

# Inhaltsverzeichnis

Nutzen Sie dieses Buch individuell ..... XXI

## 1. Mechanik der Massenpunkte 1

<b>1.1 Messen und Maßeinheiten</b> .....	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
<b>1.2 Kinematik</b> .....	9
1.2.1 Ortsvektor .....	9
1.2.2 Geschwindigkeit .....	10
1.2.3 Beschleunigung .....	11
<b>1.3 Dynamik</b> .....	12
1.3.1 Trägheit .....	12
1.3.2 Kraft und Masse .....	12
1.3.3 Maßeinheiten .....	13
1.3.4 Newtons Axiome .....	13
<b>1.4 Einfache Bewegungen</b> .....	14
1.4.1 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung .....	14
1.4.2 Die gleichförmige Kreisbewegung ..	16
1.4.3 Die harmonische Schwingung .....	18
<b>1.5 Arbeit, Energie, Impuls, Leistung</b> .....	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
<b>1.6 Reibung</b> .....	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
<b>1.7 Gravitation</b> .....	46
1.7.1 Das Gravitationsgesetz .....	46

1.7.2 Das Gravitationsfeld .....	48
1.7.3 Gezeitenkräfte .....	49
1.7.4 Planetenbahnen .....	52
<b>1.8 Trägheitskräfte</b> .....	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
<b>Aufgaben</b> .....	61

## 2. Mechanik des starren Körpers 2

<b>2.1 Translation und Rotation</b> .....	72
2.1.1 Bewegungsmöglichkeiten eines starren Körpers .....	72
2.1.2 Infinitesimale Drehungen .....	73
2.1.3 Die Winkelgeschwindigkeit .....	73
<b>2.2 Dynamik des starren Körpers</b> .....	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
<b>2.3 Gleichgewicht und Bewegung eines starren Körpers</b> .....	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
<b>2.4 Der Kreisel</b> .....	88
2.4.1 Nutation des kräftefreien Kreisels ..	88
2.4.2 Präzession des Kreisels .....	89
<b>Aufgaben</b> .....	91

## 3. Mechanik deformierbarer Körper 3

<b>3.1 Ruhende Flüssigkeiten und Gase (Hydro- und Aerostatik)</b> .....	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	<b>4.4</b>	<b>Eigenschwingungen</b> .....	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
<b>3.2</b>	<b>Oberflächenspannung</b> .....	100	4.4.4	Eigenschwingungen von Platten, Membranen und Hohlräumen .....	186
<b>3.3</b>	<b>Strömungen</b> .....	104	4.4.5	Entartung .....	188
3.3.1	Beschreibung von Strömungen .....	104	<b>4.5</b>	<b>Schallwellen</b> .....	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	<b>4.6</b>	<b>Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten</b> .....	197
3.3.8	Strömungswiderstand .....	123	<b>Aufgaben</b> .....	202	
3.3.9	Wirbel .....	125	<b>5. Wärme</b>		<b>5</b>
3.3.10	Turbulenz .....	128	<b>5.1</b>	<b>Wärmeenergie und Temperatur</b> .....	207
<b>3.4</b>	<b>Der deformierbare Festkörper</b> .....	130	5.1.1	Was ist Wärme? .....	207
3.4.1	Dehnung und Kompression .....	130	5.1.2	Temperatur .....	208
3.4.2	Scherung .....	131	5.1.3	Thermometer .....	210
3.4.3	Zusammenhang zwischen $E$ -Modul und $G$ -Modul .....	132	5.1.4	Freiheitsgrade .....	211
3.4.4	Anelastisches Verhalten .....	132	5.1.5	Wärmekapazität .....	212
3.4.5	Elastische Energie .....	134	5.1.6	Kalorimeter .....	214
3.4.6	Wie biegen sich die Balken? .....	134	<b>5.2</b>	<b>Kinetische Gastheorie</b> .....	214
3.4.7	Knickung .....	135	5.2.1	Der Gasdruck .....	214
3.4.8	Härte .....	135	5.2.2	Die Zustandsgleichung idealer Gase	216
<b>Aufgaben</b> .....	136	5.2.3	Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre ..	217	
<b>4. Schwingungen und Wellen</b>		<b>4</b>	5.2.4	$c_V$ und $c_p$ bei Gasen .....	218
<b>4.1</b>	<b>Schwingungen</b> .....	141	5.2.5	Adiabatische Zustandsänderungen ..	219
4.1.1	Überlagerung von Schwingungen ..	142	5.2.6	Druckarbeit .....	220
4.1.2	Gedämpfte Schwingungen .....	150	5.2.7	Mittlere freie Weglänge und Wirkungsquerschnitt .....	221
4.1.3	Erzwungene Sinusschwingungen ..	154	5.2.8	Brownsche Bewegung .....	223
4.1.4	Amplituden- und Phasenmodulation	158	5.2.9	Die Boltzmann-Verteilung .....	224
<b>4.2</b>	<b>Wellen</b> .....	160	5.2.10	Die Maxwell-Verteilung .....	225
4.2.1	Beschreibung von Wellen .....	160	<b>5.3</b>	<b>Wärme kraftmaschinen</b> .....	227
4.2.2	Die Wellengleichung .....	161	5.3.1	Thermische Energiewandler .....	227
4.2.3	Elastische Wellen .....	162	5.3.2	Arbeitsdiagramme .....	229
4.2.4	Überlagerung von Wellen .....	164	5.3.3	Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern ..	229
4.2.5	Intensität einer Welle .....	169	<b>5.4</b>	<b>Wärmeleitung und Diffusion</b> .....	232
<b>4.3</b>	<b>Wellenausbreitung</b> .....	171	5.4.1	Mechanismen des Wärmetransportes .....	232
4.3.1	Streuung .....	172	5.4.2	Die Gesetze der Wärmeleitung .....	232
4.3.2	Das Prinzip von Huygens-Fresnel ..	172	5.4.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang .....	236
4.3.3	Das Prinzip von Fermat .....	173	5.4.4	Wärmetransport durch Konvektion ..	237
4.3.4	Beugung .....	175	5.4.5	Diffusion in Gasen und Lösungen ..	237
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. Elektromagnetismus:  
Ladungen und Ströme**

**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 ..... 302

6.1.5 Kapazität ..... 305

6.1.6 Dipole ..... 308

6.1.7 Influenz ..... 309

6.1.8 Energie einer Ladungsverteilung ... 310

6.1.9 Das elektrische Feld als Träger  
der elektrischen Energie ..... 310

**6.2 Dielektrika** ..... 311

6.2.1 Die Verschiebungsdichte ..... 311

6.2.2 Dielektrizitätskonstante ..... 311

6.2.3 Mechanismen  
der dielektrischen Polarisierung ..... 314

6.2.4 Energiedichte des elektrischen  
Feldes im Dielektrikum ..... 316

6.2.5 Elektrostriktion;  
Piezo- und Pyroelektrizität ..... 316

**6.3 Gleichströme** ..... 318

6.3.1 Stromstärke ..... 318

6.3.2 Das ohmsche Gesetz ..... 319

6.3.3 Energie und Leistung  
elektrischer Ströme ..... 321

6.3.4 Gleichstromtechnik ..... 322

**6.4 Mechanismen der elektrischen Leitung** ... 326

6.4.1 Nachweis freier Elektronen  
in Metallen ..... 326

6.4.2 Elektronentransport in Metallen ... 327

6.4.3 Elektrische Leitfähigkeit ..... 328

6.4.4 Elektrolyse ..... 331

6.4.5 Elektrolytische Leitfähigkeit ..... 333

6.4.6 Ionenwolken;  
elektrochemisches Potential ..... 336

**6.5 Galvanische Elemente** ..... 340

6.5.1 Ionengleichgewicht  
und Nernst-Gleichung ..... 340

6.5.2 Auflösung von Metallionen ..... 341

6.5.3 Galvanische Elemente ..... 341

6.5.4 Galvanische Polarisierung ..... 342

6.5.5 Polarisierung  
und Oberflächenspannung ..... 343

**6.6 Thermoelektrizität** ..... 344

6.6.1 Der Seebeck-Effekt ..... 344

6.6.2 Peltier-Effekt  
und Thomson-Effekt ..... 346

**6.7 Ströme und Felder** ..... 346

6.7.1 Elektrostatik ..... 346

6.7.2 Lorentz-Kraft und Magnetfeld ..... 347

6.7.3 Kräfte auf Ströme im Magnetfeld .. 348

6.7.4 Der Hall-Effekt ..... 350

6.7.5 Relativität der Felder ..... 351

**6.8 Erzeugung von Magnetfeldern** ..... 353

6.8.1 Das Feld  
des geraden Elektronenstrahls  
oder des geraden Drahtes ..... 353

6.8.2 Der gerade Draht,  
relativistisch betrachtet ..... 354

6.8.3 Allgemeine Eigenschaften  
des Magnetfeldes ..... 355

6.8.4 Bezeichnungen  
elektromagnetischer Felder ..... 357

**6.9 Das Magnetfeld von Strömen** ..... 357

6.9.1 Vergleich mit dem elektrischen Feld;  
der Satz von Biot-Savart ..... 360

6.9.2 Magnetostatik ..... 362

6.9.3 Elektromagnete ..... 364

6.9.4 Magnetische Spannung  
und Vektorpotential ..... 365

6.9.5 Das Magnetfeld der Erde ..... 366

**Aufgaben** ..... 371

**7. Elektrodynamik**

**7**

**7.1 Induktion** ..... 379

7.1.1 Faradays Induktionsversuche ..... 379

7.1.2 Das Induktionsgesetz  
als Folge der Lorentz-Kraft ..... 381

7.1.3 Die Richtung des induzierten  
Stromes (Lenz-Regel) ..... 384

7.1.4 Wirbelströme ..... 385

7.1.5 Induktivität ..... 386

7.1.6 Ein- und Ausschalten  
von Gleichströmen ..... 387

7.1.7 Energie und Energiedichte  
im Magnetfeld ..... 388

7.1.8 Gegeninduktion ..... 388

**7.2 Magnetische Materialien** ..... 390

7.2.1 Magnetisierung ..... 390

7.2.2 Diamagnetismus ..... 392

7.2.3 Paramagnetismus ..... 392

7.2.4 Ferromagnetismus ..... 393

7.2.5 Der Einstein-de Haas-Effekt ..... 395

7.2.6 Struktur der Ferromagnetika ..... 395

7.2.7 Antiferromagnetismus  
und Ferrimagnetismus ..... 398

7.2.8 Ferro- und Antiferroelektrizität .... 398

**7.3 Wechselströme** ..... 398

7.3.1 Erzeugung von Wechselströmen .... 399

7.3.2 Effektivwerte  
von Strom und Spannung ..... 401

7.3.3 Wechselstromwiderstände ..... 402

7.3.4 Zweipole, Ortskurven,  
Ersatzschaltbilder ..... 405

7.3.5 Messinstrumente  
für elektrische Größen ..... 408

7.3.6 Drehstrom ..... 411

7.3.7 Schwingkreise ..... 413

7.3.8 Transformatoren ..... 415

7.3.9 Das Betatron ..... 418

7.3.10 Elektromotoren und Generatoren ... 420

7.3.11 Skineffekt ..... 424

**7.4 Elektromagnetische Wellen** ..... 425

7.4.1 Der Verschiebungsstrom ..... 425

7.4.2 Der physikalische Inhalt  
der Maxwell-Gleichungen ..... 426

7.4.3 Ebene elektromagnetische Wellen .. 427

7.4.4 Energiedichte und Energieströmung 431

7.4.5 Der lineare Oszillator ..... 431

7.4.6 Die Ausstrahlung  
des linearen Oszillators ..... 433

7.4.7 Wellengleichung  
und Telegraphengleichung ..... 435

7.4.8 Warum funkt man  
mit Trägerwellen? ..... 437

7.4.9 Drahtwellen ..... 438

7.4.10 Hohlraumoszillatoren  
und Hohlleiter ..... 439

**Aufgaben** ..... 441

**8. Freie Elektronen und Ionen**

**8**

**8.1 Erzeugung von freien Ladungsträgern** .... 447

8.1.1 Glühemission (Richardson-Effekt) . 447

8.1.2 Photoeffekt  
(Lichtelektrischer Effekt) ..... 449

8.1.3 Feldemission ..... 450

8.1.4 Sekundärelektronen ..... 451

8.1.5 Ionisierung eines Gases ..... 451

**8.2 Bewegung freier Ladungsträger** ..... 452

8.2.1 Elektronen  
im homogenen elektrischen Feld ... 452

8.2.2 Elektronen  
im homogenen Magnetfeld ..... 453

8.2.3 Oszilloskop und Fernsehöhre ..... 455

8.2.4 Thomsons Parabelversuch;  
Massenspektroskopie ..... 456

8.2.5 Die Geschwindigkeitsabhängigkeit  
der Elektronenmasse ..... 457

8.2.6 Die Elektronenöhre ..... 458

8.2.7 Elektronenöhren als Verstärker ..... 461

8.2.8 Schwingungserzeugung  
durch Rückkopplung ..... 462

8.2.9 Erzeugung und Verstärkung  
höchstfrequenter Schwingungen .... 463

8.2.10 Teilchenfallen ..... 464

**8.3 Gasentladungen** ..... 465

8.3.1 Leitfähigkeit von Gasen ..... 465

8.3.2 Stoßionisation ..... 468

8.3.3 Einteilung der Gasentladungen ..... 469

8.3.4 Glimmentladungen ..... 470

8.3.5 Bogen und Funken ..... 470

8.3.6 Gasentladungslampen ..... 471

8.3.7 Kathoden-, Röntgen-  
und Kanalstrahlung ..... 472

**8.4 Plasmen** ..... 473  
 8.4.1 Der „vierte Aggregatzustand“ ..... 473  
 8.4.2 Plasmaschwingungen ..... 475  
 8.4.3 Plasmen im Magnetfeld ..... 476  
 8.4.4 Fusionsplasmen ..... 478  
**Aufgaben** ..... 480

**9. Geometrische Optik** 9

**9.1 Reflexion und Brechung** ..... 483  
 9.1.1 Lichtstrahlen ..... 483  
 9.1.2 Reflexion ..... 484  
 9.1.3 Brechung ..... 487  
 9.1.4 Totalreflexion ..... 487  
 9.1.5 Prismen ..... 489  
**9.2 Optische Instrumente** ..... 490  
 9.2.1 Brechung an Kugelflächen ..... 490  
 9.2.2 Dicke Linsen ..... 493  
 9.2.3 Linsenfehler ..... 494  
 9.2.4 Abbildungsmaßstab  
 und Vergrößerung ..... 495  
 9.2.5 Die Lupe ..... 496  
 9.2.6 Das Mikroskop ..... 496  
 9.2.7 Der Dia-Projektor ..... 498  
 9.2.8 Das Fernrohr oder Teleskop ..... 499  
 9.2.9 Das Auge ..... 501  
**9.3 Die Lichtgeschwindigkeit  $c$**  ..... 502  
 9.3.1 Astronomische Methoden ..... 502  
 9.3.2 Laufzeitmessungen im Labor ..... 503  
 9.3.3 Resonatormethoden ..... 504  
 9.3.4 Anwendungen ..... 505  
 9.3.5 Lichtgeschwindigkeit im Medium .. 505  
**9.4 Matrizenoptik** ..... 506  
**9.5 Geometrische Elektronenoptik** ..... 507  
 9.5.1 Das Brechungsgesetz  
 für Elektronen ..... 507  
 9.5.2 Elektrische Elektronenlinsen ..... 509  
 9.5.3 Magnetische Linsen ..... 510  
 9.5.4 Elektronenmikroskope ..... 511  
**Aufgaben** ..... 514

**10. Wellenoptik** 10

**10.1 Interferenz und Beugung** ..... 519  
 10.1.1 Kohärenz ..... 520  
 10.1.2 Die Grundkonstruktion  
 der Interferenzoptik ..... 521  
 10.1.3 Gitter ..... 523  
 10.1.4 Spalt- und Lochblende ..... 525  
 10.1.5 Auflösungsvermögen  
 optischer Geräte ..... 526

10.1.6 Auflösungsvermögen  
 des Spektrographen ..... 528  
 10.1.7 Fraunhofer-Beugung ..... 532  
 10.1.8 Fresnel-Linsen ..... 532  
 10.1.9 Holographie ..... 534  
 10.1.10 Fresnel-Beugung ..... 535  
 10.1.11 Stehende Lichtwellen ..... 536  
 10.1.12 Interferenzfarben ..... 537  
 10.1.13 Interferometrie ..... 538

**10.2 Polarisation des Lichts** ..... 543

10.2.1 Lineare und elliptische Polarisation 543  
 10.2.2 Polarisationsapparate ..... 544  
 10.2.3 Polarisation durch Doppelbrechung 544  
 10.2.4 Polarisation  
 durch Reflexion und Brechung ..... 547  
 10.2.5 Intensitätsverhältnisse  
 bei Reflexion und Brechung ..... 548  
 10.2.6 Reflexminderung ..... 550  
 10.2.7 Interferenzen im parallelen  
 linear polarisierten Licht ..... 551  
 10.2.8 Interferenzen im konvergenten  
 polarisierten Licht ..... 553  
 10.2.9 Drehung der Polarisationssebene ... 553  
 10.2.10 Der elektrooptische Effekt  
 (Kerr-Effekt) ..... 555

**10.3 Absorption, Dispersion und Streuung  
 des Lichts** ..... 555

10.3.1 Absorption ..... 556  
 10.3.2 Dispersion ..... 557  
 10.3.3 Atomistische Deutung  
 der Dispersion ..... 558  
 10.3.4 Deutung des Faraday-Effektes ..... 561  
 10.3.5 Warum ist der Himmel blau? ..... 562

**Aufgaben** ..... 566

**11. Strahlungsfelder** 11

**11.1 Das Strahlungsfeld** ..... 569  
 11.1.1 Strahlungsgrößen ..... 569  
 11.1.2 Photometrische Größen ..... 571  
 11.1.3 Photometrie  
 und Strahlungsmessung ..... 571  
**11.2 Strahlungsgesetze** ..... 573  
 11.2.1 Wärmestrahlung  
 und thermisches Gleichgewicht .... 573  
 11.2.2 Das Spektrum  
 der schwarzen Strahlung ..... 575  
 11.2.3 Plancks Strahlungsgesetz ..... 576  
 11.2.4 Lage des Emissionsmaximums;  
 Wiensches Verschiebungsgesetz .... 578  
 11.2.5 Gesamtemission des schwarzen  
 Strahlers; Stefan-Boltzmann-Gesetz 579

11.2.6 Der kosmische schwarze Strahler ... 580  
 11.2.7 Pyrometrie ..... 581  
**11.3 Die Welt der Farben** ..... 582  
 11.3.1 Farbe ..... 582  
 11.3.2 Infrarot und Ultraviolett ..... 587  
 11.3.3 Die Strahlung der Sonne ..... 593  
 11.3.4 Warum sind die Blätter grün? ..... 599  
**Aufgaben** ..... 602

**12. Relativistische Physik** 12

**12.1 Maßstäbe und Uhren – Raum und Zeit** .... 607  
 12.1.1 Bezugs- oder Inertialsysteme ..... 608  
 12.1.2 Das Michelson-Experiment ..... 609  
 12.1.3 Das Relativitätspostulat ..... 613  
 12.1.4 Die 4. Dimension: Die Zeit ..... 614  
**12.2 Gleichzeitigkeit** ..... 616  
 12.2.1 Pythagoras und Minkowski ..... 618  
 12.2.2 Abstände in der Raumzeit ..... 619  
 12.2.3 Kausalität ..... 620  
 12.2.4 Bewegte Uhren gehen langsamer –  
 die Zeitdilatation ..... 620  
 12.2.5 Das Zwillingsparadoxon ..... 623  
 12.2.6 Maßstabsvergleich und  
 Längenkontraktion ..... 626  
**12.3 Die Lorentz-Transformation** ..... 627  
**12.4 Vierervektoren** ..... 628  
**12.5 Relativistischer Doppler-Effekt** ..... 630  
**12.6 Addition von Geschwindigkeiten** ..... 633  
**12.7 Relativistisches Sehen** ..... 634  
 12.7.1 Ruhende Beobachter, bewegte  
 Objekte ..... 635  
 12.7.2 Bewegte Beobachter, ruhende  
 Objekte ..... 637  
**12.8 Relativistischer Impuls  
 und relativistische Energie** ..... 639  
 12.8.1 Die newtonschen Impulse werden  
 beim Wechsel des Bezugssystems  
 nicht erhalten ..... 640  
 12.8.2 Der 4-Impuls ..... 641  
 12.8.3 Systeme von Teilchen ..... 643  
**12.9 Elektromagnetische Felder und Bewegung** 644  
 12.9.1 Relativistische Ladungsinvarianz .... 645  
 12.9.2 Der elektromagnetische Feldtensor . 648  
 12.9.3 Elektromagnetische Wellen ..... 650  
**12.10 Gravitation und Kosmologie** ..... 650  
 12.10.1 Allgemeine Relativität ..... 650  
 12.10.2 Einsteins Gravitationstheorie ..... 652  
 12.10.3 Gravitationswellen ..... 655  
 12.10.4 Schwarze Löcher ..... 657  
 12.10.5 Kosmologische Modelle ..... 659  
 12.10.6 Die kosmologische Kraft ..... 661

12.10.7 Gab es einen Urknall? ..... 663  
 12.10.8 Das Geheimnis der dunklen Massen 666  
**Aufgaben** ..... 667

**13. Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik** 13

**13.1 Das Photon** ..... 678  
 13.1.1 Entdeckung des Photons ..... 678  
 13.1.2 Masse und Impuls der Photonen;  
 Strahlungsdruck ..... 679  
 13.1.3 Stoß von Photonen und Elektronen;  
 Compton-Effekt ..... 680  
 13.1.4 Rückstoß bei der  $\gamma$ -Emission;  
 Mößbauer-Effekt ..... 681  
**13.2 Wellen und Teilchen** ..... 683  
 13.2.1 Materiewellen ..... 683  
 13.2.2 Elektronenbeugung ..... 684  
 13.2.3 Elektronenbeugung an Lochblenden 685  
 13.2.4 Selbstinterferenz von Atomen ..... 687  
 13.2.5 Interferometrie mit Materiewellen .. 689  
 13.2.6 Die Unbestimmtheitsrelation ..... 690  
**13.3 Spektren** ..... 691  
 13.3.1 Emission und Absorption von Licht 691  
 13.3.2 Linienverbreiterung ..... 692  
 13.3.3 Fluoreszenz ..... 694  
 13.3.4 Phosphoreszenz ..... 695  
 13.3.5 Raman-Effekt ..... 695  
**13.4 Der Versuch von Franck und Hertz** ..... 696  
 13.4.1 Die Energiestufen der Atome ..... 697  
 13.4.2 Anregung und Ionisierung ..... 698  
**13.5 Die Entdeckung des Atomkerns** ..... 699  
 13.5.1 Das leere Atom ..... 700  
 13.5.2 Das Experiment von Rutherford .... 701  
**13.6 Grundzüge der Quantenmechanik** ..... 704  
 13.6.1 Einleitung:  
 Mathematisches Handwerkszeug ... 704  
 13.6.2 Vektoren und Funktionen ..... 705  
 13.6.3 Matrizen und Operatoren ..... 705  
 13.6.4 Eigenfunktionen und Eigenwerte ... 706  
 13.6.5 Zustandsgrößen  
 der Quantenmechanik ..... 708  
 13.6.6 Die Unbestimmtheitsrelation ..... 711  
 13.6.7 Der Energieoperator  
 (Hamilton-Operator) ..... 713  
 13.6.8 Die Schrödinger-Gleichung ..... 716  
**13.7 Teilchen in Potentialtöpfen** ..... 717  
 13.7.1 Stationäre Zustände ..... 717  
 13.7.2 Der Tunneleffekt ..... 720  
 13.7.3 Harmonisch gebundene Teilchen ... 722  
 13.7.4 Der Knotensatz ..... 724  
**Aufgaben** ..... 726



**14. Physik der Atome und ihre Anwendungen** 14

- 14.1 Quantenphysik und Atome** ..... 732
  - 14.1.1 Bohr-Sommerfeld-Modelle  
des Atoms ..... 732
  - 14.1.2 Quanten-Fluktuationen  
stabilisieren die Atome ..... 733
  - 14.1.3 Atomare Einheiten  
und Feinstrukturkonstante  $\alpha$  ..... 734
- 14.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger** .. 735
  - 14.2.1 Das Kepler-Problem  
im Coulombfeld ..... 735
  - 14.2.2 Schrödinger-Gleichung  
für das Wasserstoffatom ..... 736
  - 14.2.3 Quantenzahlen, Spektrum  
und Energiediagramm ..... 741
  - 14.2.4 Aufhebung der *l*-Entartung:  
Einelektronenatome ..... 743
- 14.3 Magnetismus von Atomen** ..... 744
  - 14.3.1 Stern-Gerlach-Experiment ..... 744
  - 14.3.2 Magnetisches Moment eines Atoms ..... 744
  - 14.3.3 Präzession im Magnetfeld ..... 745
  - 14.3.4 Spektrum im Magnetfeld,  
der normale Zeeman-Effekt ..... 745
- 14.4 Elektronenspin und Feinstruktur** ..... 747
  - 14.4.1 Magnetische Spin-Bahn-Kopplung . 748
  - 14.4.2 Gesamtdrehimpuls ..... 749
  - 14.4.3 Feinstruktur  
im Einelektronen-Atom ..... 750
  - 14.4.4 Zeeman-Effekt  
von Einelektronen-Atomen ..... 752
  - 14.4.5 Stark-Effekt ..... 755
- 14.5 Atome mit zwei Elektronen** ..... 755
  - 14.5.1 Das Helium-Atom ..... 755
  - 14.5.2 Der Grundzustand  
des Helium-Atoms ..... 757
  - 14.5.3 Angeregte Zustände  
des Helium-Atoms ..... 758
  - 14.5.4 Drehimpulse im Helium-Atom ..... 759
  - 14.5.5 Andere Zweielektronen-Atome ..... 760
- 14.6 Wie strahlen die Atome?** ..... 761
  - 14.6.1 Atomare Antennen ..... 761
  - 14.6.2 Quantentheorie  
der atomaren Strahlung ..... 765
  - 14.6.3 Absorption und Emission ..... 769
  - 14.6.4 Strahlungsverschiebungen ..... 774
- 14.7 Lichtkräfte** ..... 777
  - 14.7.1 Strahlungsdruck ..... 777
  - 14.7.2 Optische Dipolkräfte ..... 778
  - 14.7.3 Laserkühlung ..... 778
- 14.8 Atomoptik** ..... 780
  - 14.8.1 Atomare Beugung ..... 782

- 14.8.2 Atominterferometer ..... 783
- 14.9 Der Einfluss der Atomkerne** ..... 784
  - 14.9.1 Isotopieverschiebungen ..... 784
  - 14.9.2 Kernmagnetismus  
und Hyperfeinstruktur ..... 786
  - 14.9.3 Magnetische Resonanz ..... 789
  - 14.9.4 Magnetische Resonanz  
in Chemie und Medizin ..... 794
  - 14.9.5 Rabi-Atomstrahlresonanz ..... 796
  - 14.9.6 Ramseys Methode  
der getrennten oszillierenden Felder 798
  - 14.9.7 Atomuhren, atomare Springbrunnen  
und GPS ..... 800
  - 14.9.8 Optisches Pumpen  
und Magnetometer ..... 803
- 14.10 Kräfte zwischen Atomen** ..... 804
  - 14.10.1 Van der Waals-Kräfte ..... 804
  - 14.10.2 Atomare Stöße ..... 805
  - 14.10.3 Streuung  
ununterscheidbarer Teilchen ..... 807
- 14.11 Quantenmaterie** ..... 808
  - 14.11.1 Bose-Einstein-Kondensation ..... 810
  - 14.11.2 Atomare Bose-Kondensate ..... 811
  - 14.11.3 Einteilchen-  
und Vielteilchen-Quantenzustände . 813
  - 14.11.4 Materiewellen ..... 814
  - 14.11.5 Suprafluidität und Vortizes ..... 815
  - 14.11.6 Atomare Fermi-Gase ..... 818
- Aufgaben** ..... 820

**15. Laserphysik** 15

- 15.1 Laserprozesse** ..... 823
  - 15.1.1 Wie strahlen die Atome? ..... 823
  - 15.1.2 Energieaustausch  
von Licht und Materie ..... 825
  - 15.1.3 Inversion und Verstärkung ..... 826
  - 15.1.4 Verstärkung und Verluste im Laser . 827
  - 15.1.5 Laserschwelle  
und gesättigte Verstärkung ..... 828
  - 15.1.6 Laserbetrieb  
mit drei und vier Niveaus ..... 828
- 15.2 Laserstrahlen** ..... 829
  - 15.2.1 Gaußstrahlen ..... 829
  - 15.2.2 Optische Resonatoren ..... 831
  - 15.2.3 Laserleistung ..... 832
- 15.3 Laser, Typen und Eigenschaften** ..... 833
  - 15.3.1 Helium-Neon-Laser und Gaslaser .. 833
  - 15.3.2 Neodym-Laser und Festkörperlaser 835
  - 15.3.3 Diodenlaser ..... 837
  - 15.3.4 Durchstimmbare Laser ..... 838

15.4	<b>Kurzzeitleaser</b> .....	839	17.2	<b>Gitterschwingungen</b> .....	910
15.4.1	Güteschaltung .....	839	17.2.1	Spezifische Wärmekapazität .....	911
15.4.2	Modenkopplung .....	840	17.2.2	Gitterdynamik .....	915
15.4.3	Das Femtosekunden-Stroboskop ....	843	17.2.3	Optik der Ionenkristalle .....	918
15.4.4	Höchstleistungslaser .....	844	17.2.4	Phononen .....	920
<b>Aufgaben</b> .....	845		17.2.5	Wärmeleitung in Isolatoren .....	921
<b>16. Die Elemente und die Chemie</b> .....	<b>16</b>		<b>17.3 Metalle</b> .....	922	
16.1	<b>Systematik des Atombaus</b> .....	847	17.3.1	Das klassische Elektronengas .....	923
16.1.1	Das Periodensystem der Elemente .....	847	17.3.2	Das Fermi-Gas .....	925
16.1.2	Einteilchenmodell und Quantenzustände .....	850	17.3.3	Metalloptik .....	927
16.2	<b>Atome mit mehreren Elektronen in der Quantenmechanik</b> .....	851	17.3.4	Elektrische und Wärmeleitung .....	929
16.2.1	Bauprinzipien der Elektronenhülle ..	851	17.3.5	Energiebänder .....	931
16.2.2	Zentralfeldnäherung .....	852	17.3.6	Elektronen und Löcher .....	933
16.2.3	Drehimpuls und Spin im Mehrelektronenatom .....	853	<b>17.4 Halbleiter</b> .....	935	
16.2.4	Jenseits des Periodensystems .....	855	17.4.1	Reine Halbleiter .....	935
<b>16.3 Röntgenstrahlung</b> .....	856		17.4.2	Gestörte Halbleiter .....	938
16.3.1	Erzeugung und Nachweis .....	856	17.4.3	Halbleiter-Elektronik .....	941
16.3.2	Röntgenbeugung .....	857	17.4.4	Amorphe Halbleiter .....	944
16.3.3	Röntgenoptik .....	861	<b>17.5 Gitterfehler</b> .....	945	
16.3.4	Bremsstrahlung .....	862	17.5.1	Idealkristall und Realkristall .....	946
16.3.5	Charakteristische Strahlung .....	863	17.5.2	Thermische Fehlordnung .....	946
16.3.6	Röntgenabsorption .....	865	17.5.3	Chemische Fehlordnung .....	948
<b>16.4 Moleküle</b> .....	869		17.5.4	Versetzungen .....	949
16.4.1	Die Energiestufen der Moleküle ....	869	<b>17.6 Makromolekulare Festkörper</b> .....	952	
16.4.2	Rotationsbanden .....	870	17.6.1	Definition und allgemeine Eigenschaften .....	952
16.4.3	Das Rotations-Schwingungs- Spektrum .....	871	17.6.2	Länge eines linearen Makromoleküls .....	953
16.4.4	Die Potentialkurve des Moleküls ...	872	17.6.3	Gummielastizität .....	955
16.4.5	Molekulare Quantenzustände .....	874	17.6.4	Hochpolymere .....	956
16.4.6	Quantenchemie .....	875	<b>17.7 Supraleitung</b> .....	957	
<b>Aufgaben</b> .....	880		<b>Aufgaben</b> .....	963	
<b>17. Festkörperphysik</b> .....	<b>17</b>		<b>18. Kerne und Elementarteilchen</b> .....	<b>18</b>	
17.1	<b>Kristallgitter</b> .....	884	18.1	<b>Kernbausteine</b> .....	969
17.1.1	Dichteste Kugelpackungen .....	885	18.1.1	Kernbausteine und Kernkräfte .....	969
17.1.2	Gittergeometrie .....	889	18.1.2	Massendefekt, Isotopie und Massenspektroskopie .....	971
17.1.3	Kristallstrukturanalyse .....	891	18.1.3	Kernmodelle .....	973
17.1.4	Gitterenergie .....	895	18.1.4	Kernspaltung .....	976
17.1.5	Kristallbindung .....	900	18.1.5	Kernfusion .....	977
17.1.6	Einiges über Eis .....	903	<b>18.2 Radioaktivität</b> .....	981	
17.1.7	Kristallwachstum .....	907	18.2.1	Elementumwandlung .....	981
17.1.8	Fullerene .....	909	18.2.2	Zerfallsenergie .....	984
			18.2.3	Das Zerfallsgesetz .....	986
			<b>18.3 Schnelle Teilchen</b> .....	988	
			18.3.1	Durchgang schneller Teilchen durch Materie .....	989
			18.3.2	Nachweis schneller Teilchen .....	990
			18.3.3	Teilchenbeschleuniger .....	995
			18.3.4	Strahlendosis und Strahlenwirkung	999



**18.4 Elementarteilchen** ..... 1002

18.4.1 Historischer Überblick ..... 1002

18.4.2 Wie findet man neue Teilchen? ..... 1004

18.4.3 Myonen und Pionen ..... 1008

18.4.4 Neutron und Neutrinos ..... 1009

18.4.5 Wechselwirkungen ..... 1012

18.4.6 Elektromagnetische Wechselwirkung ..... 1016

18.4.7 Die innere Struktur der Nukleonen ..... 1018

18.4.8 Das Quarkmodell ..... 1019

18.4.9 Quantenchromodynamik ..... 1023

18.4.10 Symmetrien, Invarianzen, Erhaltungssätze ..... 1026

18.4.11 Magnetische Monopole ..... 1029

**18.5 Kosmische Strahlung** ..... 1030

18.5.1 Ursprung und Nachweis ..... 1030

18.5.2 Wechselwirkung mit Materie ..... 1031

18.5.3 Strahlungsgürtel ..... 1032

**Aufgaben** ..... 1035

**19. Statistische Physik** 19

**19.1 Statistik der Ensembles** ..... 1045

19.1.1 Zufallstexte ..... 1045

19.1.2 Wahrscheinlichkeit einer Komposition ..... 1046

19.1.3 Die wahrscheinlichste Komposition ..... 1048

19.1.4 Schwankungerscheinungen ..... 1050

19.1.5 Die kanonische Verteilung ..... 1051

19.1.6 Beispiel: „Harmonischer Oszillator“ ..... 1054

19.1.7 Mischungsentropie ..... 1055

19.1.8 Das kanonische Ensemble (Ensemble von Gibbs) ..... 1056

19.1.9 Arbeit und Wärme ..... 1057

**19.2 Physikalische Ensembles** ..... 1058

19.2.1 Physikalische Deutung ..... 1058

19.2.2 Zustandsänderungen ..... 1058

19.2.3 Verteilungsmodul und Temperatur ..... 1059

19.2.4 Wahrscheinlichkeit und Entropie ... 1060

19.2.5 Die freie Energie; Gleichgewichtsbedingungen ..... 1060

19.2.6 Statistische Gewichte ..... 1062

19.2.7 Der Phasenraum ..... 1063

19.2.8 Das ideale Gas ..... 1064

19.2.9 Absolute Reaktionsraten ..... 1066

**19.3 Quantenstatistik** ..... 1067

19.3.1 Abzählung von Quantenteilchen .... 1067

19.3.2 Fermi-Dirac- und Bose-Einstein-Statistik ..... 1068

19.3.3 Das Fermi-Gas ..... 1071

19.3.4 Stoßvorgänge bei höchsten Energien ..... 1074

19.3.5 Extreme Zustände der Materie ..... 1076

19.3.6 Biografie eines Schwarzen Loches . 1077

**Aufgaben** ..... 1079

**20. Nichtlineare Dynamik** 20

**20.1 Stabilität** ..... 1086

20.1.1 Dynamische Systeme ..... 1086

20.1.2 Stabilität von Fixpunkten ..... 1088

20.1.3 Der Phasenraum deterministischer Systeme ..... 1090

**20.2 Nichtlineare Schwingungen** ..... 1093

20.2.1 Pendel mit großer Amplitude ..... 1093

20.2.2 Erzwungene Schwingungen mit nichtlinearer Rückstellkraft .... 1094

20.2.3 Selbsterregte Schwingungen ..... 1096

20.2.4 Parametrische Schwingungserregung ..... 1100

**20.3 Biologische und chemische Systeme** ..... 1101

20.3.1 Populationsdynamik ..... 1101

20.3.2 Einfache ökologische Modelle ..... 1106

20.3.3 Kinetische Probleme ..... 1109

**20.4 Chaos und Ordnung** ..... 1113

20.4.1 Einfache Wege ins Chaos ..... 1113

20.4.2 Chaos und Fraktale ..... 1115

20.4.3 Iteratives Gleichungslösen ..... 1120

20.4.4 Chaos im Kochtopf ..... 1121

**Aufgaben** ..... 1125

**Quellennachweis**

für die Einleitungs- und Ausblickabbildungen ... 1131

**Sach- und Namenverzeichnis**

A–Z ..... 1133