

# Gerthsen Physik

**Dieter Meschede**

Bis zur 20. Auflage betreut  
von Helmut Vogel

22., völlig neu bearbeitete Auflage  
mit 1330 meist zweifarbigen  
Abbildungen, 10 Farbtafeln,  
93 Tabellen,  
105 durchgerechneten Beispielen  
und 1074 Aufgaben  
mit vollständigen Lösungen  
auf CD-ROM



Springer

# Inhaltsverzeichnis

Nutzen Sie dieses Buch individuell .....XXI

## i. Mechanik der Massenpunkte Q

<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 Q

<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

<b>3.1 Ruhende Flüssigkeiten und Gase (Hydro- und Aerostatik)</b> .....	93
3.1.1 Der feste, flüssige und gasförmige Zustand .....	93

**(II) Inhaltsverzeichnis**

3.1.2 Die Gestalt von Flüssigkeitsoberflächen . . . . . 94

3.1.3 Druck . . . . . 95

3.1.4 Der Schweredruck . . . . . 96

3.1.5 Gasdruck . . . . . 98

3.1.6 Der Atmosphärendruck . . . . . 99

**3.2 Oberflächenspannung** . . . . . 100

**3.3 Strömungen** . . . . . 104

3.3.1 Beschreibung von Strömungen . . . . . 104

3.3.2 Innere Reibung . . . . . 109

3.3.3 Die laminare Strömung . . . . . 110

3.3.4 Bewegungsgleichung einer Flüssigkeit . . . . . 115

3.3.5 Kriterien für die verschiedenen Strömungstypen . . . . . 116

3.3.6 Strömung idealer Flüssigkeiten . . . . . 118

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  $\lambda$ -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

**Schwingungen und Wellen Qj**

**4.1 Schwingungen** . . . . . 141

4.1.1 Überlagerung von Schwingungen . . . . . 142

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

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

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

**Wärme Q**

**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

**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** ..... 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 Polarisation ... 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 Polarisation ..... 341

6.5.5 Polarisation 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**

**Q**

**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**

**Q**

**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

## Inhaltsverzeichnis

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

9.1 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 Optischeinstrumente** ..... 488  
 9.2.1 Brechung an Kugelflächen ..... 488  
 9.2.2 DickeLinsen ..... 491  
 9.2.3 Linsenfehler ..... 492  
 9.2.4 Abbildungsmaßstab  
 und Vergrößerung ..... 493  
 9.2.5 DieLupe ..... 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 DasAuge ..... 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

**io. Wellenoptik**

**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

**ii. Strahlungsfelder**

**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 Wärme Strahlung  
 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

## Inhaltsverzeichnis

<b>11.3 Die Welt der Farben</b> .....	580
11.3.1 Farbe.....	580
11.3.2 Infrarot und Ultraviolett.....	582
11.3.3 Die Strahlung der Sonne.....	588
11.3.4 Warum sind die Blätter grün?.....	594
<b>Aufgaben</b> .....	597
<b>2. Teilchen, Wellen, mikroskopische Physik Q</b>	
<b>12.1 Das Photon</b> .....	604
12.1.1 Entdeckung des Photons.....	604
12.1.2 Masse und Impuls der Photonen; Strahlungsdruck.....	605
12.1.3 Stoß von Photonen und Elektronen; Compton-Effekt.....	606
12.1.4 Rückstoß bei der/-Emission; Mößbauer-Effekt.....	607
<b>12.2 Wellen und Teilchen</b> .....	609
12.2.1 Materiewellen.....	609
12.2.2 Elektronenbeugung.....	610
12.2.3 Elektronenbeugung an Lochblenden	611
12.2.4 Selbstinterferenz von Atomen.....	613
12.2.5 Interferometrie mit Materiewellen ..	615
12.2.6 Die Unbestimmtheitsrelation.....	616
<b>12.3 Spektren</b> .....	617
12.3.1 Emission und Absorption von Licht	617
12.3.2 Linienverbreiterung.....	618
12.3.3 Fluoreszenz.....	620
12.3.4 Phosphoreszenz.....	621
12.3.5 Raman-Effekt.....	621
<b>12.4 Der Versuch von Franck und Hertz</b> .....	622
12.4.1 Die Energiestufen der Atome.....	623
12.4.2 Anregung und Ionisierung.....	624
<b>12.5 Die Entdeckung des Atomkerns</b> .....	625
12.5.1 Das leere Atom.....	626
12.5.2 Das Experiment von Rutherford ..	627
<b>12.6 Grundzüge der Quantenmechanik</b> .....	630
12.6.1 Einleitung: Mathematisches Handwerkszeug ..	630
12.6.2 Vektoren und Funktionen.....	631
12.6.3 Matrizen und Operatoren.....	631
12.6.4 Eigenfunktionen und Eigenwerte ..	632
12.6.5 Zustandsgrößen der Quantenmechanik.....	634
12.6.6 Die Unbestimmtheitsrelation.....	637
12.6.7 Der Energieoperator (Hamilton-Operator).....	639
12.6.8 Die Schrödinger-Gleichung.....	642
<b>12.7 Teilchen in Potentialtöpfen</b> .....	643
12.7.1 Stationäre Zustände.....	643
12.7.2 Der Tunneleffekt.....	646
12.7.3 Harmonisch gebundene Teilchen ..	648
12.7.4 Der Knotensatz.....	650
<b>Aufgaben</b> .....	652
<b>13. Physik der Atome und ihre Anwendungen Bj</b>	
<b>13.1 Quantenphysik und Atome</b> .....	658
13.1.1 Bohr-Sommerfeld-Modelle des Atoms.....	658
13.1.2 Quanten-Fluktuationen stabilisieren die Atome.....	659
13.1.3 Atomare Einheiten und Feinstrukturkonstante $a$ .....	660
<b>13.2 Das Wasserstoffatom nach Schrödinger</b> ..	661
13.2.1 Das Kepler-Problem im Coulombfeld.....	661
13.2.2 Schrödinger-Gleichung für das Wasserstoff atom.....	662
13.2.3 Quantenzahlen, Spektrum und Energiediagramm.....	667
13.2.4 Aufhebung der /-Entartung: Einelektronenatome.....	669
<b>13.3 Magnetismus von Atomen</b> .....	670
13.3.1 Stern-Gerlach-Experiment.....	670
13.3.2 Magnetisches Moment eines Atoms	670
13.3.3 Präzession im Magnetfeld.....	671
13.3.4 Spektrum im Magnetfeld, der normale Zeeman-Effekt.....	671
<b>13.4 Elektronenspin und Feinstruktur</b> .....	673
13.4.1 Magnetische Spin-Bahn-Kopplung .	674
13.4.2 Gesamtdrehimpuls.....	675
13.4.3 Feinstruktur im Einelektronen-Atom.....	676
13.4.4 Zeeman-Effekt von Einelektronen-Atomen.....	678
13.4.5 Stark-Effekt.....	681
<b>13.5 Atome mit zwei Elektronen</b> .....	681
13.5.1 Das Helium-Atom.....	681
13.5.2 Der Grundzustand des Helium-Atoms.....	683
13.5.3 Angeregte Zustände des Helium-Atoms.....	684
13.5.4 Drehimpulse im Helium-Atom.....	685
13.5.5 Andere Zweielektronen-Atome.....	686
<b>13.6 Wie strahlen die Atome?</b> .....	687
13.6.1 Atomare Antennen.....	687
13.6.2 Quantentheorie der atomaren Strahlung.....	691
13.6.3 Absorption und Emission.....	695
13.6.4 Strahlungsverschiebungen.....	700
<b>13.7 Lichtkräfte</b> .....	703
13.7.1 Strahlungsdruck.....	703
13.7.2 Optische Dipolkräfte.....	704

13.7.3	Laserkühlung	704	14.3.3	Diodenlaser	763
<b>13.8</b>	<b>Atomoptik</b>	706	14.3.4	Durchstimmbare Laser	764
13.8.1	Atomare Beugung	708	<b>14.4</b>	<b>Kurzzeitlaser</b>	765
13.8.2	Atominterferometer	709	14.4.1	Güteschaltung	765
<b>13.9</b>	<b>Der Einfluss der Atomkerne</b>	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	<b>Aufgaben</b>		771
13.9.4	Magnetische Resonanz in Chemie und Medizin	720	<b>15. Die Elemente und die Chemie</b>	<b>Q</b>	
13.9.5	Rabi-Atomstrahlresonanz	722	<b>15.1</b>	<b>Systematik des Atombaus</b>	773
13.9.6	Ramseys Methode der getrennten oszillierenden Felder	724	15.1.1	Das Periodensystem der Elemente	773
13.9.7	Ratomuhren, 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
<b>13.10</b>	<b>Kräfte zwischen Atomen</b>	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
<b>13.11</b>	<b>Quantenmaterie</b>	734	<b>15.2</b>	<b>Röntgenstrahlung</b>	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
<b>Aufgaben</b>		746	<b>15.3</b>	<b>Moleküle</b>	795
<b>14. Laserphysik</b>	<b>0</b>		15.3.1	Die Energiestufen der Moleküle	795
<b>14.1</b>	<b>Laserprozesse</b>	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	<b>Aufgaben</b>		806
14.1.6	Laserbetrieb mit drei und vier Niveaus	754	<b>16. Festkörperphysik</b>	<b>Q</b>	
<b>14.2</b>	<b>Laserstrahlen</b>	755	<b>16.1</b>	<b>Kristallgitter</b>	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
<b>14.3</b>	<b>Laser, Typen und Eigenschaften</b>	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



# I Inhaltsverzeichnis

<b>16.2 Gitterschwingungen</b> .....	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
<b>16.3 Metalle</b> .....	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
<b>16.4 Halbleiter</b> .....	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
<b>16.5 Gitterfehler</b> .....	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
<b>16.6 Makromolekulare Festkörper</b> .....	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
<b>16.7 Supraleitung</b> .....	883
<b>Aufgaben</b> .....	889

## Kerne und Elementarteilchen

<b>17.1 Kernbausteine</b> .....	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
<b>17.2 Radioaktivität</b> .....	907
17.2.1 Elementumwandlung.....	907
17.2.2 Zerfallsenergie.....	910
17.2.3 Das Zerfallsgesetz.....	912
<b>17.3 Schnelle Teilchen</b> .....	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

<b>17.4 Elementarteilchen</b> .....	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
<b>17.5 Kosmische Strahlung</b> .....	956
17.5.1 Ursprung und Nachweis.....	956
17.5.2 Wechselwirkung mit Materie.....	957
17.5.3 Strahlungsgürtel.....	958
<b>Aufgaben</b> .....	961

## 18. Relativitätstheorie

## El

<b>18.1 Bezugssysteme</b> .....	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
<b>18.2 Relativistische Mechanik</b> .....	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
<b>18.3 Relativistische Physik</b> .....	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
<b>18.4 Gravitation und Kosmologie</b> .....	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 Q**

**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 Q**

**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