

Wolfgang Demtröder

Experimentalphysik 1

Mechanik und Wärme

5., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer

Wolfgang Demtröder
Universität Kaiserslautern
Fachbereich Physik
Erwin-Schrödinger-Strasse 46
67663 Kaiserslautern
demtroed@rhrk.uni-kl.de

ISBN 978-3-540-79294-9

e-ISBN 978-3-540-79295-6

DOI 10.1007/978-3-540-79295-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2008, 2006, 2003, 1998, 1994 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

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 Werk 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.

Einbandgestaltung: WMX Design GmbH, Heidelberg

Satz und Herstellung: le-tex publishing services oHG, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Vorwort zur fünften Auflage

Die 4. Auflage dieses Bandes wurde einer kritischen Revision unterzogen, wobei viele Hinweise von Lesern, sowohl von Kollegen als auch von Studierenden berücksichtigt werden konnten. Vor allem wurden viele Abbildungen neu gezeichnet, um die Perspektive bei drei-dimensionalen Abbildungen richtig darzustellen, oder die wichtigsten Botschaften der Abbildungen, die ja zur Illustration des Textes dienen sollen, besser hervorzuheben.

An Stellen, bei denen ich aufgrund von Leserzuschriften den Eindruck hatte, dass etwas nicht klar genug erläutert war, wurde der Text geändert oder ergänzt. Manche Tabellen sind auf den neuesten Stand gebracht worden und auch bei den Lösungen der Aufgaben wurden oft einige Zwischenschritte ausführlicher dargestellt.

Ich danke allen Lesern für ihre Hilfe bei der Verbesserung des Lehrbuches. Vor allem möchte ich hier Herrn P. Staub von der TU Wien, die Kollegen Prof. K. Bergmann (TU Kaiserslautern) und Prof. B. Boddenberg (Universität Dortmund) erwähnen, die durch konstruktive Hinweise viel dazu beigetragen haben, dass die 5. Auflage hoffentlich eine gegen Null tendierende Fehlerrate hat.

Da an manchen Universitäten durch Einführung des Bachelor-Master-Studienganges die für die Mechanik und Wärmelehre zur Verfügung stehende Zeit knapper geworden ist, habe ich im Inhaltsverzeichnis die Kapitel bzw. Abschnitte, die in der Vorlesung für diesen Studiengang weggelassen werden können, durch einen Stern markiert. Der Autor würde sich auch weiterhin über Zuschriften seiner Leser freuen, die nach Möglichkeit schnell beantwortet werden sollen. Er hofft, dass dieses Lehrbuch das Verständnis der Grundlagen der Physik erleichtern und die Begeisterung für die Physik wecken und erhalten kann.

Kaiserslautern,
im März 2008

Wolfgang Demtröder

Vorwort zur ersten Auflage

Dieses vierbändige Lehrbuch der Experimentalphysik, dessen erster Band hiermit vorgestellt wird, ist gedacht zur Begleitung und Vertiefung der Vorlesungen zur Einführung in die Physik, wie sie an den meisten deutschen Universitäten bis zum Vordiplom gehalten werden. Das Buch ist durch eine gründliche Überarbeitung und Erweiterung von Vorlesungsskripten des Autors entstanden, die über viele Jahre hinweg von den Studenten in Kaiserslautern benutzt wurden.

Dieses Lehrbuch soll deutlich machen, dass physikalische Erkenntnisgewinnung auf der Entwicklung und Beschreibung von Modellen der Natur beruht, deren experimentelle Prüfung und sukzessive Verfeinerung zu einem immer detaillierteren Verständnis der uns umgebenden Welt und der in ihr ablaufenden Vorgänge führt.

Deshalb beginnt die Darstellung – nach einem einführenden Kapitel, in dem die historische Entwicklung der Physik und ihre Bedeutung für andere Bereiche von Wissenschaft, Kultur und Technik kurz gestreift werden und die Rolle der Messung für ein quantitatives Verständnis der Natur illustriert wird – mit dem einfachsten Modell des Massenpunktes zur Beschreibung der Bewegung von Körpern unter dem Einfluss von Kräften. Nach einer Diskussion der Darstellung von Vorgängen in bewegten Bezugssystemen und der grundlegenden Ideen der speziellen Relativitätstheorie werden dann im 4. Kapitel Systeme von Massenpunkten und Stöße zwischen zwei Teilchen behandelt.

Räumliche Ausdehnung von Körpern und unterschiedliche Eigenschaften der Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig werden dann in den Kap. 5–7 berücksichtigt. Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen und die zu ihrer Beschreibung verwendeten Modelle bilden den Inhalt des 8. Kapitels, während Kap. 9 das technologisch wichtige Gebiet der Vakuumphysik kurz darstellt.

Zu den wichtigsten dynamischen Vorgängen in der Natur gehören Schwingungen und Wellenphänomene, die relativ ausführlich in Kap. 10¹ behandelt werden. Wärmelehre und Thermodynamik werden hier in nur einem Kapitel relativ knapp dargestellt, weil noch etwas Raum bleiben sollte für das neue und rasch expandierende Gebiet der Physik nichtlinearer Phänomene, das viele überraschende und faszinierende Einsichten in die reale Natur bietet. Im Sinne der verfeinerten Approximation von Modellen stellt die nichtlineare Dynamik einen großen Schritt in der genauen, wenn auch meistens nur numerisch möglichen Beschreibung realer Naturvorgänge dar.

Die in diesem Lehrbuch behandelten grundlegenden Begriffe und ihre Anwendung auf die Lösung von Problemen werden an vielen Beispielen illustriert, und

¹ in der vorliegenden zweiten Auflage ist dies Kap. 11

Übungsaufgaben am Ende jedes Kapitels bieten dem Leser die Möglichkeit, sein Verständnis des Stoffes selbst zu prüfen. Dazu kann er seine eigene Lösung mit den im Anhang angegebenen Lösungen vergleichen. Dort sind auch einige Grundbegriffe der Vektorrechnung, der komplexen Zahlen und der Beschreibung von physikalischen Vorgängen in problemangepassten Koordinatensystemen dargestellt, um den Zugang zur mathematischen Beschreibung in diesem Lehrbuch zu erleichtern.

Jedes Lehrbuch lebt von der kritischen Mitarbeit der Leser. Der Autor freut sich deshalb über Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf mögliche Fehler.

Zum Schluss möchte ich allen herzlich danken, die bei der Herstellung dieses Buches geholfen haben. Insbesondere sind hier Herr Dr. Kölsch und Frau Kaiser vom Springer-Verlag zu nennen, die mit viel Geduld und großem Engagement den Autor während der Herstellungsphase unterstützt haben. Frau Wollscheid hat viele der Abbildungen gezeichnet. Frau Weyland und Frau Heider haben Teile des Manuskripts geschrieben, Ihnen sei dafür ganz herzlich gedankt. Ich danke Herrn Imsieke, der das gesamte Manuskript gelesen und durch Hinweise auf Unklarheiten viel zur Verbesserung der Darstellung beigetragen hat. Besonderer Dank gebührt meiner lieben Frau, die viel Verständnis gehabt hat für die zahlreichen Arbeitswochenenden, welche für dieses Buch gebraucht wurden und die mir durch ihre Hilfe die Zeit zum Schreiben ermöglicht hat.

Ich hoffe, dass dieses Buch nicht nur für Physikstudenten, sondern auch für Studenten anderer Fachrichtungen, die Einführungsvorlesungen in Physik hören, von Nutzen ist. Wenn es die Begeisterung des Autors für unser schönes Fach auf möglichst viele Studenten übertragen kann, hat es seinen Zweck erfüllt.

Kaiserslautern,
im Mai 1994

Wolfgang Demtröder

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	17
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	26
1.6.6	Stoffmengeneinheit	27
1.6.7	Temperatureinheit	27
1.6.8	Einheit der elektrischen Stromstärke	27
1.6.9	Einheit der Lichtstärke	28
1.6.10	Winkleinheiten	28
1.7	Maßsysteme	29
1.8	Messgenauigkeit und Messfehler	30
1.8.1	Systematische Fehler	30
1.8.2	Statistische Fehler. Messwertverteilung und Mittelwert ...	30
1.8.3	Streuungsmaße	32
1.8.4	Fehlerverteilungsgesetz	33
1.8.5	Fehlerfortpflanzung	35
1.8.6	Ausgleichsrechnung	36
	Zusammenfassung	39
	Übungsaufgaben	40

2. Mechanik eines Massenpunktes

2.1	Das Modell des Massenpunktes. Bahnkurve	41
2.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung	43
2.3	Gleichförmig beschleunigte Bewegung	44
2.3.1	Der freie Fall	45
2.3.2	Der schräge Wurf	45
2.4	Bewegungen mit nicht-konstanter Beschleunigung	46
2.4.1	Die gleichförmige Kreisbewegung	46
2.4.2	Die allgemeine krummlinige Bewegung	47
2.5	Kräfte	49
2.5.1	Kräfte als Vektoren. Addition von Kräften	49
2.5.2	Kraftfelder	50
2.5.3	Messung von Kräften. Diskussion des Kraftbegriffes	52
2.6	Die Grundgleichungen der Mechanik	53
2.6.1	Die Newtonschen Axiome	53
2.6.2	Träge und schwere Masse	55
2.6.3	Die Bewegungsgleichung eines Teilchens in einem beliebigen Kraftfeld	56
2.7	Der Energiesatz der Mechanik	59
2.7.1	Arbeit und Leistung	59
2.7.2	Wegunabhängige Arbeit. Konservative Kraftfelder	61
2.7.3	Potentielle Energie	63
2.7.4	Der Energiesatz der Mechanik	64
2.7.5	Zusammenhang zwischen Kraftfeld und Potential	65
2.8	Drehimpuls und Drehmoment	66
2.9	Gravitation und Planetenbewegungen	67
2.9.1	Die Keplerschen Gesetze	67
2.9.2	Newtons Gravitationsgesetz	70
2.9.3	Planetenbahnen	70
2.9.4	Das effektive Potential	73
2.9.5	Gravitationsfeld ausgedehnter Körper	74
2.9.6	Experimentelle Prüfung des Gravitationsgesetzes	76
2.9.7	Experimentelle Bestimmung der Erdbeschleunigung	78
	Zusammenfassung	80
	Übungsaufgaben	81

3. Bewegte Bezugssysteme und spezielle Relativitätstheorie

3.1	Relativbewegung	85
3.2	Inertialsysteme und Galilei-Transformation	85
3.3	Beschleunigte Bezugssysteme, Trägheitskräfte	87
3.3.1	Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme	87
3.3.2	Rotierende Bezugssysteme	89
3.3.3	Zentrifugal- und Corioliskräfte	91
3.3.4	Zusammenfassung	94
3.4	Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	94
3.5	Lorentz-Transformationen	96

3.6	Spezielle Relativitätstheorie	98
3.6.1	Das Problem der Gleichzeitigkeit	98
3.6.2	Minkowski-Diagramme	99
3.6.3	Skalenlängen	100
3.6.4	Lorentz-Kontraktion von Längen	101
3.6.5	Zeitdilatation	103
3.6.6	Zwillings-Paradoxon	104
3.6.7	Raumzeit-Ereignisse und Kausalität	107
	Zusammenfassung	109
	Übungsaufgaben	109
4.	Systeme von Massenpunkten. Stöße 	
4.1	Grundbegriffe	111
4.1.1	Massenschwerpunkt	111
4.1.2	Reduzierte Masse	112
4.1.3	Drehimpuls eines Teilchensystems	113
4.2	Stöße zwischen zwei Teilchen	115
4.2.1	Grundgleichungen	116
4.2.2	Elastische Stöße im Laborsystem	117
4.2.3	Elastische Stöße im Schwerpunktsystem	119
4.2.4	Inelastische Stöße	121
4.2.5	Newton-Diagramme	123
4.3	Was lernt man aus der Untersuchung von Stößen?	124
4.3.1	Streuung in einem kugelsymmetrischen Potential	124
4.3.2	Reaktive Stöße	127
4.4	Stöße bei relativistischen Energien*	128
4.4.1	Relativistische Massenzunahme	129
4.4.2	Kraft und relativistischer Impuls	130
4.4.3	Die relativistische Energie	131
4.4.4	Inelastische Stöße bei relativistischen Energien	132
4.4.5	Relativistischer Energiesatz	133
4.5	Erhaltungssätze*	134
4.5.1	Impulserhaltungssatz	134
4.5.2	Energieerhaltungssatz	134
4.5.3	Drehimpulserhaltung	135
4.5.4	Erhaltungssätze und Symmetrien	135
	Zusammenfassung	137
	Übungsaufgaben	138
5.	Dynamik starrer ausgedehnter Körper 	
5.1	Das Modell des starren Körpers	141
5.2	Massenschwerpunkt	142
5.3	Die Bewegung eines starren Körpers	143
5.4	Kräfte und Kräftepaare	143
5.5	Trägheitsmoment und Rotationsenergie	145
5.5.1	Steinerscher Satz	146

5.6	Bewegungsgleichung der Rotation eines starren Körpers	149
5.6.1	Rotation um eine Achse bei konstantem Drehmoment	150
5.6.2	Drehschwingungen um eine feste Achse	151
5.6.3	Vergleich von Translation und Rotation	152
5.7	Rotation um freie Achsen; Kreiselbewegungen*	152
5.7.1	Trägheitstensor und Trägheitsellipsoid	152
5.7.2	Hauptträgheitsmomente	154
5.7.3	Freie Achsen	156
5.7.4	Die Eulerschen Gleichungen	158
5.7.5	Der kräftefreie symmetrische Kreisel	158
5.7.6	Präzession des symmetrischen Kreisels	161
5.7.7	Überlagerung von Nutation und Präzession	162
5.8	Die Erde als symmetrischer Kreisel	164
	Zusammenfassung	166
	Übungsaufgaben	167

6. Reale feste und flüssige Körper

6.1	Atomares Modell der Aggregatzustände	169
6.2	Deformierbare feste Körper	171
6.2.1	Hookesches Gesetz	171
6.2.2	Querkontraktion	173
6.2.3	Scherung und Torsionsmodul	174
6.2.4	Biegung eines Balkens	175
6.2.5	Elastische Hysterese, Deformationsarbeit	178
6.2.6	Die Härte eines Festkörpers	179
6.3	Ruhende Flüssigkeiten, Hydrostatik	179
6.3.1	Freie Verschiebbarkeit und Oberflächen von Flüssigkeiten	180
6.3.2	Statischer Druck in einer Flüssigkeit	180
6.3.3	Auftrieb und Schwimmen	183
6.4	Phänomene an Flüssigkeitsgrenzflächen	184
6.4.1	Oberflächenspannung	184
6.4.2	Grenzflächen und Haftspannung	186
6.4.3	Kapillarität	189
6.4.4	Zusammenfassung	190
6.5	Reibung zwischen festen Körpern	190
6.5.1	Haftreibung	190
6.5.2	Gleitreibung	191
6.5.3	Rollreibung	192
6.5.4	Bedeutung der Reibung in der Technik	193
6.6	Die Erde als deformierbarer Körper	194
6.6.1	Polabplattung der rotierenden Erde	194
6.6.2	Gezeitenverformung	195
6.6.3	Wirkungen der Gezeiten	199
6.6.4	Messung der Erdverformung	199
	Zusammenfassung	201
	Übungsaufgaben	202

7. Gase	
7.1	Makroskopische Betrachtung 203
7.2	Luftdruck und barometrische Höhenformel 204
7.3	Kinetische Gastheorie 206
7.3.1	Das Modell des idealen Gases 206
7.3.2	Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie 207
7.3.3	Mittlere kinetische Energie und absolute Temperatur 208
7.3.4	Verteilungsfunktion 209
7.3.5	Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung 210
7.3.6	Stoßquerschnitt und mittlere freie Weglänge 214
7.4	Experimentelle Prüfung der kinetischen Gastheorie 215
7.4.1	Molekularstrahlen 215
7.5	Transportprozesse in Gasen* 218
7.5.1	Diffusion 218
7.5.2	Brownsche Bewegung 221
7.5.3	Wärmeleitung in Gasen 221
7.5.4	Viskosität von Gasen 223
7.5.5	Zusammenfassung 224
7.6	Die Erdatmosphäre 225
	Zusammenfassung 227
	Übungsaufgaben 228

8. Strömende Flüssigkeiten und Gase	
8.1	Grundbegriffe und Strömungstypen 231
8.2	Euler-Gleichung für ideale Flüssigkeiten 233
8.3	Kontinuitätsgleichung 234
8.4	Bernoulli-Gleichung 235
8.5	Laminare Strömungen 239
8.5.1	Innere Reibung 239
8.5.2	Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Wänden 242
8.5.3	Laminare Strömungen durch Rohre 242
8.5.4	Kugelfall-Viskosimeter, Stokessches Gesetz 243
8.6	Navier-Stokes-Gleichung* 244
8.6.1	Wirbel und Zirkulation 245
8.6.2	Helmholtzsche Wirbelsätze 247
8.6.3	Die Entstehung von Wirbeln 248
8.6.4	Turbulente Strömungen; Strömungswiderstand 249
8.7	Aerodynamik 251
8.7.1	Der dynamische Auftrieb 251
8.7.2	Zusammenhang zwischen dynamischem Auftrieb und Strömungswiderstand 253
8.7.3	Kräfte beim Fliegen 254
8.8	Ähnlichkeitsgesetze; Reynolds'sche Zahl 254
8.9	Nutzung der Windenergie 256
	Zusammenfassung 259
	Übungsaufgaben 260

9. Vakuum-Physik*

9.1	Grundlagen und Grundbegriffe	263
9.1.1	Die verschiedenen Vakuumbereiche	263
9.1.2	Einfluss der Wandbelegung	264
9.1.3	Saugvermögen und Saugleistung von Pumpen	265
9.1.4	Strömungsleitwerte von Vakuumleitungen	266
9.1.5	Erreichbarer Enddruck	267
9.2	Vakuumerzeugung	268
9.2.1	Mechanische Pumpen	268
9.2.2	Diffusionspumpen	272
9.2.3	Kryo- und Sorptionspumpen	274
9.3	Messung kleiner Drücke	276
9.3.1	Flüssigkeitsdruckmessgeräte	276
9.3.2	Membranmanometer	277
9.3.3	Wärmeleitungsmanometer	277
9.3.4	Ionisations- und Penning-Vakuummeter	278
9.3.5	Reibungsvakuummeter	279
	Zusammenfassung	280
	Übungsaufgaben	280

10. Wärmelehre

10.1	Temperatur und Wärmeenergie	283
10.1.1	Temperaturmessung, Thermometer und Temperaturskala	284
10.1.2	Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper	286
10.1.3	Thermische Ausdehnung von Gasen, Gasthermometer	289
10.1.4	Absolute Temperaturskala	290
10.1.5	Wärmemenge und spezifische Wärme	290
10.1.6	Molvolumen und Avogadro-Konstante	292
10.1.7	Innere Energie und molare Wärmekapazität idealer Gase	293
10.1.8	Spezifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck	293
10.1.9	Molekulare Deutung der spezifischen Wärme	294
10.1.10	Spezifische Wärmekapazität fester Körper	296
10.1.11	Schmelzwärme und Verdampfungswärme	297
10.2	Wärmetransport	298
10.2.1	Konvektion	298
10.2.2	Wärmeleitung	299
10.2.3	Das Wärmerohr (Heatpipe)	304
10.2.4	Methoden der Wärmeisolierung	305
10.2.5	Wärmestrahlung	307
10.2.6	Thermische Solarenergienutzung	313
10.3	Die Hauptsätze der Thermodynamik	315
10.3.1	Zustandsgrößen	316
10.3.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	317
10.3.3	Spezielle Prozesse als Beispiele für den ersten Hauptsatz	318
10.3.4	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	320
10.3.5	Der Carnotsche Kreisprozess	320
10.3.6	Äquivalente Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	323

10.3.7	Die Entropie	324
10.3.8	Reversible und irreversible Prozesse	328
10.3.9	Freie Energie und Enthalpie	329
10.3.10	Chemische Reaktionen	330
10.3.11	Thermodynamische Potentiale; Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen	331
10.3.12	Gleichgewichts-Zustände	332
10.3.13	Der dritte Hauptsatz (Nernstsches Theorem)	333
10.3.14	Thermodynamische Maschinen	334
10.4	Thermodynamik realer Gase und Flüssigkeiten	338
10.4.1	Van-der-Waalsche Zustandsgleichung	338
10.4.2	Stoffe in verschiedenen Aggregatzuständen	340
10.4.3	Lösungen und Mischzustände	348
Zusammenfassung		350
Übungsaufgaben		352

11. Mechanische Schwingungen und Wellen

11.1	Der freie ungedämpfte Oszillator	353
11.2	Darstellung von Schwingungen	354
11.3	Überlagerung von Schwingungen	355
11.3.1	Eindimensionale Überlagerungen	356
11.3.2	Zweidimensionale Überlagerung, Lissajous-Figuren	359
11.4	Der freie gedämpfte Oszillator	361
11.5	Erzwungene Schwingungen	363
11.6	Energiebilanz bei der Schwingung eines Massenpunktes	367
11.7	Parametrischer Oszillator*	368
11.8	Gekoppelte Oszillatoren	370
11.8.1	Gekoppelte Federpendel	370
11.8.2	Erzwungene Schwingungen zweier gekoppelter Pendel ...	372
11.8.3	Normalschwingungen	373
11.9	Mechanische Wellen	374
11.9.1	Verschiedene Darstellungen harmonischer ebener Wellen .	375
11.9.2	Zusammenfassung	376
11.9.3	Allgemeine Darstellung beliebiger Wellen. Wellengleichung	377
11.9.4	Verschiedene Wellentypen	378
11.9.5	Ausbreitung von Wellen in verschiedenen Medien	380
11.9.6	Energiedichte und Energietransport in einer Welle	386
11.9.7	Dispersion, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	386
11.10	Überlagerung von Wellen	389
11.10.1	Kohärenz und Interferenz	389
11.10.2	Überlagerung zweier harmonischer Wellen	390
11.11	Beugung, Reflexion und Brechung von Wellen	391
11.11.1	Huygenssches Prinzip	391
11.11.2	Beugung an Begrenzungen	393
11.11.3	Zusammenfassung	395
11.11.4	Reflexion und Brechung von Wellen	395

11.12	Stehende Wellen	396
11.12.1	Eindimensionale stehende Wellen	396
11.12.2	Experimentelle Demonstration stehender Wellen	398
11.12.3	Zweidimensionale Eigenschwingungen von Membranen	399
11.13	Wellen bei bewegten Quellen	401
11.13.1	Doppler-Effekt	401
11.13.2	Wellenfronten bei bewegten Quellen	402
11.13.3	Stoßwellen	404
11.14	Akustik	405
11.14.1	Definitionen	405
11.14.2	Druckamplitude und Energiedichte von Schallwellen	406
11.14.3	Erzeugung von Schallwellen	407
11.14.4	Schalldetektoren	407
11.14.5	Ultraschall	408
11.14.6	Anwendungen des Ultraschalls	409
11.14.7	Verfahren der Ultraschalldiagnostik	410
11.15	Physik der Musikinstrumente*	411
11.15.1	Einteilung der Musikinstrumente	412
11.15.2	Akkorde, Tonleitern und Stimmungen	412
11.15.3	Physik der Geige	414
11.15.4	Physik beim Klavierspiel	416
	Zusammenfassung	417
	Übungsaufgaben	419

12. Nichtlineare Dynamik und Chaos*

12.1	Stabilität dynamischer Systeme	423
12.2	Logistisches Wachstumsgesetz und Feigenbaum-Diagramm	427
12.3	Parametrischer Oszillator	429
12.4	Bevölkerungsexplosion	430
12.5	Systeme mit verzögerter Rückkopplung	432
12.6	Selbstähnlichkeit	433
12.7	Fraktale	434
12.8	Mandelbrot-Mengen	435
12.9	Folgerungen für unser Weltverständnis	438
	Zusammenfassung	439
	Übungsaufgaben	440

Anhang

A.1	Vektorrechnung	441
1.1	Definition des Vektors	441
1.2	Darstellung von Vektoren	441
1.2.1	Kartesische Koordinaten	441
1.2.2	Sphärische oder Polarkoordinaten	442
1.2.3	Zylindrische Koordinaten	442
1.3	Polare und axiale Vektoren	442
1.4	Addition von Vektoren	443

1.5	Multiplikation von Vektoren	443
1.5.1	Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar	443
1.5.2	Das Skalarprodukt	443
1.5.3	Das Vektorprodukt	444
1.5.4	Mehrfache Produkte	444
1.6	Differentiation von Vektoren	445
1.6.1	Vektorfelder	445
1.6.2	Differentiation eines Vektors nach einer skalaren Größe ..	445
1.6.3	Der Gradient einer skalaren Größe	446
1.6.4	Die Divergenz eines Vektorfeldes	446
1.6.5	Die Rotation eines Vektorfeldes	447
1.6.6	Mehrfach-Differentiationen	447
A.2	Koordinatensysteme	448
2.1	Kartesische Koordinaten	448
2.2	Zylinderkoordinaten	448
2.3	Sphärische Koordinaten (Kugelkoordinaten)	449
A.3	Komplexe Zahlen	450
3.1	Rechenregeln für komplexe Zahlen	451
3.2	Polardarstellung	452
A.4	Fourieranalyse	452
	Lösungen der Übungsaufgaben	453
	Farbtafeln	489
	Literaturverzeichnis	497
	Sachwortverzeichnis	503