

# 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  
höchsfrequenter 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
<b>11.3</b>	<b>Die Welt der Farben</b> .....	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
<b>Aufgaben</b>	.....	602

**12. Relativistische Physik** 12

<b>12.1</b>	<b>Maßstäbe und Uhren – Raum und Zeit</b> ....	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
<b>12.2</b>	<b>Gleichzeitigkeit</b> .....	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 Zwillingssparadoxon .....	623
12.2.6	Maßstabsvergleich und Längenkontraktion .....	626
<b>12.3</b>	<b>Die Lorentz-Transformation</b> .....	627
<b>12.4</b>	<b>Vierervektoren</b> .....	628
<b>12.5</b>	<b>Relativistischer Doppler-Effekt</b> .....	630
<b>12.6</b>	<b>Addition von Geschwindigkeiten</b> .....	633
<b>12.7</b>	<b>Relativistisches Sehen</b> .....	634
12.7.1	Ruhende Beobachter, bewegte Objekte .....	635
12.7.2	Bewegte Beobachter, ruhende Objekte .....	637
<b>12.8</b>	<b>Relativistischer Impuls und relativistische Energie</b> .....	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
<b>12.9</b>	<b>Elektromagnetische Felder und Bewegung</b> .....	644
12.9.1	Relativistische Ladungsinvarianz ....	645
12.9.2	Der elektromagnetische Feldtensor .	648
12.9.3	Elektromagnetische Wellen .....	650
<b>12.10</b>	<b>Gravitation und Kosmologie</b> .....	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
<b>Aufgaben</b>	.....	667

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

<b>13.1</b>	<b>Das Photon</b> .....	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
<b>13.2</b>	<b>Wellen und Teilchen</b> .....	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
<b>13.3</b>	<b>Spektren</b> .....	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
<b>13.4</b>	<b>Der Versuch von Franck und Hertz</b> .....	696
13.4.1	Die Energiestufen der Atome .....	697
13.4.2	Anregung und Ionisierung .....	698
<b>13.5</b>	<b>Die Entdeckung des Atomkerns</b> .....	699
13.5.1	Das leere Atom .....	700
13.5.2	Das Experiment von Rutherford ....	701
<b>13.6</b>	<b>Grundzüge der Quantenmechanik</b> .....	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
<b>13.7</b>	<b>Teilchen in Potentialtöpfen</b> .....	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
<b>Aufgaben</b>	.....	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



<http://www.springer.com/978-3-540-25421-8>

Gerthsen Physik

(Ed.)D. Meschede

2006, XIX, 1162 S. 1347 Abb. Mit-CD-ROM., Hardcover

ISBN: 978-3-540-25421-8