



Gerthsen Physik

Helmut Vogel

19. Auflage
mit 1212 meist zweifarbigen
Abbildungen, 10 Farbtafeln,
89 Tabellen, 105 durchgerechneten
Beispielen und 1065 Aufgaben
mit vollständigen Lösungswegen



Springer

Professor Dr. *Helmut Vogel* †
Lehrstuhl für Physik an der
Technischen Universität München
D-85350 Freising-Weihenstephan

Graphisches Konzept:
Schreiber VIS
Joachim Schreiber
D-64343 Seeheim

ISBN 3-540-62988-2
19. Auflage
Springer-Verlag
Berlin
Heidelberg
New York

Die Deutsche Bibliothek –
CIP-Einheitsaufnahme
Gerthsen, Christian:
Gerthsen Physik; mit 89 Tabellen und
105 durchgerechneten Beispielen und
1065 Aufgaben mit vollständigen
Lösungswegen / Gerthsen.
Bearb. von Helmut Vogel. –
19. Aufl.
– Berlin; Heidelberg; New York;
Barcelona; Budapest; Hongkong;
London; Mailand; Paris; Santa Clara;
Singapur; Tokio: Springer, 1997
(Springer-Lehrbuch)
ISBN 3-540-62988-2

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg
1956, 1958, 1960, 1963, 1964, 1966,
1969, 1971, 1974, 1977, 1982, 1986,
1989, 1993, 1995, 1997
Printed in Germany

SPIN 10550471
56/3144-5 4 3 2 1 0
Gedruckt auf säurefreiem Papier

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Herstellung:
Petra Treiber, Heidelberg
Claus-Dieter Bachem, Heidelberg

Texterfassung mit dem Springer plain
T_EX-Makropaket CPMono01:
Adam Leinz, Karlsruhe

Datenkonvertierung und Umbruch:
Mitterweger, Plankstadt
über das Satzsystem 3B2

Filmbelichtung:
Mitterweger, Plankstadt
auf Agfa Accuset 1000

Zeichnungen:
Schreiber VIS, Seeheim
in Zusammenarbeit
mit Eva Werkmann, Wiesbaden

Einbandgestaltung:
de'blik, Berlin

Einbandabbildung:
Tony Stone

Papier:
Terraprint 70g/m² (Farbbogen 100g/m²)
mattgestrichen, chlorfrei.
Lieferung durch die Feinpapiergroß-
handlung Hartmann & Flinsch GmbH,
Bereich Verlage, München

Druck und Bindearbeiten:
Appl, Wemding

Inhaltsverzeichnis

Nutzen Sie dieses Buch individuell XIX

1. Mechanik der Massenpunkte 1

1.1 Messen und Maßeinheiten	1
1.1.1 Messen	1
1.1.2 Maßeinheiten	2
1.1.3 Maßsysteme und Dimensionen	2
1.1.4 Längeneinheit	3
1.1.5 Winkelmaße	4
1.1.6 Zeitmessung	4
1.1.7 Meßfehler	5
1.2 Kinematik	9
1.2.1 Ortsvektor	9
1.2.2 Geschwindigkeit	10
1.2.3 Beschleunigung	11
1.3 Dynamik	12
1.3.1 Trägheit	12
1.3.2 Kraft und Masse	12
1.3.3 Maßeinheiten	13
1.3.4 Newtons Axiome	13
1.4 Einfache Bewegungen	14
1.4.1 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung	14
1.4.2 Die gleichförmige Kreisbewegung ...	16
1.4.3 Die harmonische Schwingung	18
1.5 Arbeit, Energie, Impuls, Leistung	20
1.5.1 Arbeit	20
1.5.2 Kinetische Energie	22
1.5.3 Impuls	23
1.5.4 Kraftfelder	24
1.5.5 Potentielle Energie	24
1.5.6 Der Energiesatz	25
1.5.7 Leistung	26
1.5.8 Zentralkräfte	26
1.5.9 Anwendungen des Energie- und Impulsbegriffes	27
a) Geschoß- oder Treibstrahlgeschwindigkeiten	27
b) Raketenphysik	28
c) Propeller- und Düsenantrieb	28
d) Durchschlagkraft von Geschossen	29
e) Potentielle Energie der Schwere ...	30
f) Schwingungsenergie	31
g) Stoßgesetze	32
h) Zur Energiekrise	35
i) Der Virialsatz	37
1.5.10 Impulsraum	38
1.6 Reibung	40

1.6.1 Reibungsmechanismen	40
1.6.2 Bewegung unter Reibungseinfluß ...	42
1.6.3 Flug von Geschossen	43
1.6.4 Die technische Bedeutung der Reibung	44
1.7 Gravitation	46
1.7.1 Das Gravitationsgesetz	46
1.7.2 Das Gravitationsfeld	48
1.7.3 Gezeitenkräfte	49
1.7.4 Planetenbahnen	52
1.8 Trägheitskräfte	54
1.8.1 Arten der Kräfte	54
1.8.2 Inertialsysteme	55
1.8.3 Rotierende Bezugssysteme	56
1.8.4 Bahnstörungen	57
1.8.5 Invarianzen und Erhaltungssätze ...	59
Aufgaben	61

2. Mechanik des starren Körpers 2

2.1 Translation und Rotation	72
2.1.1 Bewegungsmöglichkeiten eines starren Körpers	72
2.1.2 Infinitesimale Drehungen	73
2.1.3 Die Winkelgeschwindigkeit	73
2.2 Dynamik des starren Körpers	74
2.2.1 Rotationsenergie	74
2.2.2 Das Trägheitsmoment	74
2.2.3 Das Drehmoment	75
2.2.4 Der Drehimpuls	76
2.2.5 Das Trägheitsmoment als Tensor ...	77
2.2.6 Der Drehimpulssatz	77
2.2.7 Die Bewegungsgleichung des starren Körpers	80
2.3 Gleichgewicht und Bewegung eines starren Körpers	80
2.3.1 Gleichgewichtsbedingungen	80
a) Arten des Gleichgewichts	81
b) Einfache Maschinen	82
c) Die Waage	83
d) Standfestigkeit	84
2.3.2 Gleichmäßig beschleunigte Rotation	84
2.3.3 Drehschwingungen	85
2.3.4 Kippung	86
2.3.5 Drehung um freie Achsen	87
2.4 Der Kreisel	88
2.4.1 Nutation des kräftefreien Kreisels ...	88
2.4.2 Präzession des Kreisels	89
Aufgaben	91

3. Mechanik deformierbarer Körper**3****3.1 Ruhende Flüssigkeiten und Gase****(Hydro- und Aerostatik)** 933.1.1 Der feste, flüssige
und gasförmige Zustand 933.1.2 Die Gestalt
von Flüssigkeitsoberflächen 94

3.1.3 Druck 95

a) Hydraulische Presse 95

b) Druckerarbeit 95

c) Kompressibilität 96

3.1.4 Der Schweredruck 96

a) Kommunizierende Röhren 97

b) Auftrieb 97

c) Schwimmen 97

d) Aräometer 98

3.1.5 Gasdruck 98

3.1.6 Der Atmosphärendruck 99

3.2 Oberflächenspannung 100

a) Tröpfchengröße 101

b) Überdruck in der Seifenblase 102

c) Kapillarität 103

3.3 Strömungen 104

3.3.1 Beschreibung von Strömungen 104

3.3.2 Innere Reibung 109

3.3.3 Die laminare Strömung 110

a) Reibungskräfte
in strömenden Flüssigkeiten 110

b) Druckkraft 111

c) Laminare Spaltströmung 111

d) Laminare Rohrströmung 112

e) Laminare Strömung
um Kugeln (Stokes) 112

f) Die Prandtl-Grenzschicht 113

g) Schmiermittelreibung 114

3.3.4 Bewegungsgleichung
einer Flüssigkeit 1153.3.5 Kriterien für die verschiedenen
Strömungstypen 116

3.3.6 Strömung idealer Flüssigkeiten 118

a) Ausströmen aus einem Loch 119

b) Weitere Beispiele
zur Bernoulli-Gleichung 120

c) Kavitation 120

d) Gasdynamik 120

3.3.7 Der hydrodynamische Impulssatz 121

3.3.8 Strömungswiderstand 123

3.3.9 Wirbel 125

3.3.10 Turbulenz 128

3.4 Der deformierbare Festkörper 130

3.4.1 Dehnung und Kompression 130

3.4.2 Scherung 131

3.4.3 Zusammenhang zwischen E -Modul
und G -Modul 132

3.4.4 Anelastisches Verhalten 132

3.4.5 Elastische Energie 134

3.4.6 Wie biegen sich die Balken? 134

3.4.7 Knickung 135

3.4.8 Härte 135

Aufgaben 136**4. Schwingungen und Wellen****4****4.1 Schwingungen** 141

4.1.1 Überlagerung von Schwingungen 142

a) Schwingungen
verschiedener Richtung 142b) Schwingungen gleicher Frequenz
und Richtung: Zeigerdiagramm,
komplexe Rechnung 143c) Schwingungen mit wenig
verschiedenen Frequenzen:
Schwebungen,
Amplitudenmodulation 145d) Schwingungen mit stark
unterschiedlicher Frequenz:
Fourier-Analyse 146e) Schwingungen mit
unbestimmter Phasendifferenz
(inkohärente Schwingungen) 149

4.1.2 Gedämpfte Schwingungen 150

4.1.3 Erzwungene Sinusschwingungen 154

4.1.4 Amplituden-
und Phasenmodulation 158**4.2 Wellen** 160

4.2.1 Beschreibung von Wellen 160

4.2.2 Die Wellengleichung 161

4.2.3 Elastische Wellen 162

4.2.4 Überlagerung von Wellen 164

a) Wellen gleicher Frequenz,
aber verschiedener
Ausbreitungsrichtung 165b) Wellen
gleicher Ausbreitungsrichtung,
aber verschiedener Frequenz 167

4.2.5 Intensität einer Welle 169

4.3 Wellenausbreitung 171

4.3.1 Streuung 172

4.3.2 Das Prinzip
von Huygens-Fresnel 172

4.3.3 Das Prinzip von Fermat 173

4.3.4 Beugung 175

4.3.5 Doppler-Effekt; Mach-Wellen 176

4.3.6 Absorption 178

4.3.7 Stoßwellen 179

4.4 Eigenschwingungen 181

4.4.1 Gekoppelte Pendel 181

4.4.2 Wellen im Kristallgitter;
die Klein-Gordon-Gleichung 182

4.4.3 Stehende elastische Wellen 184

4.4.4	Eigenschwingungen von Platten, Membranen und Hohlräumen	186	5.4.5	Diffusion in Gasen und Lösungen	237
4.4.5	Entartung	188	5.4.6	Transportphänomene	239
4.5	Schallwellen	189	5.5	Entropie	242
4.5.1	Schallmessungen	189	5.5.1	Irreversibilität	242
	a) Messung in stehender Welle	190	5.5.2	Wahrscheinlichkeit und Entropie	243
	b) Kundtsches Rohr	190	5.5.3	Entropie und Wärmeenergie	245
	c) Quinckesches Resonanzrohr	190	5.5.4	Berechnung von Entropien	245
	d) Ultraschall-Interferometer	190	5.5.5	Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre	248
	e) Optische Wellenlängenmessung von Ultraschallwellen (Debye und Sears)	190	5.5.6	Reversible Kreisprozesse	249
4.5.2	Töne und Klänge	191	5.5.7	Das thermodynamische Gleichgewicht	251
4.5.3	Lautstärke	193	5.5.8	Chemische Energie	255
4.5.4	Das Ohr	194	5.5.9	Freie Energie, Helmholtz-Gleichung und 3. Hauptsatz der Wärmelehre	259
4.5.5	Ultraschall und Hyperschall	196	5.6	Aggregatzustände	260
4.6	Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten	197	5.6.1	Koexistenz von Flüssigkeit und Dampf	260
Aufgaben		202	a) Sieden	262	
			b) Hygrometrie	262	
			c) Verdampfungswärme	264	
5.	Wärme	5	5.6.2	Koexistenz von Festkörper und Flüssigkeit	265
5.1	Wärmeenergie und Temperatur	207	5.6.3	Koexistenz dreier Phasen	266
5.1.1	Was ist Wärme?	207	5.6.4	Reale Gase	267
5.1.2	Temperatur	208	5.6.5	Kinetische Deutung der van der Waals-Gleichung	269
5.1.3	Thermometer	210	5.6.6	Joule-Thomson-Effekt; Gasverflüssigung	270
5.1.4	Freiheitsgrade	211	5.6.7	Erzeugung tiefster Temperaturen	272
5.1.5	Wärmekapazität	212	5.7	Lösungen	274
5.1.6	Kalorimeter	214	5.7.1	Grundbegriffe	274
5.2	Kinetische Gastheorie	214	5.7.2	Osmose	275
5.2.1	Der Gasdruck	214	5.7.3	Dampfdrucksenkung	276
5.2.2	Die Zustandsgleichung idealer Gase	216	5.7.4	Destillation	277
5.2.3	Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre	217	5.8	Vakuum	278
5.2.4	c_V und c_p bei Gasen	218	5.8.1	Bedeutung der Vakuumtechnik	278
5.2.5	Adiabatische Zustandsänderungen	219	5.8.2	Vakuumumpen	279
5.2.6	Druckarbeit	220	5.8.3	Strömung verdünnter Gase	281
5.2.7	Mittlere freie Weglänge und Wirkungsquerschnitt	221	5.8.4	Vakuum-Meßgeräte	282
5.2.8	Brownsche Bewegung	223	Aufgaben		284
5.2.9	Die Boltzmann-Verteilung	224			
5.2.10	Die Maxwell-Verteilung	225	6.	Elektrizität	6
	a) Die Verteilungsfunktion	226	6.1	Elektrostatik	293
	b) Molekularstrahlen	227	6.1.1	Elektrische Ladungen	293
5.3	Wärme kraftmaschinen	227	6.1.2	Das elektrische Feld	296
5.3.1	Thermische Energiewandler	227	6.1.3	Spannung und Potential	298
5.3.2	Arbeitsdiagramme	229	6.1.4	Berechnung von Feldern	301
5.3.3	Wirkungsgrad von thermischen Energiewandlern	229	a) Feld einer beliebigen kugelsymmetrischen Ladungsverteilung	301	
5.4	Wärmeleitung und Diffusion	232	b) Feld im Innern einer gleichmäßig geladenen Hohlkugel	302	
5.4.1	Mechanismen des Wärmetransportes	232	c) Feld eines gleichmäßig geladenen unendlich langen geraden Drahtes	302	
5.4.2	Die Gesetze der Wärmeleitung	232			
5.4.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang	236			
5.4.4	Wärmetransport durch Konvektion	237			

7.4 Magnetische Materialien	388
7.4.1 Magnetisierung	388
7.4.2 Diamagnetismus	390
7.4.3 Paramagnetismus	390
7.4.4 Ferromagnetismus	391
7.4.5 Der Einstein-de Haas-Effekt	393
7.4.6 Struktur der Ferromagnetika	393
7.4.7 Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	396
7.4.8 Ferro- und Antiferroelektrizität	396
7.5 Wechselströme	396
7.5.1 Erzeugung von Wechselströmen	397
7.5.2 Effektivwerte von Strom und Spannung	399
7.5.3 Wechselstromwiderstände	400
7.5.4 Zweipole, Ortskurven, Ersatzschaltbilder	403
7.5.5 Meßinstrumente für elektrische Größen	406
a) Drehspulamperemeter	406
b) Elektrodynamisches Meßwerk ...	406
c) Induktionsmeßwerk (Ferraris-Zähler)	407
d) Dreheisen- oder Weicheisen-Meßwerk	407
e) Hitzdrahtamperemeter	408
f) Voltmeter	408
g) Saitengalvanometer	408
h) Schleifenzillograph	408
7.5.6 Drehstrom	409
7.5.7 Schwingkreise	411
7.5.8 Transformatoren	413
7.5.9 Das Betatron	416
7.5.10 Elektromotoren und Generatoren ...	418
a) Motoren und ihre Kennlinien ...	418
b) Gleichstrommotoren	419
c) Der Drehstrom-Asynchronmotor (Induktionsmotor)	420
7.5.11 Skineffekt	422
7.6 Elektromagnetische Wellen	423
7.6.1 Der Verschiebungsstrom	423
7.6.2 Der physikalische Inhalt der Maxwell-Gleichungen	424
7.6.3 Ebene elektromagnetische Wellen ...	425
7.6.4 Energiedichte und Energieströmung	429
7.6.5 Der lineare Oszillator	429
7.6.6 Die Ausstrahlung des linearen Oszillators	431
7.6.7 Wellengleichung und Telegraphengleichung	433
a) Hohe Frequenzen	434
b) Kleine Frequenzen	434
7.6.8 Warum funkt man mit Trägerwellen?	435
7.6.9 Drahtwellen	436

7.6.10 Hohlraumoszillatoren und Hohlleiter	437
Aufgaben	439

8. Freie Elektronen und Ionen

8

8.1 Erzeugung von freien Ladungsträgern	445
8.1.1 Glühemission (Richardson-Effekt) ..	445
8.1.2 Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt)	447
8.1.3 Feldemission	448
8.1.4 Sekundärelektronen	449
8.1.5 Ionisierung eines Gases	449
8.2 Bewegung freier Ladungsträger	450
8.2.1 Elektronen im homogenen elektrischen Feld	450
8.2.2 Elektronen im homogenen Magnetfeld	451
8.2.3 Oszilloskop und Fernsehöhre	453
8.2.4 Thomsons Parabelversuch; Massenspektroskopie	454
8.2.5 Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse	455
8.2.6 Die Elektronenöhre	456
8.2.7 Elektronenöhren als Verstärker	459
8.2.8 Schwingungserzeugung durch Rückkopplung	460
8.2.9 Erzeugung und Verstärkung höchstfrequenter Schwingungen	461
8.2.10 Teilchenfallen	462
8.3 Gasentladungen	463
8.3.1 Leitfähigkeit von Gasen	463
a) Ionenkinetik	463
b) Die Ionisationskammer	464
8.3.2 Stoßionisation	466
8.3.3 Einteilung der Gasentladungen	467
8.3.4 Glimmentladungen	468
8.3.5 Bogen und Funken	468
8.3.6 Gasentladungslampen	469
8.3.7 Kathoden-, Röntgen- und Kanalstrahlung	470
8.4 Plasmen	471
8.4.1 Der „vierte Aggregatzustand“	471
8.4.2 Plasmaschwingungen	473
8.4.3 Plasmen im Magnetfeld	474
8.4.4 Fusionsplasmen	476
Aufgaben	478

9. Geometrische Optik

9

9.1 Reflexion und Brechung	481
9.1.1 Lichtstrahlen	481
9.1.2 Reflexion	483
9.1.3 Brechung	485

9.1.4	Totalreflexion	485
9.1.5	Prismen	487
9.2	Optische Instrumente	488
9.2.1	Brechung an Kugelflächen	488
9.2.2	Dicke Linsen	491
9.2.3	Linsenfehler	492
9.2.4	Abbildungsmaßstab und Vergrößerung	493
9.2.5	Die Lupe	494
9.2.6	Das Mikroskop	494
9.2.7	Der Dia-Projektor	496
9.2.8	Das Fernrohr	497
9.2.9	Das Auge	498
9.3	Die Lichtgeschwindigkeit	500
9.3.1	Astronomische Methoden	500
9.3.2	Zahnradmethode	500
9.3.3	Drehspiegelmethode	501
9.3.4	Resonanzmethode	502
9.4	Geometrische Elektronenoptik	502
9.4.1	Das Brechungsgesetz für Elektronen	502
9.4.2	Elektrische Elektronenlinsen	503
9.4.3	Magnetische Linsen	505
9.4.4	Elektronenmikroskope	506
Aufgaben		509

10. Wellenoptik

10

10.1	Interferenz und Beugung	513
10.1.1	Kohärenz	514
10.1.2	Die Grundkonstruktion der Interferenzoptik	515
10.1.3	Gitter	517
10.1.4	Spalt- und Lochblende	519
10.1.5	Auflösungsvermögen optischer Geräte	520
10.1.6	Auflösungsvermögen des Spektrographen	522
10.1.7	Fresnel-Linsen	524
10.1.8	Holographie	526
10.1.9	Fresnel-Beugung	527
10.1.10	Stehende Lichtwellen	528
10.1.11	Interferenzfarben	529
10.1.12	Interferometrie	531
10.2	Polarisation des Lichts	534
10.2.1	Lineare und elliptische Polarisation	534
10.2.2	Polarisationsapparate	535
10.2.3	Polarisation durch Doppelbrechung	535
10.2.4	Polarisation durch Reflexion und Brechung	538
10.2.5	Intensitätsverhältnisse bei Reflexion und Brechung	539
10.2.6	Reflexminderung	541

10.2.7	Interferenzen im parallelen linear polarisierten Licht	542
10.2.8	Interferenzen im konvergenten polarisierten Licht	544
10.2.9	Drehung der Polarisationssebene	544
10.2.10	Der elektrooptische Effekt (Kerr-Effekt)	546

10.3 Absorption, Dispersion und Streuung des Lichtes

10.3.1	Absorption	547
10.3.2	Dispersion	548
10.3.3	Atomistische Deutung der Dispersion	549
10.3.4	Deutung des Faraday-Effektes	552
10.3.5	Warum ist der Himmel blau?	553

10.4 Wellen und Teilchen

10.4.1	Materiewellen	556
10.4.2	Elektronenbeugung	557
10.4.3	Elektronenbeugung an Lochblenden	558
10.4.4	Die Unschärferelation	560

Aufgaben

11

11. Strahlungsenergie

11.1	Das Strahlungsfeld	565
11.1.1	Strahlungsgrößen	565
11.1.2	Photometrische Größen	567
11.1.3	Photometrie und Strahlungsmessung	568
11.2	Strahlungsgesetze	569
11.2.1	Wärmestrahlung und thermisches Gleichgewicht	569
11.2.2	Das Spektrum der schwarzen Strahlung	571
11.2.3	Plancks Strahlungsgesetz	572
11.2.4	Lage des Emissionsmaximums; Wiensches Verschiebungsgesetz	574
11.2.5	Gesamtemission des schwarzen Strahlers; Stefan-Boltzmann-Gesetz	575
11.2.6	Pyrometrie	575
11.3	Die Welt der Strahlung	576
11.3.1	Farbe	577
11.3.2	Infrarot und Ultraviolett	579
11.3.3	Die Strahlung der Sonne	585
11.3.4	Warum sind die Blätter grün?	591
Aufgaben		594

12. Das Atom

12

12.1	Das Photon	599
12.1.1	Entdeckung des Photons	600
12.1.2	Masse und Impuls der Photonen; Strahlungsdruck	600

13.5.3 Strahlungsgürtel	736	15.2 Relativistische Mechanik	840
Aufgaben	739	15.2.1 Relativität der Gleichzeitigkeit	840
14. Festkörperphysik	14	15.2.2 Maßstabsvergleich	841
14.1 Kristallgitter	750	15.2.3 Uhrenvergleich	842
14.1.1 Dichteste Kugelpackungen	751	15.2.4 Addition von Geschwindigkeiten	844
14.1.2 Gittergeometrie	755	15.2.5 Messung von Beschleunigungen	845
14.1.3 Kristallstrukturanalyse	757	15.2.6 Die bewegte Masse	846
14.1.4 Gitterenergie	761	15.2.7 Die Masse-Energie-Äquivalenz	847
14.1.5 Kristallbindung	766	15.2.8 Flugplan einer Interstellarrakete	849
14.1.6 Einiges über Eis	769	15.2.9 Antriebsprobleme	852
14.1.7 Kristallwachstum	773	der Photonenrakete	853
14.1.8 Fullerene	775	15.3 Relativistische Physik	853
14.2 Gitterschwingungen	776	15.3.1 Die Lorentz-Transformation	853
14.2.1 Spezifische Wärmekapazität	777	15.3.2 Die Struktur der Raumzeit	855
14.2.2 Gitterdynamik	781	15.3.3 Relativistische Elektrodynamik	855
14.2.3 Optik der Ionenkristalle	784	15.3.4 Materiewellen	857
14.2.4 Phononen	786	15.3.5 Speicherringe	859
14.2.5 Wärmeleitung in Isolatoren	787	und Teilchenstrahlwaffen	859
14.3 Metalle	788	15.4 Gravitation und Kosmologie	861
14.3.1 Das klassische Elektronengas	789	15.4.1 Allgemeine Relativität	861
14.3.2 Das Fermi-Gas	791	15.4.2 Einsteins Gravitationstheorie	862
14.3.3 Metalloptik	793	15.4.3 Gravitationswellen	866
14.3.4 Elektrische und Wärmeleitung	795	15.4.4 Schwarze Löcher	868
14.3.5 Energiebänder	797	15.4.5 Kosmologische Modelle	869
14.3.6 Elektronen und Löcher	799	15.4.6 Die kosmologische Kraft	872
14.4 Halbleiter	801	15.4.7 Gab es einen Urknall?	873
14.4.1 Reine Halbleiter	801	15.4.8 Das Geheimnis	876
14.4.2 Gestörte Halbleiter	804	der dunklen Massen	876
14.4.3 Halbleiter-Elektronik	807	Aufgaben	877
14.4.4 Amorphe Halbleiter	810	16. Quantenmechanik	16
14.5 Gitterfehler	811	16.1 Mathematisches Handwerkszeug	887
14.5.1 Idealkristall und Realkristall	812	16.1.1 Vektoren und Funktionen	887
14.5.2 Thermische Fehlordnung	812	16.1.2 Matrizen und Operatoren	889
14.5.3 Chemische Fehlordnung	814	16.1.3 Eigenfunktionen und Eigenwerte	889
14.5.4 Versetzungen	815	16.2 Grundzüge der Quantenmechanik	891
14.6 Makromolekulare Festkörper	818	16.2.1 Die Axiome	891
14.6.1 Definition	818	16.2.2 Die Unschärferelation	894
und allgemeine Eigenschaften	818	16.2.3 Der Energieoperator	896
14.6.2 Länge eines linearen Makromoleküls	819	(Hamilton-Operator)	896
14.6.3 Gummielastizität	821	16.2.4 Die Schrödinger-Gleichung	898
14.6.4 Hochpolymere	822	16.3 Teilchen in Potentialtöpfen	900
14.7 Supraleitung	823	16.3.1 Stationäre Zustände	900
Aufgaben	829	16.3.2 Der Tunneleffekt	902
15. Relativitätstheorie	15	16.3.3 Der Knotensatz	905
15.1 Bezugssysteme	835	16.4 Atome und Moleküle	905
15.1.1 Gibt es „absolute Ruhe“?	835	16.4.1 Das Wasserstoffatom	905
15.1.2 Der Michelson-Versuch	836	16.4.2 Atome mit mehreren Elektronen	908
15.1.3 Das Relativitätsprinzip	838	16.4.3 Das Periodensystem	908
15.1.4 Punktereignisse	838	16.4.4 Die effektive Kernladung	910
15.1.5 Rückdatierung	839	16.4.5 Wie strahlen die Atome?	911
		16.4.6 Hybridzustände	913
		16.4.7 Quantenchemie	914
		Aufgaben	918

17. Statistische Physik 17

17.1 Statistik der Ensembles	923
17.1.1 Zufallstexte	923
17.1.2 Wahrscheinlichkeit einer Komposition	924
17.1.3 Die wahrscheinlichste Komposition ..	926
17.1.4 Schwankungserscheinungen	928
17.1.5 Die kanonische Verteilung	929
17.1.6 Beispiel: „Harmonischer Oszillator“	932
17.1.7 Mischungsentropie	933
17.1.8 Das kanonische Ensemble (Ensemble von Gibbs)	934
17.1.9 Arbeit und Wärme	935
17.2 Physikalische Ensembles	936
17.2.1 Physikalische Deutung	936
17.2.2 Zustandsänderungen	936
17.2.3 Verteilungsmodul und Temperatur ...	937
17.2.4 Wahrscheinlichkeit und Entropie ...	938
17.2.5 Die freie Energie; Gleichgewichtsbedingungen	938
17.2.6 Statistische Gewichte	940
17.2.7 Der Phasenraum	941
17.2.8 Das ideale Gas	942
17.2.9 Absolute Reaktionsraten	944
17.3 Quantenstatistik	945
17.3.1 Abzählung von Quantenteilchen	945
17.3.2 Fermi-Dirac- und Bose-Einstein-Statistik	946
17.3.3 Das Fermi-Gas	949
17.3.4 Stoßvorgänge bei höchsten Energien	952
17.3.5 Extreme Zustände der Materie	954
17.3.6 Biographie eines Schwarzen Loches	955
Aufgaben	957

18. Nichtlineare Dynamik 18

18.1 Stabilität	964
18.1.1 Dynamische Systeme	964
18.1.2 Stabilität von Fixpunkten	966
18.1.3 Der Phasenraum deterministischer Systeme	968
18.2 Nichtlineare Schwingungen	971
18.2.1 Pendel mit großer Amplitude	971
18.2.2 Erzwungene Schwingungen mit nichtlinearer Rückstellkraft	972
18.2.3 Selbsterregte Schwingungen	974

18.2.4 Parametrische Schwingungserregung	978
18.3 Biologische und chemische Systeme	979
18.3.1 Populationsdynamik	979
18.3.2 Einfache ökologische Modelle	984
18.3.3 Kinetische Probleme	987
18.4 Chaos und Ordnung	991
18.4.1 Einfache Wege ins Chaos	991
18.4.2 Chaos und Fraktale	993
18.4.3 Iteratives Gleichungslösen	998
18.4.4 Chaos im Kochtopf	999
Aufgaben	1003

Lösungen zu den Aufgaben =

Kapitel 1	1009
Kapitel 2	1028
Kapitel 3	1034
Kapitel 4	1043
Kapitel 5	1052
Kapitel 6	1073
Kapitel 7	1083
Kapitel 8	1095
Kapitel 9	1102
Kapitel 10	1111
Kapitel 11	1117
Kapitel 12	1125
Kapitel 13	1138
Kapitel 14	1160
Kapitel 15	1170
Kapitel 16	1184
Kapitel 17	1194
Kapitel 18	1201

Farbtafeln ■

1 – 10	1215
--------------	------

Quellennachweis ■

für die Einleitungs- und Ausblickabbildungen	1231
--	------

Sach- und Namenverzeichnis ■

A – Z	1233
-------------	------