

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	Winkelheiten .....	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
<b>3. Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie</b>		
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
<b>4. Systeme von Massenpunkten. Stöße</b>		
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
<b>5. Dynamik starrer ausgedehnter Körper</b>		
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
<b>8.</b>	<b>Strömende Flüssigkeiten und Gase</b> .....	
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
<b>9.</b>	<b>Vakuum-Physik</b> .....	
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**

<b>1.</b>	<b>Vektorrechnung</b>	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
<b>2.</b>	<b>Koordinatensysteme</b>	387
2.1	Kartesische Koordinaten	388
2.2	Zylinderkoordinaten	388
2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten)	389
<b>3.</b>	<b>Komplexe Zahlen</b>	390
3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen	391
3.2	Polardarstellung	391

<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b>	393
------------------------------------	-----

<b>Farbtafeln</b>	421
-------------------	-----

<b>Literaturverzeichnis</b>	429
-----------------------------	-----

<b>Sachwortverzeichnis</b>	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

<b>1. Elektrostatik</b>	
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 Elektrostatisches 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
<b>5.</b>	<b>Elektrotechnische Anwendungen</b>	
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
<b>6.</b>	<b>Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen</b>	
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
<b>7. Elektromagnetische Wellen im Vakuum</b>		
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
<b>8. Elektromagnetische Wellen in Materie</b>		
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
<b>11.</b>	<b>Optische Instrumente</b>	
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	Vergößernde 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
<b>12.</b>	<b>Neue Techniken in der Optik</b>	
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
 <b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> . . . . .		 389
 <b>Farbtafeln</b> . . . . .		 443
 <b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .		 451
 <b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .		 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
<b>4.</b>	<b>Grundlagen der Quantenmechanik</b> .....	
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
<b>5.</b>	<b>Das Wasserstoffatom</b> .....	
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
<b>7. Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Atome</b>	
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
<b>8. Laser</b>	
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 <sub>2</sub> -Molekül	321
9.7.4	Walsh-Diagramm	322
9.7.5	Das NH <sub>3</sub> -Molekül	323
9.7.6	$\pi$ -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
<b>17. Oberflächen</b> .....	
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
<b>Zeittafel</b> .....	529
<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> .....	533
<b>Farbtafeln</b> .....	587
<b>Literatur</b> .....	595
<b>Sach- und Namenverzeichnis</b> .....	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 $\beta$ -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 $(\alpha, p)$ -Reaktion .....	154
6.3.2	Die $(\alpha, n)$ -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 $\pi$ -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 geringerer 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
	<b>Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik .....</b>	<b>415</b>
	<b>Lösungen der Übungsaufgaben .....</b>	<b>417</b>
	<b>Farbtafeln .....</b>	<b>465</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>473</b>
	<b>Sach- und Namenverzeichnis .....</b>	<b>479</b>