

Physik

Ulrich Harten

Physik

Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler

9. Auflage

Ulrich Harten
Hochschule Mannheim
Mannheim, Deutschland

Die Online-Version des Buches enthält digitales Zusatzmaterial, das durch ein Play-Symbol gekennzeichnet ist. Die Dateien können von Lesern des gedruckten Buches mittels der kostenlosen Springer Nature „More Media“ App angesehen werden. Die App ist in den relevanten App-Stores erhältlich und ermöglicht es, das entsprechend gekennzeichnete Zusatzmaterial mit einem mobilen Endgerät zu öffnen.

ISBN 978-3-662-68483-2

ISBN 978-3-662-68484-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68484-9>

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

Springer Vieweg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2003, 2005, 2007, 2009, 2012, 2014, 2017, 2021, 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort

Die Naturgesetze galten schon, als die Erde noch wüst und leer war. Verstöße gegen sie werden nicht bestraft, sie sind gar nicht erst möglich. Wer verstehen will, was um ihn herum passiert oder gar technische Prozesse entwickeln will, die auch tun, was sie sollen, der muss die Naturgesetze kennen. Die fertige Maschine wird sich erbarmungslos an sie halten.

Dieses Buch will Studienanfängern, die sich im Nebenfach mit Physik zu befassen haben, ein leidliches Verständnis der wichtigsten physikalischen Gesetze vermitteln. Dies ist absichtsvoll so vorsichtig formuliert, denn leider sind die meisten Gesetze keineswegs einfach zu verstehen. Quantenphysik und Relativitätstheorie sind weitgehend ausgespart, denn hier kann der, der sich nur nebenbei mit Physik beschäftigt, nur ein sehr oberflächliches Verständnis erwerben.

Die „klassische“ Physik ist schwierig genug. Die Erfahrung zeigt, dass schon die Newton'sche Mechanik Studienanfängern große Schwierigkeit bereitet. Zu verlockend ist die anschauliche Mechanik, die noch auf Aristoteles zurückgeht und sich vielleicht so auf den Punkt bringen lässt: Ein Gegenstand bewegt sich immer in die Richtung, in die er gezogen wird. Das ist selbst in einfachen Alltagssituationen falsch, und dies zu verstehen erfordert schon einiges Abstraktionsvermögen. Es erfordert außerdem die Bereitschaft, sich auf einige Mathematik einzulassen, auf die in der Physik nicht verzichtet werden kann.

Es geht mir mit diesem Buch also vor Allem um das Verstehen scheinbar einfacher Dinge. Ein so relativ kurzes Lehrbuch kann keine Vollständigkeit beanspruchen. Die Stoffauswahl orientiert sich an dem, was typischerweise im Nebenfach gelehrt wird, ist aber natürlich auch persönlich gefärbt. Mancher Dozent wird also in seiner Vorlesung auch Themen behandeln, die in diesem Buch nur knapp erwähnt sind. Besteht dann weiterer Lesebedarf, so gibt es sehr gute „dicke“ Physikbücher, im Springer Verlag den „Gerthsen“ und den „Hering“, die dann weiterhelfen, sonst aber vielleicht wieder zu viel des Guten sind.

Unentbehrlich beim Lernen sind Rechenbeispiele und Übungsaufgaben. Wenn es schon Physik sein muss, so hätte der Student sie gerne an Beispielen aus seinem Fachgebiet erläutert. Dies hat aber Grenzen, denn da wird es schnell zu kompliziert für den Anfang. Ich habe mich bemüht, anschauliche Beispiele, die vor Allem an Alltagserfahrungen anknüpfen, zu finden.

Viele Zusammenhänge in der Physik lassen sich am besten an bewegten Bildern veranschaulichen. Daher sind in dieser neuen Auflage noch mehr Bilder mit Videos hinterlegt. Beim E-Books kann man die Legende dieser Bilder anklicken, um das Video zu betrachten. Beim Print-Buch kann der Leser sich die Videos mit der More-Media-App auf das Smartphone holen.

Ich danke wieder allen Lesern, die Fehlerhinweise gegeben haben. Die Betreuung dieses Buches beim Verlag lag in den Händen von Frau Burato und Herrn Kottusch. Ihnen gilt mein Dank für die vielfältigen Hilfen.

Hinweise zum Gebrauch des Buches

Lernen ist Arbeit. Darum passt ein Schreibtisch besser zum Lehrbuch als ein Ohrensessel. Für die Physik gilt das in besonderem Maße, denn sie macht Gebrauch von der Mathematik. Formeln im Kopf umzuformen und auszurechnen, grenzt an Leichtsinn. Darum hält der Kundige stets Bleistift, Papier, Taschenrechner und Radiergummi oder das Tablet griffbereit.

Kleingedrucktes darf der eilige Leser überschlagen, ohne gleich befürchten zu müssen, dass er den Faden verliert. Er verzichtet lediglich auf etwas Butter zum Brot.

Merke

Was so markiert ist, gehört zum Grundwissen.

Lernen erschöpft sich nicht im Aufnehmen vorgedruckter Gedankengänge: Es erfordert eigenes Tun.

Rechenbeispiel 1.1: Wie geht das?

Aufgabe: Man sollte gleich probieren, die Aufgabe selbst zu lösen.

Lösung: Hier wird die Lösung ausführlich beschrieben.

In Kürze Diese Lerntabellen am Ende der Kapitel fassen den Inhalt noch einmal zusammen und sollen insbesondere bei der Prüfungsvorbereitung helfen.

Halbwertszeit

$T_{1/2}$: Zeit, in der die Hälfte des Wissens zerfällt [s]

Zunächst einmal sollen die **Verständnisfragen** helfen, die Zusammenhänge zu wiederholen. Dann droht am Ende der Vorlesung in der Regel eine Klausur. Darum sollen Lösungen zu den **Übungsaufgaben** nicht einfach am Ende des Buches nachgeschlagen werden. Zunächst sollte zumindest versucht werden, sie selbst zu lösen. Die Übungsaufgaben sind nach Schwierigkeitsgrad sortiert: (I) leicht; (II) mittel; (III) schwer.

Vieles in der Physik lässt sich nicht beantworten ohne die Kenntnis einzelner Natur- und Materialkonstanten. Nur wenige verdienen es, auswendig gelernt zu werden; den Rest schlägt man nach. Was der Inhalt dieses Buches verlangt, findet sich im Anhang.

Viele Zusammenhänge in der Physik lassen sich am besten an bewegten Bildern veranschaulichen. Daher sind in dieser Auflage etliche Bilder mit Videos hinterlegt. Beim E-Books kann man die Legende dieser Bilder anklicken, um das Video zu betrachten. Beim Print-Buch kann der Leser sich die Videos mit der More-Media-App auf das Smartphone holen.

Liste der Formelzeichen

a	Jahr	\vec{F}_L	Lorentzkraft
A	Ampere (Stromeinheit)	\vec{F}_N	Normalkraft (senkrecht zur Ebene)
A	Fläche(ninhalt)	\vec{F}_R	Reibungskraft
A_0	Amplitude (einer Schwingung)	\vec{F}_z	Zentripetalkraft (bei einer Kreisbewegung)
$\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$	Vektoren	g	Fallbeschleunigung
$\vec{a}, (a)$	Beschleunigung, (Betrag)	g	Gegenstandsweite (Optik)
$\vec{a}_z, (a_z)$	Zentralbeschleunigung (bei einer Kreisbewegung)	G	Gravitationskonstante, elektrischer Leitwert
$\vec{B}, (B)$	magnetische Flussdichte, (Betrag)	$\vec{v}, (v)$	Geschwindigkeit, (Betrag)
b	Bildweite (Optik)	h	Stunde
c	Phasengeschwindigkeit (einer Welle)	h	Höhe, Planck'sches Wirkungsquantum
c	Stoffmengendichte, spezifische Wärmekapazität (pro Masse)	h_{cv}	Wärmeübergangskoeffizient (Konvektion)
c_m	Molalität (Einheit: mol/kg)	Δh	Höhenunterschied
c_n	molare Wärmekapazität	$\vec{H}, (H)$	magnetische Feldstärke, Äquivalenzdosis
c_p	molare Wärmekapazität bei konstantem Druck	I	elektrischer Strom, Wärmestrom, Volumenstromstärke
c_v	molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen	I	Schallstärke, Intensität
C	elektrische Kapazität, Wärmekapazität	J	Trägheitsmoment
C	Coulomb (Ladungseinheit; entspricht A · s)	j	Teilchenstromdichte
d	Tag	j_Q	Wärmestromdichte
d	Abstand, Durchmesser (einer Kugel)	J	Joule (Energieeinheit)
D	Dioptrien (Optik)	k	Kompressibilität
D	Federkonstante	k, k_B	Boltzmannkonstante
dB	Dezibel	$k(\lambda)$	Extinktionskonstante (Optik)
e	Euler'sche Zahl	K	Kelvin (Temperatureinheit)
e_0	Elementarladung	kg	Kilogramm (Masseneinheit)
E	Elastizitätsmodul	l, Δl	Länge, Längenänderung
$\vec{E}, (E)$	elektrische Feldstärke, (Betrag)	I_{eff}	effektiver Hebelarm
f	Brennweite (einer Linse), Frequenz	$\vec{L}, (L)$	Drehimpuls, (Betrag)
f^*	Grenzfrequenz (eines Hoch- oder Tiefpasses)	L	Induktivität
F	Farad (Einheit der elektrischen Kapazität)	m	Masse
$\vec{F}, (F)$	Kraft, (Betrag)	\vec{m}	magnetisches Moment
\vec{F}_C	Coulomb-Kraft	m	Meter (Längeneinheit)
\vec{F}_G	Schwerkraft	min	Minute
		M	molare Masse
		n	Brechungsindex (Optik)
		n	Anzahldichte, Anzahl der Mole
		N	Anzahl
		N	Newton (Krafteinheit)

N_A	Avogadro-Konstante, Log- schmidt-Zahl	α	linearer Ausdehnungskoeffizi- ent
p	Druck	α	Absorptionsvermögen
p_D	Dampfdruck	α, β, γ	Winkel
$\vec{p}, (p)$	Impuls, Dipolmoment, (Betrag)	β	Volumenausdehnungs- koeffizient
P	Leistung	β_{grenz}	Grenzwinkel der Totalreflexion
Pa	Pascal (Druckeinheit)	Γ	Vergrößerung (Optik)
Q, q	Ladung	δ	Dämpfungskonstante (Schwin- gungen)
Q	Wärme, Kompressionsmodul	ε_0	elektrische Feldkonstante
r	Abstand, Radius	ε_r	relative Permittivität (Dielektri- zitätskonstante)
R	elektrischer Widerstand, Strö- mungswiderstand	η	Nutzeffekt, Wirkungsgrad, Vis- kosität
R_C	kapazitiver Widerstand	λ	Wellenlänge, Wärmeleitfä- higkeit, Widerstandsbeiwert (Strömung)
R_i	Innenwiderstand	μ	elektrische Beweglichkeit
R_L	induktiver Widerstand	μ_0	magnetische Feldkonstante
R	Gaskonstante, Reflexionsver- mögen (Optik)	μ_{Gl}	Gleitreibungskoeffizient
R_e	Reynold-Zahl	μ_H	Haftreibungskoeffizient
s	Sekunde (Zeiteinheit)	μ_m	Massenschwächungskoeffizient (Röntgenstrahlen)
s	Standardabweichung	μ_r	relative Permeabilität
s	Strecke	ρ	Massendichte
s_0	Anfangsort	ρ	Reflexionsvermögen (Optik)
t	Zeit	ρ	spezifischer elektrischer Wider- stand
$T_{1/2}$	Halbwertszeit	ρ_D	Dampfdichte
T	Schwingungsdauer, Periode	σ	elektrische Leitfähigkeit
T	Temperatur	σ	mechanische Spannung, Ober- flächenspannung
T	Tesla (Magnetfeldeinheit)	σ	Strahlungskonstante (Optik)
$\vec{T}, (T)$	Drehmoment, (Betrag)	τ	Zeitkonstante
u	atomare Masseneinheit	Φ	magnetischer Fluss, Strahlungs- fluss (Optik)
$u(X)$	Messunsicherheit der Größe X	φ_0	Phasenwinkel (gesprochen: fi)
U	elektrische Spannung, innere Energie	$\omega = 2\pi \cdot f$	Kreisfrequenz, Winkelge- schwindigkeit
$U_{\text{eff}}, I_{\text{eff}}$	Effektivwerte von Spannung und Strom	ω	Öffnungswinkel (Optik)
v_0	Anfangsgeschwindigkeit	Ω	Ohm (Einheit des elektrischen Widerstandes)
V	Volt (Spannungseinheit)		
V	Volumen		
V_n	Molvolumen		
V_S	spezifisches Volumen (Kehr- wert der Dichte)		
w	Energiedichte		
W	Watt (Leistungseinheit)		
W	Arbeit		
W_{el}	elektrische Energie		
W_{kin}	kinetische Energie		
W_{pot}	potentielle Energie		
Z	Kernladungszahl		

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	1
1.1	Physikalische Größen	2
1.1.1	Physikalische Größen und ihre Einheiten	2
1.1.2	SI Einheitensystem	4
1.1.3	Dimensionskontrolle	5
1.2	Mengenangaben	6
1.2.1	Masse und Stoffmenge	6
1.2.2	Dichten und Gehalte	7
1.3	Statistik und Messunsicherheit	9
1.3.1	Messfehler	9
1.3.2	Mittelwert und Streumaß	10
1.3.3	Messunsicherheit	11
1.3.4	Fehlerfortpflanzung	12
1.4	Vektoren und Skalare	13
1.5	Wichtige Funktionen	18
1.5.1	Winkelfunktionen	18
1.5.2	Exponentialfunktion und Logarithmus	19
1.5.3	Potenzfunktionen	22
1.5.4	Algebraische Gleichungen	23
1.6	Fragen und Übungen	25
2	Mechanik starrer Körper	27
2.1	Kinematik (Bewegung)	29
2.1.1	Fahrstrecke und Geschwindigkeit	29
2.1.2	Beschleunigung	32
2.1.3	Überlagerung von Bewegungen	36
2.1.4	Kinematik der Drehbewegungen	39
2.1.5	Relativ oder Absolut?	43
2.2	Kraft	44
2.2.1	Kraftmessung und Kräftezerlegung	44
2.2.2	Gewichtskraft und Gravitation	47
2.2.3	Reibungskraft	48
2.3	Energie	50
2.3.1	Einführung	50
2.3.2	Arbeit und Leistung	51
2.3.3	Potentielle Energie	54
2.3.4	Bewegungsenergie und mechanische Energie	55
2.4	Drehmoment und Statik	57
2.4.1	Hebel und Drehmoment	57
2.4.2	Die Grundgleichungen der Statik	60
2.4.3	Gleichgewichte	61

2.5	Dynamik der linearen Bewegung	64
2.5.1	Die Newton'schen Gesetze	64
2.5.2	Kraft = Gegenkraft	67
2.5.3	Bewegungsgleichung	69
2.5.4	Impuls	70
2.6	Dynamik der Rotation	73
2.6.1	Das 2. Newton'sche Gesetz in neuem Kleid	73
2.6.2	Dynamik der Kreisbewegung	75
2.6.3	Trägheitsmoment	76
2.6.4	Die Rollbewegung	78
2.6.5	Drehimpulserhaltung	80
2.7	Trägheitskräfte	82
2.7.1	Linear beschleunigte Bezugssysteme	82
2.7.2	Rotierende Bezugssysteme	84
2.7.3	Trägheitskräfte in der technischen Mechanik	86
2.8	Fragen und Übungen	89
3	Mechanik deformierbarer Körper	95
3.1	Die Aggregatzustände	97
3.2	Festkörper	98
3.2.1	Struktur der Festkörper	98
3.2.2	Verformung von Festkörpern	100
3.2.3	Viskoelastizität	103
3.3	Hydrostatik	104
3.3.1	Stempeldruck	104
3.3.2	Schweredruck	105
3.3.3	Auftrieb	107
3.3.4	Manometer	109
3.3.5	Pumpen	110
3.3.6	Kompressibilität	111
3.4	Grenzflächen	112
3.4.1	Kohäsion	112
3.4.2	Adhäsion	115
3.5	Hydrodynamik	117
3.5.1	Ideale Strömung	117
3.5.2	Zähigkeit (Viskosität)	120
3.5.3	Reale Strömung durch Rohre	122
3.5.4	Umströmung von Hindernissen	125
3.6	Fragen und Übungen	129
4	Mechanische Schwingungen und Wellen	133
4.1	Mechanische Schwingungen	134
4.1.1	Alles was schwingt	134
4.1.2	Harmonische Schwingungen	134
4.1.3	Gedämpfte Schwingungen	138
4.1.4	Erzwungene Schwingungen	140
4.1.5	Überlagerung von Schwingungen	141

4.2	Wellen	145
4.2.1	Wellenarten	145
4.2.2	Harmonische Seilwellen	147
4.2.3	Intensität und Energietransport	150
4.2.4	Stehende Wellen	151
4.2.5	Schallwellen	153
4.2.6	Schallwahrnehmung	155
4.2.7	Dopplereffekt	157
4.3	Fragen und Übungen	161
5	Wärmelehre	163
5.1	Die Grundlegenden Größen	165
5.1.1	Wärme	165
5.1.2	Temperatur	166
5.1.3	Temperaturmessung	167
5.1.4	Wahrscheinlichkeit und Ordnung	169
5.1.5	Die Entropie	170
5.1.6	Wärmekapazität	171
5.2	Das ideale Gas	174
5.2.1	Die Zustandsgleichung	174
5.2.2	Partialdruck	176
5.2.3	Die Energie im Gas	177
5.3	Transportphänomene	178
5.3.1	Wärmeleitung	178
5.3.2	Konvektion	180
5.3.3	Wärmestrahlung	181
5.3.4	Diffusion	183
5.3.5	Osmose	185
5.4	Phasenumwandlungen	187
5.4.1	Umwandlungswärmen	187
5.4.2	Schmelzen oder Aufweichen?	189
5.4.3	Schmelzen und Gefrieren	189
5.4.4	Lösungs- und Solvatationswärme	192
5.4.5	Verdampfen und Kondensieren	192
5.4.6	Luftfeuchtigkeit	194
5.4.7	Zustandsdiagramme	195
5.4.8	Absorption und Adsorption	197
5.5	Wärmenutzung	198
5.5.1	Warum kostet Energie?	198
5.5.2	Zustandsänderungen	199
5.5.3	Der Ottomotor	203
5.5.4	„Echte“ Wärmekraftmaschinen	206
5.5.5	Wärme- und Entropiehaushalt der Erde	207
5.6	Fragen und Übungen	211

6	Elektrizitätslehre	215
6.1	Grundlagen	218
6.1.1	Ladung und Strom	218
6.1.2	Kräfte zwischen Ladungen	219
6.1.3	Elektrisches Feld	221
6.1.4	Feld und Spannung	224
6.1.5	Das elektrische Potenzial	225
6.2	Materie im elektrischen Feld	227
6.2.1	Influenz und elektrische Abschirmung	227
6.2.2	Der elektrische Strom	229
6.2.3	Leitfähigkeit und Resistivität	230
6.2.4	Die Permittivität (Dielektrizitätskonstante)	231
6.2.5	Gasentladung	233
6.3	Der Stromkreis	234
6.3.1	Strom und Spannung messen	234
6.3.2	Leistung und Energie	235
6.3.3	Elektrischer Widerstand	237
6.3.4	Wärme bei Stromdurchgang	238
6.3.5	Kondensator	239
6.3.6	Feld im Kondensator	241
6.3.7	Energie des geladenen Kondensators	242
6.3.8	Energie des elektrischen Feldes	243
6.4	Wechselspannung	243
6.4.1	Effektivwerte	243
6.4.2	Kapazitiver Widerstand	245
6.5	Elektrische Netzwerke	247
6.5.1	Widerstände in Reihe und parallel	247
6.5.2	Spannungsteiler	248
6.5.3	Innenwiderstände	251
6.5.4	Hoch- und Tiefpass	252
6.5.5	Kondensatorentladung und e-Funktion	253
6.6	Elektrochemie	255
6.6.1	Dissoziation	255
6.6.2	Elektrolyte	257
6.7	Grenzflächen	259
6.7.1	Membranspannung	259
6.7.2	Galvani-Spannung	261
6.7.3	Thermospannung	262
6.7.4	Halbleiter	263
6.8	Elektrische Unfälle	267
6.9	Magnetische Felder	269
6.9.1	Einführung	269
6.9.2	Kräfte im Magnetfeld	272
6.9.3	Erzeugung von Magnetfeldern	275
6.9.4	Materie im Magnetfeld	276
6.9.5	Die Feldgrößen \vec{H} und \vec{D}	278

6.10	Induktion	279
6.10.1	Einführung	279
6.10.2	Transformatoren	282
6.10.3	Selbstinduktion	283
6.10.4	Induktiver Widerstand	285
6.11	Elektrische Schwingungen	286
6.11.1	Der Schwingkreis	286
6.11.2	Geschlossene elektrische Feldlinien	290
6.11.3	Der schwingende elektrische Dipol	291
6.12	Fragen und Übungen	297
7	Optik	303
7.1	Elektromagnetische Wellen	305
7.1.1	Der strahlende Dipol	305
7.1.2	Spektralbereiche	307
7.1.3	Wellenausbreitung	308
7.2	Geometrische Optik	310
7.2.1	Lichtbündel	310
7.2.2	Spiegelung	313
7.2.3	Brechung	316
7.2.4	Dispersion	319
7.2.5	Linsen	320
7.2.6	Abbildung durch Linsen	323
7.2.7	Abbildungsgleichungen	325
7.2.8	Dicke Linsen und Objektive	326
7.2.9	Das Auge	328
7.2.10	Optische Instrumente	329
7.3	Intensität und Farbe	333
7.3.1	Strahlungs- und Lichtmessgrößen	333
7.3.2	Optische Absorption	335
7.3.3	Farbsehen	337
7.4	Wellenoptik	339
7.4.1	Polarisiertes Licht	339
7.4.2	Interferenz	342
7.4.3	Kohärenz	344
7.4.4	Dünne Schichten und Beugungsgitter	347
7.4.5	Beugungsfiguren	349
7.5	Quantenoptik	351
7.5.1	Das Lichtquant	351
7.5.2	Energiezustände und Spektren	354
7.5.3	Laser	357
7.5.4	Röntgenstrahlen	359
7.6	Elektronenoptik	362
7.6.1	Elektronenbeugung	362
7.6.2	Elektronenmikroskope	363
7.6.3	Die Unschärferelation	364
7.7	Fragen und Übungen	368

8	Atom- und Kernphysik	371
8.1	Aufbau des Atoms	372
8.1.1	Das Bohr'sche Atommodell	372
8.1.2	Elektronenwolken	373
8.1.3	Das Pauli-Prinzip	374
8.1.4	Charakteristische Röntgenstrahlung	375
8.2	Aufbau des Atomkerns	376
8.2.1	Nukleonen und Nuklide	376
8.2.2	Der Massendefekt	377
8.2.3	Radioaktivität	378
8.2.4	Nachweis radioaktiver Strahlung	380
8.2.5	Zerfallsgesetz	384
8.2.6	Kernspaltung und künstliche Radioaktivität	386
8.2.7	Antimaterie	387
8.2.8	Strahlennutzen, Strahlenschaden, Strahlenschutz	388
8.3	Fragen und Übungen	390
	Serviceteil	393
	Anhang	394
	Stichwortverzeichnis	421