

# Inhaltsverzeichnis

Über den Autor	11
<b>Einleitung</b>	<b>35</b>
Über dieses Buch	35
Vereinbarungen in diesem Buch	35
Was Sie nicht lesen müssen	35
Annahmen über den Leser	36
Wie dieses Buch aufgebaut ist	37
Symbole in diesem Buch	37
Wie es weitergeht	38
<b>Teil I</b>	
<b>Einführung: Was ist Physik? Warum Physik?</b>	<b>39</b>
<b>Kapitel 1</b>	
<b>Was ist Physik?</b>	<b>41</b>
Was ist Physik?	41
Klassische und moderne Physik	42
Ein kurzer Abriss der Geschichte der Physik	42
Die Anfänge reichen bis in das antike Griechenland zurück	42
Zeit des Stillstands: Das Mittelalter	43
Neuanfang im späten Mittelalter	43
Ein erster Höhepunkt: Die Renaissance	44
Entwicklung der Mechanik und der Optik im 17. Jahrhundert	44
Die Physik wird eine Wissenschaft: Das 18. Jahrhundert	45
Elektromagnetismus und Thermodynamik: Das 19. Jahrhundert	46
Kurz, aber wirkungsvoll: Die Revolution zu Beginn des 20. Jahrhunderts	46
High-Life in der Physik: Die ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts	47
Seitdem: Stetiger Fortschritt ohne Augenöffner	47
Einteilung der Physik, Aufbau dieses Buches	48
Die Physik und die anderen Naturwissenschaften	49
<b>Kapitel 2</b>	
<b>Messen und Maßeinheiten</b>	<b>51</b>
Modelle, Theorien und Gesetze	51
Beobachtung und Experiment	52
Es kommt auf die Messgenauigkeit an: Messfehler	52
Darstellung von Messwerten	55

Einheitensysteme	55
Darstellung von physikalischen Ergebnissen	58

## **Teil II**

### **Mechanik**

61

#### **Kapitel 3**

##### **Bewegung pur: Die Kinematik**

63

Bewegung schafft Raum und Zeit	63
Unendlich klein, aber oho!	65
Drei Größen zur Beschreibung von Bewegungen: Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung	66
Bewegung bedeutet das Zurücklegen eines Weges	66
Geschwindigkeit ist keine Hexerei	67
Bleifuß oder Bremse: Die Beschleunigung	69
Bewegungen lassen sich addieren: Das Superpositionsprinzip	70
Runter kommen sie immer: Der Wurf	72
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	73

#### **Kapitel 4**

##### **Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm: Die Newton'schen Gesetze**

75

Die Kräfte sind entscheidend	75
Grundlagen der Mechanik: Die Newton'schen Gesetze	76
Sich Änderungen widersetzen: Das erste Newton'sche Gesetz	76
Je größer die Kraft, desto größer die Wirkung: Das zweite Newton'sche Gesetz	77
Zu jeder Kraft gibt es eine Gegenkraft: Das dritte Newton'sche Gesetz	78
Die Größen der Newton'schen Gesetze	79
Arbeiten mit Kräften	79
Jede Masse besitzt zwei Eigenschaften	82
Auch Kräfte können träge sein: Das d'Alembertsche Prinzip	88
Schein oder nicht Schein: Trägheitskräfte	89
Die Summe von Kräften und Trägheitskräften ist null	90
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	91

#### **Kapitel 5**

##### **Arbeit und Leistung**

93

Arbeit	93
So viele Arbeiten	95
Leistung ist Arbeit pro Zeit	99
Wirkungsgrad	100
Etwas für Afficionados: Gravitationsfelder und Gravitationspotentiale	103
Überall im Raum definiert: Die Gravitationsfeldstärke	103

Arbeit im Gravitationsfeld: Das Gravitationspotential	105
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	106

## **Kapitel 6**

### **Impuls und Energie** **109**

Eher unscheinbar: Der Impuls	109
Es geht nichts verloren: Die Energie	110
Gespeicherte Arbeit: Die Definition der Energie	111
Formen von Energie	111
Beispiele für Energien	112
Energie und Impuls sind konstant: Die Erhaltungssätze	113
Vollkommen autark: Abgeschlossene Systeme	114
Impulserhaltungssatz	115
Auch die Gesamtenergie ist konstant: Der Energieerhaltungssatz	116
Mitten ins Herz: Stöße	117
Was genau ist ein Stoß?	118
Klassifizierung von Stößen	118
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	122

## **Kapitel 7**

### **Rundherum: Die Kreisbewegung** **125**

Ständig beschleunigt: Die gleichförmige Kreisbewegung	125
Winkel pro Zeit gleich Winkelgeschwindigkeit	127
Winkelbeschleunigung	129
Jetzt geht es ab: Die Tangentialbeschleunigung	131
Die eine wirkt nach innen, die andere scheinbar nach außen: Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft	133
Zentripetalkraft	133
Zentrifugalkraft	134
Translationsbewegungen und Kreisbewegungen: Ein erster Vergleich	136
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	136

## **Kapitel 8**

### **Rotation starrer Körper** **139**

Die Form berücksichtigen: Drehmoment und Trägheitsmoment	140
Das Bewegungsgesetz für Rotationsbewegungen	140
Alle Punkte bewegen sich gleich	141
Der Abstand ist entscheidend: I. Das Drehmoment	141
Der Abstand ist entscheidend: II. Das Trägheitsmoment	143
Die Lage der Achse ist entscheidend: Der Satz von Steiner	145
Auch bei Drehbewegungen von Bedeutung: Impuls, Arbeit, Energie und Leistung	146
Drehimpuls	147

In jeder Bewegung steckt Energie: Die Rotationsenergie	148
Natürlich erfordert eine Drehbewegung Arbeit	150
Die Leistung bei Rotationsbewegungen	151
Vergleich Rotation und Translation	151
Tiefdruckgebiete drehen sich immer gegen den Uhrzeigersinn: Die Corioliskraft	152
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	155

## **Kapitel 9**

### ***Hinderlich und doch unverzichtbar: Die Reibung*** **159**

Viele verschiedene Arten der Reibung	160
Sich großflächig reiben: Die Coulomb'sche Reibung	160
Wie festgeklebt: Die Haftreibung	160
Irgendwie hakt es immer noch: Die Gleitreibung	165
Weitere Reibungsarten	165
Rollreibung	165
Der Wind kommt immer von vorn: Der Luftwiderstand	167
Ein oder zwei Schlaufen reichen zum Festmachen: Die Seilreibung	170
Vor- und Nachteile der Reibung	172
Achtmal Reibung bei einem simplen Gerät: Das Fahrrad	172
Bremsen	174
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	175

## **Teil III**

### ***Viele Atome bilden ein Kontinuum: Die Kontinuumsmechanik*** **177**

## **Kapitel 10**

### ***Die Form kehrt zurück: Die Elastizitätslehre*** **179**

Belastungen erzeugen Spannungen	179
Belastungen	179
Jetzt wird's spannend: Schieben, ziehen und drücken	180
Je größer die Belastung, umso größer die Verformung: Das Hooke'sche Gesetz	182
Die vier elastischen Konstanten	183
In die Länge gezogen: Der Elastizitätsmodul	183
Nicht nur längs, sondern auch quer: Die Poissonzahl	184
Ansturm von allen Seiten: Der Kompressionsmodul	184
Und noch ein Modul: Der Schubmodul	186
Relative Volumenänderung	186
Nicht völlig unabhängig: Beziehungen zwischen den elastischen Konstanten	189
Diskussion der elastischen Konstanten	190
Auch in der Verformung steckt Energie	193
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	194

## **Kapitel 11**

### ***Wenn die Belastungen größer werden: Plastische Verformung und Bruch* 195**

Jenseits des elastischen Bereichs	195
Verformbar oder nicht?	195
Spannungs-Dehnungs-Kurven	196
Eine Kurve und eine Vielzahl von Parametern	198
Plastische Verformung und Bruch	201
Beschreibung der plastischen Verformung	201
Mechanismen der plastischen Verformung	202
Gegenmittel	205
»Plink!« Der spröde Bruch	206
Das Griffith-Modell des spröden Bruchs	207
Zähigkeit: Widerstand gegen spröden Bruch	208
Betrachtung von Oberflächen	213
Das ist die Härte	213
Verschleiß	216
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	217

## **Kapitel 12**

### ***Sie kann ziemlich turbulent sein: Die Hydrodynamik* 219**

Aggregatzustände	219
Ruhende Flüssigkeiten und Gase	220
Der Druck lastet schwer	220
Auftrieb	226
Oberflächen und Grenzflächen	228
Nur Luft und Wasser: Oberflächenspannung und -energie	228
Es geht an die Grenzen: Grenzflächenenergie und Grenzflächenspannung	230
Flüssigkeitsoberflächen können gewölbt sein: Die Kapillarität	230
Und wieder einmal die Reibung: Viskosität und Zähigkeit	233
Zäh wie Honig: Die Viskosität	233
Flüssigkeiten und Gase strömen sehr ähnlich: Bewegte Fluide	235
Welche Kräfte greifen an?	236
Laminare und turbulente Strömung	237
Einige Beispiele von Strömungsproblemen	237
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	241

## Teil IV

### Schwingungen und Wellen

243

#### Kapitel 13

##### Harmonische Schwingungen

245

Der Idealfall: Harmonische Schwingungen	246
Die Rückstellkraft ist entscheidend: Die Definition einer harmonischen Schwingung	246
Eine ganz einfache Differentialgleichung: Die Schwingungsgleichung	247
Größen zur Beschreibung einer harmonischen Schwingung	251
Harmonische Schwingungen ganz konkret	252
Der Klassiker: Das Federpendel	253
Auf den Punkt gebracht: Das mathematische Pendel oder Fadenpendel	256
Ziemlich ausgedehnt: Das physikalische Pendel oder Brettpendel	261
Ziemlich verdreht: Das Torsionspendel	262
Hätten Sie gedacht, dass das eine harmonische Schwingung ist?	263
Richtgrößen und Systemgrößen	264
Konstruktiv oder destruktiv: Überlagerung von Schwingungen	265
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	269

#### Kapitel 14

##### Reale Schwingungen

271

Nichts währt ewig: Gedämpfte Schwingungen	271
Nur geringe Einflüsse: Der Schwingfall	272
Die Salootür: Der aperiodische Grenzfall	273
Ziemlich langsam: Kriechfall	275
Größen zur Beschreibung der Dämpfung	275
Dieser Rhythmus, dass jeder mit muss: Erzwungene Schwingungen	276
Das Pohl'sche Pendel	276
An einer Stelle knallt es: Das Amplitudenverhältnis und die Resonanz	278
Nicht ganz im Takt: Die Phasenverschiebung	281
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	282

#### Kapitel 15

##### Gemeinsam schwingt es sich leichter: Schwingungssysteme

285

Gekoppelte Schwingungen	285
Wichtige Begriffe	288
Längs oder quer: Transversale und longitudinale Schwingungen	288
Bewegungsmöglichkeiten: Freiheitsgrade	289
Eigenschwingungen	290
Stabschwingungen	290
Longitudinalschwingungen	291

Transversalschwingungen	293
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	294
<b>Kapitel 16</b>	
<b>Ein Surferparadies: Wellen</b>	<b>297</b>
Der Swing geht auf die Reise: Wellen	298
Definition einer Welle	298
Ausbreitung von Wellen	299
Die Differentialgleichung schlechthin: Die Wellengleichung	301
Sie enthalten die Ortsabhängigkeit: Wellenlänge und Wellenzahl	303
Eine Größe fehlt noch: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit	304
Interferenz und Beugung	307
Wenn zwei sich treffen: Interferenz	307
Viele Einzelne bilden ein Ganzes: Das Huygens'sche Prinzip	309
Wellen können um die Ecke gehen: Die Beugung	310
Ein Engpass kann Wellen nichts anhaben: Die Beugung am Spalt	311
Stehende Wellen	316
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	319
<b>Kapitel 17</b>	
<b>Wellen kann man auch hören: Die Akustik</b>	<b>321</b>
Schallwellen	321
Eine mathematische Betrachtung des Schalls	324
Schallschnelle und Druckamplitude	325
Die Schallgeschwindigkeit hängt vom Material ab	326
Laut und leise: Die Intensität einer Schallwelle	328
Eher subjektiv: Die Klangqualität	330
Dopplereffekt und Überschallknall	332
Immer wieder an der Bahnschranke: Der Dopplereffekt	332
Durch die Wand: Der Überschallknall	336
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	338
<b>Teil V</b>	
<b>Die Optik sorgt für den Durchblick</b>	<b>339</b>
<b>Kapitel 18</b>	
<b>Es werde Licht</b>	<b>341</b>
Licht ist eine Welle	341
Der Doppelspaltversuch	341
Was schwingt beim Licht?	342
Lichtgeschwindigkeit	344
Frequenz und Wellenlänge	344

Das elektromagnetische Spektrum	345
Die verschiedenen Gestalten des Lichts	347
Vorwärts wie Rückwärts: Licht als Strahl	347
Licht als Welle	348
Licht als Teilchenstrom	348
Licht quantitativ: Intensität, Strahlungsleistung und Lichtmenge	350
Rein physikalisch: Energetische Größen	351
Das Auge misst mit: Photometrische Größen	351
Polarisation	355
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	358

## **Kapitel 19**

### ***Auch Licht kann gebeugt werden*** **359**

Interferenz von Licht	359
Eine notwendige Bedingung: Die Kohärenz	359
Beispiele	360
Beugung von Licht	364
Beugung an Spalten	364
Eine Vielzahl von Spalten: Die Beugung am Gitter	364
Arten der Beugung von Licht	368
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	371

## **Kapitel 20**

### ***Zwei grundlegende optische Effekte: Reflexion und Brechung*** **373**

Wechselwirkung von Licht mit Materie	373
Es geht wieder zurück: Die Reflexion	374
Reflexionsgesetz	375
Eine neue Richtung einschlagen: Die Brechung	376
Der Winkel ändert sich: Das Brechungsgesetz	376
Ursache der Brechung	376
Der Brechungsindex und weitere wichtige Größen	377
Beispiele für Brechungseffekte	382
Totalreflexion	385
Licht kann auch verloren gehen: Die Absorption	389
Es wird langsam dunkler: Der Absorptionskoeffizient	390
Sie decken alle Fälle ab: Die Fresnel'schen Formeln	390
Abbildungen in der Optik	395
Reelle und virtuelle Bilder	395
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	396



## **Kapitel 21**

### **Spieglein, Spieglein an der Wand**

**399**

Arten von Spiegeln	399
Die Welt hinter dem Spiegel: Ebene Spiegel	400
Einsammeln von Licht: Hohlspiegel	402
Das Spiegelgesetz	402
Konstruktion mittels Hauptstrahlen	405
Wichtig für Straßenverkehr und Make-up: Der gewölbte Spiegel	409
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	410

## **Kapitel 22**

### **Sie können sammeln oder zerstreuen: Linsen**

**413**

Arten von Linsen	413
Analog zur Spiegelgleichung: Die Linsengleichung	415
Annäherung durch Prismen	415
Gar nicht so kompliziert: Die Herleitung der Linsengleichung	415
Charakteristika einer Linse: Brennweite und Brechkraft	417
Konstruktion des Bildes einer Sammellinse mittels der Hauptstrahlen	419
Und wiederum: Die Hauptstrahlen	419
Zerstreuungslinsen	422
Nobody is perfect: Linsenfehler	422
Chromatische Aberration	423
Sphärische Aberration	424
Kein Tiefschlaf, sondern ein Linsenfehler: Die Koma	424
Bildwölbungsfehler	425
Linsenkombinationen	426
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	427

## **Kapitel 23**

### **Das Auge ist gut, aber es geht noch besser**

**431**

Das menschliche Auge	431
Aufbau und Funktionsweise	431
Eine Brille muss her: Sehfehler	434
Einige nützliche Definitionen	434
Das einfachste Instrument: Die Lupe	436
Blick ins Innere des Lebens: Das Mikroskop	438
Aufbau eines Mikroskops	438
Vergrößerung	439
Es gibt Grenzen: Das Auflösungsvermögen	440
Blick in die Ferne und ins Weltall: Fernrohre	444
Linsenfernrohre	445
Spiegelteleskope	446

Die Vergrößerung und andere Kennwerte	448
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	450

## **Teil VI**

<b>Elektrisierend und magnetisierend zugleich: Der Elektromagnetismus</b>	<b>451</b>
---	------------

### **Kapitel 24**

<b>Ruhende Punktladung: Elektrostatik I</b>	<b>453</b>
Sie können gewaltige Kräfte hervorrufen: Elektrische Ladungen	453
Plötzlich kriegt man einen gewischt! Elektrostatische Phänomene	453
Reibung setzt Ladung frei	454
Eine erste Zusammenfassung	455
Die Trennung von Ladungen	455
Ladungstrennung durch Reibung	456
Die Kräfte zwischen Ladungen werden ausgenutzt: Die Influenz	457
Unteilbar: Die Elementarladung	459
Es regelt die Kraft zwischen Punktladungen: Das Coulomb'sche Gesetz	462
Wirkung auf eine Probeladung: Das elektrische Feld	463
Felder sichtbar machen: Feldlinien	464
Schon wieder: Das Superpositionsprinzip	465
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	466

### **Kapitel 25**

<b>Ausgedehnte Ladungen: Elektrostatik II</b>	<b>469</b>
Geladene Wolken: Ladungsverteilungen	470
Radiale Felder	470
Homogene Felder	471
Auch in der Elektrizitätslehre allgegenwärtig: Arbeit und Energie	473
Sie komplettieren die Liste: Potential und Spannung	476
Zusammenfassung der elektrischen Feldgrößen	480
Kondensatoren können Ladungen speichern: Die Kapazität	480
Kondensatoren können auch ein Dielektrikum enthalten	481
Dipole richten sich aus	482
Realisierung von Kondensatoren	483
Ein Schaltkreis kann mehrere Kondensatoren enthalten	485
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	487

### **Kapitel 26**

<b>Immer in die gleiche Richtung: Gleichstromkreise</b>	<b>489</b>
Die erste von zwei wichtigen Größen: Der elektrische Strom	489
Strom ist Ladung pro Zeit	489

Meistens sind es Elektronen: Der Ladungstransport	490
Die zweite wichtige Größe: Die Spannung	492
Sie geben Ladungsträgern einen Kick: Spannungsquellen	492
Widerstand aus elektrisch	495
Der Widerstand ist streng geregelt: Das Ohm'sche Gesetz	495
Ein Widerstand bedingt einen Spannungsabfall	497
Der Widerstand hängt vom Material	497
Gleichstromkreise	500
Ein Widerstand kommt selten allein	500
Knoten und Maschen: Die Kirchhoffschen Regeln	502
Elektrizität bedeutet Leistung	504
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	505

## **Kapitel 27**

### **Magnetismus**

**507**

Magnetische Phänomene	507
Sie sind immer magnetisch: Permanentmagnete	507
Stromdurchflossene Leiter sind auch magnetisch	509
Zwei Größen zur Beschreibung magnetischer Felder	513
Feldgröße #1: Die magnetische Induktion	513
Feldgröße #2: Die Magnetfeldstärke	514
Immer mehr Windungen: Spulen	516
Bewegte Ladungen in elektromagnetischen Feldern	521
Immer geradeaus: Ladungen im elektrischen Feld	521
Im Kreis herum: Bewegte Ladungen im magnetischen Feld	523
Eine Vielzahl technischer Anwendungen: Bewegte Ladungen in kombinierten Feldern	525
Der Hall-Effekt	525
Alle Materialien sind magnetisch, aber es gibt gewaltige Unterschiede	527
Berücksichtigung des Materials: Permeabilität und Suszeptibilität	528
Der Ursache entgegengesetzt: Der Diamagnetismus	529
Alle richten sich aus: Der Paramagnetismus	529
Drastische Effekte: Der Ferromagnetismus	531
Vergleich der Materialien	534
Abarten: Ferrimagnetismus und Antiferromagnetismus	535
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	536

## **Kapitel 28**

### **Induktion**

**539**

Magnetische Felder erzeugen Spannungen: Die Induktion	539
Eine einfache Leiterschaukel	539
Entscheidend ist die Änderung des magnetischen Flusses	540
Der Ursache entgegenwirken: Die Lenz'sche Regel	542

Es passiert auch im eigenen Leiterkreis: Die Selbstinduktion	545
Die Induktion: Ein Effekt mit vielen Anwendungen	548
Die einfache Erzeugung von Wechselstrom: Der Generator	548
Die Umkehrung des Generatorprinzips: Der Elektromotor	550
Rauf und runter: Der Transformator	552
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	553

## **Kapitel 29**

### **Es geht ständig auf und ab: Wechselstromkreise** **555**

Es lebe die Veränderung: Wechselströme	555
Es kommt auf die Effektivität an: Die Leistung eines Wechselstromkreises	556
Gleichstrom vs Wechselstrom	558
Jede Menge Widerstände	560
Strom und Spannung im Gleichtakt: Der Ohm'sche Widerstand	560
Kondensatoren müssen geladen werden: Der kapazitive Widerstand	561
Ein zögerlicher Beginn: Der induktive Widerstand	564
Meist treten sie vereint auf: Widerstandskombinationen	566
Bezeichnung der Widerstände	567
Einer ist zumeist vorn: Der Phasenwinkel	568
Leistung kann auch blind sein	569
Eine einfache und elegante Darstellung: Zeigerdiagramme	572
It Don't Mean a Thing if You Ain't Got That Swing: Schwingkreise	574
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	576

## **Kapitel 30**

### **Der ganze Elektromagnetismus in vier Gesetzen:**

### **Die Maxwell'schen Gleichungen** **577**

Stand der Dinge: Elektrische und magnetische Felder	577
Elektrostatische Felder	577
Magnetostatische Felder	578
Elektromagnetische Felder	578
Beschreibung durch Feldgrößen	578
Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen elektrischen und magnetischen Feldern	581
Ihr Auftritt, Herr Maxwell!	581
Der ganze Schlamassel auf einen Blick	581
Symmetrie und Asymmetrie der Maxwell'schen Gleichungen	582
Maxwell #1: Das Gauß'sche Gesetz	582
Maxwell #2: Das Gauß'sche Gesetz für Magnetfelder	583
Maxwell #3: Das Induktionsgesetz	583
Maxwell #4: Das Durchflutungsgesetz	584
Monopole, Dipole und Quadrupole	585
Elektrische Mono- und Multipole	585
Magnetische Dipole	586

Zum Schluss ein Augenöffner: Elektromagnetische Wellen	588
Die Vorhersage durch Maxwell	588
Die Realisierung durch Hertz	589
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	592

### **Kapitel 31**

#### **Halbleiterphysik und Halbleiterbauelemente** **593**

Weder Leiter noch Isolatoren: Halbleiter	594
Die Eigenleitung: Elektronen und Löcher	594
Banddiagramme	597
Materialien	599
Die Dotierung: Elektronen oder Löcher	600
Sie bestimmen die Eigenschaften eines Halbleiters:	
Die Ladungsträgerkonzentrationen	602
Halbleiterbauelemente	606
Mit n- und p-Gebieten: Bipolar-Bauelemente	606
Feldeffekt-Bauelemente	611
Schottky-Bauelemente	615
Halbleitertechnologie	616
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	619

### **Teil VII**

#### **Thermodynamik** **621**

### **Kapitel 32**

#### **Leicht komprimierbar: Die Thermodynamik von Gasen** **623**

Die vier Zustandsgrößen	623
Je geringer das Volumen, umso höher der Druck:	
Das Gesetz von Boyle-Mariotte	624
Je wärmer, desto größer: Das Gesetz von Gay-Lussac	625
Steigt die Temperatur, steigt auch der Druck: Das Gesetz von Amontons	626
Vorläufige Zusammenfassung	626
Gase enthalten sehr viele Teilchen: Die Avogadrozahl	629
Ideal oder real: Gasgesetze	630
Perfekt: Das ideale Gasgesetz	630
Einige Korrekturen sind notwendig: Das reale Gasgesetz	632
Auch Gase besitzen eine Energie: Die Kinematik von Gasteilchen	634
Wie viel Freiheit?	634
Gasteilchen sind nicht gerade langsam	636
Betrachtung der Gesamtenergie	637
Nicht alle sind gleich schnell: Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung	637
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	639

## Kapitel 33

### Temperaturphänomene und Wärmetransport

641

Hitze in Zahlen: Die Temperatur	641
Die Messung der Temperatur	641
Temperaturskalen	642
Umrechnungen	643
Kälter geht's nicht: Der absolute Nullpunkt	644
Mit der Temperatur nimmt auch die Größe zu: Die Wärmeausdehnung	646
Eindimensional: Die Längenausdehnung	646
Ausdehnung in alle Dimensionen: Die Volumenausdehnung	648
Man kann Wärme auch quantitativ messen	649
Ein quantitative Größe: Die Wärmemenge	650
Wärme kann gespeichert werden: Die Wärmekapazität	650
Ein Stoff in verschiedenen Zuständen: Phasen	651
Zwei Aggregatzustände zugleich: Phasenübergänge	651
Nicht gerade offensichtlich: Die latente Wärme	653
Phasendiagramme	654
Es gibt eine große Anzahl von Phasen	656
Langsam, aber stetig: Der Wärmetransport	657
Es läuft auf einen Temperatúrausgleich hinaus: Die Wärmeleitung	657
Immer im Kreis: Die Konvektion	660
In der Sonne ist es warm: Die Wärmestrahlung	661
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	662

## Kapitel 34

### Das Fundament der Thermodynamik: Die Hauptsätze

663

Null aber wichtig: Der nullte Hauptsatz	663
Wärme ist eine Form von Energie: Der Erste Hauptsatz	664
Wichtige Prozesse mit seltsamen Namen	665
Es geht um Maschinen: Der Zweite Hauptsatz	672
Wärme wird in Kraft umgewandelt: Wärmekraftmaschinen	672
Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als eins	673
Ideal, aber nicht 100 %: Der Carnotprozess	676
Eine nicht ganz einfache Größe: Die Entropie	678
Dritter Hauptsatz	682
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	683

## **Teil VIII**

### **Eine Art von Revolution: Der Übergang von der klassischen zur modernen Physik**

**685**

#### **Kapitel 35**

##### **Die verfluchte Lichtgeschwindigkeit: Die makroskopische Seite der Revolution**

**687**

Sie geben den Rahmen: Bezugssysteme	687
Ruhesysteme	687
Inertialsysteme	689
Beschleunigte Systeme	690
Von einem System zum anderen: Transformationen	691
Galilei-Transformationen	691
Die Lichtgeschwindigkeit ist Schuld an der Relativitätstheorie	692
Nicht einfach zu messen: Die Lichtgeschwindigkeit	692
Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant	694
Die Schlussfolgerungen und die Konsequenzen	695
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	696

#### **Kapitel 36**

##### **Gründe für die Quantenmechanik**

**699**

Schwarzkörperstrahlung	699
Was ist ein schwarzer Körper?	700
Die Farbe hängt von der Temperatur ab: Beobachtungen	701
Klassische Erklärungsversuche	701
Lösung durch Quantisierung: Das Planck'sche Strahlungsgesetz	705
Rayleigh-Jeans – Wien – Planck: Ein Vergleich	707
Der Photoeffekt	708
Die experimentellen Tatsachen	708
Klassische Erklärungsversuche	709
Die Erklärung Einsteins	709
Photon schubst Elektron: Der Compton-Effekt	712
Der Compton-Versuch	712
Die Erklärung	712
Die moderne Physik schlägt zurück	713
Welle oder Teilchen? Beides!	713
Nicht jeder Wert ist erlaubt: Die Quantisierung	714
Die Schlussfolgerungen	714
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	714

## Teil IX

### *Die moderne Physik der makroskopischen Welt*

**717**

#### **Kapitel 37**

##### *Alles ist nur relativ: Die Relativitätstheorie*

**719**

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	719
Ein Gedankenexperiment	720
Der Ausgangspunkt der Relativitätstheorie: Einsteins Postulate	720
Das erste Postulat	721
Das zweite Postulat	721
Das Ende der Galilei-Transformationen und die Geburt der Lorentz-Transformation	721
Alles ist relativ	724
Zeit ist nicht länger absolut: Die Zeitdilatation	724
Addition von Geschwindigkeiten	728
Längenkontraktion	729
Massenzunahme	730
Nun endlich: $E = mc^2$	731
Vom Speziellen zum Allgemeinen	733
Das Äquivalenzprinzip	734
Relativität ist ein Prinzip	735
Die Raumzeit wird gekrümmt	736
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	738

#### **Kapitel 38**

##### *Unvorstellbar groß: Das Weltall*

**739**

Ein Nachbarschaftsbesuch: Das Planetensystem	739
Wenn Jupiter auf Mars zugeht: Die Planeten	740
Was sonst noch so rumschwirrt	742
The Moon of Alabama oder der Mond von Wanne-Eickel?	744
Die Welt war eine Scheibe: Die Entstehung des Sonnensystems	745
Sie ist der Chef: Die Sonne	746
Groß und Hell: Aufbau und Eigenschaften der Sonne	746
Aus Wasserstoff wird Helium: Die Wirkungsweise der Sonne	747
Nur einer von vielen: Die Sterne	748
Größen zur Beschreibung von Sternen	748
Das Hertzsprung-Russel-Diagramm	753
Die Evolution von Sternen	754
Unvorstellbar groß: Das Universum	757
Die Milchstraße ist nur eine von vielen Galaxien	757
Das Universum und der ganze Rest	760
The Big Bang Theory: Der Urknall	761
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	765



## Teil X

### Die moderne Physik der mikroskopischen Welt

767

#### Kapitel 39

##### Die Welt wird klarer, aber auch unbestimmter: Die Quantenmechanik

769

Die Quantenmechanik löst offene Fragen, wirft aber auch neue auf	769
Sie regelt Alles: Die Schrödingergleichung	770
Beschreibung durch Wellenfunktionen	771
Eigentlich nur Rechenvorschriften: Operatoren	772
Konkrete Zahlen: Die Eigenwerte	773
Ein Topf mit besonderem Inhalt: Die Vorgehensweise der Quantenmechanik	773
Darstellungsweisen in der Quantenmechanik	778
Die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Quantenmechanik	779
Ein Phänomen, zwei Beschreibungen: Der Welle-Teilchen-Dualismus	779
Quantisierung	781
Bestimmt unbestimmt	782
Sie kommen im Paket: Quantenobjekte	784
Voll durch die Wand: Der Tunneleffekt	785
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	789

#### Kapitel 40

##### Sie bilden die Elemente: Atome

791

118 Elemente aus nur drei Bausteinen	791
Atome sind weitgehend leer: Das Rutherford-Experiment	793
Atommodelle	794
Erste Erklärungsversuche: Frühe Modelle	794
Das Linienspektrum des Wasserstoffatoms	795
Nicht ganz richtig und dennoch von großer Bedeutung: Das Bohr'sche Atommodell	796
Einfacher geht's nicht: Das Wasserstoffatom	799
Nicht nur eine, sondern gleich vier Quantenzahlen	799
Aufteilung der Wellenfunktion	800
Keine Kreisbahnen, sondern Wahrscheinlichkeitswolken: Orbitale	805
Vielgestaltige Orbitale: Atome mit vielen Elektronen	808
Ein jedes an seinem Platz: Das Pauliprinzip	809
Die Hund'schen Regeln	810
Sieht kompliziert aus, ist aber eigentlich ganz einfach:	
Das Periodensystem	811
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	815

## **Kapitel 41**

### **Perfektion durch Zusammenschluss: Chemische Bindungen und die Bildung von Molekülen**

**817**

Verschiedene Methoden, sich zu verbinden: Die chemische Bindung	817
Primäre Bindungen	818
Vereint lebt es sich besser: Moleküle	819
Arten von Molekülen	819
Nur die Edelgase sind zufrieden: Gründe für die Bildung von Molekülen	819
Wem gehört das Elektron? Die Elektronegativität	821
Aufenthaltswahrscheinlichkeiten: Molekülorbitale	823
Ein Spezialfall: Das Kohlenstoffatom	824
Sekundäre Bindungen	831
Makromoleküle	833
Molekülspektren	837
Molekülschwingungen	837
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	839

## **Kapitel 42**

### **Riesige Verbände von verbundenen Bausteinen: Festkörperphysik**

**841**

Eine regelmäßige Anordnung: Das Kristallgitter	841
Kristalline und amorphe Festkörper	841
Basis + Gitter: Definition einer Kristallstruktur	842
Es kann nur 14 geben: Die Bravaisgitter	845
In einen anderen Raum wechseln: Das reziproke Gitter	845
Drei Zahlen zur Beschreibung von Richtungen und Flächen:	
Die Miller'schen Indizes	848
Röntgenbeugung	848
Die chemische Bindung ist ausschlaggebend: Arten von Festkörpern	850
Ein Gas aus Elektronen: Metallische Festkörper	851
Ionische Festkörper	851
Kovalente Festkörper	852
Betreten verboten: Das Bändermodell	854
Das Gitter ist entscheidend: Festkörpereigenschaften	859
Auch Gitter können schwingen	859
Ein Gas aus Elektronen: Elektrische Leitfähigkeit von Metallen	862
Wärmeleitung	863
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	866

## **Kapitel 43**

### **Der Aufbau von Atomkernen**

**869**

Äußerst kompakt: Der Aufbau von Atomkernen	869
Nur Protonen und Neutronen: Die Bausteine von Atomkernen	869
Chemisch gleich, physikalisch verschieden: Isotope	871

Die starke Wechselwirkung	871
Kerne halten zusammen: Die Bindungsenergie	873
Atomkerne können einfach zerfallen: Die natürliche Radioaktivität	875
Irgendwie stimmt es nicht: Der Radioaktive Zerfall	875
Nur noch die Hälfte	877
Radioaktive Strahlung	881
Gray und Sievert: Die Strahlungsdosis	882
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	884

## **Kapitel 44**

### ***Es geht um gewaltige Energien: Kernspaltung und Kernfusion*** **885**

Die Mitte ist begünstigt: Die Weizsäcker'sche Massenformel	885
Von oben nach unten: Kernspaltung	888
Die physikalischen Grundlagen	888
Kernwaffen	890
Kernenergie	892
Von unten nach oben: Kernfusion	897
Das Prinzip	897
Die Sonne im Herzen: Fusionsreaktoren	898
Die Wasserstoffbombe	900
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	901

## **Kapitel 45**

### ***Klein, aber oho!: Elementarteilchen*** **903**

Erzeugung und Beobachtung von Elementarteilchen	904
Elementarteilchenphysik ist Hochenergiephysik	904
Zoo der Elementarteilchen	904
Antimaterie	906
Paarvernichtung	907
Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	909
Klassen von Teilchen	909
Von schwach bis stark: Die vier Wechselwirkungen	909
Ein Zoo mit ziemlich vielen Teilchen	911
Starker Auftritt: Hadronen	911
Nicht immer leichte Teilchen: Leptonen	914
Rot, grün und blau: Die »Farben« und weitere Eigenschaften der Quarks	915
Drei Generationen von Fundamentarteilchen	916
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	918

## **Kapitel 46**

### **Zehn berühmte Physiker**

**919**

»Und sie bewegt sich doch!«: Galileo Galilei	919
Die Geschichte vom fallenden Apfel: Isaac Newton	920
Licht ist eine Welle: Christiaan Huygens	921
Der Elektromagnetismus in vier Gleichungen: James Clerk Maxwell	922
Thermodynamik pur: Ludwig Boltzmann	922
Er führte die Quanten ein: Max Planck	924
Die herausgestreckte Zunge: Albert Einstein	925
Der Kopenhagener Kreis: Niels Bohr	926
Der Teil und das Ganze: Werner Heisenberg	926
Ein genialer Forscher und Lehrer: Richard Feynman	927

## **Kapitel 47**

### **Zehn wichtige Entdeckungen vor 1900**

**929**

Im freien Fall: Galileis Fallrinne	929
Selbst 30 Pferde reichten nicht: Die Magdeburger Halbkugeln	930
Die Zustandsgleichung idealer Gase	931
Von Bernstein und Froschschenkeln: Die Ursprünge der Elektrizitätslehre	932
Der Oersted-Versuch	933
Faradays Untersuchungen zur Induktion	934
Die Entdeckung der großen Jupitermonde durch Galilei	935
Das Doppelspaltexperiment von Young	936
Es gibt keinen Äther: Der Michelson-Morley-Versuch	936
Strahlende Aussichten: Die Entdeckung der Radioaktivität	937

## **Kapitel 48**

### **Zehn wichtige Entdeckungen nach 1900**

**939**

Aufspaltung im Magnetfeld: Der Zeeman-Effekt	939
Der Franck-Hertz-Versuch (1911–1914)	940
Das Bohr'sche Atommodell (1913)	942
Die Entwicklung der Quantenmechanik Mitte der 20er Jahre	942
Der Nachweis der Elektronenbeugung (1927)	943
Die Entdeckung von Neutron und Positron (1932)	944
Das Neutrino: 1933 postuliert, 1956 gefunden	945
Die Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Straßmann (1938)	947
Die Erfindung des Transistors (1947)	947
Die Entwicklung des Raster-Tunnelmikroskops (1981)	948

## Anhang A

### **Physikalische Konstanten und Größen**

**951**

Unveränderbar: Physikalische Konstanten	951
Wichtige physikalische Größen und ihre Einheiten	951
Die Grundgrößen	953
Wichtige mechanische Einheiten	953
Radiant oder nicht?	955
Wichtige optische Einheiten	956
Wichtige elektromagnetische Einheiten	956
Wichtige thermodynamische Einheiten	958
Wichtige Strahlungseinheiten	959
Ohne Sie geht es nicht: Wichtige Tabellen	960

## Anhang B

### **Ein klein wenig Mathematik: Mathematische Formelsammlung**

**967**

Es kommt auf die Richtung an: Die Vektorrechnung	967
Vektoren besitzen einen Betrag und eine Richtung	967
Darstellung durch Pfeile oder Zahlen	968
Addition und Subtraktion von Vektoren	969
Multiplikation	970
Geometrie	974
Auf den Winkel kommt es an: Trigonometrie	976
Mein Hut, der hat drei Ecken: Dreiecke	976
Sinus und Co: Definitionen	978
Jenseits der 90°	979
Wichtige trigonometrische Formeln	980
Differentialrechnung	981
Ableitungen: Motivation und Definitionen	982
Die wichtigsten Ableitungen	983
Die wichtigsten Regeln beim Ableiten	983
Nabla und Delta: Zwei spezielle Ableitungen	984
Eigentlich gar nicht so kompliziert: Die Integralrechnung	985
Warum Integralrechnung?	985
Die Integration ergibt eine Funktion: Unbestimmte Integrale	986
Die Integration liefert eine Zahl: Bestimmte Integrale	987
Rechenregeln	988
Linien- und Flächenintegrale	988
Noch einige wichtige Formeln zum Schluss	989

<b>Lösungen der Aufgaben</b>	<b>991</b>
<b>Abbildungsnachweis</b>	<b>1087</b>
<b>Personenverzeichnis</b>	<b>1089</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>1091</b>