

Repetitorium der Physik

Von Prof. Dr. sc. nat. ETH Fritz Kurt Kneubühl
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

5., überarbeitete Auflage
Mit 318 Bildern, 67 Tabellen und zahlreichen Beispielen



B. G. Teubner Stuttgart 1994

Prof. Dr. sc. nat. Fritz Kurt Kneubühl

Geboren 1931 in Zürich. Studium der Physik an der ETH Zürich: Diplom 1955 bei G. Busch und K. A. Müller sowie Promotion 1959 bei H. H. Günthard. Anschließend Ramsey Memorial Fellow, University College London und University of Southampton, England. 1960 Graefflin Fellow, The Johns Hopkins University, Baltimore, USA. Ab 1961 Assistent bei G. Busch und W. Känzig, ETH Zürich. 1963 Habilitation, 1966 Assistenz-Professor, 1970 a. o. Professor, 1972 o. Professor an der ETH Zürich. 1976–1978 Vorsitzender Quantum Electronics Division, European Physical Society. 1976 Mitglied The Johns Hopkins Society of Scholars, Baltimore, USA. 1978–1980 Vorsteher Physik-Departement, 1986 Vorsteher Laboratorium für Infrarotphysik, 1986 Gründung Institut für Quantenelektronik, ETH Zürich. 1989 L. Eötvös Medaille, Ungarische Physikalische Gesellschaft. 1990 auswärtiges Mitglied, Akademie der Wissenschaften, DDR, 1994 Editor in Chief „Infrared Physics“.

Arbeitsgebiete: Quantenelektronik und Infrarotphysik, insbesondere Gaslaser, Spektroskopie der kondensierten Materie, Gase und Plasmen, Solar- und Astrophysik, Atmosphärenphysik, Bauphysik.

B 2 / 128



Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Kneubühl, Fritz Kurt:

Repetitorium der Physik / von Fritz Kurt Kneubühl. –

5., überarb. Aufl. – Stuttgart : Teubner, 1994

(Teubner Studienbücher : Physik)

ISBN 3-519-43012-6

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1990

Printed in Germany

Satz: Elsner & Behrens GmbH, Oftersheim

Druck und Bindung: Passavia Druckerei GmbH, Passau

Umschlaggestaltung: W. Koch, Sindelfingen

Inhalt

I	Mechanik des Massenpunktes	19
1.1	Grundbegriffe	19
1.1.1	Mechanik	19
1.1.2	Masse und Massenpunkt	19
1.1.3	Die Länge	20
1.1.4	Die Zeit	21
1.2	Kinematik des Massenpunktes	25
1.2.1	Der Massenpunkt auf der Geraden	25
1.2.2	Der Massenpunkt im dreidimensionalen Raum	27
1.2.3	Die Kreisbewegung	31
1.2.4	Kinematik bezogen auf die Bahn des Massenpunktes	34
1.3	Die Newtonschen Axiome	37
1.3.1	Das Prinzip vom Parallelogramm der Kräfte	38
1.3.2	Das Reaktionsprinzip	39
1.3.3	Das Trägheitsgesetz	40
1.3.4	Das Grundgesetz der Dynamik	40
1.3.5	Integralform des Grundgesetzes	42
1.4	Arbeit und Energie	42
1.4.1	Die Arbeit	42
1.4.2	Die Leistung	44
1.4.3	Kraftfelder	45
1.4.4	Konservative Kraftfelder	46
1.4.5	Die potentielle Energie	48
1.4.6	Die kinetische Energie	49
1.5	Die Gravitation	49
1.5.1	Die Keplerschen Gesetze	50
1.5.2	Das universelle Gravitationsgesetz von Newton	50
1.5.3	Gravitationsfeld eines Massenpunktes	52
1.5.4	Gravitationsfeld eines Systems von Massenpunkten	54
1.5.5	Massenverteilung und Dichte	55
1.5.6	Gravitationsfeld einer kontinuierlichen Massenverteilung	56
1.5.7	Gravitationsfeld einer homogenen Kugel	57
1.5.8	Gravitationsfeld einer kugelsymmetrischen Massenverteilung	58
1.5.9	Das Gewicht	58
1.5.10	Gewichtsbedingte Bewegungen	59
1.5.11	Identität von schwerer und träger Masse	61
1.6	Zentralbewegungen	61
1.6.1	Mechanisches Drehmoment und Drall	62
1.6.2	Bewegungen bedingt durch Zentralkräfte	62

1.7	Rückstoß und Raketenantrieb	63
1.7.1	Der Rückstoß eines Geschützes	64
1.7.2	Der Schub der Düse	64
1.7.3	Die allgemeine Raketengleichung	65
1.7.4	Die Bewegung der kräftefreien Rakete	65
1.8	Systeme von Massenpunkten	65
1.8.1	Der Impulssatz	66
1.8.2	Impulserhaltung	66
1.8.3	Der Schwerpunktsatz	67
1.8.4	Der Drallsatz	67
1.8.5	Erhaltung des Dralls	69
1.8.6	Der Energiesatz	69
1.9	Stöße	70
1.9.1	Das Stoßproblem	70
1.9.2	Erhaltungssätze	71
1.9.3	Stoßtypen	71
1.9.4	Der Stoß auf der Geraden	71
1.9.5	Der ebene elastische Stoß von gleichen Massen	72
1.10	Gleichgewicht und Stabilität	72
1.10.1	Gleichgewichtslagen	73
1.10.2	Klassifizierung des Gleichgewichts	73
1.10.3	Strukturelle Stabilität	74
1.10.4	Katastrophen	75
1.10.5	Der Wattsche Zentrifugalregulator	76
1.11	Darstellungen der klassischen Mechanik	78
1.11.1	Newton-Mechanik	78
1.11.2	Lagrange-Mechanik	79
1.11.3	Hamilton-Mechanik	79
1.11.4	Hamilton-Jacobi-Mechanik	80
2	Relativität	83
2.1	Klassische Relativität gleichförmig bewegter Bezugssysteme	83
2.1.1	Das Relativitätsprinzip	83
2.1.2	Die Galilei-Transformation	84
2.1.3	Die klassische Mechanik	84
2.2	Klassische Relativität beschleunigter Bezugssysteme	84
2.2.1	Trägheitskräfte	84
2.2.2	Das Prinzip von d'Alembert	85
2.2.3	Gleichförmig rotierende Bezugssysteme	86
2.2.4	Die Erde als rotierendes Bezugssystem	88

2.3	Die spezielle Relativitätstheorie	89
2.3.1	Widersprüche zur klassischen Relativität	89
2.3.2	Die Theorie von Einstein	90
2.3.3	Der Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten	92
2.4	Aspekte der speziellen Relativitätstheorie	92
2.4.1	Die Addition von Geschwindigkeiten	92
2.4.2	Die Lorentz-Kontraktion	93
2.4.3	Die Zeitdilatation	94
2.4.4	Relativität der Gleichzeitigkeit	94
2.4.5	Relativistische Beschleunigung	95
2.5	Die relativistische Energie	95
2.5.1	Die Beziehung von Einstein	95
2.5.2	Relativistische Energie und Ruhmasse	96
2.5.3	Relativistische Energie und Impuls	96
2.5.4	Die kinetische Energie	97
3	Mechanik der starren Körper	98
3.1	Grundbegriffe und Kinematik	98
3.1.1	Definition des starren Körpers	98
3.1.2	Masse und Dichte	98
3.1.3	Der Schwerpunkt	98
3.1.4	Drehungen des starren Körpers	99
3.1.5	Freiheitsgrade der Bewegung	100
3.2	Statik des starren Körpers	100
3.2.1	Kräfte am starren Körper	100
3.2.2	Kräftepaare	101
3.2.3	Die Dynamik	102
3.2.4	Die Wirkung der Schwerkraft auf den starren Körper	103
3.3	Der starre Rotator	103
3.3.1	Kinematik des starren Rotators	103
3.3.2	Das Trägheitsmoment	104
3.3.3	Der Drehimpuls des starren Rotators	105
3.3.4	Dynamik des starren Rotators	106
3.3.5	Das physikalische Pendel	108
3.4	Der Kreisel	109
3.4.1	Kinematik des Kreisels	109
3.4.2	Drehimpuls und kinetische Energie	110
3.4.3	Dynamik des kräftefreien Kreisels	112
3.4.4	Kreisel unter dem Einfluß von Kräften	115

4	Mechanik deformierbarer Medien	117
4.1	Mechanische Eigenschaften der Materie	117
4.1.1	Mechanische Spannungen	117
4.1.2	Oberflächenspannung	122
4.1.3	Übersicht	125
4.2	Statik der Flüssigkeiten und Gase	126
4.2.1	Massenkräfte	126
4.2.2	Volumenkräfte oder Kraftdichten	126
4.2.3	Druck und Druckgradient	127
4.2.4	Flüssigkeiten und Gase im Schwerfeld	128
4.3	Kinematik der Flüssigkeiten und Gase	130
4.3.1	Lokale und totale zeitliche Änderungen	130
4.3.2	Die Kontinuitätsgleichung	132
4.3.3	Stationäre Strömungen	133
4.3.4	Strömungen inkompressibler Flüssigkeiten	134
4.3.5	Stationäre Potentialströmungen	134
4.3.6	Rotation und Zirkulation	135
4.4	Dynamik der reibungslosen Flüssigkeiten und Gase	136
4.4.1	Die Bewegungsdifferentialgleichung	136
4.4.2	Die Bernoulli-Gleichung	137
4.4.3	Die Bernoulli-Gleichung inkompressibler reibungsloser Flüssigkeiten	137
4.4.4	Laminare Strömung einer inkompressiblen reibungslosen Flüssigkeit in einem Rohr	138
4.5	Potentialströmungen inkompressibler Flüssigkeiten	139
4.5.1	Definition	139
4.5.2	Das Geschwindigkeitspotential	139
4.5.3	Paradoxon von d'Alembert	140
4.5.4	Komplexe Darstellung der ebenen Potentialströmung	140
4.5.5	Komplexe Darstellung einer Quelle in der Ebene	141
4.5.6	Die komplexe Darstellung der Potentialströmung um einen Zylinder	142
4.6	Wirbel	142
4.6.1	Der Potentialwirbel	142
4.6.2	Die Helmholtz'schen Wirbelsätze	144
4.6.3	Strömungen um Wirbelfäden	145
4.7	Überschallströmungen	145
4.7.1	Der Machsche Kegel	145
4.7.2	Unter- und Überschallströmungen eines idealen Gases in einem Rohr	146

4.8	Dynamik viskoser Flüssigkeiten und Gase	149
4.8.1	Viskosität	149
4.8.2	Spannungstensoren der Viskosität	152
4.8.3	Volumenkräfte der Viskosität	152
4.8.4	Die Bewegungsgleichung viskoser Medien	153
4.8.5	Reibungswiderstand in viskosen Flüssigkeiten	154
4.8.6	Ähnlichkeitsgesetze	156
4.9	Turbulente Strömungen	158
4.9.1	Turbulenz und Reynolds-Kriterium	158
4.9.2	Turbulente Strömung in einem Rohr	159
4.9.3	Die Prandtlsche Grenzschicht	160
4.9.4	Druckwiderstand auf umströmte Körper	162
4.9.5	Strömungswiderstand einer Kugel	163
4.9.6	Widerstand einer Strömung parallel zu einer Wand	165
4.10	Der dynamische Auftrieb	165
4.10.1	Das Gesetz von Kutta-Joukowski	165
4.10.2	Der Magnus-Effekt	166
4.10.3	Auftrieb und induzierter Widerstand eines Flügels	167
5	Elektrizität und Magnetismus	171
5.1	Elektrostatik	171
5.1.1	Die elektrische Ladung	171
5.1.2	Wechselwirkung zwischen zwei elektrischen Punktladungen	172
5.1.3	Elektrische Felder	173
5.1.4	Elektrostatik von Metallen	177
5.1.5	Elektrische Kondensatoren	181
5.1.6	Die Energie im elektrischen Feld	184
5.1.7	Kräfte im elektrischen Feld	184
5.1.8	Permanente elektrische Dipole	186
5.1.9	Induzierte elektrische Dipole	188
5.2	Dielektrische Eigenschaften der Materie	189
5.2.1	Phänomenologie	189
5.2.2	Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika	191
5.2.3	Die elektrische Polarisierung	192
5.2.4	Atomistische Deutung der dielektrischen Eigenschaften	193
5.2.5	Dielektrische Dispersion	194
5.3	Stationäre elektrische Ströme	196
5.3.1	Der elektrische Strom	196
5.3.2	Das ohmsche Gesetz	197
5.3.3	Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit	198
5.3.4	Die Kontinuitätsgleichung des elektrischen Stromes	199
5.3.5	Potentialtheorie der ohmschen Leiter	199
5.3.6	Die Leistung des elektrischen Stromes	200

5.4	Elektrische Leiter	201
5.4.1	Die Faraday-Gesetze der Elektrolyse	201
5.4.2	Mikroskopische Deutung der elektrischen Leitfähigkeit	201
5.4.3	Feste elektrische Leiter	203
5.4.4	Normale Metalle	205
5.4.5	Supraleiter	206
5.4.6	Halbleiter	210
5.5	Magnetismus	213
5.5.1	Einleitung	213
5.5.2	Magnetische Dipole	213
5.5.3	Die Feldgleichung des Magnetismus	215
5.5.4	Magnetfelder elektrischer Ströme	215
5.5.5	Bewegte elektrische Ladungen im magnetischen Feld	217
5.5.6	Das Induktionsgesetz von Faraday	219
5.5.7	Anwendungen des Induktionsgesetzes	221
5.5.8	Magnetische Feldenergie und magnetische Kräfte	223
5.5.9	Der magnetische Dipol als Kreisstrom	223
5.6	Magnetische Eigenschaften der Materie	225
5.6.1	Phänomenologie	225
5.6.2	Grenzflächen zwischen zwei Magnetika	227
5.6.3	Die Magnetisierung	228
5.6.4	Der Zusammenhang zwischen dem Magnetfeld, der Magnetisierung und der magnetischen Induktion	229
5.6.5	Mikroskopische Deutung der magnetischen Eigenschaften	230
5.7	Quasistationäre Ströme	233
5.7.1	Einleitung	233
5.7.2	Lineare Schaltungen	233
5.7.3	Wechselströme	235
5.7.4	Schaltvorgänge und Impulse	237
5.8	Die Maxwellschen Gleichungen	240
5.8.1	Korrektur des Durchflutungsgesetzes von Ampère	240
5.8.2	Vollständige phänomenologische Theorie der Elektrizität und des Magnetismus	240
5.8.3	Die elektromagnetischen Eigenschaften des Vakuums	241
6	Schwingungen und Wellen	242
6.1	Harmonische Schwingungen	242
6.1.1	Definition	242
6.1.2	Beispiele harmonischer Oszillatoren	242
6.1.3	Lösungen der Bewegungsgleichung des harmonischen Oszillators	243
6.1.4	Energie des harmonischen Oszillators	244

6.2	Linear gedämpfte harmonische Schwingungen	244
6.2.1	Definition	244
6.2.2	Beispiele linear gedämpfter harmonischer Oszillatoren	245
6.2.3	Lösungen der Bewegungsgleichung	246
6.3	Erzwungene harmonische Schwingungen	247
6.3.1	Definition	247
6.3.2	Erzwungene Schwingung im LRC-Schwingkreis	247
6.3.3	Erzwungene Schwingungen bei unterkritischer Dämpfung	247
6.3.4	Resonanz und Kreisgüte	249
6.4	Rückkopplung	251
6.4.1	Definition	251
6.4.2	Stromproportionale Rückkopplung eines LRC-Schwingkreises	251
6.4.3	Wirkungen der Rückkopplung	252
6.5	Gekoppelte Schwingungen	253
6.5.1	Das System der Bewegungsgleichungen	253
6.5.2	Normalkoordinaten und Eigenkreisfrequenzen	253
6.5.3	Normal- oder Eigenschwingungen	254
6.5.4	Wirkung der Kopplung auf entartete Normalschwingungen	255
6.5.5	Schwingungen zweiatomiger Moleküle	255
6.5.6	Schwingungen mehratomiger Moleküle	256
6.5.7	Schwebungen	257
6.6	Das Frequenzspektrum	258
6.6.1	Fourier-Reihen	258
6.6.2	Amplitudenmodulation	259
6.6.3	Die Fourier-Transformation	260
6.7	Zweidimensionale harmonische Schwingungen	261
6.7.1	Lissajous-Figuren	261
6.7.2	Phasenvergleich gleichfrequenter Schwingungen	262
6.7.3	Zweidimensionale Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen	262
6.8	Wellen und Wellengeschwindigkeiten	263
6.8.1	Der Begriff Welle	263
6.8.2	Wellentypen	264
6.8.3	Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	265
6.8.4	Überlagerung von Wellen	266
6.8.5	Harmonische Wellen	266
6.8.6	Dispersion und Gruppengeschwindigkeit	268
6.9	Wellen ohne Dispersion	271
6.9.1	Die Wellengleichung	271
6.9.2	Lösungen der Wellengleichung	271
6.9.3	Seilwellen	273
6.9.4	Schallwellen in Flüssigkeiten und Gasen	274
6.9.5	Elektromagnetische Wellen im Vakuum	278

6.10	Wellen mit Dispersion	280
6.10.1	Dispersion und Wellengleichung	280
6.10.2	Wellen auf der linearen Kette	281
6.10.3	Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen	283
6.10.4	Elektromagnetische Wellen in dispersiven Medien	284
6.10.5	Plasmawellen	285
6.11	Stehende Wellen	286
6.11.1	Grundlagen	286
6.11.2	Stehende Wellen auf Saiten	287
6.11.3	Stehende Wellen auf Membranen	289
6.12	Reflexion und Brechung von Wellen an ebenen Grenzflächen	290
6.12.1	Reflexion bei senkrechtem Einfall	290
6.12.2	Das Brechungsgesetz von Snellius	291
6.12.3	Die Totalreflexion	291
6.12.4	Polarisation bei Reflexion und Brechung	292
6.12.5	Brewster-Bedingung	292
6.13	Geometrische Optik	293
6.13.1	Laufzeit und Lichtweg	293
6.13.2	Das Fermatsche Prinzip	294
6.13.3	Paraxiale Optik	296
6.13.4	Photometrie	300
6.14	Interferenz	302
6.14.1	Zweistrahlintereferenz	302
6.14.2	Schallinterferenz nach Quincke	303
6.14.3	Das Michelson-Interferometer	303
6.14.4	Fourier-Spektroskopie	304
6.14.5	Vielstrahlinterferenz	304
6.14.6	Das Interferometer von Fabry und Perot	306
6.14.7	Kohärenz	307
6.15	Beugung	307
6.15.1	Beugung und geometrische Optik	307
6.15.2	Das Prinzip von Huygens	308
6.15.3	Fraunhofer-Beugung am Spalt	308
6.15.4	Beugungsgitter	310
6.15.5	Auflösungsvermögen von Mikroskopen nach Abbe	311
6.16	Abstrahlung elektromagnetischer Wellen	312
6.16.1	Vektorpotential und Hertzscher Vektor	312
6.16.2	Hertzor Dipol	315
6.16.3	Die Stabantenne	317
6.16.4	Abstrahlung einer beschleunigten Punktladung	318

6.17	Doppler- Effekt	318
6.17.1	Normaler Doppler-Effekt	319
6.17.2	Relativistischer Doppler-Effekt der elektromagnetischen Wellen . . .	319
7	Quanten- und Wellenmechanik	321
7.1	Quantentheorie der elektromagnetischen Strahlung	321
7.1.1	Die Planckschen Beziehungen	321
7.1.2	Der photoelektrische Effekt	322
7.1.3	Die Bremsstrahlung	323
7.1.4	Der Compton-Effekt	323
7.1.5	Der Strahlungsdruck	324
7.1.6	Wirkung der Gravitation auf Photonen	325
7.2	Wellennatur der Materieteilchen	326
7.2.1	Die Beziehung von de Broglie	326
7.2.2	Die Dispersion der de Broglie-Wellen	327
7.2.3	Kathodenstrahlen	327
7.3	Grundbegriffe der Wellenmechanik	328
7.3.1	Aufgabe und Eigenart der Wellenmechanik	328
7.3.2	Quantenmechanische Operatoren	329
7.3.3	Der Hamilton-Operator	331
7.3.4	Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung	331
7.3.5	Die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	332
7.3.6	Das Teilchen im Potentialtopf	334
7.4	Die Bedeutung der Wellenfunktion	335
7.4.1	Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit	335
7.4.2	Erwartungswerte und Schwankungsquadrate von Observablen	337
7.4.3	Heisenbergsche Vertauschungsrelationen und Unbestimmtheitsrelation	339
7.4.4	Die Kontinuitätsgleichung der Wellenmechanik	340
7.4.5	Mathematische Eigenschaften der Eigenfunktionen	341
7.4.6	Matrixdarstellung quantenmechanischer Operatoren	343
7.5	Wellenmechanik des eindimensionalen harmonischen Oszillators	345
7.5.1	Die Schrödinger-Gleichung des harmonischen Oszillators	345
7.5.2	Energieeigenwerte und Eigenfunktionen	346
7.5.3	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	348
7.6	Die Quantenmechanik des Drehimpulses	350
7.6.1	Drehimpulsoperatoren	350
7.6.2	Eigenwerte und Eigenfunktionen	351

7.7	Quantisierte magnetische Dipolmomente	352
7.7.1	Das Bohrsche Magneton	352
7.7.2	Das quantisierte magnetische Dipolmoment des Elektronendralls	354
7.7.3	Der Elektronenspin und sein magnetisches Moment	354
7.7.4	Kernspins und ihre magnetischen Momente	357
7.8	Quantenmechanik des Wasserstoffatoms	359
7.8.1	Einfaches Modell des Wasserstoffatoms	359
7.8.2	Die Schrödinger-Gleichung des Wasserstoffatoms	359
7.8.3	Energieeigenwerte und Eigenfunktionen	361
7.8.4	Der Drehimpuls des Wasserstoffatoms	363
7.8.5	Exakt meßbare Observable des Wasserstoffatoms	363
7.8.6	Spektrallinien des Wasserstoffatoms	363
7.9	Das Elektron im periodischen Potential	364
7.9.1	Elektronen im Festkörper	364
7.9.2	Bloch-Wellen	366
7.9.3	Die Bandstruktur der Energie	368
8	Thermodynamik	371
8.1	Zustandsgleichung und Temperatur	371
8.1.1	Grundbegriffe	371
8.1.2	Aggregatzustände und Phasen	372
8.1.3	Temperaturskalen	374
8.1.4	Die Zustandsgleichung der idealen Gase	375
8.1.5	Die Zustandsgleichung der realen Gase	376
8.2	Wärmekapazitäten	378
8.2.1	Die Wärme	378
8.2.2	Spezifische und molare Wärmekapazitäten	379
8.2.3	Molare Wärmekapazitäten idealer Gase	379
8.2.4	Molare Wärmekapazitäten fester Körper	380
8.3	Wärmeleitung	382
8.3.1	Der Wärmestrom	382
8.3.2	Die erste Wärmeleitungsgleichung	382
8.3.3	Die Kontinuitätsgleichung der Wärme	383
8.3.4	Die zweite Wärmeleitungsgleichung	383
8.3.5	Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	384
8.3.6	Der eindimensionale Wärmepol	385
8.3.7	Komplexe Dispersionsrelation von Wärmeleitung und Diffusion	385
8.4	Wärme, Arbeit und Energie	387
8.4.1	Arbeit an und von thermodynamischen Systemen	387
8.4.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	387
8.4.3	Molare Wärmekapazitäten der idealen Gase	388

8.5	Entropie und zweiter Hauptsatz	390
8.5.1	Zustandsänderungen	390
8.5.2	Reversible adiabatische Zustandsänderungen idealer Gase	391
8.5.3	Der Carnotsche Kreisprozeß	391
8.5.4	Die Entropie	395
8.5.5	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	396
8.6	Thermodynamische Potentiale	398
8.6.1	Übersicht	398
8.6.2	Die innere Energie	398
8.6.3	Die Enthalpie	399
8.6.4	Die Helmholtzsche freie Energie	400
8.6.5	Das Gibbssche Potential	401
8.6.6	Relationen zwischen thermodynamischen Potentialen und Zustandsgrößen	402
8.7	Spezielle thermodynamische Zustandsänderungen	403
8.7.1	Isotherm isobare Phasenumwandlungen	403
8.7.2	Der Joule-Thomson-Effekt	404
8.8	Das Nernstsche Wärmetheorem	405
8.8.1	Die Entropie beim absoluten Temperaturnullpunkt	405
8.8.2	Unerreichbarkeit des absoluten Temperaturnullpunkts	406
9	Statistische Mechanik	407
9.1	Die Brownsche Bewegung	407
9.1.1	Das Phänomen und seine Bedeutung	407
9.1.2	Die Formel von Einstein	407
9.2	Boltzmann-Statistik	408
9.2.1	Beschreibung des Systems	408
9.2.2	Der Phasenraum	408
9.2.3	Statistische Mittelwerte	409
9.2.4	Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit	410
9.2.5	Boltzmann-Statistik einer kanonischen Gesamtheit	412
9.2.6	Statistische Deutung thermodynamischer Größen	413
9.2.7	Statistische Schwankungen thermodynamischer Größen	414
9.3	Kinetische Theorie der einatomigen idealen Gase	415
9.3.1	Der Phasenraum	415
9.3.2	Die Zustandssumme	415
9.3.3	Thermodynamische Größen	416
9.3.4	Die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung	416
9.3.5	Das Äquipartitions- oder Gleichverteilungsgesetz	417

9.4	Quantenstatistik	418
9.4.1	Fermionen und Bosonen	418
9.4.2	Die Verteilungsfunktionen von Fermi-Dirac und Bose-Einstein	419
9.4.3	Statistik des harmonischen Oszillators	420
9.4.4	Einstein-Modell der spezifischen Wärme	421
9.4.5	Zustandsdichten	422
9.4.6	Das Elektronengas in Metallen	423
9.4.7	Theorie der Wärmestrahlung	424
10	Atomkerne und Elementarteilchen	429
10.1	Einleitung	429
10.1.1	Abmessungen und Energien	429
10.1.2	Der Wirkungsquerschnitt	429
10.1.3	Streuung	430
10.2	Der Aufbau der Atomkerne	431
10.2.1	Bausteine der Kerne	431
10.2.2	Kernradien	432
10.2.3	Kernkräfte	433
10.2.4	Bindungsenergie der Kerne	434
10.2.5	Kernniveaus	436
10.3	Radioaktivität	437
10.3.1	Instabile Kerne	437
10.3.2	Das statistische Zerfallsgesetz	438
10.3.3	Der α -Zerfall	439
10.3.4	Der β -Zerfall	441
10.3.5	Die γ -Strahlung	442
10.4	Kernreaktionen	443
10.4.1	Kernreaktionen mit Neutroneneinfang	443
10.4.2	Kernreaktionen mit geladenen Teilchen	444
10.4.3	Kernspaltung	444
10.4.4	Kernverschmelzung	446
10.5	Elementarteilchen	446
10.5.1	Klassifizierung	446
10.5.2	Innere Struktur	449
10.5.3	Wechselwirkung und Zerfälle	450

Anhang

A 1	Literatur	452
A 1.1	Physik allgemein	452
A 1.2	Physik speziell	454

A 1.3	Mathematik allgemein	459
A 1.4	Mathematik speziell	460
A 1.5	Fachwörterbücher und Lexika	461
A 2	Physikalische Einheiten	462
A 2.1	Einleitung	462
A 2.1.1	Einheitensysteme	462
A 2.1.2	Zehnerpotenzen physikalischer Einheiten	463
A 2.1.3	Logarithmische Einheiten	463
A 2.2	Mechanische Einheiten	463
A 2.3	Elektrische und magnetische Einheiten	468
A 2.3.1	Vergleich verschiedener Einheiten	468
A 2.3.2	Elektromagnetische Gleichungen	471
A 2.3.3	Beschreibung des elektrischen Verhaltens der Materie	472
A 2.3.4	Beschreibung des magnetischen Verhaltens der Materie	472
A 2.4	Skala der elektromagnetischen Wellen	473
A 2.5	Thermodynamische Einheiten	474
A 2.6	Molekulare Energieeinheiten	474
A 2.7	Photometrische Einheiten	475
A 3	Physikalische Konstanten und Tabellen	476
A 3.1	Konstanten	476
A 3.2	Periodisches System der Elemente	478
A 3.3	Grundzustände der Atome	479
A 4	Mathematische Tabellen	482
A 4.1	Mathematische Konstanten	482
A 4.1.1	Reelle Zahlen	482
A 4.1.2	Komplexe Zahlen	482
A 4.2	Spezielle Funktionen	483
A 4.2.1	Die Exponentialfunktion	483
A 4.2.2	Der natürliche Logarithmus	484
A 4.2.3	Die Hyperbelfunktionen	485
A 4.2.4	Inverse Hyperbelfunktionen	487
A 4.2.5	Die trigonometrischen Funktionen	488
A 4.2.6	Die zyklometrischen Funktionen	491
A 4.2.7	Zylinderfunktionen ganzzahliger Ordnung	492
A 4.2.8	Hermite-Polynome	495
A 4.2.9	Legendre-Polynome und zugeordnete Legendre-Kugel- funktionen	496

A 4.2.10	Laguerre-Polynome	497
A 4.2.11	Kugelfunktionen und Orbitale	498
A 4.2.12	Normierte Eigenfunktionen des Wasserstoffatoms	499
A 4.2.13	Die δ -, „Funktion“	499
A 4.3	Fourier-Reihen	500
A 4.4	Laplace-Transformation	502
A 4.5	Gewöhnliche Differentialgleichungen	503
A 4.5.1	Homogene lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	503
A 4.5.2	Inhomogene lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	504
A 4.5.3	Homogene lineare Differentialgleichungen mit veränderlichen Koeffizienten	506
A 4.5.4	Inhomogene lineare Differentialgleichungen mit veränderlichen Koeffizienten	508
A 4.5.5	Nichtlineare Differentialgleichungen	508
A 4.6	Vektoralgebra im reellen dreidimensionalen Raum	509
A 4.6.1	Vektoren	509
A 4.6.2	Das Skalarprodukt	510
A 4.6.3	Das Vektorprodukt	511
A 4.6.4	Gemischte Produkte	511
A 4.6.5	Kartesisches Koordinatensystem	511
A 4.6.6	Polare und axiale Vektoren	512
A 4.7	Vektoranalysis im reellen dreidimensionalen Raum	513
A 4.7.1	Definition der Operatoren in kartesischen Koordinaten	513
A 4.7.2	Operatoren in Zylinderkoordinaten	514
A 4.7.3	Operatoren in Kugelkoordinaten	514
A 4.7.4	Allgemeine Rechenregeln	515
A 4.7.5	Integralsätze	515
A 4.8	Statistische Verteilungen	517
A 4.8.1	Grundlagen	517
A 4.8.2	Die Binomialverteilung	517
A 4.8.3	Die Poisson-Verteilung	517
A 4.8.4	Die Normalverteilung	518
A 5	Fachwörter der Physik	519
	Sachverzeichnis	536