

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
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
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	4.3.7	Stoßwellen	179
3.1.3	Druck	95	4.4	Eigenschwingungen	181
3.1.4	Der Schweredruck	96	4.4.1	Gekoppelte Pendel	181
3.1.5	Gasdruck	98	4.4.2	Wellen im Kristallgitter; die Klein-Gordon-Gleichung	182
3.1.6	Der Atmosphärendruck	99	4.4.3	Stehende elastische Wellen	184
3.2	Oberflächenspannung	100	4.4.4	Eigenschwingungen von Platten, Membranen und Hohlräumen	186
3.3	Strömungen	104	4.4.5	Entartung	188
3.3.1	Beschreibung von Strömungen	104	4.5	Schallwellen	189
3.3.2	Innere Reibung	109	4.5.1	Schallmessungen	189
3.3.3	Die laminare Strömung	110	4.5.2	Töne und Klänge	191
3.3.4	Bewegungsgleichung einer Flüssigkeit	115	4.5.3	Lautstärke	193
3.3.5	Kriterien für die verschiedenen Strömungstypen	116	4.5.4	Das Ohr	194
3.3.6	Strömung idealer Flüssigkeiten	118	4.5.5	Ultraschall und Hyperschall	196
3.3.7	Der hydrodynamische Impulssatz ..	121	4.6	Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten	197
3.3.8	Strömungswiderstand	123	Aufgaben	202	
3.3.9	Wirbel	125			
3.3.10	Turbulenz	128	5. Wärme	5	
3.4	Der deformierbare Festkörper	130	5.1	Wärmeenergie und Temperatur	207
3.4.1	Dehnung und Kompression	130	5.1.1	Was ist Wärme?	207
3.4.2	Scherung	131	5.1.2	Temperatur	208
3.4.3	Zusammenhang zwischen E -Modul und G -Modul	132	5.1.3	Thermometer	210
3.4.4	Anelastisches Verhalten	132	5.1.4	Freiheitsgrade	211
3.4.5	Elastische Energie	134	5.1.5	Wärmekapazität	212
3.4.6	Wie biegen sich die Balken?	134	5.1.6	Kalorimeter	214
3.4.7	Knickung	135	5.2	Kinetische Gastheorie	214
3.4.8	Härte	135	5.2.1	Der Gasdruck	214
Aufgaben	136		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
4. Schwingungen und Wellen	4		5.3	Wärmekraftmaschinen	227
4.1	Schwingungen	141	5.3.1	Thermische Energiewandler	227
4.1.1	Überlagerung von Schwingungen ..	142	5.3.2	Arbeitsdiagramme	229
4.1.2	Gedämpfte Schwingungen	150	5.3.3	Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern ..	229
4.1.3	Erzwungene Sinusschwingungen ...	154	5.4	Wärmeleitung und Diffusion	232
4.1.4	Amplituden- und Phasenmodulation	158	5.4.1	Mechanismen des Wärmetransportes	232
4.2	Wellen	160	5.4.2	Die Gesetze der Wärmeleitung	232
4.2.1	Beschreibung von Wellen	160	5.4.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang	236
4.2.2	Die Wellengleichung	161	5.4.4	Wärmetransport durch Konvektion .	237
4.2.3	Elastische Wellen	162	5.4.5	Diffusion in Gasen und Lösungen ..	237
4.2.4	Überlagerung von Wellen	164			
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			

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 261

5.6.1 Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf 261

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 275

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

6.2.2 Dielektrizitätskonstante 311

6.2.3 Mechanismen der dielektrischen Polarisierung 313

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

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

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 342

6.6 Thermoelektrizität 343

6.6.1 Der Seebeck-Effekt 343

6.6.2 Peltier-Effekt und Thomson-Effekt 345

Aufgaben 346

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

6.1.5 Kapazität 305

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

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 Elektronenstrahls 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	Bezeichnungen elektromagnetischer Felder	364	7.7.3	Ebene elektromagnetische Wellen ..	425
7.3	Das Magnetfeld von Strömen	364	7.7.4	Energiedichte und Energieströmung	429
7.3.1	Vergleich mit dem elektrischen Feld; der Satz von Biot-Savart	367	7.7.5	Der lineare Oszillator	429
7.3.2	Magnetostatik	369	7.7.6	Die Ausstrahlung des linearen Oszillators	431
7.3.3	Elektromagnete	371	7.7.7	Wellengleichung und Telegraphengleichung	433
7.3.4	Magnetische Spannung und Vektorpotential	372	7.7.8	Warum funkt man mit Trägerwellen?	435
7.3.5	Das Magnetfeld der Erde	373	7.7.9	Drahtwellen	436
7.4	Induktion	377	7.7.10	Hohlraumoszillatoren und Hohlleiter	437
7.4.1	Faradays Induktionsversuche	377	Aufgaben		439
7.4.2	Das Induktionsgesetz als Folge der Lorentz-Kraft	379			
7.4.3	Die Richtung des induzierten Stromes (Lenz-Regel)	382	8. Freie Elektronen und Ionen		8
7.4.4	Wirbelströme	383	8.1 Erzeugung von freien Ladungsträgern	445	
7.4.5	Induktivität	384	8.1.1	Glühemission (Richardson-Effekt) .	445
7.4.6	Ein- und Ausschalten von Gleichströmen	385	8.1.2	Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt)	447
7.4.7	Energie und Energiedichte im Magnetfeld	386	8.1.3	Feldemission	448
7.4.8	Gegeninduktion	386	8.1.4	Sekundärelektronen	449
7.5	Magnetische Materialien	388	8.1.5	Ionisierung eines Gases	449
7.5.1	Magnetisierung	388	8.2 Bewegung freier Ladungsträger	450	
7.5.2	Diamagnetismus	390	8.2.1	Elektronen im homogenen elektrischen Feld ...	450
7.5.3	Paramagnetismus	390	8.2.2	Elektronen im homogenen Magnetfeld	451
7.5.4	Ferromagnetismus	391	8.2.3	Oszilloskop und Fernsehöhre	453
7.5.5	Der Einstein-de Haas-Effekt	393	8.2.4	Thomsons Parabelversuch; Massenspektroskopie	454
7.5.6	Struktur der Ferromagnetika	393	8.2.5	Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse	455
7.5.7	Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	396	8.2.6	Die Elektronenröhre	456
7.5.8	Ferro- und Antiferroelektrizität	396	8.2.7	Elektronenröhren als Verstärker	459
7.6	Wechselströme	396	8.2.8	Schwingungserzeugung durch Rückkopplung	460
7.6.1	Erzeugung von Wechselströmen	397	8.2.9	Erzeugung und Verstärkung höchsfrequenter Schwingungen	461
7.6.2	Effektivwerte von Strom und Spannung	399	8.2.10	Teilchenfallen	462
7.6.3	Wechselstromwiderstände	400	8.3 Gasentladungen	463	
7.6.4	Zweipole, Ortskurven, Ersatzschaltbilder	403	8.3.1	Leitfähigkeit von Gasen	463
7.6.5	Messinstrumente für elektrische Größen	406	8.3.2	Stoßionisation	466
7.6.6	Drehstrom	409	8.3.3	Einteilung der Gasentladungen	467
7.6.7	Schwingkreise	411	8.3.4	Glimmentladungen	468
7.6.8	Transformatoren	413	8.3.5	Bogen und Funken	468
7.6.9	Das Betatron	416	8.3.6	Gasentladungslampen	469
7.6.10	Elektromotoren und Generatoren ...	418	8.3.7	Kathoden-, Röntgen- und Kanalstrahlung	470
7.6.11	Skineffekt	422	8.4 Plasmen	471	
7.7	Elektromagnetische Wellen	423	8.4.1	Der „vierte Aggregatzustand“	471
7.7.1	Der Verschiebungsstrom	423	8.4.2	Plasmaschwingungen	473
7.7.2	Der physikalische Inhalt der Maxwell-Gleichungen	424			

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
 9.2.8 Das Fernrohr oder Teleskop 497
 9.2.9 Das Auge 499
9.3 Die Lichtgeschwindigkeit 500
 9.3.1 Astronomische Methoden 500
 9.3.2 Laufzeitmessungen im Labor 501
 9.3.3 Resonatormethoden 502
 9.3.4 Anwendungen 503
 9.3.5 Lichtgeschwindigkeit im Medium .. 503
9.4 Matrizenoptik 504
9.5 Geometrische Elektronenoptik 505
 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

10.1 Interferenz und Beugung 517
 10.1.1 Kohärenz 518
 10.1.2 Die Grundkonstruktion
 der Interferenzoptik 519
 10.1.3 Gitter 521
 10.1.4 Spalt- und Lochblende 523
 10.1.5 Auflösungsvermögen
 optischer Geräte 524
 10.1.6 Auflösungsvermögen
 des Spektrographen 526
 10.1.7 Fraunhofer-Beugung 530

10.1.8 Fresnel-Linsen 530
 10.1.9 Holographie 532
 10.1.10 Fresnel-Beugung 533
 10.1.11 Stehende Lichtwellen 534
 10.1.12 Interferenzfarben 535
 10.1.13 Interferometrie 536
10.2 Polarisation des Lichts 541
 10.2.1 Lineare und elliptische Polarisation 541
 10.2.2 Polarisationsapparate 542
 10.2.3 Polarisation durch Doppelbrechung 542
 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 Polarisationsebene 551
 10.2.10 Der elektrooptische Effekt
 (Kerr-Effekt) 553
**10.3 Absorption, Dispersion und Streuung
 des Lichts** 553
 10.3.1 Absorption 554
 10.3.2 Dispersion 555
 10.3.3 Atomistische Deutung
 der Dispersion 556
 10.3.4 Deutung des Faraday-Effektes 559
 10.3.5 Warum ist der Himmel blau? 560
Aufgaben 564

11. Strahlungsfelder 11

11.1 Das Strahlungsfeld 567
 11.1.1 Strahlungsgrößen 567
 11.1.2 Photometrische Größen 569
 11.1.3 Photometrie
 und Strahlungsmessung 569
11.2 Strahlungsgesetze 571
 11.2.1 Wärmestrahlung
 und thermisches Gleichgewicht 571
 11.2.2 Das Spektrum
 der schwarzen Strahlung 573
 11.2.3 Plancks Strahlungsgesetz 574
 11.2.4 Lage des Emissionsmaximums;
 Wiensches Verschiebungsgesetz 576
 11.2.5 Gesamtemission des schwarzen
 Strahlers; Stefan-Boltzmann-Gesetz 577
 11.2.6 Der kosmische schwarze Strahler ... 578
 11.2.7 Pyrometrie 579

11.3 Die Welt der Farben	580	12.7.4 Der Knotensatz	650
11.3.1 Farbe	580	Aufgaben	652
11.3.2 Infrarot und Ultraviolett	582		
11.3.3 Die Strahlung der Sonne	588		
11.3.4 Warum sind die Blätter grün?	594	13. Physik der Atome und ihre Anwendungen 13	
Aufgaben	597		
12. Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik 12		13.1 Quantenphysik und Atome	658
12.1 Das Photon	604	13.1.1 Bohr-Sommerfeld-Modelle	
12.1.1 Entdeckung des Photons	604	des Atoms	658
12.1.2 Masse und Impuls der Photonen;		13.1.2 Quanten-Fluktuationen	
Strahlungsdruck	605	stabilisieren die Atome	659
12.1.3 Stoß von Photonen und Elektronen;		13.1.3 Atomare Einheiten	
Compton-Effekt	606	und Feinstrukturkonstante α	660
12.1.4 Rückstoß bei der γ -Emission;		13.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger ..	661
Mößbauer-Effekt	607	13.2.1 Das Kepler-Problem	
12.2 Wellen und Teilchen	609	im Coulombfeld	661
12.2.1 Materiewellen	609	13.2.2 Schrödinger-Gleichung	
12.2.2 Elektronenbeugung	610	für das Wasserstoffatom	662
12.2.3 Elektronenbeugung an Lochblenden	611	13.2.3 Quantenzahlen, Spektrum	
12.2.4 Selbstinterferenz von Atomen	613	und Energiediagramm	667
12.2.5 Interferometrie mit Materiewellen ..	615	13.2.4 Aufhebung der l -Entartung:	
12.2.6 Die Unbestimmtheitsrelation	616	Einelektronenatome	669
12.3 Spektren	617	13.3 Magnetismus von Atomen	670
12.3.1 Emission und Absorption von Licht	617	13.3.1 Stern-Gerlach-Experiment	670
12.3.2 Linienverbreiterung	618	13.3.2 Magnetisches Moment eines Atoms	670
12.3.3 Fluoreszenz	620	13.3.3 Präzession im Magnetfeld	671
12.3.4 Phosphoreszenz	621	13.3.4 Spektrum im Magnetfeld,	
12.3.5 Raman-Effekt	621	der normale Zeeman-Effekt	671
12.4 Der Versuch von Franck und Hertz	622	13.4 Elektronenspin und Feinstruktur	673
12.4.1 Die Energiestufen der Atome	623	13.4.1 Magnetische Spin-Bahn-Kopplung .	674
12.4.2 Anregung und Ionisierung	624	13.4.2 Gesamtdrehimpuls	675
12.5 Die Entdeckung des Atomkerns	625	13.4.3 Feinstruktur	
12.5.1 Das leere Atom	626	im Einelektronen-Atom	676
12.5.2 Das Experiment von Rutherford	627	13.4.4 Zeeman-Effekt	
12.6 Grundzüge der Quantenmechanik	630	von Einelektronen-Atomen	678
12.6.1 Einleitung:		13.4.5 Stark-Effekt	681
Mathematisches Handwerkszeug ...	630	13.5 Atome mit zwei Elektronen	681
12.6.2 Vektoren und Funktionen	631	13.5.1 Das Helium-Atom	681
12.6.3 Matrizen und Operatoren	631	13.5.2 Der Grundzustand	
12.6.4 Eigenfunktionen und Eigenwerte ...	632	des Helium-Atoms	683
12.6.5 Zustandsgrößen		13.5.3 Angeregte Zustände	
der Quantenmechanik	634	des Helium-Atoms	684
12.6.6 Die Unbestimmtheitsrelation	637	13.5.4 Drehimpulse im Helium-Atom	685
12.6.7 Der Energieoperator		13.5.5 Andere Zweielektronen-Atome	686
(Hamilton-Operator)	639	13.6 Wie strahlen die Atome?	687
12.6.8 Die Schrödinger-Gleichung	642	13.6.1 Atomare Antennen	687
12.7 Teilchen in Potentialtöpfen	643	13.6.2 Quantentheorie	
12.7.1 Stationäre Zustände	643	der atomaren Strahlung	691
12.7.2 Der Tunneleffekt	646	13.6.3 Absorption und Emission	695
12.7.3 Harmonisch gebundene Teilchen ...	648	13.6.4 Strahlungsverschiebungen	700
		13.7 Lichtkräfte	703
		13.7.1 Strahlungsdruck	703
		13.7.2 Optische Dipolkräfte	704

13.7.3	Laserkühlung	704	14.3.3	Diodenlaser	763
13.8	Atomoptik	706	14.3.4	Durchstimmbare Laser	764
13.8.1	Atomare Beugung	708	14.4	Kurzzeitlaser	765
13.8.2	Atominterferometer	709	14.4.1	Güteschaltung	765
13.9	Der Einfluss der Atomkerne	710	14.4.2	Modenkopplung	766
13.9.1	Isotopieverschiebungen	710	14.4.3	Das Femtosekunden-Stroboskop	769
13.9.2	Kernmagnetismus und Hyperfeinstruktur	712	14.4.4	Höchstleistungslaser	770
13.9.3	Magnetische Resonanz	715	Aufgaben	771
13.9.4	Magnetische Resonanz in Chemie und Medizin	720	15. Die Elemente und die Chemie		15
13.9.5	Rabi-Atomstrahlresonanz	722	15.1	Systematik des Atombaus	773
13.9.6	Ramseys Methode der getrennten oszillierenden Felder	724	15.1.1	Das Periodensystem der Elemente .	773
13.9.7	Atomuhren, atomare Springbrunnen und GPS	726	15.1.2	Quantenzahlen	776
13.9.8	Optisches Pumpen und Magnetometer	729	15.1.3	Bauprinzipien der Elektronenhülle .	777
13.10	Kräfte zwischen Atomen	730	15.1.4	Atome mit mehreren Elektronen in der Quantenmechanik	777
13.10.1	Van der Waals-Kräfte	730	15.1.5	Die effektive Kernladung	779
13.10.2	Atomare Stöße	731	15.1.6	Deutung des Periodensystems	779
13.10.3	Streuung ununterscheidbarer Teilchen	733	15.1.7	Jenseits des Periodensystems	781
13.11	Quantenmaterie	734	15.2	Röntgenstrahlung	782
13.11.1	Bose-Einstein-Kondensation	736	15.2.1	Erzeugung und Nachweis	782
13.11.2	Atomare Bose-Kondensate	737	15.2.2	Röntgenbeugung	783
13.11.3	Einteilchen- und Vielteilchen-Quantenzustände .	739	15.2.3	Röntgenoptik	787
13.11.4	Materiewellen	740	15.2.4	Bremsstrahlung	788
13.11.5	Suprafluidität und Vortizes	741	15.2.5	Charakteristische Strahlung	789
13.11.6	Atomare Fermi-Gase	744	15.2.6	Röntgenabsorption	791
Aufgaben	746	15.3	Moleküle	795
14. Laserphysik		14	15.3.1	Die Energiestufen der Moleküle	795
14.1	Laserprozesse	749	15.3.2	Rotationsbanden	796
14.1.1	Wie strahlen die Atome?	749	15.3.3	Das Rotations-Schwingungs- Spektrum	797
14.1.2	Energieaustausch von Licht und Materie	751	15.3.4	Die Potentialkurve des Moleküls ...	798
14.1.3	Inversion und Verstärkung	752	15.3.5	Molekulare Quantenzustände	800
14.1.4	Verstärkung und Verluste im Laser .	753	15.3.6	Quantenchemie	801
14.1.5	Laserschwelle und gesättigte Verstärkung	754	Aufgaben	806
14.1.6	Laserbetrieb mit drei und vier Niveaus	754	16. Festkörperphysik		16
14.2	Laserstrahlen	755	16.1	Kristallgitter	810
14.2.1	Gaußstrahlen	755	16.1.1	Dichteste Kugelpackungen	811
14.2.2	Optische Resonatoren	757	16.1.2	Gittergeometrie	815
14.2.3	Laserleistung	758	16.1.3	Kristallstrukturanalyse	817
14.3	Laser, Typen und Eigenschaften	759	16.1.4	Gitterenergie	821
14.3.1	Helium-Neon-Laser und Gaslaser ..	759	16.1.5	Kristallbindung	826
14.3.2	Neodym-Laser und Festkörperlaser	761	16.1.6	Einiges über Eis	829
			16.1.7	Kristallwachstum	833
			16.1.8	Fullerene	835

16.2 Gitterschwingungen 836

16.2.1 Spezifische Wärmekapazität 837

16.2.2 Gitterdynamik 841

16.2.3 Optik der Ionenkristalle 844

16.2.4 Phononen 846

16.2.5 Wärmeleitung in Isolatoren 847

16.3 Metalle 848

16.3.1 Das klassische Elektronengas 849

16.3.2 Das Fermi-Gas 851

16.3.3 Metalloptik 853

16.3.4 Elektrische und Wärmeleitung 855

16.3.5 Energiebänder 857

16.3.6 Elektronen und Löcher 859

16.4 Halbleiter 861

16.4.1 Reine Halbleiter 861

16.4.2 Gestörte Halbleiter 864

16.4.3 Halbleiter-Elektronik 867

16.4.4 Amorphe Halbleiter 870

16.5 Gitterfehler 871

16.5.1 Idealkristall und Realkristall 872

16.5.2 Thermische Fehlordnung 872

16.5.3 Chemische Fehlordnung 874

16.5.4 Versetzungen 875

16.6 Makromolekulare Festkörper 878

16.6.1 Definition
und allgemeine Eigenschaften 878

16.6.2 Länge
eines linearen Makromoleküls 879

16.6.3 Gummielastizität 881

16.6.4 Hochpolymere 882

16.7 Supraleitung 883

Aufgaben 889

17. Kerne und Elementarteilchen 17

17.1 Kernbausteine 895

17.1.1 Kernbausteine und Kernkräfte 895

17.1.2 Massendefekt, Isotopie
und Massenspektroskopie 897

17.1.3 Kernmodelle 899

17.1.4 Kernspaltung 902

17.1.5 Kernfusion 903

17.2 Radioaktivität 907

17.2.1 Elementumwandlung 907

17.2.2 Zerfallsenergie 910

17.2.3 Das Zerfallsgesetz 912

17.3 Schnelle Teilchen 914

17.3.1 Durchgang schneller Teilchen
durch Materie 915

17.3.2 Nachweis schneller Teilchen 916

17.3.3 Teilchenbeschleuniger 921

17.3.4 Strahlendosis und Strahlenwirkung 925

17.4 Elementarteilchen 928

17.4.1 Historischer Überblick 928

17.4.2 Wie findet man neue Teilchen? 930

17.4.3 Myonen und Pionen 934

17.4.4 Neutron und Neutrinos 935

17.4.5 Wechselwirkungen 938

17.4.6 Elektromagnetische
Wechselwirkung 942

17.4.7 Die innere Struktur der Nukleonen 944

17.4.8 Das Quarkmodell 945

17.4.9 Quantenchromodynamik 949

17.4.10 Symmetrien, Invarianzen,
Erhaltungssätze 952

17.4.11 Magnetische Monopole 955

17.5 Kosmische Strahlung 956

17.5.1 Ursprung und Nachweis 956

17.5.2 Wechselwirkung mit Materie 957

17.5.3 Strahlungsgürtel 958

Aufgaben 961

18. Relativitätstheorie 18

18.1 Bezugssysteme 971

18.1.1 Gibt es „absolute Ruhe“? 971

18.1.2 Der Michelson-Versuch 972

18.1.3 Das Relativitätsprinzip 974

18.1.4 Punktereignisse 974

18.1.5 Rückdatierung 975

18.2 Relativistische Mechanik 976

18.2.1 Relativität der Gleichzeitigkeit 976

18.2.2 Maßstabsvergleich 977

18.2.3 Uhrenvergleich 978

18.2.4 Addition von Geschwindigkeiten ... 980

18.2.5 Messung von Beschleunigungen ... 981

18.2.6 Die bewegte Masse 982

18.2.7 Die Masse-Energie-Äquivalenz 983

18.2.8 Flugplan einer Interstellarrakete ... 985

18.2.9 Antriebsprobleme
der Photonenrakete 988

18.3 Relativistische Physik 989

18.3.1 Die Lorentz-Transformation 989

18.3.2 Die Struktur der Raumzeit 991

18.3.3 Relativistische Elektrodynamik 991

18.3.4 Materiewellen 993

18.3.5 Speicherringe
und Teilchenstrahlwaffen 995

18.4 Gravitation und Kosmologie 997

18.4.1 Allgemeine Relativität 997

18.4.2 Einsteins Gravitationstheorie 998

18.4.3 Gravitationswellen 1002

18.4.4 Schwarze Löcher 1004

18.4.5 Kosmologische Modelle 1005

18.4.6 Die kosmologische Kraft 1008
 18.4.7 Gab es einen Urknall? 1009
 18.4.8 Das Geheimnis der dunklen Massen 1012
Aufgaben 1013

19. Statistische Physik **19**

19.1 Statistik der Ensembles 1023
 19.1.1 Zufallstexte 1023
 19.1.2 Wahrscheinlichkeit
 einer Komposition 1024
 19.1.3 Die wahrscheinlichste Komposition 1026
 19.1.4 Schwankungserscheinungen 1028
 19.1.5 Die kanonische Verteilung 1029
 19.1.6 Beispiel:
 „Harmonischer Oszillator“ 1032
 19.1.7 Mischungsentropie 1033
 19.1.8 Das kanonische Ensemble
 (Ensemble von Gibbs) 1034
 19.1.9 Arbeit und Wärme 1035
19.2 Physikalische Ensembles 1036
 19.2.1 Physikalische Deutung 1036
 19.2.2 Zustandsänderungen 1036
 19.2.3 Verteilungsmodul und Temperatur . 1037
 19.2.4 Wahrscheinlichkeit und Entropie ... 1038
 19.2.5 Die freie Energie;
 Gleichgewichtsbedingungen 1038
 19.2.6 Statistische Gewichte 1040
 19.2.7 Der Phasenraum 1041
 19.2.8 Das ideale Gas 1042
 19.2.9 Absolute Reaktionsraten 1044
19.3 Quantenstatistik 1045
 19.3.1 Abzählung von Quantenteilchen 1045
 19.3.2 Fermi-Dirac-
 und Bose-Einstein-Statistik 1046
 19.3.3 Das Fermi-Gas 1049
 19.3.4 Stoßvorgänge
 bei höchsten Energien 1052
 19.3.5 Extreme Zustände der Materie 1054
 19.3.6 Biografie eines Schwarzen Loches . 1055
Aufgaben 1057

20. Nichtlineare Dynamik **20**

20.1 Stabilität 1064
 20.1.1 Dynamische Systeme 1064
 20.1.2 Stabilität von Fixpunkten 1066
 20.1.3 Der Phasenraum
 deterministischer Systeme 1068
20.2 Nichtlineare Schwingungen 1071
 20.2.1 Pendel mit großer Amplitude 1071
 20.2.2 Erzwungene Schwingungen
 mit nichtlinearer Rückstellkraft 1072
 20.2.3 Selbsterregte Schwingungen 1074
 20.2.4 Parametrische
 Schwingungserregung 1078
20.3 Biologische und chemische Systeme 1079
 20.3.1 Populationsdynamik 1079
 20.3.2 Einfache ökologische Modelle 1084
 20.3.3 Kinetische Probleme 1087
20.4 Chaos und Ordnung 1091
 20.4.1 Einfache Wege ins Chaos 1091
 20.4.2 Chaos und Fraktale 1093
 20.4.3 Iteratives Gleichungslösen 1098
 20.4.4 Chaos im Kochtopf 1099
Aufgaben 1103

Farbtafeln **■**
 1–10 1109

Quellennachweis **■**
 für die Einleitungs- und Ausblickabbildungen ... 1125

Sach- und Namenverzeichnis **■**
 A–Z..... 1127