

Inhaltsverzeichnis

Nutzen Sie dieses Buch individuell XXI

1. Mechanik der Massenpunkte

1

1.1 Messen und Maßeinheiten	1
1.1.1 Messen	1
1.1.2 Maßeinheiten	2
1.1.3 Maßsysteme und Dimensionen	2
1.1.4 Längeneinheit	3
1.1.5 Winkelmaße	4
1.1.6 Zeitmessung	4
1.1.7 Meßfehler	5
1.2 Kinematik	9
1.2.1 Ortsvektor	9
1.2.2 Geschwindigkeit	10
1.2.3 Beschleunigung	11
1.3 Dynamik	12
1.3.1 Trägheit	12
1.3.2 Kraft und Masse	12
1.3.3 Maßeinheiten	13
1.3.4 Newtons Axiome	13
1.4 Einfache Bewegungen	14
1.4.1 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung	14
1.4.2 Die gleichförmige Kreisbewegung	16
1.4.3 Die harmonische Schwingung	18
1.5 Arbeit, Energie, Impuls, Leistung	20
1.5.1 Arbeit	20
1.5.2 Kinetische Energie	22
1.5.3 Impuls	23
1.5.4 Kraftfelder	24
1.5.5 Potentielle Energie	24
1.5.6 Der Energiesatz	25
1.5.7 Leistung	26
1.5.8 Zentralkräfte	26
1.5.9 Anwendungen des Energie- und Impulsbegriffes	27
a) Geschöß- oder Treibstrahlgeschwindigkeiten	27
b) Raketenphysik	28
c) Propeller- und Düsenantrieb	28
d) Durchschlagskraft von Geschossen	29
e) Potentielle Energie der Schwere	30
f) Schwingungsenergie	31
g) Stoßgesetze	32
h) Zur Energiekrise	35
i) Der Virialsatz	37
1.5.10 Impulsraum	38

1.6 Reibung	40
1.6.1 Reibungsmechanismen	40
1.6.2 Bewegung unter Reibungseinfluß	42
1.6.3 Flug von Geschossen	43
1.6.4 Die technische Bedeutung der Reibung	44
1.7 Gravitation	46
1.7.1 Das Gravitationsgesetz	46
1.7.2 Das Gravitationsfeld	48
1.7.3 Gezeitenkräfte	49
1.7.4 Planetenbahnen	52
1.8 Trägheitskräfte	54
1.8.1 Arten der Kräfte	54
1.8.2 Inertialsysteme	55
1.8.3 Rotierende Bezugssysteme	56
1.8.4 Bahnstörungen	57
1.8.5 Invarianzen und Erhaltungssätze	59
Aufgaben	61

2. Mechanik des starren Körpers

2

2.1 Translation und Rotation	72
2.1.1 Bewegungsmöglichkeiten eines starren Körpers	72
2.1.2 Infinitesimale Drehungen	73
2.1.3 Die Winkelgeschwindigkeit	73
2.2 Dynamik des starren Körpers	74
2.2.1 Rotationsenergie	74
2.2.2 Das Trägheitsmoment	74
2.2.3 Das Drehmoment	75
2.2.4 Der Drehimpuls	76
2.2.5 Das Trägheitsmoment als Tensor	77
2.2.6 Der Drehimpulssatz	77
2.2.7 Die Bewegungsgleichung des starren Körpers	80
2.3 Gleichgewicht und Bewegung eines starren Körpers	80
2.3.1 Gleichgewichtsbedingungen	80
a) Arten des Gleichgewichts	82
b) Einfache Maschinen	82
c) Die Waage	84
d) Standfestigkeit	84
2.3.2 Gleichmäßig beschleunigte Rotation	85
2.3.3 Drehschwingungen	85
2.3.4 Kippung	86
2.3.5 Drehung um freie Achsen	87
2.4 Der Kreisel	88
2.4.1 Nutation des kräftefreien Kreisels	88
2.4.2 Präzession des Kreisels	89
Aufgaben	91

3. Mechanik deformierbarer Körper**3**

3.1 Ruhende Flüssigkeiten und Gase (Hydro- und Aerostatik)	93
3.1.1 Der feste, flüssige und gasförmige Zustand	93
3.1.2 Die Gestalt von Flüssigkeitsoberflächen	94
3.1.3 Druck	95
a) Hydraulische Presse	95
b) Druckarbeit	95
c) Kompressibilität	96
3.1.4 Der Schweredruck	96
a) Kommunizierende Röhren	97
b) Auftrieb	97
c) Schwimmen	97
d) Aräometer	98
3.1.5 Gasdruck	98
3.1.6 Der Atmosphärendruck	99
3.2 Oberflächenspannung	100
a) Tröpfchengröße	101
b) Überdruck in der Seifenblase	102
c) Kapillarität	103
3.3 Strömungen	104
3.3.1 Beschreibung von Strömungen	104
3.3.2 Innere Reibung	109
3.3.3 Die laminare Strömung	110
a) Reibungskräfte in strömenden Flüssigkeiten	110
b) Druckkraft	111
c) Laminare Spaltströmung	111
d) Laminare Rohrströmung	112
e) Laminare Strömung um Kugeln (Stokes)	112
f) Die Prandtl-Grenzschicht	113
g) Schmiermittelreibung	114
3.3.4 Bewegungsgleichung einer Flüssigkeit	115
3.3.5 Kriterien für die verschiedenen Strömungstypen	116
3.3.6 Strömung idealer Flüssigkeiten	118
a) Ausströmen aus einem Loch	119
b) Weitere Beispiele zur Bernoulli-Gleichung	120
c) Kavitation	120
d) Gasdynamik	120
3.3.7 Der hydrodynamische Impulssatz	121
3.3.8 Strömungswiderstand	123
3.3.9 Wirbel	125
3.3.10 Turbulenz	128
3.4 Der deformierbare Festkörper	130
3.4.1 Dehnung und Kompression	130
3.4.2 Scherung	131
3.4.3 Zusammenhang zwischen E -Modul und G -Modul	132
3.4.4 Anelastisches Verhalten	132
3.4.5 Elastische Energie	134

3.4.6 Wie biegen sich die Balken?	134
3.4.7 Knickung	135
3.4.8 Härte	135
Aufgaben	136

4. Schwingungen und Wellen**4**

4.1 Schwingungen	141
4.1.1 Überlagerung von Schwingungen	142
a) Schwingungen verschiedener Richtung	142
b) Schwingungen gleicher Frequenz und Richtung: Zeigerdiagramm, komplexe Rechnung	143
c) Schwingungen mit wenig verschiedenen Frequenzen: Schwebungen, Amplitudenmodulation	145
d) Schwingungen mit stark unterschiedlicher Frequenz: Fourier-Analyse	146
e) Schwingungen mit unbestimmter Phasendifferenz (inkohärente Schwingungen)	149
4.1.2 Gedämpfte Schwingungen	150
4.1.3 Erzwungene Sinusschwingungen	154
4.1.4 Amplituden- und Phasenmodulation	158
4.2 Wellen	160
4.2.1 Beschreibung von Wellen	160
4.2.2 Die Wellengleichung	161
4.2.3 Elastische Wellen	162
4.2.4 Überlagerung von Wellen	164
a) Wellen gleicher Frequenz, aber verschiedener Ausbreitungsrichtung	165
b) Wellen gleicher Ausbreitungsrichtung, aber verschiedener Frequenz	167
4.2.5 Intensität einer Welle	169
4.3 Wellenausbreitung	171
4.3.1 Streuung	172
4.3.2 Das Prinzip von Huygens-Fresnel	172
4.3.3 Das Prinzip von Fermat	173
4.3.4 Beugung	175
4.3.5 Doppler-Effekt; Mach-Wellen	176
4.3.6 Absorption	178
4.3.7 Stoßwellen	179
4.4 Eigenschwingungen	181
4.4.1 Gekoppelte Pendel	181
4.4.2 Wellen im Kristallgitter; die Klein-Gordon-Gleichung	182
4.4.3 Stehende elastische Wellen	184
4.4.4 Eigenschwingungen von Platten, Membranen und Hohlräumen	186
4.4.5 Entartung	188

4.5 Schallwellen	189
4.5.1 Schallmessungen	189
a) Messung in stehender Welle	190
b) Kundtsches Rohr	190
c) Quinckesches Resonanzrohr	190
d) Ultraschall-Interferometer	190
e) Optische Wellenlängenmessung von Ultraschallwellen (Debye und Sears)	190
4.5.2 Töne und Klänge	191
4.5.3 Lautstärke	193
4.5.4 Das Ohr	194
4.5.5 Ultraschall und Hyperschall	196
4.6 Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten	197
Aufgaben	202

5. Wärme

5

5.1 Wärmeenergie und Temperatur	207
5.1.1 Was ist Wärme?	207
5.1.2 Temperatur	208
5.1.3 Thermometer	210
5.1.4 Freiheitsgrade	211
5.1.5 Wärmekapazität	212
5.1.6 Kalorimeter	214
5.2 Kinetische Gastheorie	214
5.2.1 Der Gasdruck	214
5.2.2 Die Zustandsgleichung idealer Gase	216
5.2.3 Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre	217
5.2.4 c_v und c_p bei Gasen	218
5.2.5 Adiabatische Zustandsänderungen	219
5.2.6 Druckarbeit	220
5.2.7 Mittlere freie Weglänge und Wirkungsquerschnitt	221
5.2.8 Brownsche Bewegung	223
5.2.9 Die Boltzmann-Verteilung	224
5.2.10 Die Maxwell-Verteilung	225
a) Die Verteilungsfunktion	226
b) Molekularstrahlen	227
5.3 Wärmekraftmaschinen	227
5.3.1 Thermische Energiewandler	227
5.3.2 Arbeitsdiagramme	229
5.3.3 Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern	229
5.4 Wärmeleitung und Diffusion	232
5.4.1 Mechanismen des Wärmetransportes	232
5.4.2 Die Gesetze der Wärmeleitung	232
5.4.3 Wärmeübergang und Wärmedurchgang	236
5.4.4 Wärmetransport durch Konvektion	237
5.4.5 Diffusion in Gasen und Lösungen	237
5.4.6 Transportphänomene	239
5.5 Entropie	242
5.5.1 Irreversibilität	242
5.5.2 Wahrscheinlichkeit und Entropie	243

5.5.3 Entropie und Wärmeenergie	245
5.5.4 Berechnung von Entropien	245
5.5.5 Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre	248
5.5.6 Reversible Kreisprozesse	249
5.5.7 Das thermodynamische Gleichgewicht	251
5.5.8 Chemische Energie	255
5.5.9 Freie Energie, Helmholtz-Gleichung und 3. Hauptsatz der Wärmelehre	259
5.6 Aggregatzustände	260
5.6.1 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf	260
a) Sieden	262
b) Hygrometrie	262
c) Verdampfungswärme	264
5.6.2 Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit	265
5.6.3 Koexistenz dreier Phasen	266
5.6.4 Reale Gase	267
5.6.5 Kinetische Deutung der van der Waals-Gleichung	269
5.6.6 Joule-Thomson-Effekt; Gasverflüssigung	270
5.6.7 Erzeugung tiefster Temperaturen	272
5.7 Lösungen	274
5.7.1 Grundbegriffe	274
5.7.2 Osmose	275
5.7.3 Dampfdrucksenkung	276
5.7.4 Destillation	277
5.8 Vakuum	278
5.8.1 Bedeutung der Vakuumtechnik	278
5.8.2 Vakuumpumpen	279
5.8.3 Strömung verdünnter Gase	281
5.8.4 Vakuum-Meßgeräte	282
Aufgaben	284

6. Elektrizität

6

6.1 Elektrostatik	293
6.1.1 Elektrische Ladungen	293
6.1.2 Das elektrische Feld	296
6.1.3 Spannung und Potential	298
6.1.4 Berechnung von Feldern	301
a) Feld einer beliebigen kugel- symmetrischen Ladungsverteilung	301
b) Feld im Innern einer gleichmäßig geladenen Hohlkugel	302
c) Feld eines gleichmäßig geladenen unendlich langen geraden Drahtes	302
d) Feld einer gleichmäßig geladenen unendlich ausgedehnten ebenen Platte	302
e) Feld eines beliebigen Metallkörpers	303

6.1.5	Kapazität	305
	a) Parallel- und Serienschaltung von Kondensatoren	306
	b) Kirchhoff-Waage	306
	c) Elektrometer	307
	d) Schwebekondensator, Millikan-Versuch	307
6.1.6	Dipole	307
6.1.7	Influenz	309
6.1.8	Energie einer Ladungsverteilung	309
6.1.9	Das elektrische Feld als Träger der elektrischen Energie	310
6.2	Dielektrika	310
6.2.1	Die Verschiebungsdichte	310
6.2.2	Dielektrizitätskonstante	311
6.2.3	Mechanismen der dielektrischen Polarisaton	313
	a) Verschiebungspolarisation	313
	b) Orientierungspolarisation	314
6.2.4	Energiedichte des elektrischen Feldes im Dielektrikum	315
6.2.5	Elektrostriktion: Piezo- und Pyroelektrizität	316
6.3	Gleichströme	317
6.3.1	Stromstärke	317
6.3.2	Das Ohmsche Gesetz	318
6.3.3	Energie und Leistung elektrischer Ströme	320
6.3.4	Gleichstromtechnik	321
	a) Meßgeräte, Meßbereichsumschaltung	321
	b) Brückenschaltungen	322
	c) Kompensationsmethode	323
	d) Innenwiderstand einer Spannungsquelle; Leistungsanpassung	323
	e) Vorwiderstand und Potentiometer	324
6.4	Mechanismen der elektrischen Leitung	325
6.4.1	Nachweis freier Elektronen in Metallen	325
6.4.2	Elektronentransport in Metallen	326
6.4.3	Elektrische Leitfähigkeit	327
	a) Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit	327
	b) Innerer Photoeffekt	328
	c) Magnetoresistenz	328
	d) Druckabhängigkeit des Widerstandes	329
	e) Elektrische und Wärmeleitfähigkeit	329
	f) Supraleitung	329
	g) Elektrische Relaxation	329
6.4.4	Elektrolyse	330
6.4.5	Elektrolytische Leitfähigkeit	332
6.4.6	Ionenwolken; elektrochemisches Potential	335

6.5 Galvanische Elemente	339
6.5.1 Ionengleichgewicht und Nernst-Gleichung	339
6.5.2 Auflösung von Metallionen	340
6.5.3 Galvanische Elemente	340
6.5.4 Galvanische Polarisierung	341
6.5.5 Polarisierung und Oberflächenspannung	343
6.6 Thermoelektrizität	343
6.6.1 Der Seebeck-Effekt	343
6.6.2 Peltier-Effekt und Thomson-Effekt	345
Aufgaben	346

7. Elektrodynamik

7

7.1	Ströme und Felder	353
7.1.1	Elektrostatik	353
7.1.2	Lorentz-Kraft und Magnetfeld	354
7.1.3	Kräfte auf Ströme im Magnetfeld	355
7.1.4	Der Hall-Effekt	356
7.1.5	Relativität der Felder	358
7.2	Erzeugung von Magnetfeldern	359
7.2.1	Das Feld des geraden Elektronenstrahles oder des geraden Drahtes	360
7.2.2	Der gerade Draht, relativistisch betrachtet	361
7.2.3	Allgemeine Eigenschaften des Magnetfeldes	362
7.2.4	Das Magnetfeld von Strömen	364
7.2.5	Vergleich mit dem elektrischen Feld; der Satz von Biot-Savart	367
7.2.6	Magnetostatik	369
7.2.7	Elektromagnete	371
7.2.8	Magnetische Spannung und Vektorpotential	372
7.2.9	Das Magnetfeld der Erde	373
7.3	Induktion	377
7.3.1	Faradays Induktionsversuche	377
7.3.2	Das Induktionsgesetz als Folge der Lorentz-Kraft	379
7.3.3	Die Richtung des induzierten Stromes (Lenz-Regel)	382
7.3.4	Wirbelströme	383
7.3.5	Induktivität	384
7.3.6	Ein- und Ausschalten von Gleichströmen	385
7.3.7	Energie und Energiedichte im Magnetfeld	386
7.3.8	Gegeninduktion	386
7.4	Magnetische Materialien	388
7.4.1	Magnetisierung	388
7.4.2	Diamagnetismus	390
7.4.3	Paramagnetismus	390
7.4.4	Ferromagnetismus	391
7.4.5	Der Einstein-de Haas-Effekt	393

7.4.6	Struktur der Ferromagnetika	393
7.4.7	Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	396
7.4.8	Ferro- und Antiferroelektrizität	396
7.5	Wechselströme	396
7.5.1	Erzeugung von Wechselströmen	397
7.5.2	Effektivwerte von Strom und Spannung	399
7.5.3	Wechselstromwiderstände	400
7.5.4	Zweipole, Ortskurven, Ersatzschaltbilder	403
7.5.5	Meßinstrumente für elektrische Größen	406
	a) Drehspulamperemeter	406
	b) Elektrodynamisches Meßwerk	406
	c) Induktionsmeßwerk (Ferraris-Zähler)	407
	d) Dreheisen- oder Weicheisen- Meßwerk	407
	e) Hitzdrahtamperemeter	408
	f) Voltmeter	408
	g) Saitengalvanometer	408
	h) Schleifenoszillograph	408
7.5.6	Drehstrom	409
7.5.7	Schwingkreise	411
7.5.8	Transformatoren	413
7.5.9	Das Betatron	416
7.5.10	Elektromotoren und Generatoren	418
	a) Motoren und ihre Kennlinien	418
	b) Gleichstrommotoren	419
	c) Der Drehstrom-Asynchronmotor (Induktionsmotor)	420
7.5.11	Skineffekt	422
7.6	Elektromagnetische Wellen	423
7.6.1	Der Verschiebungsstrom	423
7.6.2	Der physikalische Inhalt der Maxwell-Gleichungen	424
7.6.3	Ebene elektromagnetische Wellen	425
7.6.4	Energiedichte und Energieströmung	429
7.6.5	Der lineare Oszillator	429
7.6.6	Die Ausstrahlung des linearen Oszillators	431
7.6.7	Wellengleichung und Telegraphengleichung	433
	a) Hohe Frequenzen	434
	b) Kleine Frequenzen	434
7.6.8	Warum funkelt man mit Trägerwellen?	435
7.6.9	Drahtwellen	436
7.6.10	Hohlraumoszillatoren und Hohlleiter	437
Aufgaben		439

8. Freie Elektronen und Ionen

8

8.1	Erzeugung von freien Ladungsträgern	445
8.1.1	Glühemission (Richardson-Effekt)	445

8.1.2	Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt)	447
8.1.3	Feldemission	448
8.1.4	Sekundärelektronen	449
8.1.5	Ionisierung eines Gases	449
8.2	Bewegung freier Ladungsträger	450
8.2.1	Elektronen im homogenen elektrischen Feld	450
8.2.2	Elektronen im homogenen Magnetfeld	451
8.2.3	Oszilloskop und Fernsehröhre	453
8.2.4	Thomsons Parabelversuch; Massenspektroskopie	454
8.2.5	Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse	455
8.2.6	Die Elektronenröhre	456
8.2.7	Elektronenröhren als Verstärker	459
8.2.8	Schwingungserzeugung durch Rückkopplung	460
8.2.9	Erzeugung und Verstärkung höchsfrequenter Schwingungen	461
8.2.10	Teilchenfallen	462
8.3	Gasentladungen	463
8.3.1	Leitfähigkeit von Gasen	463
	a) Ionenkinetik	463
	b) Die Ionisationskammer	464
8.3.2	Stoßionisation	466
8.3.3	Einteilung der Gasentladungen	467
8.3.4	Glimmentladungen	468
8.3.5	Bogen und Funken	468
8.3.6	Gasentladungslampen	469
8.3.7	Kathoden-, Röntgen- und Kanalstrahlung	470
8.4	Plasmen	471
8.4.1	Der „vierte Aggregatzustand“	471
8.4.2	Plasmaschwingungen	473
8.4.3	Plasmen im Magnetfeld	474
8.4.4	Fusionsplasmen	476
Aufgaben		478

9. Geometrische Optik

9

9.1	Reflexion und Brechung	481
9.1.1	Lichtstrahlen	481
9.1.2	Reflexion	482
9.1.3	Brechung	485
9.1.4	Totalreflexion	485
9.1.5	Prismen	487
9.2	Optische Instrumente	488
9.2.1	Brechung an Kugelflächen	488
9.2.2	Dicke Linsen	491
9.2.3	Linsenfehler	492
9.2.4	Abbildungsmaßstab und Vergrößerung	493
9.2.5	Die Lupe	494
9.2.6	Das Mikroskop	494

9.2.7	Der Dia-Projektor	496	10.3.2	Dispersion	555
9.2.8	Das Fernrohr oder Teleskop	497	10.3.3	Atomistische Deutung der Dispersion	556
9.2.9	Das Auge	499	10.3.4	Deutung des Faraday-Effektes	559
9.3	Die Lichtgeschwindigkeit	500	10.3.5	Warum ist der Himmel blau?	560
9.3.1	Astronomische Methoden	500	10.4	Wellen und Teilchen	563
9.3.2	Laufzeitmessungen im Labor	501	10.4.1	Materiewellen	563
9.3.3	Resonatormethoden	502	10.4.2	Elektronenbeugung	564
9.3.4	Anwendungen	503	10.4.3	Elektronenbeugung an Lochblenden	565
9.3.5	Lichtgeschwindigkeit im Medium	503	10.4.4	Interferometrie mit Materiewellen	567
9.4	Matrizenoptik	504	10.4.5	Die Unschärferelation	567
9.5	Geometrische Elektronenoptik	505	Aufgaben	569	
9.5.1	Das Brechungsgesetz für Elektronen	505			
9.5.2	Elektrische Elektronenlinsen	506			
9.5.3	Magnetische Linsen	508			
9.5.4	Elektronenmikroskope	509			
Aufgaben	512				
10. Wellenoptik	10		11. Strahlungsfelder	11	
10.1 Interferenz und Beugung	517		11.1 Das Strahlungsfeld	573	
10.1.1	Kohärenz	518	11.1.1	Strahlungsgrößen	573
10.1.2	Die Grundkonstruktion der Interferenzoptik	519	11.1.2	Photometrische Größen	575
10.1.3	Gitter	521	11.1.3	Photometrie und Strahlungsmessung	575
10.1.4	Spalt- und Lochblende	523	11.2 Strahlungsgesetze	577	
10.1.5	Auflösungsvermögen optischer Geräte	524	11.2.1	Wärmestrahlung und thermisches Gleichgewicht	577
10.1.6	Auflösungsvermögen des Spektrographen	526	11.2.2	Das Spektrum der schwarzen Strahlung	579
10.1.7	Fraunhofer-Beugung	530	11.2.3	Plancks Strahlungsgesetz	580
10.1.8	Fresnel-Linsen	530	11.2.4	Lage des Emissionsmaximums; Wiensches Verschiebungsgesetz	582
10.1.9	Holographie	532	11.2.5	Gesamtemission des schwarzen Strahlers; Stefan-Boltzmann-Gesetz	583
10.1.10	Fresnel-Beugung	533	11.2.6	Der kosmische schwarze Strahler	584
10.1.11	Stehende Lichtwellen	534	11.2.7	Pyrometrie	585
10.1.12	Interferenzfarben	535	11.3 Die Welt der Farben	585	
10.1.13	Interferometrie	536	11.3.1	Farbe	586
10.2 Polarisation des Lichts	541		11.3.2	Infrarot und Ultraviolett	588
10.2.1	Lineare und elliptische Polarisation	541	11.3.3	Die Strahlung der Sonne	594
10.2.2	Polarisationsapparate	542	11.3.4	Warum sind die Blätter grün?	600
10.2.3	Polarisation durch Doppelbrechung	542	Aufgaben	603	
10.2.4	Polarisation durch Reflexion und Brechung	545			
10.2.5	Intensitätsverhältnisse bei Reflexion und Brechung	546			
10.2.6	Reflexminderung	548			
10.2.7	Interferenzen im parallelen linear polarisierten Licht	549			
10.2.8	Interferenzen im konvergenten polarisierten Licht	551			
10.2.9	Drehung der Polarisationssebene	551			
10.2.10	Der elektrooptische Effekt (Kerr-Effekt)	553			
10.3 Absorption, Dispersion und Streuung des Lichts	553		12. Photonen, Atome und Quantenmechanik	12	
10.3.1	Absorption	554	12.1 Das Photon	607	
			12.1.1	Entdeckung des Photons	608
			12.1.2	Masse und Impuls der Photonen; Strahlungsdruck	608
			12.1.3	Stoß von Photonen und Elektronen; Compton-Effekt	610
			12.1.4	Rückstoß bei der γ -Emission; Mößbauer-Effekt	611
			12.2 Emission und Absorption von Licht	612	
			12.2.1	Spektren	613
			12.2.2	Linienverbreiterung	614
			12.2.3	Fluoreszenz	615
			12.2.4	Phosphoreszenz	616
			12.2.5	Der Versuch von Franck und Hertz	617

12.2.6	Die Energiestufen der Atome	617
12.2.7	Anregung und Ionisierung	618
12.2.8	Raman-Effekt	620
12.3	Das Bohrsche Atommodell	621
12.3.1	Das Versagen der klassischen Physik vor dem Atom	621
12.3.2	Bohrs Postulate	622
12.3.3	Das Wasserstoffspektrum	623
12.3.4	Das Wasserstoffatom nach Bohr	624
12.3.5	Die Spektren anderer Atome	626
12.3.6	Die Bohr-Sommerfeld- Quantenbedingungen	627
12.3.7	Das Korrespondenzprinzip	628
12.4	Atome in magnetischen und elektrischen Feldern	629
12.4.1	Drehimpulsquantelung	629
12.4.2	Atom- und Kernmomente	630
12.4.3	Der Stern-Gerlach-Versuch	632
12.4.4	Zeeman-Aufspaltung und Larmor-Präzession	632
12.4.5	Spinresonanz	633
12.4.6	Kernspinmessung an freien Atomen	634
12.4.7	Kernspinresonanz in kompakter Materie	634
12.4.8	Einfluß der Umgebung bei der Spinresonanz	635
12.4.9	Zeeman-Effekt	637
12.4.10	Stark-Effekt	638
12.5	Grundzüge der Quantenmechanik	638
12.5.1	Einleitung: Mathematisches Handwerkszeug	638
12.5.2	Vektoren und Funktionen	639
12.5.3	Matrizen und Operatoren	640
12.5.4	Eigenfunktionen und Eigenwerte	641
12.5.5	Zustandsgrößen der Quantenmechanik	642
12.5.6	Die Unbestimmtheitsrelation	645
12.5.7	Der Energieoperator (Hamilton-Operator)	647
12.5.8	Die Schrödinger-Gleichung	650
12.6	Teilchen in Potentialtöpfen	651
12.6.1	Stationäre Zustände	652
12.6.2	Der Tunneleffekt	654
12.6.3	Der Knotensatz	656
12.6.4	Das Wasserstoffatom	657
Aufgaben		661

13. Laserphysik

13

13.1	Laserprozesse	669
13.1.1	Wie strahlen die Atome?	669
13.1.2	Energieaustausch von Licht und Materie	671
13.1.3	Inversion und Verstärkung	672
13.1.4	Verstärkung und Verluste im Laser	673

13.1.5	Laserschwelle und gesättigte Verstärkung	674
13.1.6	Laserbetrieb mit drei und vier Niveaus	674
13.2	Laserstrahlen	675
13.2.1	Gaußstrahlen	675
13.2.2	Optische Resonatoren	677
13.2.3	Laserleistung	678
13.3	Laser, Typen und Eigenschaften	679
13.3.1	Helium-Neon-Laser und Gaslaser	679
13.3.2	Neodym-Laser und Festkörperlaser	681
13.3.3	Diodenlaser	683
13.3.4	Durchstimbare Laser	684
13.4	Kurzzeitlaser	685
13.4.1	Güteschaltung	685
13.4.2	Modenkopplung	686
13.4.3	Das Femtosekunden-Stroboskop	689
13.4.4	Höchstleistungslaser	689
Aufgaben		690

14. Die Elemente und die Chemie

14

14.1	Systematik des Atombaus	693
14.1.1	Das Periodensystem der Elemente	693
14.1.2	Quantenzahlen	696
14.1.3	Bauprinzipien der Elektronenhülle	697
14.1.4	Atome mit mehreren Elektronen in der Quantenmechanik	697
14.1.5	Die effektive Kernladung	699
14.1.6	Deutung des Periodensystems	699
14.1.7	Jenseits des Periodensystems	701
14.2	Röntgenstrahlung	702
14.2.1	Erzeugung und Nachweis	702
14.2.2	Röntgenbeugung	703
14.2.3	Röntgenoptik	707
14.2.4	Bremsstrahlung	708
14.2.5	Charakteristische Strahlung	709
14.2.6	Röntgenabsorption	711
14.3	Moleküle	715
14.3.1	Die Energiestufen der Moleküle	715
14.3.2	Rotationsbanden	716
14.3.3	Das Rotations-Schwingungs- Spektrum	717
14.3.4	Die Potentialkurve des Moleküls	718
14.3.5	Molekulare Quantenzustände	720
14.3.6	Quantenchemie	721
Aufgaben		726

15. Festkörperphysik

15

15.1	Kristallgitter	730
15.1.1	Dichteste Kugelpackungen	731
15.1.2	Gittergeometrie	735
15.1.3	Kristallstrukturanalyse	737

15.1.4	Gitterenergie	741	16.3.2	Nachweis schneller Teilchen	840
15.1.5	Kristallbindung	746	a)	Ionisationskammer	840
15.1.6	Einiges über Eis	749	und	Halbleiterzähler	841
15.1.7	Kristallwachstum	753	b)	Nebel- und Blaskammer	842
15.1.8	Fullerene	755	c)	Funkenkammer	842
15.2	Gitterschwingungen	756	d)	Zählrohr	843
15.2.1	Spezifische Wärmekapazität	757	e)	Scintillationszähler	843
15.2.2	Gitterdynamik	761	f)	Tscherenkow-Zähler	844
15.2.3	Optik der Ionenkristalle	764	g)	Kernspur-Platten	844
15.2.4	Phononen	766	h)	Drahtkammer	844
15.2.5	Wärmeleitung in Isolatoren	767	16.3.3	Teilchenbeschleuniger	845
15.3	Metalle	768	16.3.4	Strahlendosis und Strahlenwirkung	849
15.3.1	Das klassische Elektronengas	769	16.4	Elementarteilchen	852
15.3.2	Das Fermi-Gas	771	16.4.1	Historischer Überblick	852
15.3.3	Metalloptik	773	16.4.2	Wie findet man neue Teilchen?	854
15.3.4	Elektrische und Wärmeleitung	775	16.4.3	Myonen und Pionen	858
15.3.5	Energiebänder	777	16.4.4	Neutron und Neutrinos	859
15.3.6	Elektronen und Löcher	779	16.4.5	Wechselwirkungen	862
15.4	Halbleiter	781	16.4.6	Elektromagnetische Wechselwirkung	866
15.4.1	Reine Halbleiter	781	16.4.7	Die innere Struktur der Nukleonen	868
15.4.2	Gestörte Halbleiter	784	16.4.8	Das Quarkmodell	869
15.4.3	Halbleiter-Elektronik	787	16.4.9	Quantenchromodynamik	873
15.4.4	Amorphe Halbleiter	790	16.4.10	Symmetrien, Invarianzen,	876
15.5	Gitterfehler	791	Erhaltungssätze	879	
15.5.1	Idealkristall und Realkristall	792	16.4.11	Magnetische Monopole	880
15.5.2	Thermische Fehlordnung	792	16.5	Kosmische Strahlung	880
15.5.3	Chemische Fehlordnung	794	16.5.1	Ursprung und Nachweis	881
15.5.4	Versetzungen	795	16.5.2	Wechselwirkung mit Materie	882
15.6	Makromolekulare Festkörper	798	16.5.3	Strahlungsgürtel	885
15.6.1	Definition	798	Aufgaben		885
und	allgemeine Eigenschaften	798			
15.6.2	Länge eines linearen Makromoleküls	799			
15.6.3	Gummielastizität	801			
15.6.4	Hochpolymere	802			
15.7	Supraleitung	803			
Aufgaben		809			
16. Kerne und Elementarteilchen	16		17. Relativitätstheorie	17	
16.1	Der innere Aufbau der Atome	815	17.1	Bezugssysteme	895
16.1.1	Das leere Atom	815	17.1.1	Gibt es „absolute Ruhe“?	895
16.1.2	Die Entdeckung des Atomkerns	816	17.1.2	Der Michelson-Versuch	896
16.1.3	Kernbausteine und Kernkräfte	820	17.1.3	Das Relativitätsprinzip	898
16.1.4	Massendefekt, Isotopie	821	17.1.4	Punkt ereignisse	898
und	Massenspektroskopie	821	17.1.5	Rückdatierung	899
16.1.5	Kernmodelle	823	17.2	Relativistische Mechanik	900
16.1.6	Kernspaltung	825	17.2.1	Relativität der Gleichzeitigkeit	900
16.1.7	Kernfusion	827	17.2.2	Maßstabsvergleich	901
16.2	Radioaktivität	831	17.2.3	Uhrenvergleich	902
16.2.1	Elementumwandlung	831	17.2.4	Addition von Geschwindigkeiten	904
16.2.2	Zerfallsenergie	834	17.2.5	Messung von Beschleunigungen	905
16.2.3	Das Zerfallsgesetz	836	17.2.6	Die bewegte Masse	906
16.3	Schnelle Teilchen	838	17.2.7	Die Masse-Energie-Äquivalenz	907
16.3.1	Durchgang schneller Teilchen	838	17.2.8	Flugplan einer Interstellarrakete	909
durch	Materie	838	17.2.9	Antriebsprobleme der Photonenrakete	912
			17.3	Relativistische Physik	913
			17.3.1	Die Lorentz-Transformation	913
			17.3.2	Die Struktur der Raumzeit	915
			17.3.3	Relativistische Elektrodynamik	915
			17.3.4	Materiewellen	917
			17.3.5	Speicherringe	919
			und	Teilchenstrahlwaffen	919

17.4 Gravitation und Kosmologie	921	19.2 Nichtlineare Schwingungen	995
17.4.1 Allgemeine Relativität	921	19.2.1 Pendel mit großer Amplitude	995
17.4.2 Einsteins Gravitationstheorie	922	19.2.2 Erzwungene Schwingungen mit nichtlinearer Rückstellkraft	996
17.4.3 Gravitationswellen	926	19.2.3 Selbsterregte Schwingungen	998
17.4.4 Schwarze Löcher	928	19.2.4 Parametrische Schwingungserregung	1002
17.4.5 Kosmologische Modelle	929	19.3 Biologische und chemische Systeme	1003
17.4.6 Die kosmologische Kraft	932	19.3.1 Populationsdynamik	1003
17.4.7 Gab es einen Urknall?	933	19.3.2 Einfache ökologische Modelle	1008
17.4.8 Das Geheimnis der dunklen Massen	936	19.3.3 Kinetische Probleme	1011
Aufgaben	937	19.4 Chaos und Ordnung	1015
18. Statistische Physik	18	19.4.1 Einfache Wege ins Chaos	1015
18.1 Statistik der Ensembles	947	19.4.2 Chaos und Fraktale	1017
18.1.1 Zufallstexte	947	19.4.3 Iteratives Gleichungslösen	1022
18.1.2 Wahrscheinlichkeit einer Komposition	948	19.4.4 Chaos im Kochtopf	1023
18.1.3 Die wahrscheinlichste Komposition	950	Aufgaben	1027
18.1.4 Schwankungserscheinungen	952	Lösungen zu den Aufgaben	=
18.1.5 Die kanonische Verteilung	953	Kapitel 1	1033
18.1.6 Beispiel: „Harmonischer Oszillator“	956	Kapitel 2	1052
18.1.7 Mischungsentropie	957	Kapitel 3	1058
18.1.8 Das kanonische Ensemble (Ensemble von Gibbs)	958	Kapitel 4	1067
18.1.9 Arbeit und Wärme	959	Kapitel 5	1076
18.2 Physikalische Ensembles	960	Kapitel 6	1097
18.2.1 Physikalische Deutung	960	Kapitel 7	1107
18.2.2 Zustandsänderungen	960	Kapitel 8	1119
18.2.3 Verteilungsmodul und Temperatur	961	Kapitel 9	1126
18.2.4 Wahrscheinlichkeit und Entropie	962	Kapitel 10	1135
18.2.5 Die freie Energie; Gleichgewichtsbedingungen	962	Kapitel 11	1142
18.2.6 Statistische Gewichte	964	Kapitel 12	1150
18.2.7 Der Phasenraum	965	Kapitel 13	1165
18.2.8 Das ideale Gas	966	Kapitel 14	1167
18.2.9 Absolute Reaktionsraten	968	Kapitel 15	1173
18.3 Quantenstatistik	969	Kapitel 16	1183
18.3.1 Abzählung von Quantenteilchen	969	Kapitel 17	1205
18.3.2 Fermi-Dirac- und Bose-Einstein- Statistik	970	Kapitel 18	1219
18.3.3 Das Fermi-Gas	973	Kapitel 19	1226
18.3.4 Stoßvorgänge bei höchsten Energien	976	Farbtafeln	■
18.3.5 Extreme Zustände der Materie	978	1–10	1241
18.3.6 Biographie eines Schwarzen Loches	979	Quellennachweis	■
Aufgaben	981	für die Einleitungs- und Ausblickabbildungen	1257
19. Nichtlineare Dynamik	19	Sach- und Namenverzeichnis	■
19.1 Stabilität	988	A–Z	1259
19.1.1 Dynamische Systeme	988		
19.1.2 Stabilität von Fixpunkten	990		
19.1.3 Der Phasenraum deterministischer Systeme	992		