

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 1

Mechanik und Wärme

2. überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 575, meist zweifarbigen Abbildungen,
9 Farbtafeln, 38 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 164 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung und Überblick

1.1	Die Bedeutung des Experimentes	1
1.2	Der Modellbegriff in der Physik	3
1.3	Historischer Rückblick	5
1.3.1	Die antike Naturphilosophie	5
1.3.2	Die Entwicklung der klassischen Physik	7
1.3.3	Die moderne Physik	10
1.4	Unser heutiges physikalisches Weltbild	11
1.5	Beziehungen zwischen Physik und Nachbarwissenschaften	15
1.5.1	Biophysik und medizinische Physik	15
1.5.2	Astrophysik	16
1.5.3	Geophysik und Meteorologie	16
1.5.4	Physik und Technik	16
1.5.5	Physik und Philosophie	17
1.6	Die Grundgrößen in der Physik, ihre Normale und Meßverfahren .	18
1.6.1	Längeneinheiten	19
1.6.2	Meßverfahren für Längen	20
1.6.3	Zeiteinheiten	22
1.6.4	Zeitmessungen	25
1.6.5	Masseneinheiten und ihre Messung	25
1.6.6	Temperatureinheit	26
1.6.7	Einheit der elektrischen Stromstärke	26
1.6.8	Winkleinheiten	27
1.7	Maßsysteme	28
1.8	Meßgenauigkeit und Meßfehler	28
1.8.1	Systematische Fehler	28
1.8.2	Statistische Fehler. Meßwertverteilung und Mittelwert ...	29
1.8.3	Streuungsmaße	30
1.8.4	Fehlerverteilungsgesetz	31
1.8.5	Fehlerfortpflanzung	32
1.8.6	Ausgleichsrechnung	33

2. Mechanik eines Massenpunktes

2.1	Das Modell des Massenpunktes. Bahnkurve	37
2.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung	38

2.3	Bewegungsgleichung der gleichförmig beschleunigten Bewegung .	40
2.3.1	Der freie Fall	41
2.3.2	Der schräge Wurf	41
2.4	Bewegungen mit nicht-konstanter Beschleunigung	42
2.4.1	Die gleichförmige Kreisbewegung	42
2.4.2	Die allgemeine krummlinige Bewegung	43
2.5	Kräfte	45
2.5.1	Kräfte als Vektoren. Addition von Kräften	45
2.5.2	Kraftfelder	46
2.5.3	Messung von Kräften. Diskussion des Kraftbegriffes	47
2.6	Die Grundgleichungen der Mechanik	48
2.6.1	Die Newtonschen Axiome	48
2.6.2	Träge und schwere Masse	50
2.6.3	Die Bewegungsgleichung eines Teilchens in einem beliebigen Kraftfeld	51
2.7	Der Energiesatz der Mechanik	54
2.7.1	Arbeit und Leistung	54
2.7.2	Wegunabhängige Arbeit. Konservative Kraftfelder	55
2.7.3	Potentielle Energie	57
2.7.4	Der Energiesatz der Mechanik	58
2.7.5	Zusammenhang zwischen Kraftfeld und Potential	59
2.8	Drehimpuls und Drehmoment	60
2.9	Gravitation und Planetenbewegungen	61
2.9.1	Die Keplerschen Gesetze	61
2.9.2	Newtons Gravitationsgesetz	63
2.9.3	Planetenbahnen	64
2.9.4	Das effektive Potential	66
2.9.5	Gravitationsfeld ausgedehnter Körper	67
2.9.6	Experimentelle Prüfung des Gravitationsgesetzes	70
2.9.7	Experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung	72

3. Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie

3.1	Relativbewegung	77
3.2	Inertialsysteme und Galilei-Transformation	77
3.3	Beschleunigte Bezugssysteme, Trägheitskräfte	79
3.3.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme	79
3.3.2	Rotierende Bezugssysteme	81
3.3.3	Zentrifugal- und Corioliskräfte	83
3.3.4	Zusammenfassung	86
3.4	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	86
3.5	Lorentz-Transformationen	87
3.6	Spezielle Relativitätstheorie	89
3.6.1	Das Problem der Gleichzeitigkeit	89
3.6.2	Minkowski-Diagramme	90
3.6.3	Lorentz-Kontraktion von Längen	92

3.6.4	Zeitdilatation	93
3.6.5	Zwillings-Paradoxon	95
3.6.6	Raumzeit-Ereignisse und Kausalität	98
4. Systeme von Massenpunkten. Stöße		
4.1	Grundbegriffe	101
4.1.1	Schwerpunkt	101
4.1.2	Reduzierte Masse	102
4.1.3	Drehimpuls eines Teilchensystems	103
4.2	Stöße zwischen zwei Teilchen	105
4.2.1	Grundgleichungen	105
4.2.2	Elastische Stöße im Laborsystem	106
4.2.3	Elastische Stöße im Schwerpunktsystem	109
4.2.4	Inelastische Stöße	111
4.2.5	Newton-Diagramme	112
4.3	Was lernt man aus der Untersuchung von Stößen?	113
4.3.1	Streuung in einem Potential	114
4.4	Stöße bei relativistischen Energien	117
4.4.1	Relativistische Massenzunahme	117
4.4.2	Kraft und relativistischer Impuls	118
4.4.3	Die relativistische Energie	119
4.4.4	Unelastische Stöße bei relativistischen Energien	120
4.4.5	Relativistischer Energiesatz	121
5. Dynamik starrer ausgedehnter Körper		
5.1	Das Modell des starren Körpers	125
5.2	Massenschwerpunkt	126
5.3	Die Bewegung eines starren Körpers	127
5.4	Kräfte und Kräftepaare	127
5.5	Trägheitsmoment und Rotationsenergie	129
5.5.1	Steinerscher Satz	130
5.6	Bewegungsgleichung der Rotation eines starren Körpers	132
5.6.1	Rotation um eine Achse bei konstantem Drehmoment	133
5.6.2	Drehschwingungen um eine feste Achse	134
5.6.3	Vergleich von Translation und Rotation	135
5.7	Rotation um freie Achsen. Kreiselbewegungen	135
5.7.1	Trägheitstensor und Trägheitsellipsoid	136
5.7.2	Hauptträgheitsmomente	137
5.7.3	Freie Achsen	139
5.7.4	Die Eulerschen Gleichungen	141
5.7.5	Der kräftefreie symmetrische Kreisel	141
5.7.6	Präzession des symmetrischen Kreisels	144
5.8	Die Erde als symmetrischer Kreisel	146

6. Reale feste und flüssige Körper

6.1	Atomares Modell der Aggregatzustände	151
6.2	Deformierbare feste Körper	153
6.2.1	Hookesches Gesetz	153
6.2.2	Querkontraktion	155
6.2.3	Scherung und Torsionsmodul	156
6.2.4	Biegung eines Balkens	157
6.2.5	Elastische Hysterese, Deformationsarbeit	159
6.2.6	Die Härte eines Festkörpers	160
6.3	Ruhende Flüssigkeiten, Hydrostatik	161
6.3.1	Freie Verschiebbarkeit und Oberflächen von Flüssigkeiten	161
6.3.2	Statischer Druck in einer Flüssigkeit	162
6.3.3	Auftrieb und Schwimmen	164
6.4	Phänomene an Flüssigkeitsgrenzflächen	165
6.4.1	Oberflächenspannung	166
6.4.2	Grenzflächen und Haftspannung	167
6.4.3	Kapillarität	170
6.4.4	Zusammenfassung	171
6.5	Reibung zwischen festen Körpern	171
6.5.1	Haftreibung	172
6.5.2	Gleitreibung	173
6.5.3	Rollreibung	173
6.5.4	Bedeutung der Reibung in der Technik	175
6.6	Die Erde als deformierbarer Körper	176
6.6.1	Polabplattungen der rotierenden Erde	176
6.6.2	Gezeitenverformung	177
6.6.3	Wirkungen der Gezeiten	180
6.6.4	Messung der Erdverformung	181

7. Gase

7.1	Makroskopische Betrachtung	183
7.2	Luftdruck und barometrische Höhenformel	184
7.3	Kinetische Gastheorie	186
7.3.1	Das Modell des idealen Gases	186
7.3.2	Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie	186
7.3.3	Mittlere kinetische Energie und absolute Temperatur	187
7.3.4	Verteilungsfunktion	188
7.3.5	Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung	189
7.3.6	Stoßquerschnitt und mittlere freie Weglänge	192
7.4	Experimentelle Prüfung der kinetischen Gastheorie	194
7.4.1	Molekularstrahlen	194
7.5	Transportprozesse in Gasen	196
7.5.1	Diffusion	197

7.5.2	Brownsche Bewegung	199
7.5.3	Wärmeleitung in Gasen	200
7.5.4	Viskosität von Gasen	201
7.5.5	Zusammenfassung	202
7.6	Die Erdatmosphäre	203
8.	Strömende Flüssigkeiten und Gase	
8.1	Grundbegriffe und Strömungstypen	207
8.2	Euler-Gleichung für ideale Flüssigkeiten	209
8.3	Kontinuitätsgleichung	210
8.4	Bernoulli-Gleichung	211
8.5	Laminare Strömungen	215
8.5.1	Innere Reibung	215
8.5.2	Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden ...	217
8.5.3	Laminare Strömungen durch Rohre	218
8.5.4	Kugelfall-Viskosimeter, Stokessches Gesetz	219
8.6	Navier-Stokes-Gleichung	220
8.6.1	Wirbel und Zirkulation	220
8.6.2	Helmholtzsche Wirbelsätze	223
8.6.3	Die Entstehung von Wirbeln	223
8.6.4	Turbulente Strömungen. Strömungswiderstand	225
8.7	Aerodynamik	227
8.7.1	Der dynamische Auftrieb	227
8.7.2	Zusammenhang zwischen dynamischem Auftrieb und Strömungswiderstand	228
8.7.3	Kräfte beim Fliegen	229
8.8	Ähnlichkeitsgesetze, Reynoldssche Zahl	230
9.	Vakuum-Physik	
9.1	Grundlagen und Grundbegriffe	233
9.1.1	Die verschiedenen Vakuumbereiche	233
9.1.2	Einfluß der Wandbelegung	234
9.1.3	Saugvermögen und Saugleistung von Pumpen	235
9.1.4	Strömungsleitwerte von Vakuumleitungen	235
9.1.5	Erreichbarer Enddruck	237
9.2	Vakuum-Erzeugung	238
9.2.1	Mechanische Pumpen	238
9.2.2	Diffusionspumpen	242
9.2.3	Kryo- und Sorptionspumpen	243
9.3	Messung kleiner Drücke	245
9.3.1	Flüssigkeitsdruckmeßgeräte	246
9.3.2	Membranmanometer	247
9.3.3	Wärmeleitungsmanometer	247
9.3.4	Ionisations- und Penning-Vakuummeter	248
9.3.5	Reibungsvakuummeter	249

10. Mechanische Schwingungen und Wellen

10.1	Der freie ungedämpfte Oszillator	251
10.2	Darstellung von Schwingungen	252
10.3	Überlagerung von Schwingungen	253
10.3.1	Eindimensionale Überlagerungen	253
10.3.2	Zweidimensionale Überlagerung, Lissajous-Figuren	256
10.4	Der freie gedämpfte Oszillator	258
10.5	Erzwungene Schwingungen	260
10.6	Energiebilanz bei der Schwingung eines Massenpunktes	263
10.7	Parametrischer Oszillator	264
10.8	Gekoppelte Oszillatoren	266
10.8.1	Gekoppelte Federpendel	266
10.8.2	Erzwungene Schwingungen zweier gekoppelter Pendel	268
10.8.3	Normalschwingungen	269
10.9	Mechanische Wellen	270
10.9.1	Verschiedene Darstellungen harmonischer ebener Wellen	270
10.9.2	Zusammenfassung	272
10.9.3	Allgemeine Darstellung beliebiger Wellen. Wellengleichung	272
10.9.4	Verschiedene Wellentypen	273
10.9.5	Ausbreitung von Wellen in verschiedenen Medien	276
10.9.6	Energiedichte und Energietransport in einer Welle	281
10.9.7	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	281
10.10	Überlagerung von Wellen	284
10.10.1	Kohärenz und Interferenz	284
10.10.2	Überlagerung zweier harmonischer Wellen	284
10.11	Beugung, Reflexion und Brechung von Wellen	286
10.11.1	Huygenssches Prinzip	286
10.11.2	Beugung an Begrenzungen	288
10.11.3	Zusammenfassung	289
10.11.4	Reflexion und Brechung von Wellen	289
10.12	Stehende Wellen	290
10.12.1	Eindimensionale stehende Wellen	290
10.12.2	Experimentelle Demonstration stehender Wellen	292
10.12.3	Zweidimensionale Eigenschwingungen von Membranen	293
10.13	Wellen bei bewegten Quellen	295
10.13.1	Doppler-Effekt	295
10.13.2	Wellenfronten bei bewegten Quellen	296
10.13.3	Stoßwellen	297
10.14	Akustik	298
10.14.1	Definitionen	298

10.14.2 Druckamplitude und Energiedichte von Schallwellen	299
10.14.3 Erzeugung von Schallwellen	300
10.14.4 Schalldetektoren	300
10.15 Physik der Musikinstrumente	301
10.15.1 Einteilung der Musikinstrumente	301
10.15.2 Akkorde, Tonleitern und Stimmungen	302
10.15.3 Physik der Geige	303
10.15.4 Physik beim Klavierspiel	305

11. Wärmelehre

11.1 Temperatur und Wärmemenge	309
11.1.1 Temperaturmessung, Thermometer und Temperaturskala .	310
11.1.2 Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	312
11.1.3 Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer . . .	315
11.1.4 Absolute Temperaturskala	316
11.1.5 Wärmemenge und spezifische Wärme	316
11.1.6 Molvolumen und Avogadro-Konstante	318
11.1.7 Innere Energie und spezifische Molwärme idealer Gase	318
11.1.8 Molekulare Deutung der spezifischen Wärme	319
11.1.9 Spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck . . .	320
11.1.10 Spezifische Wärme fester Körper	321
11.1.11 Schmelzwärme und Verdampfungswärme	322
11.2 Wärmetransport	323
11.2.1 Konvektion	323
11.2.2 Wärmeleitung	325
11.2.3 Das Wärmerohr (heatpipe)	329
11.2.4 Wärmestrahlung	330
11.2.5 Methoden der Wärmeisolierung	330
11.3 Die Hauptsätze der Thermodynamik	332
11.3.1 Zustandsgrößen	332
11.3.2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	334
11.3.3 Spezielle Prozesse als Beispiele für den ersten Hauptsatz .	334
11.3.4 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	336
11.3.5 Der Carnotsche Kreisprozeß	336
11.3.6 äquivalente Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	339
11.3.7 Die Entropie	340
11.3.8 Reversible und irreversible Prozesse	343
11.3.9 Thermodynamische Potentiale	344
11.3.10 Der dritte Hauptsatz (Nernstsches Theorem)	346
11.3.11 Thermodynamische Maschinen	348
11.4 Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten	350
11.4.1 Van der Waals'sche Zustandsgleichung	350
11.4.2 Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen	352
11.4.3 Lösungen und Mischzustände	359

12. Nichtlineare Dynamik und Chaos

12.1	Stabilität dynamischer Systeme	365
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm	368
12.3	Bevölkerungsexplosion	370
12.4	Selbstähnlichkeit	372
12.5	Fraktale	373
12.6	Mandelbrot-Mengen	374
12.7	Folgerungen für unser Weltverständnis	377

Anhang

1.	Vektorrechnung	381
1.1	Definition des Vektors	381
1.2	Darstellung von Vektoren	381
1.2.1	Kartesische Koordinaten	381
1.2.2	Sphärische oder Polarkoordinaten	382
1.2.3	Zylindrische Koordinaten	382
1.3	Polare und axiale Vektoren	382
1.4	Addition von Vektoren	383
1.5	Multiplikation von Vektoren	383
1.5.1	Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar	383
1.5.2	Das Skalarprodukt	383
1.5.3	Das Vektorprodukt	384
1.5.4	Mehrfache Produkte	384
1.6	Differentiation von Vektoren	385
1.6.1	Vektorfelder	385
1.6.2	Differentiation eines Vektors nach einer skalaren Größe ..	385
1.6.3	Der Gradient einer skalaren Größe	386
1.6.4	Die Divergenz eines Vektorfeldes	386
1.6.5	Die Rotation eines Vektorfeldes	387
1.6.6	Mehrfach-Differentiationen	387
2.	Koordinatensysteme	387
2.1	Kartesische Koordinaten	388
2.2	Zylinderkoordinaten	388
2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten)	389
3.	Komplexe Zahlen	390
3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen	391
3.2	Polardarstellung	391

Lösungen der Übungsaufgaben	393
--	-----

Farbtafeln	421
-------------------------	-----

Literaturverzeichnis	429
-----------------------------------	-----

Sachwortverzeichnis	435
----------------------------------	-----

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 2

Elektrizität und Optik

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 635, meist zweifarbigen Abbildungen,
11 Farbtafeln, 17 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 137 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrostatik

1.1	Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz	1
1.2	Das elektrische Feld	5
1.2.1	Elektrische Feldstärke	5
1.2.2	Elektrischer Kraftfluß; Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes	7
1.3	Elektrostatistisches Potential	8
1.3.1	Potential und Spannung	9
1.3.2	Potentialgleichung	10
1.3.3	Äquipotentialflächen	11
1.3.4	Spezielle Ladungsverteilungen	11
1.4	Multipole	13
1.4.1	Der elektrische Dipol	14
1.4.2	Der elektrische Quadrupol	16
1.4.3	Multipolentwicklung	16
1.5	Leiter im elektrischen Feld	17
1.5.1	Influenz	18
1.5.2	Kondensatoren	19
1.6	Die Energie des elektrischen Feldes	22
1.7	Dielektrika im elektrischen Feld	23
1.7.1	Dielektrische Polarisierung	24
1.7.2	Polarisationsladungen	24
1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	25
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	28
1.8	Die atomaren Grundlagen von Ladungen und elektrischen Momenten	30
1.8.1	Der Millikan-Versuch	30
1.8.2	Ablenkung von Elektronen und Ionen in elektrischen Feldern	31
1.8.3	Molekulare Dipolmomente	31
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	34
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	34
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	35
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	35
1.9.4	Elektrostatische Staubfilter	36

1.9.5	Elektrostatische Farbbeschichtung	36
1.9.6	Elektrostatische Kopierer und Drucker	37
	Zusammenfassung	38
	Übungsaufgaben	39

2. Der elektrische Strom

2.1	Strom als Ladungstransport	41
2.2	Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz	43
2.2.1	Driftgeschwindigkeit und Stromdichte	43
2.2.2	Das Ohmsche Gesetz	45
2.2.3	Beispiele für die Anwendung des Ohmschen Gesetzes	46
2.2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung	47
2.3	Stromleistung und Joulesche Wärme	52
2.4	Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln	53
2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen	53
2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen	54
2.4.3	Wheatstonesche Brückenschaltung	54
2.5	Meßverfahren für elektrische Ströme	55
2.5.1	Strommeßgeräte	55
2.5.2	Schaltung von Amperemetern	56
2.5.3	Strommeßgeräte als Voltmeter	57
2.6	Ionenleitung in Flüssigkeiten	57
2.7	Stromtransport in Gasen; Gasentladungen	59
2.7.1	Ladungsträgerkonzentration	59
2.7.2	Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger	59
2.7.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	60
2.7.4	Mechanismus von Gasentladungen	62
2.7.5	Verschiedene Typen von Gasentladungen	64
2.8	Stromquellen	66
2.8.1	Innenwiderstand einer Stromquelle	66
2.8.2	Galvanische Elemente	66
2.8.3	Akkumulatoren	69
2.8.4	Verschiedene Typen von Batterien	69
2.8.5	Chemische Brennstoffzellen	71
2.9	Thermische Stromquellen	72
2.9.1	Kontaktpotential	72
2.9.2	Thermoelektrische Spannung	72
2.9.3	Peltier-Effekt	73
	Zusammenfassung	74
	Übungsaufgaben	74

3. Statische Magnetfelder

3.1	Permanentmagnete; Polstärke	77
3.2	Magnetfelder stationärer Ströme	79
3.2.1	Magnetischer Kraftfluß und magnetische Spannung	80
3.2.2	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters	81

3.2.3	Magnetfeld im Inneren einer langgestreckten Spule . . .	82
3.2.4	Das Vektorpotential	82
3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz	83
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen	84
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld	88
3.3.1	Experimentelle Demonstration der Lorentzkraft	89
3.3.2	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern	90
3.3.3	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld . . .	92
3.3.4	Hall-Effekt	92
3.3.5	Das Barlowsche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen	93
3.3.6	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern	94
3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip	94
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung	95
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld	97
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom	98
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld	100
3.5	Materie im Magnetfeld	101
3.5.1	Magnetische Dipole	101
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität	103
3.5.3	Diamagnetismus	104
3.5.4	Paramagnetismus	106
3.5.5	Ferromagnetismus	106
3.5.6	Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite	109
3.5.7	Feldgleichungen in Materie	110
3.5.8	Elektromagnete	111
3.6	Das Magnetfeld der Erde	111
	Zusammenfassung	114
	Übungsaufgaben	115

4. Zeitlich veränderliche Felder

4.1	Faradaysches Induktionsgesetz	117
4.2	Lenzsche Regel	120
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung	121
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder	121
4.2.3	Magnetische Levitation	121
4.2.4	Wirbelströme	122
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion	122
4.3.1	Selbstinduktion	122
4.3.2	Gegenseitige Induktion	125
4.4	Die Energie des magnetischen Feldes	127
4.5	Der Verschiebungsstrom	127

4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale	129
	Zusammenfassung	132
	Übungsaufgaben	132
5.	Elektrotechnische Anwendungen	
5.1	Elektrische Generatoren und Motoren	135
5.1.1	Gleichstrommaschinen	137
5.1.2	Wechselstromgeneratoren	140
5.2	Wechselstrom	140
5.3	Mehrphasenstrom; Drehstrom	142
5.4	Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme	145
5.4.1	Wechselstromkreis mit Induktivität	145
5.4.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	145
5.4.3	Allgemeiner Fall	146
5.5	Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter	147
5.5.1	Hochpaß	148
5.5.2	Tiefpaß	149
5.5.3	Frequenzfilter	149
5.6	Transformatoren	150
5.6.1	Unbelasteter Transformator	151
5.6.2	Belasteter Transformator	152
5.6.3	Anwendungsbeispiele	153
5.7	Gleichrichtung	154
5.7.1	Einweggleichrichtung	155
5.7.2	Zweiweggleichrichtung	155
5.7.3	Brückenschaltung	156
5.7.4	Kaskadenschaltung	157
5.8	Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen	157
5.9	Elektronenröhren	158
5.9.1	Vakuum-Dioden	158
5.9.2	Triode	159
	Zusammenfassung	160
	Übungsaufgaben	160
6.	Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen	
6.1	Der elektromagnetische Schwingkreis	163
6.1.1	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	164
6.1.2	Erzwungene Schwingungen	165
6.2	Gekoppelte Schwingkreise	166
6.3	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	168
6.4	Offene Schwingkreise; Hertzscher Dipol	170
6.4.1	Experimentelle Realisierung eines Senders	171
6.4.2	Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols	172
6.5	Die Abstrahlung des schwingenden Dipols	177

6.5.1	Die abgestrahlte Leistung	177
6.5.2	Strahlungsdämpfung	178
6.5.3	Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung	179
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung	179
	Zusammenfassung	182
	Übungsaufgaben	183
7. Elektromagnetische Wellen im Vakuum		
7.1	Die Wellengleichung	185
7.2	Ebene elektrische Wellen	186
7.3	Periodische Wellen	186
7.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen	187
7.4.1	Linear polarisierte Wellen	188
7.4.2	Zirkular polarisierte Wellen	188
7.4.3	Elliptisch polarisierte Wellen	189
7.4.4	Unpolarisierte Wellen	189
7.5	Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen	189
7.6	Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen	190
7.7	Messung der Lichtgeschwindigkeit	194
7.7.1	Die astronomische Methode von Ole Rømer	194
7.7.2	Die Zahnradmethode von Fizeau	194
7.7.3	Phasenmethode	195
7.7.4	Bestimmung von c aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge	195
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen	196
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen	196
7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren	197
7.9	Wellen in Wellenleitern und Kabeln	199
7.9.1	Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten	199
7.9.2	Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt	201
7.9.3	Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel	204
7.9.4	Beispiele für Wellenleiter	206
7.10	Das elektromagnetische Frequenzspektrum	207
	Zusammenfassung	209
	Übungsaufgaben	210
8. Elektromagnetische Wellen in Materie		
8.1	Brechungsindex	213
8.1.1	Makroskopische Beschreibung	214
8.1.2	Mikroskopisches Modell	214
8.2	Absorption und Dispersion	216
8.3	Lichtstreuung	220
8.3.1	Kohärente Streuung; Interferenz	220
8.3.2	Inkohärente Streuung	222
8.3.3	Streuquerschnitte	223
8.3.4	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre	224

8.3.5	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung	226
8.4	Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie . . .	227
8.4.1	Wellen in nichtleitenden Medien	227
8.4.2	Wellen in leitenden Medien	228
8.4.3	Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien	229
8.5	Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien	230
8.5.1	Randbedingungen für elektrische und magnetische Feldstärke	231
8.5.2	Reflexions- und Brechungsgesetz	231
8.5.3	Amplitude und Polarisierung von reflektierten und gebrochenen Wellen	232
8.5.4	Reflexions- und Transmissionsvermögen einer Grenzfläche	234
8.5.5	Brewsterwinkel	235
8.5.6	Totalreflexion	236
8.5.7	Änderung der Polarisierung bei schrägem Lichteinfall	237
8.5.8	Phasenänderung bei der Reflexion	237
8.5.9	Reflexion an Metalloberflächen	239
8.6	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung	240
8.6.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien	241
8.6.2	Brechungsindex-Ellipsoid	242
8.6.3	Doppelbrechung	244
8.7	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht	245
8.7.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion	245
8.7.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle	246
8.7.3	Doppelbrechende Polarisatoren	247
8.7.4	Polarisationsdreher	248
8.7.5	Optische Aktivität	249
8.7.6	Spannungsdoppelbrechung	251
8.8	Nichtlineare Optik	252
8.8.1	Optische Frequenzverdopplung	252
8.8.2	Phasenanpassung	253
8.8.3	Optische Frequenzmischung	254
	Zusammenfassung	255
	Übungsaufgaben	256

9. Geometrische Optik

9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik	258
9.2	Die optische Abbildung	259
9.3	Hohlspiegel	260
9.4	Prismen	264
9.5	Linsen	265
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche	265
9.5.2	Dünne Linsen	267

9.5.3	Dicke Linsen	269
9.5.4	Linsensysteme	271
9.5.5	Zoom-Linsensysteme	272
9.5.6	Linsenfehler	273
9.5.7	Die aplanatische Abbildung	280
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik	282
9.6.1	Die Translationsmatrix	282
9.6.2	Die Brechungsmatrix	282
9.6.3	Die Reflexionsmatrix	283
9.6.4	Transformationsmatrix einer Linse	283
9.6.5	Abbildungsmatrix	284
9.6.6	Matrizen von Linsensystemen	285
9.6.7	Jones-Vektoren	285
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre	287
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre	287
9.7.2	Regenbogen	288
	Zusammenfassung	290
	Übungsaufgaben	290

10. Interferenz und Beugung

10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz	293
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen	295
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz	296
10.3.1	Fresnelscher Spiegelversuch	296
10.3.2	Youngscher Doppelspaltversuch	297
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte	298
10.3.4	Michelson-Interferometer	299
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment	301
10.3.6	Sagnac-Interferometer	304
10.3.7	Mach-Zehnder Interferometer	305
10.4	Vielstrahl-Interferenz	305
10.4.1	Fabry-Perot-Interferometer	307
10.4.2	Dielektrische Spiegel	311
10.4.3	Antireflexschicht	312
10.5	Beugung	313
10.5.1	Beugung am Spalt	313
10.5.2	Beugungsgitter	315
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung	318
10.6.1	Fresnelsche Zonen	319
10.6.2	Fresnelsche Zonenplatte	322
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung	323
10.7.1	Das Beugungsintegral	323
10.7.2	Fresnel- und Fraunhofer-Beugung an einem Spalt	324
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante	325
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung	325
10.7.5	Babinetsches Theorem	326
10.8	Fourierdarstellung der Beugung	327

10.8.1	Fourier-Transformation	327
10.8.2	Anwendung auf Beugungsprobleme	328
	Zusammenfassung	330
	Übungsaufgaben	331
11.	Optische Instrumente	
11.1	Das Auge	333
11.1.1	Aufbau des Auges	333
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit	335
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges	335
11.2	Vergrößernde optische Instrumente	336
11.2.1	Die Lupe	337
11.2.2	Das Mikroskop	338
11.2.3	Das Fernrohr	340
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten	341
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs	341
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges	343
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops	343
11.3.4	Abbesche Theorie der Abbildung	344
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente	346
11.5	Spektrographen und Monochromatoren	347
11.5.1	Prismenspektrographen	348
11.5.2	Gittermonochromator	349
11.5.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen	349
11.5.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen	352
	Zusammenfassung	354
	Übungsaufgaben	355
12.	Neue Techniken in der Optik	
12.1	Konfokale Mikroskopie	357
12.2	Optische Nahfeldmikroskopie	359
12.3	Aktive und adaptive Optik	360
12.3.1	Aktive Optik	360
12.3.2	Adaptive Optik	361
12.4	Diffraktive Optik	363
12.5	Holographie	366
12.5.1	Aufnahme eines Hologramms	366
12.5.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes	368
12.5.3	Weißlichtholographie	369
12.5.4	Holographische Interferometrie	370
12.5.5	Anwendungen der Holographie	372
12.6	Fourieroptik	372
12.6.1	Die Linse als Fouriertransformator	373
12.6.2	Optische Filterung	375

12.6.3	Optische Mustererkennung	377
12.7	Integrierte Optik	377
12.7.1	Lichtausbreitung in optischen Wellenleitern	377
12.7.2	Lichtmodulation	379
12.7.3	Kopplung zwischen benachbarten Wellenleitern	380
12.7.4	Integrierte optische Elemente	381
12.8	Optische Nachrichtenübertragung	381
12.8.1	Optische Lichtleitfasern	382
12.8.2	Pulsausbreitung in Fasern	383
	Zusammenfassung	386
	Übungsaufgaben	387
 Lösungen der Übungsaufgaben		 389
 Farbtafeln		 443
 Literaturverzeichnis		 451
 Sachwortverzeichnis		 457

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 3

Atome, Moleküle und Festkörper

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 706, meist zweifarbigen Abbildungen,
9 Farbtafeln, 48 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 149 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1	Inhalt und Bedeutung der Atomphysik	1
1.2	Moleküle: Grundbausteine der Natur	2
1.3	Festkörperphysik und ihre technische Bedeutung	3
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches	4

2. Entwicklung der Atomvorstellung

2.1	Historische Entwicklung	7
2.2	Experimentelle und theoretische Hinweise auf die Existenz von Atomen	9
2.2.1	Daltons Gesetz der konstanten Proportionen	9
2.2.2	Gesetze von Gay-Lussac und der Begriff des Mols	10
2.2.3	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten	12
2.2.4	Die Bedeutung der kinetischen Gastheorie für die Atomvorstellung	16
2.3	Kann man Atome sehen?	17
2.3.1	Brownsche Molekularbewegung	17
2.3.2	Nebelkammer	21
2.3.3	Mikroskope mit atomarer Auflösung	21
2.4	Bestimmung der Atomgröße	26
2.4.1	Bestimmung von Atomgrößen aus dem Kovolumen der van-der-Waals-Gleichung	26
2.4.2	Abschätzung der Atomgrößen aus den Transportkoeffizienten in Gasen	26
2.4.3	Beugung von Röntgenstrahlung an Kristallen	27
2.4.4	Vergleich der Methoden zur Atomgrößenbestimmung	28
2.5	Der elektrische Aufbau von Atomen	29
2.5.1	Kathoden- und Kanalstrahlen	30
2.5.2	Messung der Elementarladung	31
2.5.3	Erzeugung freier Elektronen	32
2.5.4	Erzeugung freier Ionen	34
2.5.5	Bestimmung der Elektronenmasse	36
2.5.6	Wie neutral ist ein Atom?	37
2.6	Elektronen- und Ionenoptik	39
2.6.1	Brechungsgesetz für Elektronenstrahlen	39
2.6.2	Elektronenbahnen in axialsymmetrischen Feldern	40

2.6.3	Elektrostatische Elektronenlinsen	42
2.6.4	Magnetische Linsen	44
2.6.5	Anwendungen der Elektronen- und Ionenoptik	46
2.7	Bestimmung der Atommassen; Massenspektrometer	46
2.7.1	Überblick	47
2.7.2	Parabelspektrograph von J.J. Thomson	47
2.7.3	Geschwindigkeitsfokussierung	49
2.7.4	Richtungsfokussierung	50
2.7.5	Massenspektrometer mit doppelter Fokussierung	51
2.7.6	Flugzeit-Massenspektrometer	52
2.7.7	Quadrupol-Massenspektrometer	54
2.7.8	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Spektrometer	56
2.7.9	Isotope	57
2.8	Die Struktur von Atomen	58
2.8.1	Streuversuche; integraler und differentieller Streuquerschnitt	58
2.8.2	Grundlagen der klassischen Streutheorie	59
2.8.3	Bestimmung der Ladungsverteilung im Atom aus Streuexperimenten	63
2.8.4	Das Thomsonsche Atommodell	63
2.8.5	Rutherfordsches Atommodell	66
2.8.6	Rutherfordsche Streuformel	67
	Zusammenfassung	68
	Übungsaufgaben	69

3. Entwicklung der Quantenphysik

3.1	Experimentelle Hinweise auf den Teilchencharakter elektromagnetischer Strahlung	73
3.1.1	Hohlraumstrahlung	74
3.1.2	Das Plancksche Strahlungsgesetz	75
3.1.3	Wiensches Verschiebungsgesetz	78
3.1.4	Das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz	79
3.1.5	Photoelektrischer Effekt	80
3.1.6	Compton-Effekt	82
3.1.7	Eigenschaften des Photons	83
3.1.8	Photonen im Gravitationsfeld	84
3.1.9	Wellen- und Teilchenbeschreibung von Licht	85
3.2	Der Wellencharakter von Teilchen	87
3.2.1	Die de-Broglie-Wellenlänge und Elektronenbeugung	87
3.2.2	Beugung und Interferenz von Atomen	88
3.2.3	Bragg-Reflexion und Neutronenspektrometer	90
3.2.4	Neutronen-Interferometrie	90
3.2.5	Anwendungen der Welleneigenschaften von Teilchen	91
3.3	Materiewellen und Wellenfunktionen	92
3.3.1	Wellenpakete	92
3.3.2	Statistische Deutung der Wellenfunktion	94
3.3.3	Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation	95

3.3.4	Das Auseinanderlaufen eines Wellenpaketes	99
3.3.5	Unbestimmtheitsrelation für Energie und Zeit	99
3.4	Die Quantenstruktur der Atome	101
3.4.1	Atomspektren	101
3.4.2	Das Bohrsche Atommodell	103
3.4.3	Die Stabilität der Atome	106
3.4.4	Franck-Hertz-Versuch	107
3.5	Was unterscheidet die Quantenphysik von der klassischen Physik?	109
3.5.1	Klassische Teilchenbahnen gegen Wahrscheinlichkeitsdichten der Quantenphysik	109
3.5.2	Interferenzerscheinungen bei Licht- und Materiewellen	110
3.5.3	Die Rolle des Meßprozesses	113
3.5.4	Die Bedeutung der Quantenphysik für unser Naturverständnis	113
	Zusammenfassung	115
	Übungsaufgaben	116
4.	Grundlagen der Quantenmechanik	
4.1	Die Schrödingergleichung	117
4.2	Anwendungsbeispiele der stationären Schrödingergleichung	119
4.2.1	Das freie Teilchen	119
4.2.2	Potentialstufe	120
4.2.3	Tunneleffekt	123
4.2.4	Teilchen im Potentialkasten	126
4.2.5	Harmonischer Oszillator	128
4.3	Mehrdimensionale Probleme	131
4.3.1	Teilchen im zweidimensionalen Potentialkasten	131
4.3.2	Teilchen im kugelsymmetrischen Potential	133
4.4	Erwartungswerte und Operatoren	136
4.4.1	Operatoren und Eigenwerte	137
4.4.2	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik	139
	Zusammenfassung	142
	Übungsaufgaben	143
5.	Das Wasserstoffatom	
5.1	Schrödingergleichung für Einelektronen-Atome	145
5.1.1	Trennung von Schwerpunkt- und Relativbewegung	145
5.1.2	Lösung der Radialgleichung	147
5.1.3	Quantenzahlen und Wellenfunktionen des H-Atoms	149
5.1.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte des Elektrons in verschiedenen Quantenzuständen	151
5.2	Normaler Zeeman-Effekt	153
5.3	Vergleich der Schrödinger-Theorie mit den experimentellen Befunden	156
5.4	Relativistische Korrektur der Energieterme	158
5.5	Elektronenspin	159

5.5.1	Stern-Gerlach-Experiment	159
5.5.2	Einstein-de-Haas-Effekt	160
5.5.3	Spin-Bahn-Kopplung; Feinstruktur	161
5.5.4	Anomaler Zeeman-Effekt	163
5.6	Hyperfeinstruktur	166
5.7	Vollständige Beschreibung des Wasserstoffatoms	169
5.7.1	Gesamtwellenfunktion und Quantenzahlen	169
5.7.2	Termbezeichnung und Termschema	170
5.7.3	Lamb-Verschiebung	171
5.8	Korrespondenzprinzip	176
5.9	Das Modell des Elektrons und seine Probleme	177
	Zusammenfassung	179
	Übungsaufgaben	180

6. Atome mit mehreren Elektronen

6.1	Das Heliumatom	181
6.1.1	Näherungsmodelle	182
6.1.2	Symmetrie der Wellenfunktion	183
6.1.3	Berücksichtigung des Elektronenspins	184
6.1.4	Das Pauliprinzip	185
6.1.5	Termschema des Heliumatoms	185
6.1.6	Heliumspektrum	187
6.2	Aufbau der Elektronenhüllen größerer Atome	188
6.2.1	Das Schalenmodell der Atomhüllen	189
6.2.2	Sukzessiver Aufbau der Atomhüllen mit steigender Kernladungszahl	189
6.2.3	Atomvolumen und Ionisierungsenergien	192
6.2.4	Das Periodensystem der Elemente	194
6.3	Alkaliatome	196
6.4	Theoretische Modelle von Mehrelektronen-Atomen	199
6.4.1	Modell unabhängiger Elektronen	199
6.4.2	Das Hartree-Verfahren	199
6.5	Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen	201
6.5.1	Kopplungsschemata für die Elektronendrehimpulse	201
6.5.2	Elektronenkonfiguration und Atomzustände leichter Atome	206
6.6	Angeregte Atomzustände	208
6.6.1	Einfachanregung	208
6.6.2	Anregung mehrerer Elektronen, Autoionisation	208
6.6.3	Innerschalenanregung, Auger-Prozeß	209
6.6.4	Rydbergzustände	210
6.6.5	Planetarische Atome	212
6.7	Exotische Atome	213
6.7.1	Myonische Atome	213
6.7.2	Pionische und kaonische Atome	214
6.7.3	Antiwasserstoff	215
6.7.4	Positronium und Myonium	216

Zusammenfassung	217
Übungsaufgaben	218
7. Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome	
7.1 Übergangswahrscheinlichkeiten	219
7.1.1 Induzierte und spontane Übergänge; Einstein-Koeffizienten	219
7.1.2 Übergangswahrscheinlichkeiten und Matrixelemente	222
7.1.3 Übergangswahrscheinlichkeiten für Absorption und induzierte Emission	223
7.2 Auswahlregeln	224
7.2.1 Auswahlregeln für die magnetische Quantenzahl	225
7.2.2 Paritätsauswahlregeln	226
7.2.3 Auswahlregeln für die Spinquantenzahl	227
7.2.4 Multipol-Übergänge höherer Ordnung	228
7.3 Lebensdauern angeregter Zustände	229
7.4 Linienbreiten der Spektrallinien	231
7.4.1 Natürliche Linienbreite	232
7.4.2 Doppler-Verbreiterung	234
7.4.3 Stoßverbreiterung von Spektrallinien	236
7.5 Röntgenstrahlung	239
7.5.1 Bremsstrahlung	240
7.5.2 Charakteristische Röntgenstrahlung	241
7.5.3 Absorption und Streuung von Röntgenstrahlung	242
7.5.4 Röntgenfluoreszenz	246
7.5.5 Messung von Röntgenwellenlängen	246
7.6 Kontinuierliche Absorptions- und Emissionsspektren	248
7.6.1 Photoionisation	249
7.6.2 Rekombinationsstrahlung	251
Zusammenfassung	252
Übungsaufgaben	253
8. Laser	
8.1 Physikalische Grundlagen	255
8.1.1 Schwellwertbedingung	256
8.1.2 Erzeugung der Besetzungsinversion	257
8.1.3 Frequenzverteilung der induzierten Emission	259
8.2 Optische Resonatoren	259
8.2.1 Offene optische Resonatoren	260
8.2.2 Moden des offenen Resonators	261
8.2.3 Beugungsverluste offener Resonatoren	263
8.2.4 Das Frequenzspektrum optischer Resonatoren	264
8.3 Einmodenlaser	265
8.4 Verschiedene Lasertypen	266
8.4.1 Festkörperlaser	266
8.4.2 Halbleiterlaser	267

8.4.3	Farbstofflaser	268
8.4.4	Gaslaser	270
8.5	Erzeugung kurzer Laserpulse	272
8.5.1	Güteschaltung von Laserresonatoren	272
8.5.2	Modengekoppelte Pulse	274
8.5.3	Optische Pulskompression	275
	Zusammenfassung	277
	Übungsaufgaben	278

9. Moleküle

9.1	Das H_2^+ -Molekülion	279
9.1.1	Ansatz zur exakten Lösung für das starre Molekül	280
9.1.2	Molekülorbitale und die LCAO-Näherung	282
9.1.3	Verbesserungen des LCAO-Ansatzes	285
9.2	Das H_2 -Molekül	286
9.2.1	Molekülorbitalnäherung	286
9.2.2	Heitler-London-Näherung	288
9.2.3	Vergleich beider Näherungen	288
9.2.4	Verbesserungen der Näherung	289
9.3	Elektronische Zustände zweiatomiger Moleküle	290
9.3.1	Molekülorbitalkonfigurationen	290
9.3.2	Angeregte Molekülzustände	292
9.3.3	Excimere	294
9.3.4	Korrelationsdiagramme	294
9.4	Die physikalischen Ursachen der Molekülbindung	295
9.4.1	Chemische Bindung	295
9.4.2	Multipolentwicklung	296
9.4.3	Induzierte Dipolmomente und van-der-Waals-Potential	298
9.4.4	Allgemeine Potentialentwicklung	299
9.4.5	Bindungstypen	300
9.5	Rotation und Schwingung zweiatomiger Moleküle	301
9.5.1	Born-Oppenheimer-Näherung	301
9.5.2	Der starre Rotator	302
9.5.3	Zentrifugalaufweitung	304
9.5.4	Der Einfluß der Elektronenbewegung	304
9.5.5	Schwingung zweiatomiger Moleküle	305
9.5.6	Schwingungs-Rotations-Wechselwirkung	307
9.5.7	Rotationsbarriere	308
9.6	Spektren zweiatomiger Moleküle	309
9.6.1	Das Übergangsmatrixelement	309
9.6.2	Schwingungs-Rotations-Übergänge	310
9.6.3	Die Struktur elektronischer Übergänge	312
9.6.4	Franck-Condon-Prinzip	314
9.6.5	Kontinuierliche Spektren	315
9.7	Elektronische Zustände mehratomiger Moleküle	317
9.7.1	Das H_2O -Molekül	317
9.7.2	Hybridisierung	318

9.7.3	Das CO ₂ -Molekül	321
9.7.4	Walsh-Diagramm	322
9.7.5	Das NH ₃ -Molekül	323
9.7.6	π -Elektronensysteme	324
9.8	Rotation mehratomiger Moleküle	325
9.8.1	Rotation symmetrischer Kreiselmoleküle	326
9.8.2	Asymmetrische Kreiselmoleküle	327
9.9	Schwingungen mehratomiger Moleküle	328
9.9.1	Normalschwingungen	328
9.9.2	Quantitative Behandlung	329
9.10	Chemische Reaktionen	331
9.10.1	Reaktionen erster Ordnung	332
9.10.2	Reaktionen zweiter Ordnung	332
9.10.3	Exotherme und endotherme Reaktionen	332
9.10.4	Die Bestimmung der absoluten Reaktionsraten	334
9.11	Moleküldynamik und Wellenpakete	335
	Zusammenfassung	336
	Übungsaufgaben	337

10. Experimentelle Methoden der Atom- und Molekülphysik

10.1	Spektroskopische Verfahren	340
10.1.1	Mikrowellenspektroskopie	341
10.1.2	Fourierspektroskopie	342
10.1.3	Klassische Emissions- und Absorptionsspektroskopie	345
10.1.4	Ramanspektroskopie	346
10.2	Laserspektroskopie	348
10.2.1	Laser-Absorptionsspektroskopie	348
10.2.2	Optoakustische Spektroskopie	349
10.2.3	Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	350
10.2.4	Resonante Zweistufen-Photoionisation	351
10.2.5	Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	352
10.2.6	Nichtlineare Absorption	352
10.2.7	Sättigungsspektroskopie	353
10.2.8	Dopplerfreie Zweiphotonenabsorption	356
10.3	Messung magnetischer und elektrischer Momente von Atomen und Molekülen	357
10.3.1	Die Rabi-Methode	358
10.3.2	Stark-Spektroskopie	359
10.4	Elektronenspektroskopie	360
10.4.1	Elektronenstreuversuche	360
10.4.2	Photoelektronenspektroskopie	361
10.5	Molekül-Atom-Streuung	362
10.5.1	Elastische Streuung	362
10.5.2	Inelastische Streuung	364
10.5.3	Reaktive Streuung	365
10.6	Zeitaufgelöste Messungen an Atomen und Molekülen	366
10.6.1	Lebensdauermessungen	367

10.6.2	Zeitaufgelöste Messungen der Moleküldynamik	368
10.6.3	Energietransferprozeß	370
10.7	Optisches Kühlen und Speichern von Atomen	370
	Zusammenfassung	374
	Übungsaufgaben	375

11. Die Struktur fester Körper

11.1	Die Struktur von Einkristallen	378
11.1.1	Symmetrien von Raumgittern	379
11.1.2	Bravaisgitter	380
11.1.3	Kristallstrukturen	383
11.1.4	Gitterebenen	386
11.2	Das reziproke Gitter	387
11.3	Experimentelle Methoden zur Strukturbestimmung	389
11.3.1	Bragg-Reflexion	389
11.3.2	Laue-Beugung	390
11.3.3	Debye-Scherrer-Verfahren	392
11.4	Genauere Behandlung der Röntgenbeugung	393
11.4.1	Streuamplitude und Streufaktor	393
11.4.2	Der atomare Streufaktor	395
11.4.3	Debye-Waller-Faktor	396
11.5	Reale Kristalle	397
11.5.1	Leerstellen im Gitter	397
11.5.2	Frenkelsche Fehlordnung	398
11.5.3	Diffusion von Punktdefekten	398
11.5.4	Gitterversetzungen	400
11.5.5	Polykristalline Festkörper	400
11.6	Warum halten Festkörper zusammen?	400
11.6.1	Edelgaskristalle	401
11.6.2	Ionenkristalle	402
11.6.3	Metallische Bindung	403
11.6.4	Kovalente Kristalle	403
11.6.5	Wasserstoffbrückenbindung	404
	Zusammenfassung	404
	Übungsaufgaben	405

12. Dynamik der Kristallgitter

12.1	Gitterschwingungen	407
12.1.1	Die lineare Kette	407
12.1.2	Optische und akustische Zweige	410
12.2	Spezifische Wärme von Festkörpern	412
12.2.1	Das Einstein-Modell der spezifischen Wärme	413
12.2.2	Das Debye-Modell der spezifischen Wärme	414
12.3	Phononenspektroskopie	416
12.3.1	Infrarotabsorption	417
12.3.2	Brillouin- und Ramanstreuung	417
12.3.3	Inelastische Neutronenstreuung	419

12.3.4	Ist Phononenspektroskopie mit Röntgenstrahlung möglich?	420
12.3.5	Phononenspektrum und Kraftkonstanten	421
12.3.6	Phononen als Quasiteilchen	421
12.4	Mößbauer-Effekt	421
	Zusammenfassung	427
	Übungsaufgaben	427

13. Elektronen im Festkörper

13.1	Freies Elektronengas	429
13.1.1	Elektronen im eindimensionalen Potentialkasten	429
13.1.2	Freies Elektronengas im dreidimensionalen Potentialkasten	431
13.1.3	Fermi-Dirac-Verteilung	432
13.1.4	Eigenschaften des Elektronengases bei $T = 0$ K	434
13.1.5	Elektronengas bei $T > 0$ K	434
13.1.6	Spezifische Wärme der Elektronen	435
13.2	Elektronen im periodischen Potential	436
13.2.1	Blochfunktionen	436
13.2.2	Energie-Impuls-Relationen	438
13.2.3	Energiebänder	440
13.2.4	Isolatoren und Leiter	440
13.2.5	Reale Bandstrukturen	441
13.3	Supraleitung	443
13.3.1	Das Cooper-Paar-Modell	443
13.3.2	Experimentelle Prüfung der BCS-Theorie	444
13.3.3	Hochtemperatursupraleiter	447
13.4	Nichtmetallische Leiter	448
13.5	Elektronenemission	449
13.5.1	Glühemission	449
13.5.2	Feldemission	450
	Zusammenfassung	452
	Übungsaufgaben	453

14. Halbleiter

14.1	Reine Elementhalbleiter	455
14.1.1	Elektronen und Löcher	456
14.1.2	Effektive Masse	457
14.1.3	Elektrische Leitfähigkeit von reinen Halbleitern	458
14.1.4	Die Bandstruktur von Halbleitern	460
14.2	Dotierte Halbleiter	461
14.2.1	Donatoren und n-Halbleiter	461
14.2.2	Akzeptoren und p-Halbleiter	463
14.2.3	Halbleitertypen	463
14.2.4	Störstellen-Leitung	464
14.2.5	Der p-n-Übergang	464
14.3	Anwendungen von Halbleitern	467

14.3.1	Gleichrichter-Dioden	467
14.3.2	Heißleiter und Halbleiter-Thermometer	468
14.3.3	Photodioden und Solarzellen	468
14.3.4	Transistoren	470
14.3.5	Feldeffekt-Transistoren	472
	Zusammenfassung	473
	Übungsaufgaben	474

15. Dielektrische und optische Eigenschaften von Festkörpern

15.1	Dielektrische Polarisierung und lokales Feld	475
15.2	Festkörper mit permanenten elektrischen Dipolen	477
15.3	Frequenzabhängigkeit der Polarisierung und dielektrische Funktion	478
15.3.1	Elektronische Polarisierung in Dielektrika	479
15.3.2	Optische Eigenschaften von Ionenkristallen	481
15.3.3	Experimentelle Bestimmung der dielektrischen Funktion	484
15.4	Optische Eigenschaften von Halbleitern	485
15.4.1	Interbandübergänge	485
15.4.2	Dotierte Halbleiter	486
15.4.3	Exzitonen	486
15.5	Störstellen und Farbzentren	487
	Zusammenfassung	489
	Übungsaufgaben	490

16. Amorphe Festkörper; Flüssigkeiten, Flüssigkristalle und Cluster

16.1	Gläser	492
16.1.1	Grundlagen	492
16.1.2	Die Struktur von Glas	493
16.1.3	Physikalische Eigenschaften von Gläsern	494
16.2	Metallische Gläser	495
16.2.1	Herstellungsverfahren	496
16.2.2	Struktur metallischer Gläser	497
16.2.3	Eigenschaften metallischer Gläser	497
16.3	Amorphe Halbleiter	498
16.3.1	Struktur und Herstellung von amorphem Silizium a-Si:H	498
16.3.2	Elektronische und optische Eigenschaften	499
16.4	Flüssigkeiten	499
16.4.1	Makroskopische Beschreibung	499
16.4.2	Mikroskopische Struktur	501
16.4.3	Experimentelle Untersuchungsmethoden	503
16.5	Flüssige Kristalle	503
16.5.1	Strukturtypen	504
16.5.2	Anwendungen von Flüssigkristallen	505
16.6	Cluster	507
16.6.1	Klassifikation der Cluster	508
16.6.2	Herstellungsverfahren	509
16.6.3	Physikalische Eigenschaften	510
16.6.4	Anwendungen	512

Zusammenfassung	512
Übungsaufgaben	513
17. Oberflächen	
17.1 Die atomare Struktur von Oberflächen	516
17.2 Experimentelle Untersuchungsmethoden	517
17.3 Adsorption und Desorption von Atomen und Molekülen	521
17.4 Chemische Reaktionen an Oberflächen	524
17.5 Schmelzen von Festkörperoberflächen	526
Zusammenfassung	526
Übungsaufgaben	527
Zeittafel	529
Lösungen der Übungsaufgaben	533
Farbtafeln	587
Literatur	595
Sach- und Namenverzeichnis	605

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 4

Kern-, Teilchen- und Astrophysik

Mit 522, meist zweifarbigen Abbildungen,
15 Farbtafeln, 58 Tabellen,
zahlreichen durchgerechneten Beispielen
und 105 Übungsaufgaben
mit ausführlichen Lösungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1	Was ist Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik?	1
1.2	Historische Entwicklung der Kern- und Elementarteilchenphysik ..	2
1.3	Bedeutung der Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik; offene Fragen	6
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches	6

2. Aufbau der Atomkerne

2.1	Untersuchungsmethoden	9
2.2	Ladung, Größe und Masse der Kerne	10
2.3	Massen- und Ladungsverteilung im Kern	13
2.3.1	Massendichteverteilung	15
2.3.2	Ladungsverteilung im Kern	15
2.4	Aufbau der Kerne aus Nukleonen; Isotope und Isobare	18
2.5	Kerndrehimpulse, magnetische und elektrische Momente	20
2.5.1	Magnetische Kernmomente	20
2.5.2	Elektrisches Quadrupolmoment	23
2.6	Bindungsenergie der Kerne	26
2.6.1	Experimentelle Ergebnisse	26
2.6.2	Nukleonenkonfiguration und Pauliprinzip	28
2.6.3	Tropfenmodell und Bethe-Weizsäcker-Formel	29
	Zusammenfassung	32
	Übungsaufgaben	33

3. Instabile Kerne, Radioaktivität

3.1	Stabilitätskriterien; Stabile und instabile Kerne	36
3.2	Instabile Kerne und Radioaktivität	38
3.2.1	Zerfallsgesetze	39
3.2.2	Natürliche Radioaktivität	41
3.2.3	Zerfallsketten	41
3.3	Alphazerfall	43
3.4	Betazerfall	46
3.4.1	Experimentelle Befunde	46
3.4.2	Neutrino-Hypothese	47
3.4.3	Modell des Betazerfalls	48

3.4.4	Experimentelle Methoden zur Untersuchung des β -Zerfalls	50
3.4.5	Elektroneneinfang	51
3.4.6	Energiebilanzen und Zerfallstypen	52
3.5	Gammastrahlung	52
3.5.1	Beobachtungen	52
3.5.2	Multipol-Übergänge und Übergangswahrscheinlichkeiten	53
3.5.3	Konversionsprozesse	55
3.5.4	Kernisomere	57
	Zusammenfassung	57
	Übungsaufgaben	58

4. Experimentelle Techniken und Geräte in Kern- und Hochenergiephysik

4.1	Teilchenbeschleuniger	61
4.1.1	Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung bei relativistischen Energien	61
4.1.2	Physikalische Grundlagen der Beschleuniger	62
4.1.3	Elektrostatische Beschleuniger	64
4.1.4	Hochfrequenz-Beschleuniger	66
4.1.5	Kreisbeschleuniger	67
4.1.6	Stabilisierung der Teilchenbahnen in Beschleunigern	71
4.1.7	Speicherringe	76
4.1.8	Die großen Maschinen	80
4.2	Wechselwirkung von Teilchen und Strahlung mit Materie	81
4.2.1	Geladene schwere Teilchen	82
4.2.2	Energieverlust von Elektronen	85
4.2.3	Wechselwirkung von Gamma-Strahlung mit Materie	86
4.2.4	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie	88
4.3	Detektoren	90
4.3.1	Ionisationskammer, Proportionalzählrohr, Geigerzähler	91
4.3.2	Szintillationszähler	94
4.3.3	Halbleiterzähler	95
4.3.4	Spurendetektoren	97
4.3.5	Čerenkov-Zähler	101
4.3.6	Detektoren in der Hochenergiephysik	101
4.4	Streuexperimente	103
4.4.1	Grundlagen der relativistischen Kinematik	104
4.4.2	Elastische Streuung	106
4.4.3	Was lernt man aus Streuexperimenten?	109
4.5	Kernspektroskopie	109
4.5.1	Gamma-Spektroskopie	110
4.5.2	Beta-Spektrometer	112
	Zusammenfassung	113
	Übungsaufgaben	114

5. Kernkräfte und Kernmodelle

5.1	Das Deuteron	117
5.2	Nukleon-Nukleon-Streuung	121
5.2.1	Grundlagen	121
5.2.2	Spinabhängigkeit der Kernkräfte	122
5.2.3	Ladungsabhängigkeit der Kernkräfte	124
5.3	Isospin-Formalismus	125
5.4	Meson-Austauschmodell der Kernkräfte	127
5.5	Kernmodelle	129
5.5.1	Nukleonen als Fermigas	129
5.5.2	Schalenmodell	133
5.6	Rotation und Schwingung von Kernen	140
5.6.1	Deformierte Kerne	140
5.6.2	Kernrotationen	141
5.6.3	Kernschwingungen	144
5.7	Experimenteller Nachweis angeregter Rotations- und Schwingungszustände	145
	Zusammenfassung	146
	Übungsaufgaben	147

6. Kernreaktionen

6.1	Grundlagen	149
6.1.1	Die inelastische Streuung mit Kernanregung	149
6.1.2	Die reaktive Streuung	150
6.1.3	Die stoßinduzierte Kernspaltung	150
6.1.4	Energieschwelle	150
6.1.5	Reaktionsquerschnitt	151
6.2	Erhaltungssätze	152
6.2.1	Erhaltung der Nukleonenzahl	152
6.2.2	Erhaltung der elektrischen Ladung	152
6.2.3	Drehimpuls-Erhaltung	152
6.2.4	Erhaltung der Parität	153
6.3	Spezielle stoßinduzierte Kernreaktionen	154
6.3.1	Die (α, p) -Reaktion	154
6.3.2	Die (α, n) -Reaktion	155
6.4	Stoßinduzierte Radioaktivität	155
6.5	Kernspaltung	157
6.5.1	Spontane Kernspaltung	157
6.5.2	Stoßinduzierte Spaltung leichter Kerne	159
6.5.3	Induzierte Spaltung schwerer Kerne	159
6.5.4	Energiebilanz bei der Kernspaltung	162
6.6	Kernfusion	163
6.7	Die Erzeugung von Transuranen	164
	Zusammenfassung	166
	Übungsaufgaben	166

7. Physik der Elementarteilchen

7.1	Die Entdeckung der Myonen und Pionen	169
7.2	Der Zoo der Elementarteilchen	170
7.2.1	Lebensdauer des Pions	171
7.2.2	Spin des Pions	172
7.2.3	Parität des π -Mesons	173
7.2.4	Entdeckung weiterer Teilchen	174
7.2.5	Klassifikation der Teilchen	176
7.2.6	Quantenzahlen und Erhaltungssätze	176
7.3	Leptonen	177
7.4	Das Quarkmodell	179
7.4.1	Der achtfache Weg	180
7.4.2	Quarkmodell der Mesonen	181
7.4.3	Charm-Quark und Charmonium	182
7.4.4	Quarkaufbau der Baryonen	184
7.4.5	Farbladungen	186
7.4.6	Experimentelle Hinweise auf die Existenz von Quarks ...	186
7.4.7	Quarkfamilien	188
7.5	Quantenchromodynamik	189
7.6	Starke und schwache Wechselwirkungen	191
7.6.1	W- und Z-Bosonen als Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung	193
7.6.2	Reelle W- und Z-Bosonen	194
7.6.3	Paritätsverletzung bei der schwachen Wechselwirkung ...	196
7.6.4	Die CPT-Symmetrie	198
7.6.5	Erhaltungssätze und Symmetrien	200
7.7	Das Standardmodell der Teilchenphysik	201
	Zusammenfassung	203
	Übungsaufgaben	204

8. Anwendungen der Kern- und Hochenergiephysik

8.1	Radionuklid-Anwendungen	205
8.1.1	Strahlendosis, Meßgrößen und Meßverfahren	205
8.1.2	Technische Anwendungen	208
8.1.3	Anwendungen in der Biologie	209
8.1.4	Anwendungen von Radionukliden in der Medizin	209
8.1.5	Nachweis geringer Atomkonzentrationen durch Radioaktivierung	211
8.1.6	Altersbestimmung mit radiometrischer Datierung	211
8.1.7	Hydrologische Anwendungen	213
8.2	Anwendungen von Beschleunigern	214
8.3	Kernreaktoren	214
8.3.1	Kettenreaktionen	215
8.3.2	Aufbau eines Kernreaktors	217
8.3.3	Steuerung und Betrieb eines Kernreaktors	219
8.3.4	Reaktortypen	221

8.3.5	Sicherheit von Kernreaktoren	224
8.3.6	Radioaktiver Abfall und Entsorgungskonzepte	226
8.3.7	Neue Konzepte	226
8.3.8	Vor- und Nachteile der Kernspaltungsenergie	228
8.4	Kontrollierte Kernfusion	228
8.4.1	Allgemeine Anforderungen	229
8.4.2	Magnetischer Einschluß	230
8.4.3	Plasmaheizung	232
8.4.4	Laserinduzierte Kernfusion	233
	Zusammenfassung	234
	Übungsaufgaben	235

9. Grundlagen der experimentellen Astronomie und Astrophysik

9.1	Einleitung	237
9.2	Meßdaten von Himmelskörpern	239
9.3	Astronomische Koordinatensysteme	240
9.3.1	Das Horizontsystem	240
9.3.2	Die Äquatorsysteme	241
9.3.3	Das Ekliptikalsystem	242
9.3.4	Das galaktische Koordinatensystem	242
9.3.5	Zeitliche Veränderungen der Koordinaten	243
9.3.6	Zeitmessung	243
9.4	Beobachtung von Sternen	244
9.5	Teleskope	245
9.5.1	Lichtstärke von Teleskopen	246
9.5.2	Vergrößerung	246
9.5.3	Teleskopanordnungen	247
9.5.4	Nachführung	249
9.5.5	Radioteleskope	250
9.5.6	Röntgenteleskope	251
9.6	Parallaxe, Aberration und Refraktion	252
9.7	Entfernungsmessungen	254
9.8	Scheinbare und absolute Helligkeiten	257
9.9	Messung der spektralen Energieverteilung	259
	Zusammenfassung	259
	Übungsaufgaben	260

10. Unser Sonnensystem

10.1	Allgemeine Beobachtungen und Gesetze der Planetenbewegungen	263
10.1.1	Planetenbahnen; Erstes Keplersches Gesetz	263
10.1.2	Zweites und drittes Keplersches Gesetz	265
10.1.3	Die Bahnelemente der Planeten	266
10.1.4	Die Umlaufzeiten der Planeten	269
10.1.5	Größe, Masse und mittlere Dichte der Planeten	270
10.1.6	Energiehaushalt der Planeten	272

10.2	Die inneren Planeten und ihre Monde	273
10.2.1	Merkur	274
10.2.2	Venus	275
10.2.3	Die Erde	275
10.2.4	Der Erdmond	278
10.2.5	Mars	281
10.3	Die äußeren Planeten	283
10.3.1	Jupiter und seine Monde	283
10.3.2	Saturn	286
10.3.3	Die äußersten Planeten	288
10.4	Kleine Körper im Sonnensystem	289
10.4.1	Die Planetoiden	289
10.4.2	Kometen	292
10.4.3	Meteore und Meteorite	294
10.5	Die Sonne als stationärer Stern	295
10.5.1	Masse, Größe, Dichte und Leuchtkraft der Sonne	295
10.5.2	Mittelwerte für Temperatur und Druck im Inneren der Sonne	297
10.5.3	Radialer Verlauf von Druck, Dichte und Temperatur	298
10.5.4	Energieerzeugung im Inneren der Sonne	300
10.5.5	Der Energietransport in der Sonne	303
10.5.6	Die Photosphäre	305
10.5.7	Chromosphäre und Korona	308
10.6	Die aktive Sonne	309
10.6.1	Sonnenflecken	309
10.6.2	Das Magnetfeld der Sonne	312
10.6.3	Fackeln, Flares und Protuberanzen	313
	Zusammenfassung	314
	Übungsaufgaben	315

11. Geburt, Leben und Tod von Sternen

11.1	Die sonnennächsten Sterne	317
11.1.1	Direkte Messung von Sternradien	318
11.1.2	Doppelsternsysteme und die Bestimmung von Sternmassen	321
11.1.3	Spektraltypen der Sterne	324
11.1.4	Hertzsprung-Russel-Diagramm	325
11.2	Die Geburt von Sternen	326
11.2.1	Das Jeans-Kriterium	327
11.2.2	Die Bildung von Protosternen	329
11.2.3	Der Einfluß der Rotation auf kollabierende Gaswolken ..	330
11.2.4	Der Weg des Sterns im Hertzsprung-Russel-Diagramm	331
11.3	Der stabile Lebensabschnitt von Sternen (Hauptreihenstadium) ...	332
11.3.1	Der Einfluß der Sternmasse auf Leuchtkraft und Lebensdauer	332
11.3.2	Die Energieerzeugung in Sternen der Hauptreihe	333

11.4	Die Nach-Hauptreihen-Entwicklung	335
11.4.1	Sterne geringer Masse	335
11.4.2	Die Entwicklung von Sternen mit mittleren Massen	336
11.4.3	Die Entwicklung massereicher Sterne und die Synthese schwerer Elemente	337
11.5	Entartete Sternmaterie	339
11.5.1	Zustandsgleichung entarteter Materie	339
11.5.2	Weißer Zwerge	341
11.5.3	Neutronensterne	343
11.5.4	Pulsare als rotierende Neutronensterne	346
11.6	Schwarze Löcher	349
11.6.1	Der Kollaps zu einem schwarzen Loch	349
11.6.2	Schwarzschild-Radius	350
11.6.3	Lichtablenkung im Gravitationsfeld	351
11.6.4	Zeitlicher Verlauf des Kollapses eines schwarzen Loches	352
11.6.5	Die Suche nach schwarzen Löchern	353
11.7	Beobachtbare Phänomene während des Endstadiums von Sternen	353
11.7.1	Pulsationsveränderliche	353
11.7.2	Novae	356
11.7.3	Sterne stehlen Masse	357
11.7.4	Supernovae	358
11.8	Zusammenfassende Darstellung der Sternentwicklung	359
11.9	Zum Nachdenken	361
	Zusammenfassung	362
	Übungsaufgaben	363

12. Die Entwicklung und die heutige Struktur des Universums

12.1	Experimentelle Hinweise auf ein endliches expandierendes Universum	366
12.1.1	Homogenität des Weltalls	368
12.2	Die Metrik des gekrümmten Raumes	368
12.3	Das Standardmodell	370
12.3.1	Strahlungsdominiertes und massedominiertes Universum	370
12.3.2	Hubble-Parameter und kritische Dichte	371
12.3.3	Die frühe Phase des Universums	373
12.3.4	Die Synthese der leichten Elemente	376
12.3.5	Die Bildung von Kugelsternhaufen und Galaxien	377
12.3.6	Das Alter des Universums	377
12.3.7	Friedmann-Gleichungen	378
12.3.8	Die Rotverschiebung	379
12.4	Bildung und Struktur von Galaxien	381
12.4.1	Galaxien-Typen	382
12.4.2	Aktive Galaxien	385
12.5	Die Struktur unseres Milchstraßensystems	385
12.5.1	Stellarstatistik und Sternpopulationen	386
12.5.2	Die Bewegungen der sonnennahen Sterne	388
12.5.3	Die differentielle Rotation der Milchstraßenscheibe	389

12.5.4	Die Spiralarme	391
12.5.5	Kugelsternhaufen	393
12.5.6	Das Zentrum unserer Milchstraße	395
12.5.7	Interstellare Materie	395
12.6	Die Entstehung der Elemente	399
12.7	Die Entstehung unseres Sonnensystems	400
12.7.1	Kollaps der rotierenden Gaswolke	401
12.7.2	Die Bildung der Planetesimale	403
12.7.3	Die Trennung von Gasen und festen Stoffen	404
12.7.4	Das Alter des Sonnensystems	405
12.8	Die Entstehung der Erde	407
12.8.1	Die Separation von Erdkern und Erdmantel	407
12.8.2	Die Erdkruste	409
12.8.3	Vulkanismus	410
12.8.4	Bildung der Ozeane	410
12.8.5	Die Bildung der Erdatmosphäre	411
	Zusammenfassung	412
	Übungsaufgaben	414
	Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik	415
	Lösungen der Übungsaufgaben	417
	Farbtafeln	465
	Literaturverzeichnis	473
	Sach- und Namenverzeichnis	479