grundlagen zur Strahloptik mit elektrischen und magnetischen Feldern	27
2.3.1	Wirkung elektrischer Felder auf geladene Teilchen	29
2.3.2	Wirkung magnetischer Felder auf geladene Teilchen	34
2.3.3	Teilchenführung mit Magnetfeldern	40
2.3.4	Schwache und starke Fokussierung mit Magnetfeldern*	43
	Aufgaben	49
<b>3</b>	<b>Elektronen- und Ionenquellen</b>	<b>50</b>
3.1	Elektronenquellen	50
3.1.1	Die Kathoden von Röntgenröhren	50
3.1.2	Fokussierung der Elektronenstrahlenbündel	57
3.1.3	Elektronenkanonen für Beschleuniger	60
3.2	Quellen für positive Ionen	65
3.2.1	Einschlussquellen für hohe Ionenströme	69
3.2.2	Die Plasmatröns	71
3.2.3	Die Penning-Ionenquellen	72
3.2.4	Die HF-Ionenquellen	74
3.2.5	Elektronenstrahl-Ionenquellen	78
3.3	Quellen für negative Ionen	81
	Aufgaben	88
<b>4</b>	<b>Die Röntgenröhre</b>	<b>89</b>
4.1	Röntgenspektren	92
4.1.1	Entstehung der Röntgenbremsstrahlung	92
4.1.2	Intensitätsspektren der Röntgenbremsstrahlung*	93

4.1.3	Wirkungsgrad bei der Erzeugung von Röntgenbremsstrahlung	99
4.1.4	Charakteristische Röntgenstrahlung	102
4.2	Filterung von Röntgenspektren	105
4.3	Darstellung von Röntgenspektren im Wellenlängenbild	116
4.4	Abbildungseigenschaften von Röntgenstrahlern	117
4.5	Extrafokalstrahlung	121
4.6	Winkelverteilungen von Röntgenstrahlung	123
4.7	Bauformen von Röntgenröhren	126
4.8	Technische Aspekte beim Anodenaufbau von Röntgenröhren	134
4.9	Theorie zur thermischen Belastbarkeit der Anoden von Röntgenröhren*	142
	Aufgaben	147
<b>5</b>	<b>Gleichspannungsbeschleuniger</b>	<b>148</b>
5.1	Cockcroft-Walton-Beschleuniger	148
5.2	Marx-Generatoren	150
5.3	Van de Graaff-Beschleuniger	151
5.4	Gleichspannungsbeschleuniger mit HF-Generatoren	155
	Aufgaben	158
<b>6</b>	<b>Hochfrequenzgeneratoren</b>	<b>159</b>
6.1	Das Magnetron	159
6.2	Klystrons	161
<b>7</b>	<b>Hohlwellenleiter und Hohlraumresonatoren*</b>	<b>167</b>
7.1	Hohlwellenleiter*	167
7.2	Hohlwellenleiter mit Irisblenden*	169
7.3	Hohlraumresonatoren*	170
	Aufgaben	174
<b>8</b>	<b>Linearbeschleuniger</b>	<b>175</b>
8.1	Phasenfokussierung in Linearbeschleunigern*	176
8.2	Beschleuniger mit Wideröe-Struktur	178
8.3	RFQ-Beschleuniger	180
8.4	Beschleuniger mit Alvarez-Struktur	182
8.5	Elektronenlinearbeschleuniger	184
8.5.1	Energiegewinn der Elektronen bei der Hochfrequenzbeschleunigung*	184

8.5.2	Das Wanderwellenprinzip	185
8.5.3	Das Stehwellenprinzip	187
8.5.4	Vergleich von Wander- und Stehwellenprinzip	190
	Aufgaben	194
<b>9</b>	<b>Medizinische Elektronenlinearbeschleuniger</b>	<b>195</b>
9.1	Anforderungen an medizinische Elektronenbeschleuniger	195
9.2	Aufbau von medizinischen Elektronenlinearbeschleunigern	197
9.3	Der Strahlerkopf im therapeutischen Elektronenbetrieb	199
9.3.1	Umlenkung und Fokussierung des Elektronenstrahlenbündels	201
9.3.2	Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels	204
9.3.3	Kollimation des Elektronenstrahls	212
9.4	Der Strahlerkopf im Photonenbetrieb	216
9.4.1	Bremsstrahlungserzeugung und Auslegung des Bremstargets	216
9.4.2	Homogenisierung des Photonenstrahlenbündels	219
9.4.3	Kollimation des Photonenstrahlenbündels	224
9.5	Das Doppeldosismonitorsystem	231
9.6	Keilfilter zur Formung von Photonenfeldern	233
9.7	Portal-Imaging-Systeme	244
9.8	Strahlenschutzprobleme an medizinischen Elektronenlinearbeschleunigern	248
9.8.1	Baulicher Strahlenschutz	249
9.8.2	Apparativer Strahlenschutz	250
9.8.3	Materialaktivierungen	252
9.9	Das Cyberknife	256
	Aufgaben	263
<b>10</b>	<b>Ringbeschleuniger</b>	<b>264</b>
10.1	Einteilung der Ringbeschleuniger	264
10.2	Das Betatron	265
10.3	Zyklotrons	271
10.3.1	Funktionsweise und Bauformen von klassischen Zyklotrons	271
10.3.2	Relativistische Zyklotrons	277
10.3.3	Zyklotrons für die Protonentherapie	283
10.4	Mikrotrons	294
10.5	Synchrotrons	301

10.5.1 Die räumliche Fokussierung der Teilchen im Synchrotron*	304
10.5.2 Phasenfokussierung relativistischer Teilchen im Synchrotron*	306
10.6 Das Rhodotron für industrielle Anwendungen	308
Aufgaben	310
<b>11 Synchrotronstrahlung und Speicherringe*</b>	<b>311</b>
11.1 Entstehung der Synchrotronstrahlung*	311
11.2 Speicherringe zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung*	315
Aufgaben	319
 <b>Abschnitt II: Kernreaktoren und Neutronenquellen</b>	
<b>12 Kernreaktoren</b>	<b>320</b>
12.1 Grundlagen zur Kernspaltung	320
12.1.1 Spaltbare Materialien	320
12.1.2 Neutroneninduzierte Kernspaltung	322
12.1.3 Spaltfragmentverteilungen	329
12.2 Funktionsweise von Kernreaktoren	331
12.3 Überblick über technische Bauformen von Kernreaktoren	339
12.4 Sonderformen von Kernreaktoren	342
12.4.1 Die Garching Forschungsbreaktoren	342
12.4.2 Der natürliche Reaktor in Gabun	348
Aufgaben	351
<b>13 Neutronenquellen und ihre Anwendungen</b>	<b>352</b>
13.1 Überblick über die Neutronenquellen	352
13.2 Energie von Neutronen	354
13.3 Reaktor-neutronen	356
13.4 Neutronenquellen mit spontanen Spaltungen	358
13.5 Neutronenerzeugung mit geladenen Teilchen aus Beschleunigern	359
13.5.1 Spallationsquellen	359
13.5.2 Neutronen-Fusionsgeneratoren mit Deuterium und Tritium	361
13.5.3 Zyklotron-Neutronenquellen	364
13.6 Neutronenquellen über den Kernphotoeffekt	367
13.7 Radioisotop-Neutronenquellen vom Typ ( $\alpha, n$ )	368

13.8	Anwendungen von Neutronenstrahlungen	372
13.8.1	Neutronen-Aktivierungsanalysen	372
13.8.2	Schwächung von thermischen Neutronen*	375
13.8.3	Bildgebung mit Neutronen	379
13.8.4	Anwendung von Neutronen in der Medizin	382
	Aufgaben	384

### **Abschnitt III: Radionuklide und ihre Anwendungen**

<b>14</b>	<b>Radionukliderzeugung</b>	<b>385</b>
14.1	Spezifische Aktivität radioaktiver Strahler*	386
14.2	Erzeugung neutronenreicher Nuklide durch Kernspaltung	389
14.3	Neutronenaktivierungen	389
14.4	Erzeugung von Positronenstrahlern	395
14.5	Radionuklidgeneratoren	397
14.5.1	Der Molybdän-Technetiumgenerator	398
14.5.2	Weitere Radionuklidgeneratoren*	402
	Aufgaben	406
<b>15</b>	<b>Radionuklide in der Medizin</b>	<b>407</b>
15.1	Radionuklide für strahlentherapeutische Anwendungen	407
15.2	Radionuklide für die Nuklearmedizin	411
	Aufgaben	415
<b>16</b>	<b>Kobaltbestrahlungsanlagen für die Medizin</b>	<b>416</b>
16.1	Kobaltstrahler	416
16.2	Konventionelle isozentrische Kobaltanlagen	419
16.3	Das stereotaktische Kobaltbestrahlungsgerät Gammaknife	422
	Aufgaben	424
<b>17</b>	<b>Afterloadinganlagen für die Medizin</b>	<b>425</b>
17.1	Prinzip des medizinischen Afterloadings	425
17.2	Strahlungsquellen für das medizinische Afterloading	427
17.3	Erzeugung der therapeutischen Dosisleistungsverteilungen	429
	Aufgaben	432

<b>18 Technische Anwendungen von Radionukliden</b>	<b>433</b>
18.1 Radionuklidbatterien	433
18.2 Materialprüfungen	436
18.3 Füllstandsmessungen und Ionisationsrauchmelder	439
18.4 Strahlensterilisation	440
18.5 Kunststoffherzeugung und Modifikation	442
Aufgaben	445

## **Abschnitt IV: Anhang**

<b>19 Tabellenanhang</b>	<b>446</b>
19.1 Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI, abgeleitete Einheiten	446
19.2 Physikalische Fundamentalkonstanten	450
19.3 Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	451
19.4 Strahlungsfeldgrößen	452
19.5 Elemente des Periodensystems	453
19.6 Daten zur Kernspaltung	456
19.6.1 Relative Spaltausbeuten bei der thermischen Spaltung von $^{235}\text{U}$ für bestimmte Massenzahlen A und die wichtigsten Spaltfragmente	456
19.6.2 Neutronenzahlen pro Spaltakt und Neutroneneinfangquerschnitte	459
<b>20 Literatur</b>	<b>460</b>
20.1 Lehrbücher und Monografien	460
20.2 Wissenschaftliche Einzelarbeiten	462
20.3 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	467
20.4 Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Strahlungsquellen	470
20.5 Wichtige Internetadressen	471
<b>21 Aufgabenlösungen</b>	<b>474</b>
<b>Sachregister</b>	<b>492</b>