Heribert Stroppe

PHYSIK

für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften

16., aktualisierte Auflage

HANSER

Physikalische Konstanten (2014 CODATA recommended values)

Atomare Masseneinheit	u	$= 1{,}660\,539\,040(20) \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Atomare Masseneinheit (Energieäquivalent)	$\mathrm{u}\,c_0^2$	$= 931{,}494\,0954(57)\,\mathrm{MeV}$
AVOGADRO-Konstante	N_A	$= 6{,}022\,140\,857(74) \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$
BOHRscher Radius	a_H	$= 0{,}529\,177\,210\,67(12) \cdot 10^{-10}\,\mathrm{m}$
BOHRsches Magneton	μ_B	$= 9{,}274\,009\,994(57) \cdot 10^{-24}\,\mathrm{J \cdot T^{-1}}$
BOLTZMANN-Konstante	k	$= 1{,}380\,648\,52(79) \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$
COMPTON-Wellenlänge des Elektrons	λ_C	$= 2{,}426\,310\,2367(11) \cdot 10^{-12}\,\mathrm{m}$
Elektrische Elementarladung	e	$= 1{,}602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$= 8{,}854\,187\,8176\cdots \cdot 10^{-12}\,\mathrm{F \cdot m^{-1}}$ *)
Elektronenradius	r_e	$= 2{,}817\,940\,3227(19) \cdot 10^{-15}\,\mathrm{m}$
Fallbeschleunigung (Normwert)	g_n	$= 9{,}806\,65\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$ *)
FARADAY-Konstante	F	$= 96\,485{,}332\,89(59)\,\mathrm{C \cdot mol^{-1}}$
Feinstrukturkonstante	α	$= 7{,}297\,352\,5664(17) \cdot 10^{-3}$
Gaskonstante (molare)	R_m	$= 8{,}314\,4598(48)\,\mathrm{J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}}$
Gravitationskonstante	γ	$= 6{,}674\,08(31) \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}$
JOSEPHSON-Konstante	K_J	$= 4{,}835\,978\,525(30) \cdot 10^{14}\,\mathrm{Hz \cdot V^{-1}}$
Kernmagneton	μ_N	$= 5{,}050\,783\,699(31) \cdot 10^{-27}\,\mathrm{J \cdot T^{-1}}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c_0	$= 299\,792\,458\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ *)
LOSCHMIDT-Konstante	N_L	$= 2{,}686\,7811(15) \cdot 10^{25}\,\mathrm{m^{-3}}$
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$= 12{,}566\,370\,614\cdots \cdot 10^{-7}\,\mathrm{H \cdot m^{-1}}$ *)
Magnetisches Flussquantum	Φ_0	$= 2{,}067\,833\,831(13) \cdot 10^{-15}\,\mathrm{Wb}$
Molares Normvolumen des idealen Gases	V_m0	$= 0{,}022\,413\,962(13)\,\mathrm{m^3 \cdot mol^{-1}}$
Normalluftdruck	p_0	$= 101\,325\,\mathrm{Pa}$ *)
PLANCKsches Drehimpulsquantum	$\hbar$	$= 1{,}054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$
PLANCKsches Wirkungsquantum	h	$= 6{,}626\,070\,040(81) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$
Quanten-HALL-Widerstand	R_H0	$= 25\,812{,}807\,4555(59)\,\Omega$
Ruhmasse des Elektrons	m_e	$= 9{,}109\,383\,56(11) \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}$
Ruhmasse des Neutrons	m_n	$= 1{,}674\,927\,471(21) \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Ruhmasse des Protons	m_p	$= 1{,}672\,621\,898(21) \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
RYDBERG-Frequenz	$R_\mathrm{H}\,c_0$	$= 3{,}289\,841\,960\,355(19) \cdot 10^{15}\,\mathrm{Hz}$
RYDBERG-Konstante	R_H	$= 10\,973\,731{,}568\,508(65)\,\mathrm{m^{-1}}$
Spezifische Ladung des Elektrons	e/m_e	$= -1{,}758\,820\,024(11) \cdot 10^{11}\,\mathrm{C \cdot kg^{-1}}$
Spezifische Ladung des Protons	e/m_p	$= 9{,}578\,833\,226(59) \cdot 10^{7}\,\mathrm{C \cdot kg^{-1}}$
STEFAN-BOLTZMANN-Konstante	σ	$= 5{,}670\,367(13) \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$
Wellenwiderstand des Vakuums	Z_0	$= 376{,}730\,313\,461\ldots\,\Omega$ *)
WIEN-Konstante	b	$= 2{,}897\,7729(17) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m \cdot K}$

Hinweis: Die letzten beiden Ziffern in runden Klammern geben jeweils die Standardabweichung der betreffenden Größe an; sie bezieht sich auf die letzten beiden, vor der Klammer stehenden Dezimalen. Z. B. ist die Elementarladung zu lesen als $e = (1{,}602\,176\,6208 \pm 0{,}000\,000\,0098) \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$.

*) Exakte Konstante.

Heribert Stroppe

PHYSIK

für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften

Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen
mit 371 Bildern, 25 Tabellen, 245 durchgerechneten Beispielen
und 145 Aufgaben mit Lösungen

16., aktualisierte Auflage

Unter Mitarbeit von
Heinz Langer, Peter Streitenberger und Eckard Specht

Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Prof. Dr. sc. nat. Dr.-Ing. Heribert Stroppe
Ordinarius für Technische Physik i. R.,
Wissenschaftlicher Leiter des Institute of High Technologies
and Education e.V. Magdeburg

unter Mitarbeit von

Dr. rer. nat. Heinz Langer
Dr. rer. nat. habil. Peter Streitenberger
Dr. rer. nat. Eckard Specht
Institut für Physik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

MIX
Papier aus verantwortungsvollen Quellen
FSC® C016439

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.

ISBN 978-3-446-45533-7
E-Book-ISBN 978-3-446-45580-1

Einbandbild: Otto von Guerickes Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln
aus Caspar Schott, Technica curiosa, Nürnberg 1664
(Archiv der Otto-von-Guericke-Gesellschaft Magdeburg e. V.)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
© 2018 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Manuel Leppert, M. A.
Herstellung: Katrin Wulst
Satz: Eckard Specht, Magdeburg
Bildbearbeitung: Michael Specht, Katja Neumann, Magdeburg
Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner Göttingen
Printed in Germany

Für

Alma

Vorwort

Seit seinem Erscheinen im Jahre 1974 hat das Lehrbuch zunehmende Verbreitung gefunden, nicht nur unter Studierenden der Ingenieurwissenschaften, für die es ursprünglich gedacht war, sondern auch bei Studienanfängern der Physik und anderer Naturwissenschaften. Das von Anfang an verfolgte und über Jahre hinweg beibehaltene Konzept, das ganze umfangreiche Gebiet in einem einzigen Band wiederzugeben, hat sich somit stets aufs Neue bewährt.

Die Menge an neuen physikalischen Erkenntnissen wächst von Tag zu Tag in stürmischer Weise an. Dies zwingt zu einer Form des Lehrbuchs, wie sie einer Anfängervorlesung wohl am besten gerecht wird: Die Abschnitte über die „klassische“ Physik bringen die Herleitungen bis ins Einzelne; an ihnen sollen sich die Leser die erforderliche Gewandtheit im Rechnen sowie in der mathematischen Formulierung physikalischer Zusammenhänge aneignen. Später, hauptsächlich im Kapitel „Quanten“ sowie bei neueren Anwendungen der Physik, muss mehr und mehr dazu übergegangen werden, das physikalische Phänomen zu beschreiben und zu erklären.

Neben der reinen Wissensvermittlung soll das Buch aber noch einem anderen Zweck dienen: Es soll bei den jungen Studierenden, auch wenn sie die Physik nur als Grundlagenfach belegen (müssen), zugleich ein wenig die Liebe zum Gegenstand wecken. Deshalb sind trotz der gebotenen Kürze manche Probleme der Physik angesprochen, die nicht unmittelbar zum Stoff einer Grundlagenvorlesung gehören, aber üblicherweise allgemeines Interesse finden.

Die Durcharbeitung des in betont knapper Form gehaltenen Stoffes erfordert die intensive Mitarbeit der Leser. Wer also das Buch wirklich zum Lernen und nicht nur zum Nachschlagen benutzen will, wird viel „mitrechnen“ müssen. Dies bezieht sich nicht nur auf die zu den einzelnen Abschnitten aufgenommenen Übungsbeispiele und Aufgaben; diese möglichst ohne Zuhilfenahme der Lösungen zu meistern, sei jedem Studierenden dringend angeraten. Zahlreiche zusätzliche Beispiele und Aufgaben unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades mit meist praxisorientiertem Inhalt zu allen behandelten Stoffgebieten enthält unser einbändiges Übungsbuch „PHYSIK – Beispiele und Aufgaben“.

Das Verständnis ist ein allgemeines Problem beim Erlernen der Physik. Das Lesen mag einfach erscheinen, aber das tiefere Verstehen der Zusammenhänge erfordert mehr als nur Lesen und Auswendiglernen, es erfordert Nachdenken; es gibt bei ernsthaftem Studium keine Möglichkeit, Letzteres zu umgehen. Die Studierenden sollen aber wissen, dass die Schwierigkeiten, mit denen erfahrungsgemäß jeder anfänglich zu kämpfen hat, in der Natur der Sache liegen, und dass sie sich um das Verständnis der Dinge ebenso bemühen müssen, wie es vor ihnen auch alle großen Geister einmal getan haben. Der Lohn der Mühe wird sich dann bald im Erfolgserlebnis und „Leistungsglück“ einstellen und Ansporn fur ein weiteres erfolgreiches Studium sein.

Trotz vieler Hinweise wurde mit der Erweiterung der Stoffinhalte bewusst zurückhaltend umgegangen. So wurden hinsichtlich der noch bevorstehenden Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) bereits abzusehende Änderungen an vielen Stellen eingearbeitet, ein Abschnitt über den kristallinen Aufbau der Stoffe sowie über die allgemeine Relativitätstheorie hinzugefügt. Desweiteren wurden zahlreiche inhaltliche Ergänzungen vorgenommen sowie neue Beispiele und Aufgaben aufgenommen. Vor allem Merksätze, die Studierenden bei der Prüfungsvorbereitung helfen, sind nun deutlicher hervorgehoben als zuvor.

Es war dem Hauptautor des Buches, Prof. Dr. HERIBERT STROPPE, leider nicht vergönnt, das Erscheinen der 16. Auflage zu erleben. Er prägte noch wesentlich die inhaltliche Erweiterung des Lehrbuches und nahm Einfluss auf gestalterische Aspekte der Neuauflage. Wir, die Mitautoren Dr. habil. P. STREITENBERGER und Dr. E. SPECHT, haben nach bestem Wissen die Überarbeitung des Lehrbuches im Sinne des Hauptautors fortgeführt.

Wir danken den Herren Prof. Dr. W. HERMS (Magdeburg) und Prof. Dr. J. HÖHN (Wien) für wertvolle Hinweise. Weiterhin sind wir Frau U. KRUSE für das Zeichnen und Herrn M. SPECHT für die digitale Bearbeitung der Bilder zu Dank verpflichtet.

Dem Verlag sei für die seit Erscheinen des Buches stets gute Zusammenarbeit gedankt.

Magdeburg, im Juli 2018 Die Autoren

Hinweise

Gleichungen, Bilder, Tabellen, Beispiele und Aufgaben werden *innerhalb eines Hauptabschnittes* (Einer-Nummerierung) fortlaufend gezählt (z. B. Bild 3.10 = 10. Bild im Abschnitt 3, oder (14.5) = Gleichung (5) in Abschnitt 14 oder Beispiel 31.1/*2* = zweites der Beispiele 31.1 usw.). Die *Lösungen* zu den Aufgaben befinden sich unter der entsprechenden Aufgaben-Nummer auf den Seiten 629 bis 634.

Vektoren sind im Text durch fettgedruckte Buchstaben, in den Bildern zur besseren Unterscheidung durch normale Buchstaben mit einem Pfeil darüber gekennzeichnet.

Aus didaktischen und historischen Gründen verwenden wir in der Benennung und/oder in den Formelzeichen physikalischer Größen in einigen Fällen sowohl die Größenbenennung nach DIN als auch die im physikalischen Schrifttum (noch) häufiger vorkommende Benennung, z. B. „Dielektrizitätskonstante“ und nach DIN „Permittivität“, „Verschiebungsdichte“ und „elektrischer Fluss“, „Flächenladungsdichte“ und „Ladungsbedeckung“, oder Stromdichte $\boldsymbol{j}$ statt nach DIN $\boldsymbol{J}$, magnetische Spannung U_m statt V_m u. a. Im Übrigen unterliegen sowohl die Größenbenennungen als auch die Formelzeichen erfahrungsgemäß häufigen Veränderungen, und die Empfehlungen sind in verschiedenen Fachgebieten nicht einheitlich.

Inhaltsverzeichnis

I Einführung

1 Was ist „Physik“? Wege physikalischer Erkenntnisgewinnung 20

2 Physikalische Größen, Einheiten, Dimensionen, Gleichungen 22

2.1 Größen, Einheiten, Dimensionen ... 22
2.2 Physikalische Gleichungen ... 24
2.3 Das neue SI-Einheitensystem ... 25

II Teilchen

Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers. Stoffe

3 Kinematik der Punktmasse ... 28

3.1 Raum, Zeit, Bezugssystem ... 28
3.2 Die gleichförmige Bewegung ... 30
3.3 Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung ... 31
3.4 Freier Fall. Senkrechter Wurf ... 34
3.5 Allgemeine Definition von Geschwindigkeit und Beschleunigung. Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung ... 36
3.6 Geschwindigkeit und Beschleunigung als Vektoren. Zusammengesetzte Bewegungen (Superposition) ... 39
3.7 Die gleichförmige Kreisbewegung ... 41
3.8 Die ungleichförmige Kreisbewegung ... 45
3.9 Bewegung auf beliebig krummliniger Bahn ... 47

4 Dynamik der Punktmasse ... 49

4.1 Der Kraftbegriff in der Physik. Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften. Statisches Gleichgewicht ... 49
4.2 Das Trägheitsgesetz (1. NEWTONsches Axiom) ... 51
4.3 Das Grundgesetz der Dynamik (2. NEWTONsches Axiom) ... 52
4.4 Träge und schwere Masse. Gewichtskraft. Radialkraft ... 53
4.5 Kraftstoß. Impuls (Bewegungsgröße) ... 55
4.6 Lösung der Bewegungsgleichung für konstante Kraft. Die Wurfbewegung ... 58

4.7 Das Wechselwirkungsgesetz (3. NEWTONsches Axiom) ... 61
4.8 Reibungskräfte ... 62

5 Bewegte Bezugssysteme ... 66
5.1 Geradlinig beschleunigte Bezugssysteme. Trägheitskräfte ... 66
5.2 Gleichförmig rotierende Bezugssysteme. Zentrifugalkraft, CORIOLIS-Kraft ... 69
5.3 Inertialsysteme. Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik ... 72

6 Grundzüge der speziellen Relativitätstheorie ... 74
6.1 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Die LORENTZ-Transformation ... 74
6.2 Folgerungen aus der LORENTZ-Transformation ... 78
6.3 Relativistische Bewegungsgleichung ... 79

7 Arbeit und Energie ... 81
7.1 Arbeit ... 81
7.2 Leistung. Wirkung ... 85
7.3 Der Energiebegriff. Potenzielle und kinetische Energie ... 86
7.4 Das Gesetz von der Erhaltung der Energie (Energiesatz) ... 87
7.5 Äquivalenz von Masse und Energie ... 89

8 Gravitation ... 91
8.1 Die KEPLERschen Gesetze der Planetenbewegung und das Gravitationsgesetz ... 91
8.2 Arbeit gegen die Schwerkraft. Kosmische Geschwindigkeiten ... 94

9 Dynamik der Punktmassen-Systeme ... 96
9.1 Impulserhaltungssatz. Massenmittelpunkt ... 96
9.2 Die Gesetze des Stoßes ... 98
9.3 Raketenantrieb ... 103

10 Statik des starren Körpers ... 105
10.1 Freiheitsgrade des starren Körpers ... 105
10.2 Kräfte am starren Körper. Drehmoment. Gleichgewichtsbedingungen ... 105
10.3 Kräftepaar ... 110
10.4 Der Schwerpunkt ... 110
10.5 Arten des Gleichgewichts ... 113

11 Dynamik des starren Körpers ... 114
11.1 Bewegung eines frei beweglichen Körpers bei Einwirkung einer Kraft ... 114
11.2 Kinetische Energie der Drehbewegung. Massenträgheitsmoment ... 114
11.3 Arbeit und Leistung bei der Drehbewegung. Grundgesetz der Dynamik ... 117
11.4 Der Drehimpuls (Drall). Drehimpulserhaltungssatz ... 119
11.5 Kreiselbewegungen. Freie Achsen ... 121
11.6 Bewegung des symmetrischen Kreisels ... 123

12 Die Zustandsformen der Stoffe ... 126
12.1 Einteilung der Stoffe. Aggregatzustände ... 126
12.2 Der kristalline Aufbau der Festkörper ... 127
12.3 Bindungsarten ... 130

III Kontinua
Mechanik der deformierbaren Medien

13 Der deformierbare feste Körper ... 132
13.1 Elastische Verformung. HOOKEsches Gesetz ... 132
13.2 Querkontraktion. Kompressibilität ... 134
13.3 Elastisches Verhalten bei Scherbeanspruchung ... 135
13.4 Der einachsige Spannungszustand ... 136
13.5 Dreiachsiger Spannungs- und Dehnungszustand ... 137
13.6 Zusammenhang zwischen Schubmodul, Elastizitätsmodul und POISSONscher Querkontraktionszahl ... 138
13.7 Plastische Verformung. Spannungs-Dehnungs-Diagramm ... 139
13.8 Härte fester Körper ... 141

14 Ruhende Flüssigkeiten und Gase ... 142
14.1 Druck in Flüssigkeiten (hydrostatischer Druck) ... 142
14.2 Schweredruck. Auftrieb. Schwimmstabilität ... 143
14.3 Druck in Gasen. Zusammenhang zwischen Druck, Volumen und Dichte ... 147
14.4 Schweredruck in Gasen. Barometrische Höhenformel ... 148
14.5 Erscheinungen an Grenzflächen. Kohäsion und Adhäsion ... 150
14.6 Spezifische Oberflächenenergie, Oberflächenspannung ... 150
14.7 Benetzung und Kapillarwirkung ... 152

15 Strömende Flüssigkeiten und Gase (Strömungsmechanik) ... 154
15.1 Das Strömungsfeld. Kennzeichnung und Einteilung von Strömungen ... 154
15.2 Strömungen idealer Flüssigkeiten und Gase. Kontinuitätsgleichung ... 156
15.3 Die BERNOULLIsche Gleichung. Druckmessung ... 158
15.4 Strömungen realer Flüssigkeiten und Gase. Laminare Strömung ... 162
15.5 Gesetze von HAGEN-POISEUILLE und STOKES ... 163
15.6 Umströmung durch reale Flüssigkeiten und Gase. REYNOLDS-Zahl ... 165
15.7 Die Bewegungsgleichung eines Fluids ... 167

IV Wärme
Thermodynamik und Gaskinetik

16 Verhalten der Körper bei Temperaturänderung ... 172
16.1 Die Temperatur und ihre Messung ... 172
16.2 Thermische Ausdehnung fester und flüssiger Körper ... 174

16.3 Durch Änderung der Temperatur bewirkte Zustandsänderungen der Gase. Der absolute Nullpunkt ... 176
16.4 Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases ... 179

17 Der I. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz) ... 182

17.1 Wärmemenge und Wärmekapazität ... 182
17.2 Innere Energie eines Systems. Formulierung des I. Hauptsatzes ... 184
17.3 Spezifische Wärmekapazität des idealen Gases. Kalorische Zustandsgleichung ... 186
17.4 Anwendung des I. Hauptsatzes auf spezielle Zustandsänderungen des idealen Gases ... 188
17.5 Zustandsänderungen des idealen Gases in offenen Systemen. Technische Arbeit. Enthalpie ... 193

18 Kinetische Gastheorie ... 195

18.1 Die Masse der Atome und Moleküle ... 195
18.2 Druck und mittlere quadratische Geschwindigkeit der Gasmoleküle. Grundgleichung der kinetischen Gastheorie ... 196
18.3 Die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle ... 199
18.4 Molekularenergie und Temperatur. Wärmekapazität der Körper ... 202
18.5 Stoßzahl und mittlere freie Weglänge ... 205
18.6 Gemische idealer Gase. Gesetz von DALTON ... 206

19 Der II. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz) ... 208

19.1 Der CARNOT-Kreisprozess. Wärmekraftmaschine, Kältemaschine und Wärmepumpe ... 208
19.2 Thermodynamische Temperatur ... 212
19.3 Reversible und irreversible Vorgänge. II. Hauptsatz ... 213
19.4 Entropie ... 215
19.5 Entropieänderung des idealen Gases. Irreversible Prozesse ... 220
19.6 Entropie und Wahrscheinlichkeit ... 222
19.7 III. Hauptsatz (Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts) ... 225

20 Reale Gase. Phasenumwandlungen ... 226

20.1 Die VAN-DER-WAALSsche Zustandsgleichung. Gasverflüssigung ... 226
20.2 JOULE-THOMSON-Effekt. Erzeugung tiefer Temperaturen ... 229
20.3 Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. Sieden und Verdunsten ... 231
20.4 Gleichgewicht zwischen fester und flüssiger Phase. Koexistenz dreier Phasen ... 236
20.5 Lösungen. Siedepunktserhöhung, Gefrierpunktserniedrigung ... 239

21 Ausgleichsvorgänge ... 241

21.1 Wärmeleitung ... 241
21.2 Wärmeübergang, Wärmedurchgang, Konvektion ... 244
21.3 Diffusion ... 246

V Felder

Gravitation. Elektrizität und Magnetismus

22 Das Gravitationsfeld ... 250

22.1 Nahwirkungstheorie. Der Feldbegriff ... 250
22.2 Gravitationsfeldstärke, Gravitationspotenzial ... 252
22.3 Massen als Senken des Gravitationsfeldes ... 255
22.4 Grundaussagen der allgemeinen Relativitätstheorie ... 257

23 Das elektrostatische Feld ... 259

23.1 Die elektrische Ladung. Ladungsnachweis ... 259
23.2 Ladungen als Quellen bzw. Senken des elektrischen Feldes ... 261
23.3 Kraftwirkungen des elektrischen Feldes. Elektrische Feldstärke ... 262
23.4 Elektrostatisches Potenzial. Spannung ... 265
23.5 Elektrische Ladungen auf Leitern. Influenz ... 267
23.6 Elektrischer Fluss, Flussdichte ... 268
23.7 Das elektrische Zentralfeld (Punktladung und Punktladungssystem) ... 270
23.8 Kapazität. Kondensatoren ... 272

24 Das elektrische Feld in Isolatoren (Dielektrika) ... 275

24.1 Elektrische Polarisation der Dielektrika. Piezoelektrizität ... 275
24.2 Permittivität (Dielektrizitätskonstante), elektrische Suszeptibilität ... 276
24.3 Verhalten von D und E an der Grenzfläche zweier Medien ... 278
24.4 Energieinhalt des elektrischen Feldes ... 280

25 Der Gleichstromkreis ... 282

25.1 Das stationäre elektrische Feld in einem Leiter ... 282
25.2 Stromstärke, Spannung, Widerstand. OHMsches Gesetz ... 282
25.3 Schaltungen und Messmethoden ... 285
25.4 Arbeit und Leistung elektrischer Gleichströme ... 291

26 Elektrische Leitungsvorgänge in Festkörpern und Flüssigkeiten ... 292

26.1 Klassische Theorie der freien Elektronen in Metallen ... 292
26.2 Thermoelektrische Effekte ... 294
26.3 Elektrokinetische Effekte ... 296
26.4 Elektrolytische Stromleitung. FARADAYsche Gesetze ... 296
26.5 Elektrochemische Spannungsquellen ... 298

27 Elektrische Leitungsvorgänge im Vakuum und in Gasen ... 300

27.1 Bewegung freier Ladungsträger im elektrischen Feld ... 300
27.2 Ladungsträgerinjektion, Katodenstrahlen ... 302
27.3 Gasentladungen ... 303
27.4 Plasmaströme ... 306

28 Das magnetostatische Feld der Dipole und Gleichströme 307
28.1 Analogien und Unterschiede zum elektrostatischen Feld 307
28.2 Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf magnetische Dipole. Magnetische Feldstärke 308
28.3 Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters. Durchflutungsgesetz 309
28.4 Einfache Feldberechnungen 311
28.5 Magnetische Flussdichte (Induktion) 313
28.6 Kraftwirkungen des magnetischen Feldes auf Stromleiter 314
28.7 Bewegung freier Ladungsträger im magnetischen Feld. LORENTZ-Kraft 316
28.8 Galvano- und thermomagnetische Effekte. HALL-Effekt. Quanten-HALL-Effekt 318

29 Das magnetische Feld in Stoffen 320
29.1 Magnetische Polarisation der Stoffe 320
29.2 Magnetisierung der Ferromagnetika. Hysterese 321
29.3 Der magnetische Kreis. Entmagnetisierung 323

30 Elektromagnetische Induktion 326
30.1 Das FARADAYsche Induktionsgesetz 326
30.2 Selbstinduktion 328
30.3 Energieinhalt des magnetischen Feldes 330
30.4 Elektromagnetische Induktion in einem bewegten Leiter 331

31 Der Wechselstromkreis 333
31.1 Wechselspannung, Wechselstrom, Dreiphasenstrom 333
31.2 Arbeit und Leistung elektrischer Wechselströme 335
31.3 Wechselstromwiderstände. OHMsches Gesetz für Wechselstrom 337
31.4 Der Transformator 343
31.5 Anharmonische Wechselströme in der Elektronik 344
31.6 Gleichrichter und Verstärker. Elektronische Bauelemente 345

32 Die MAXWELLschen Gleichungen 349
32.1 Wirbel des magnetischen Feldes. Verschiebungsstrom 349
32.2 Wirbel des elektrischen Feldes. Wirbelströme 350
32.3 Elektromagnetisches Feld. System der MAXWELLschen Gleichungen 352
32.4 Relativistische Elektrodynamik 353

VI Wellen
Mechanische und elektromagnetische Schwingungen und Wellen

33 Mechanische Schwingungen 356
33.1 Lineare Federschwingungen 356
33.2 Energiebilanz des harmonischen Oszillators 359
33.3 Drehschwingungen 360
33.4 Pendelschwingungen 362

33.5 Freie gedämpfte Schwingungen ... 364
33.6 Erzwungene Schwingungen ... 367

34 Elektrische Schwingungen ... 371
34.1 Der geschlossene Schwingkreis ... 371
34.2 Strom- und Spannungsresonanz ... 373
34.3 Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen ... 376

35 Überlagerung harmonischer Schwingungen ... 378
35.1 Überlagerung zweier Schwingungen längs gleicher Richtung ... 378
35.2 Gekoppelte Schwingungen ... 380
35.3 Überlagerung zweier Schwingungen längs aufeinander senkrechter Richtungen ... 383
35.4 Überlagerung von harmonischen zu anharmonischen Schwingungen ... 386
35.5 Nichtlineare Schwingungen. Deterministisches Chaos ... 388

36 Allgemeine Wellenlehre ... 392
36.1 Zusammenhang von Schwingungen und Wellen ... 392
36.2 Die eindimensionale Wellengleichung und ihre allgemeine Lösung ... 395
36.3 Transversal- und Longitudinalwellen ... 396
36.4 Stehende Wellen. Eigenschwingungen ... 399
36.5 Wellenausbreitung in ausgedehnten Medien ... 402

37 Schallwellen (Akustik) ... 405
37.1 Wellenausbreitung im Schallfeld. Phasengeschwindigkeit ... 405
37.2 Schallfeldgrößen ... 407
37.3 Schallquellen. Ton, Klang, Geräusch ... 409
37.4 Schallempfänger und Gehör. Schallpegel und Lautstärke ... 410
37.5 Stehende Schallwellen ... 412
37.6 DOPPLER-Effekt ... 414
37.7 MACHscher Kegel ... 416

38 Elektromagnetische Wellen ... 417
38.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen entlang von Leitungen ... 417
38.2 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum ... 419
38.3 Erzeugung und Nachweis elektromagnetischer Wellen ... 423
38.4 Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen (H. HERTZ, 1888) ... 425
38.5 Das elektromagnetische Spektrum ... 426

39 Einfluss von Stoffen auf die Wellenausbreitung ... 429
39.1 Absorption und Streuung ... 429
39.2 Phasengeschwindigkeit und Dispersion. Gruppengeschwindigkeit ... 430
39.3 HUYGENSsches Prinzip ... 434
39.4 Reflexion und Brechung (Refraktion). Totalreflexion ... 435
39.5 Optische Dispersion. Prisma, Spektral- und Körperfarben ... 438

40 Strahlenoptik (Geometrische Optik) ... 441
40.1 Lichtstrahlen. FERMATsches Prinzip ... 441
40.2 Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen ... 443
40.3 Abbildung durch Spiegel (ebener und gekrümmte Spiegel) ... 445
40.4 Abbildung durch Linsen (dünne und dicke Linsen, Linsensysteme) ... 450
40.5 Das Auge und der Sehvorgang ... 456
40.6 Optische Geräte zur Sehwinkelvergrößerung (Lupe, Mikroskop, Fernrohr) ... 456
40.7 Abbildungsfehler ... 459

41 Wellenoptik ... 460
41.1 Interferenz. Interferenzbedingungen ... 460
41.2 Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke ... 462
41.3 Beugung (Diffraktion). Das Beugungsphänomen ... 464
41.4 FRAUNHOFERsche Beugung am Spalt und an der Lochblende ... 466
41.5 Auflösungsvermögen optischer Geräte. Holografie ... 469
41.6 FRAUNHOFERsche Beugung am Strichgitter ... 472
41.7 Spektrometer ... 474
41.8 Beugung von RÖNTGENstrahlen am Raumgitter der Kristalle ... 475
41.9 Polarisation. Polarisation des Lichts durch Reflexion und Brechung ... 479
41.10 Polarisation durch Doppelbrechung ... 482
41.11 Interferenz des polarisierten Lichts ... 484
41.12 Drehung der Schwingungsebene des polarisierten Lichts ... 487
41.13 Nichtlineare Optik ... 489

VII Quanten
Struktur und Eigenschaften der Materie

42 Die Gesetze der Strahlung ... 492
42.1 Das Wesen der Temperaturstrahlung (Wärmestrahlung) ... 492
42.2 Strahlungsphysikalische Größen ... 493
42.3 Emission und Absorption von Strahlung. KIRCHHOFFsches Strahlungsgesetz ... 495
42.4 Das PLANCKsche Strahlungsgesetz ... 497
42.5 Folgerungen aus dem PLANCKschen Strahlungsgesetz ... 498
42.6 Lichttechnische Größen (Photometrie) ... 501
42.7 Zusammenhang zwischen strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen ... 504

43 Der Welle-Teilchen-Dualismus der Mikroobjekte ... 505
43.1 Die Teilchennatur des Lichts. Lichtquanten (Photonen) ... 505
43.2 Der lichtelektrische Effekt (Photoeffekt) ... 506
43.3 Der COMPTON-Effekt ... 509
43.4 Rückstoß durch Quantenemission. MÖSSBAUER-Effekt ... 510
43.5 Die Wellennatur der Teilchen ... 512
43.6 Das HEISENBERGsche Unbestimmtheitsprinzip (Unschärferelation) ... 515

44 Atombau und Spektren ... 518
44.1 Die Streuexperimente von LENARD und RUTHERFORD. Das RUTHERFORDsche Atommodell ... 518
44.2 Das Spektrum des Wasserstoffatoms ... 520
44.3 Das BOHRsche Atommodell ... 522
44.4 Die Spektren der Alkaliatome. Bahndrehimpulsquantenzahl ... 526
44.5 Richtungsquantelung des Bahndrehimpulses der Elektronen ... 529
44.6 Das magnetische Bahnmoment der Elektronen. BOHRsches Magneton ... 530
44.7 Elektronenspin und magnetisches Spinmoment. Die Feinstruktur der Atomspektren ... 531
44.8 Mehrelektronensysteme ... 533
44.9 Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld (ZEEMAN-Effekt) ... 534
44.10 Das PAULI-Prinzip und das Periodensystem der Elemente ... 536
44.11 Die RÖNTGENspektren und ihre Deutung ... 540
44.12 Absorption und Streuung von RÖNTGENstrahlen ... 542
44.13 Induzierte Emission. Maser und Laser ... 546

45 Wellenmechanik ... 549
45.1 Die SCHRÖDINGER-Gleichung ... 549
45.2 Elektron im Kastenpotenzial ... 551
45.3 Das wellenmechanische Bild des Atoms ... 553
45.4 Der Tunneleffekt ... 555

46 Elektrische und magnetische Eigenschaften von Festkörpern 557
46.1 Elektrische Leitfähigkeit. Das Modell des Elektronengases ... 557
46.2 Bändermodell des Festkörpers. Metalle, Halbleiter, Isolatoren ... 558
46.3 Elektrische Ströme in Halbleitern. Eigenleitung, Störstellenleitung ... 562
46.4 Der pn-Übergang ... 565
46.5 Halbleiterdiode, Transistor ... 567
46.6 Magnetische Eigenschaften. Dia- und Paramagnetismus ... 569
46.7 Ferromagnetismus, Antiferro- und Ferrimagnetismus ... 571
46.8 Supraleitung. Der JOSEPHSON-Effekt ... 574
46.9 Supraflüssigkeit ... 577

47 Atomkerne ... 578
47.1 Masse, Ladung und Zusammensetzung der Kerne ... 578
47.2 Isotope ... 579
47.3 Isobare, Isotone, Nuklide, Isomere ... 580
47.4 Massendefekt und Bindungsenergie der Kerne ... 580
47.5 Stabilitätskriterien. Kernsystematik ... 582
47.6 Kernkräfte ... 585
47.7 Kernmodelle ... 586

48 Die natürliche Radioaktivität ... 588
48.1 Der α-Zerfall der schweren Kerne ... 588
48.2 Der β-Zerfall. Gammastrahlung ... 589
48.3 Das Zerfallsgesetz. Spezifische Aktivität ... 591
48.4 Radioaktive Zerfallsreihen und radioaktives Gleichgewicht ... 593
48.5 Dosimetrie und biologische Wirkung ionisierender Strahlung ... 594

49 Künstliche Kernumwandlungen ... 597
49.1 Arten künstlicher Kernumwandlungen ... 597
49.2 Massen- und Energiebilanz von Kernreaktionen. Wirkungsquerschnitt ... 598
49.3 Kernspaltung. Gewinnung von Kernspaltungsenergie ... 599
49.4 Arten von Kernreaktoren ... 602
49.5 Kernfusion ... 603

50 Elementarteilchen ... 605
50.1 Entwicklung zum Teilchen-„Zoo“ ... 605
50.2 Erhaltungssätze für Baryonenladung, Leptonenladung, Isospin, Strangeness und Hyperladung ... 606
50.3 Die elementaren Teilchen: Leptonen und Quarks ... 608
50.4 Zusammengesetzte Elementarteilchen. Hadronen ... 610
50.5 Die elementaren Kräfte (Wechselwirkungen). Feldquanten ... 611
50.6 Standardmodell der Teilchenphysik. Vereinheitlichte Theorie der elementaren Kräfte ... 613
50.7 Kosmologie. Dunkle Materie und Dunkle Energie ... 614

A ANHANG: Fehlerrechnung (Messabweichungen) ... 616
A.1 Arten und Ursachen von Messabweichungen ... 616
A.2 Ermittlung von Messergebnis und Messabweichung ... 617
A.3 Zufallsstreuung von Messwerten ... 619
A.4 Fehlerfortpflanzung ... 623
A.5 Geradenausgleich (lineare Regression). Korrelation ... 625
Bildquellenverzeichnis ... 628
Lösungen der Aufgaben ... 629

Index ... 635

Teil I

Einführung

1 Was ist „Physik“? Wege physikalischer Erkenntnisgewinnung

Die *Physik* ist eine grundlegende Naturwissenschaft und beschäftigt sich mit der Untersuchung des Aufbaus, der Eigenschaften und der Bewegung der unbelebten Natur sowie mit den diese Bewegung hervorrufenden Kräften oder Wechselwirkungen. Wegen ihres grundlegenden und übergreifenden Charakters bildet die Physik ein unentbehrliches Fundament für viele andere Naturwissenschaften, wie z. B. die Chemie, die Astronomie, die Geowissenschaften und Meteorologie, sowie insbesondere für die gesamte Technik. So sind heute zahlreiche Physiker in den Ingenieurwissenschaften tätig, und viele in der Grundlagenforschung arbeitende Ingenieure sind zu hoch spezialisierten Physikern geworden. Da auch der Stoff, aus dem die Organismen bestehen und der in ihnen umgesetzt wird, den Gesetzen der Physik unterworfen ist, stellt diese darüber hinaus eine wesentliche Grundlage der biologischen und im weiteren Sinne auch der medizinischen Wissenschaft dar; man denke nur an die stürmische Entwicklung und zunehmende Bedeutung der Biophysik.

Die Physik ist eine *Erfahrungswissenschaft.* Jede ausgesprochene Behauptung oder Vermutung über einen physikalischen Sachverhalt ist das Resultat von Schlussfolgerungen, deren Ausgangspunkt bestimmte **Axiome** bilden. Das sind Grund- und Erfahrungssätze, deren Richtigkeit nicht durch logisches Schließen aus anderen Sätzen, sondern nur aus unmittelbar gegebenen Tatsachen hervorgeht. Ein Axiom kann man nicht logisch beweisen, sondern nur durch ein **Experiment** demonstrieren.

Das Experiment, d. h. die exakte Messung bestimmter, genau definierter *physikalischer Größen* im planmäßig und gezielt ausgeführten Versuch, bildet überhaupt die Grundlage jeglicher physikalischen Erkenntnis. Durch systematisches Ordnen des gewonnenen umfangreichen experimentellen Materials, durch die gedankliche Durchdringung mit den Methoden der *Mathematik* und Einordnung der Ergebnisse in schon bekannte Zusammenhänge lassen sich allgemein gültige physikalische **Gesetze** formulieren, die in ihrer Gesamtheit ein komplexes System von Naturerkenntnissen bilden, das sich in zunehmendem Maße ebenso erweitert, wie es an innerer Geschlossenheit gewinnt.

Dem hier skizzierten Weg der Erkenntnisgewinnung liegt die **induktive Methode** zu Grunde, die darin besteht, dass aus einer Fülle von Einzelbeobachtungen durch logische Schlussfolgerungen die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten aufgedeckt und in **Theorien** zusammengefasst werden. Sofern eine Gruppe von Gesetzmäßigkeiten noch nicht sicher in das allgemeine Gebäude von Erkenntnissen eingegliedert werden kann, sucht man zunächst mit der Aufstellung einer **Hypothese** eine vorläufige Erklärung. Hypothesen müssen aber sofort verworfen werden, wenn sie in Widerspruch zu den Tatsachen geraten. Da der Wahrheitsgehalt aller physikalischen Lehrsätze allein auf ihrer Übereinstimmung mit der Wirklichkeit beruht, ist die Physik eine immer *induktiv* arbeitende Wissenschaft. Daraus folgt:

Es gibt keine physikalische Theorie, die nicht zu experimentell prüfbaren Konsequenzen führt. Das Experiment ist deshalb ein wesentlicher Bestandteil der praktischen Überprüfung jeder physikalischen Theorie.

Für die Gewinnung von neuen physikalischen Erkenntnissen ist aber ebenso der zweite Weg, die **deduktive Methode**, von großer Bedeutung. Sie stellt das Gegenstück und zugleich eine notwendige Ergänzung zur induktiven Methode dar. Mit ihr werden aus bekannten, allgemein gültigen Sätzen, deren Richtigkeit gesichert ist, zumeist durch mathematische Ableitungen neue Einzelerkenntnisse, Experimente und Erscheinungen vorausgesagt. Beide Methoden, die induktive und die deduktive, treten stets in enger Verknüpfung auf.

So hatte beispielsweise JOHANNES KEPLER (1571–1630) die Gesetze der Planetenbewegung auf induktivem Wege ermittelt. Seine Fragestellung galt dem „Wie“ der Planetenbewegung. ISAAC NEWTON (1643–1727) suchte das „Warum“. Er fand es 1687 auf deduktivem Wege, indem er die allgemeinen Gesetze der Mechanik auf den besonderen Fall der Bewegung der Himmelskörper anwandte. Der Schlüssel dazu war das *Gravitationsgesetz*, das die gegenseitige Anziehung zweier Massen bestimmt (s. 8.1).

Die physikalischen Begriffe, mit denen wir bei unseren Untersuchungen und Überlegungen operieren, sind jedoch nicht die konkreten Objekte selbst, sondern mehr oder weniger bewährte Abstraktionen, in denen sich all unsere Erfahrung im Umgang mit diesen Objekten verdichtet und niederschlägt. Bei diesen von uns benutzten physikalischen Begriffen handelt es sich immer nur um „Bilder“ oder **Modelle**.

Solch ein Modell enthält allerdings niemals alle Eigenschaften und Aspekte des wirklichen Gegenstandes. Es ist Teil einer jeden Theorie, die ja nicht die Wirklichkeit selbst ist, sondern lediglich deren annähernd adäquate Widerspiegelung in unserem Bewusstsein. Das Modell gibt aber jene Eigenschaften wieder, die in dem gegebenen Zusammenhang interessieren. Gerade dadurch erhalten die physikalischen Modelle die Eleganz und „Handlichkeit“, mit der die oft unübersehbare Kompliziertheit der wirklichen Objekte auf die jeweils relevanten Aspekte reduziert werden kann.

Als Beispiel sei das *Planetenmodell des Atoms* genannt, wonach die Elektronen im Atom aufgrund der elektrostatischen Anziehung um den Atomkern kreisen wie Planeten um die Sonne als Folge der Schwerkraft, jeweils mit der Fliehkraft als Gegenkraft. Auf Grundlage dieses Modells gelang es (allerdings nicht ohne einschneidende Zusatzforderungen, die BOHRschen Postulate, vgl. 44.3), die Wellenlängen des von einfach gebauten Atomen emittierten Lichts sehr genau zu berechnen. Oder das *Tröpfchenmodell des Atomkerns* (s. 47.7), wonach der Kern einem Flüssigkeitstropfen vergleichbar ist. Wenn sich aus der Gasphase ein neues winziges Tröpfchen an den Tropfen anlagert, entspricht dies einer Kondensation, wobei eine bestimmte Wärmemenge, die Kondensationswärme, frei wird. Analog dazu wird Energie frei, wenn sich ein einzelner Kernbaustein, ein Nukleon, an den Kern anlagert.

2 Physikalische Größen, Einheiten, Dimensionen, Gleichungen

2.1 Größen, Einheiten, Dimensionen

Zur kurzen und eindeutigen Beschreibung der Naturgesetze werden bestimmte physikalische **Größen** benutzt. Sie beschreiben Eigenschaften von physikalischen Objekten, für die ein *Messverfahren* existiert. Grundeigenschaften aller physikalischen Größen sind Erfassbarkeit durch Maß und Zahl (Metrisierung) und Verknüpfbarkeit mittels mathematischer Operationen. Physikalische Größen werden ihrer Qualität nach verschiedenen **Größenarten** zugeordnet. So z. B. gehören die Größen Wurfhöhe, Schwingungsamplitude und Kernradius sämtlich der Größenart „Länge“ an.

Als Maß zur Messung von Größen gleicher Art dienen die physikalischen **Einheiten**. Diese sind international festgelegte, reproduzierbare Größen und werden entweder durch eine Maßverkörperung, d. h. einen *Etalon* oder *Prototyp*, wie beim Kilogramm (vgl. 4.3), oder durch eine *Mess-* bzw. *Zählvorschrift*, wie beim Ampere (vgl. 28.6) bzw. Mol (vgl. 16.4) definiert. Bei der Messung einer physikalischen Größe wird dieselbe in Vielfachen bzw. Teilen der zugehörigen Einheit ausgedrückt. Jede physikalische Größe G trägt somit ein *quantitatives* und ein *qualitatives* Merkmal, und es kann daher ihr *Wert* formal als Produkt zweier Faktoren, *Zahlenwert* $\{G\}$ und *Einheit* $[G]$, aufgefasst werden:

$$G = \{G\}\,[G]. \tag{2.1}$$

Beispiel 2.1: Elektrische Spannung $U = 220\,\mathrm{V}$; $\{U\} = 220$; $[U] = \mathrm{V}$ (Volt). □

Man unterscheidet *Basisgrößenarten* und *abgeleitete Größenarten*. In der Mechanik kommt man z. B. mit drei Basisgrößenarten, der Länge s, der Zeit t und der Masse m, aus, wobei dann die Geschwindigkeit $v = s/t$, die Beschleunigung $a = v/t$, die Kraft $F = ma$ usw. abgeleitete Größenarten sind.

Entsprechend unterscheidet man zwischen *Basiseinheiten* und *abgeleiteten Einheiten*, je nachdem, ob es sich um Einheiten von Basisgrößenarten oder abgeleiteten Größenarten handelt.

Die SI-Basiseinheiten. Dem *Internationalen Einheitensystem* (Système International d'Unités, abgekürzt in allen Sprachen „SI“) liegen sieben Basiseinheiten zu Grunde; es sind dies die

Einheit der Länge:	das **Meter**	m	(vgl. 3.1)
Einheit der Masse:	das **Kilogramm**	kg	(vgl. 4.3)
Einheit der Zeit:	die **Sekunde**	s	(vgl. 3.1)
Einheit der elektrischen Stromstärke:	das **Ampere**	A	(vgl. 28.6)
Einheit der Temperatur:	das **Kelvin**	K	(vgl. 16.1)
Einheit der Stoffmenge:	das **Mol**	mol	(vgl. 16.4)
Einheit der Lichtstärke:	die **Candela**	cd	(vgl. 42.6).

Anmerkung: Die Temperatur darf wie bisher auch in Grad Celsius (°C) angegeben werden. CELSIUS-Temperatur ist gleich KELVIN-Temperatur minus 273,15 K.

Alle Einheiten, die aus diesen Basiseinheiten direkt gebildet werden (ohne Verwendung von Zahlenfaktoren), wie z. B. die Einheit der Geschwindigkeit 1 m/s (lies: Meter je Sekunde) $\equiv 1\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ oder die Einheit der elektrischen Spannung 1 Volt (V) $= 1\,\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{s}^{-3}\cdot\mathrm{kg}\cdot\mathrm{A}^{-1}$, heißen *kohärente* Einheiten. *Nichtkohärente* Einheiten lassen sich zwar auch auf die Basiseinheiten zurückführen, jedoch treten in den entsprechenden Gleichungen Zahlenwerte auf, die von 1 verschieden sind (Beispiele: 1 Kilometer/Stunde $\equiv 1\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{h}^{-1} = 0{,}278\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$; $1\,\mathrm{bar} = 10^5\,\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{s}^{-2}\cdot\mathrm{kg}$ usw.).

Tabelle 2.1 Vielfache und Teile von SI-Einheiten. Dezimale Vielfache und Teile von Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten werden wie folgt durch *Vorsätze* gekennzeichnet:

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Yotta	Y	10^{24}	Dezi[1]	d	10^{-1}
Zetta	Z	10^{21}	Zenti[1]	c	10^{-2}
Exa	E	10^{18}	Milli	m	10^{-3}
Peta	P	10^{15}	Mikro	µ	10^{-6}
Tera	T	10^{12}	Nano	n	10^{-9}
Giga	G	10^{9}	Piko	p	10^{-12}
Mega	M	10^{6}	Femto	f	10^{-15}
Kilo	k	10^{3}	Atto	a	10^{-18}
Hekto[1]	h	10^{2}	Zepto	z	10^{-21}
Deka[1]	da	10	Yocto	y	10^{-24}

[1] Diese Vorsätze sollen nur noch bei solchen Einheiten angewendet werden, bei denen sie bisher gebräuchlich waren, z. B. Hektoliter, Hektopascal, Dezitonne, Zentimeter.

Dimensionen physikalischer Größenarten. Eine Verallgemeinerung der physikalischen Größe ist deren *Dimension*. Sie kennzeichnet die *Qualität* einer physikalischen Größenart, ohne Hinweis auf bestimmte Einheiten; sie gibt den Zusammenhang einer physikalischen Größenart mit den Basisgrößenarten an.

Der Mechanik liegen allein die drei Dimensionen *Länge* L, *Masse* M und *Zeit* T zu Grunde, entsprechend den oben genannten drei mechanischen Basisgrößenarten. Demnach hat z. B. die Geschwindigkeit die Dimension Länge/Zeit, also LT^{-1} (im Unterschied zu ihrer Einheit Meter/Sekunde), die Kraft $F = ma$ die Dimension MLT^{-2}, die Energie die Dimension $\mathsf{ML}^2\mathsf{T}^{-2}$ usw.

Beispiele 2.2:

1. Führe die Einheit der elektrischen Spannung, das Volt (V), auf die Basiseinheiten zurück!

Lösung: Aus der Einheitenbeziehung für die Energie $1\,\mathrm{J(Joule)} = 1\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{s} = 1\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}\cdot\mathrm{s} = 1\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m} = 1\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$, vgl. (23/1), folgt $1\,\mathrm{V} = 1\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2/(\mathrm{s}^3\cdot\mathrm{A})$.

2. Drücke die inkohärente Energieeinheit Kilowattstunde (kWh) durch die SI-Einheit Joule (J) aus!

Lösung: $1\,\mathrm{kW}\cdot\mathrm{h} = 10^3\,\mathrm{W}\cdot 3600\,\mathrm{s} = 3{,}6\cdot 10^6\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{s} = 3{,}6\cdot 10^6\,\mathrm{J} = 3{,}6\,\mathrm{MJ}$.

3. Welche Basiseinheit hat das Produkt RC (elektrischer Widerstand mal Kapazität)?

Lösung: Aus $[R] = 1\,\mathrm{V}/1\,\mathrm{A}$ (s. 25.2) und $[C] = 1\,\mathrm{A\,s}/1\,\mathrm{V}$ (s. 23.8) folgt $[RC] = 1\,\mathrm{s}$ (Sekunde). □

Aufgabe

2.1 Forme den Ausdruck $\mathrm{kW \cdot h \cdot m/(dm^3 \cdot MPa)}$ so um, dass er nur kohärente SI-Einheiten enthält, und vereinfache ihn durch formale Rechnung (s. hintere Einband-Innenseite)!

2.2 Physikalische Gleichungen

Man unterscheidet zwischen *Größengleichungen, zugeschnittenen Größengleichungen, Zahlenwertgleichungen* und *Einheitengleichungen.*

In der **Größengleichung** stehen die Symbole für die physikalischen Größen, d. h. für die Produkte aus Zahlenwert und Einheit dieser Größen. Die Größengleichung gilt unabhängig von der Wahl der Einheiten.

Beispiel 2.3:

$s = vt$ (Weg = Geschwindigkeit × Zeit); $F = ma$ (Kraft = Masse × Beschleunigung); usw. □

Auch in den **zugeschnittenen Größengleichungen** stehen die Symbole für die physikalischen Größen; es treten jedoch in der Gleichung stets die Quotienten aus den Größen und ihren Einheiten, d. h. also die Zahlenwerte, auf. Als Beispiel sei die Gleichung (44.26) genannt.

Beispiel 2.4:

Umrechnung der CELSIUS-Temperatur ϑ (Einheit °C) in die (absolute) KELVIN-Temperatur T (Einheit K)

$$\frac{T}{\mathrm{K}} = \frac{\vartheta}{^\circ\mathrm{C}} + 273{,}15 \qquad \text{oder} \qquad \{T\} = \{\vartheta\} + 273{,}15. \qquad \square$$

In der **Zahlenwertgleichung** bedeuten die Symbole der vorkommenden physikalischen Größen *nur* die Zahlenwerte dieser Größen. Für die Größen sind dann ganz bestimmte Einheiten vorgeschrieben, die in einer Gleichungslegende angegeben werden.

Beispiel 2.5:

$$s = \frac{1}{3{,}6}\,vt \qquad \text{mit} \qquad \begin{array}{ll} s & \text{Weg in Metern,} \\ v & \text{Geschwindigkeit in Kilometern je Stunde,} \\ t & \text{Zeit in Sekunden.} \end{array} \qquad \square$$

In diesem Buch werden grundsätzlich keine Zahlenwertgleichungen verwendet.

Die Verwendung der SI-Einheiten bietet den Vorteil, dass die Größengleichungen ohne Veränderung auch als Zahlenwertgleichungen benutzt werden können.

Geht es darum, die *Einheit* einer physikalischen Größe zu ermitteln, so setzt man die in der zugehörigen Größengleichung vorkommenden Größen in eckige Klammern, d. h., man betrachtet lediglich die Einheiten der betreffenden Größen. Auf diese Weise entsteht aus der Größengleichung die zugehörige **Einheitengleichung**.

Beispiel 2.6:

Aus der Definition der *spezifischen Wärmekapazität* $c = Q/[m(T_2 - T_1)]$, vgl. Abschnitt 17.1, mit Q als Wärmemenge, m Masse und T absoluter Temperatur folgt als Einheitengleichung

$$[c] = \frac{[Q]}{[m] \cdot [T]} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}} \equiv \mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}},$$

also für c die Einheit Joule je Kilogramm und Kelvin. □

2.3 Das neue SI-Einheitensystem

Im alten SI (bis Mai 2019) sind mit dem Caesium-Frequenzstandard f_{Cs} und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c die Basiseinheiten *Sekunde* und *Meter* auf eine unveränderliche Eigenschaft eines speziellen Atoms bzw. eine fundamentale Naturkonstante zurückgeführt (s. Abschnitt 3.1). Insbesondere wurde in Verbindung mit der Meterdefinition die Naturkonstante Lichtgeschwindigkeit 1983 ein für alle Mal auf einen bestimmten Wert festgelegt. Eine ähnliche auf unveränderliche Eigenschaften der Atome oder fundamentale Naturkonstanten zurückgehende definitorische Basis gibt es für die Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol im alten SI nicht. Mit der Entdeckung elektrischer Quanteneffekte wie dem JOSEPHSON- und dem Quanten-HALL-Effekt (s. Abschnitte 46.8 bzw. 28.8) wurde es möglich, gut reproduzierbare Normale zu entwickeln, mit denen auch diese Basiseinheiten in großer Präzision und auf praktikable Weise durch Naturkonstanten oder atomare Größen dargestellt werden können. Dieses und die gewachsenen Anforderungen an die Messgenauigkeit in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft haben zu einer Revision des SI geführt, die ab Mai 2019 gültig ist.

Die sieben definierenden Konstanten. Das neue SI wird durch verbindliche Festlegung der folgenden sieben physikalischen Konstanten definiert:

- **Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs** des Grundzustands im ^{133}Cs-Atom (vgl. 3.1)
  $f_{\mathrm{Cs}} = 9\,192\,631\,770\,\mathrm{s}^{-1}$
- **Lichtgeschwindigkeit** im Vakuum (vgl. 3.1)
  $c = 299\,792\,458\,\mathrm{m\,s}^{-1}$
- **PLANCK-Konstante** (vgl. 42.4)
  $h = 6{,}626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}$ ($\mathrm{J\,s} = \mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}}$)
- **Elementarladung** (vgl. 23.1)
  $e = 1{,}602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$ ($\mathrm{C} = \mathrm{A\,s}$)
- **BOLTZMANN-Konstante** (vgl. 18.2)
  $k = 1{,}380\,649 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J\,K}^{-1}$ ($\mathrm{J\,K}^{-1} = \mathrm{kg\,m^2\,s^{-2}\,K^{-1}}$)
- **AVOGADRO-Konstante** (vgl. 18.1)
  $N_{\mathrm{A}} = 6{,}022\,140\,76 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol}^{-1}$
- das **photometrische Strahlungsäquivalent** K_{cd} einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz ist genau gleich 683 Lumen/Watt (vgl. 42.6).

Die angegebenen Zahlenwerte können sich zum Inkrafttreten der Revision noch geringfügig ändern. Die definierenden Konstanten sollen eine relative Messunsicherheit von mindestens 10^{-8} haben, weshalb die Gravitationskonstante γ (s. 8.1), die nur mit 10^{-4} bekannt ist, nicht unter ihnen ist. Dies unterscheidet u. a. das neue SI von den PLANCK-*Einheiten* (s. u.). Von den definierenden Konstanten sind nur die Lichtgeschwindigkeit c (s. 3.1), die PLANCK-Konstante h (s. 42.4) und die Elementarladung e (s. 23.1) *fundamentale Naturkonstanten*. Die BOLTZMANN-Konstante k (s. 18.2), die AVOGADRO-Konstante N_{A} (s. 18.1) und das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} (s. 42.7) sind *festgelegte Umrechnungsfaktoren* zwischen Energie und Temperatur, Partikelzahl und Stoffmenge bzw. Leistung und Lichtstrom.

Die sieben Basisienheiten. Jede Basiseinheit kann durch eine Kombination aus Einheiten der oben aufgeführten definierenden Konstanten dargestellt werden. Für das K i l o g r a m m als Einheit der Masse zum Beispiel erhält man $\mathrm{kg} = [h][f_{\mathrm{Cs}}][c]^{-2}$. Nach (2.1) kann man dafür auch

$1\,\mathrm{kg} = (h/\{h\})\cdot(f_{\mathrm{Cs}}/\{f_{\mathrm{Cs}}\})\cdot(c/\{c\})^{-2}$ schreiben. Mit den obigen Maßzahlen $\{h\}$, $\{f_{\mathrm{Cs}}\}$ und $\{c\}$ der Konstanten h, f_{Cs} und c folgt daraus die *Definition* $1\,\mathrm{kg} = 1{,}475\,521\cdot10^{40}\,h\,f_{\mathrm{Cs}}/c^2$. Für die sieben Basiseinheiten im neuen SI ergeben sich so die folgenden Definitionen:

Sekunde (s)	$1\,\mathrm{s} = 9\,192\,631\,770/f_{\mathrm{Cs}}$
Meter (m)	$1\,\mathrm{m} = (c/299\,792\,458)\,\mathrm{s} = 30{,}663\,318\,c/f_{\mathrm{Cs}}$
Kilogramm (kg)	$1\,\mathrm{kg} = (h/6{,}626\,070\,15\cdot10^{-34})\,\mathrm{m^{-2}\,s} = 1{,}475\,521\cdot10^{40}\,h\,f_{\mathrm{Cs}}/c^2$
Ampere (A)	$1\,\mathrm{A} = (e/1{,}602\,176\,634\cdot10^{-19})\,\mathrm{s^{-1}} = 6{,}789\,686\cdot10^{8}\,f_{\mathrm{Cs}}\,e$
Kelvin (K)	$1\,\mathrm{K} = (1{,}380\,649\cdot10^{-23}/k)\,\mathrm{kg\,m^2\,s^{-2}} = 2{,}266\,665\,f_{\mathrm{Cs}}\,h/k$
Mol (mol)	$1\,\mathrm{mol} = 6{,}022\,140\,76\cdot10^{23}/N_{\mathrm{A}}$
Candela (cd)	$1\,\mathrm{cd} = (K_{\mathrm{cd}}/683)\,\mathrm{kg\,m^2\,s^{-3}\,sr^{-1}} = 2{,}614\,830\cdot10^{10}\,f_{\mathrm{Cs}}^2\,h\,K_{\mathrm{cd}}$.

Auch hier kann es zum Inkrafttreten des neuen SI noch leichte Veränderungen der Zahlenwerte geben.

Die experimentelle Realisierung der Basiseinheiten. Die Bereitstellung der jeweiligen Einheit für die Wissenschaft und Technologie ist ein wesentlicher Bestandteil der Einheitendefinition, durch die das Messverfahren festgelegt und die Weitergabe der Einheit für Eichungen und Kalibrierungen erst ermöglicht wird. Während die experimentelle Darstellung von Meter, Sekunde und Candela wie im alten SI erfolgt, ist die Realisierung der Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol neu.

Für das K i l o g r a m m gibt es zwei Realisierungsmethoden, die *„Siliciumkugel“* und die *„Watt-Waage“*. Bei der ersten Methode wird der bisherige Kilogramm-Prototyp (s. 4.3), das sog. *Ur-Kilogramm*, durch eine hochreine und von strukturellen Gitterdefekten möglichst freie Siliciumkugel als Massenormal ersetzt. Mittels RÖNTGENfeinstrukturbeugung (s. 41.8) und weiterer Messverfahren kann (aus der Gitterkonstante, dem Kugelvolumen und der Kugelmasse sowie der Molmasse von Si) die AVOGADRO-Konstante bestimmt werden, was zunächst eine Realisierung der Einheit M o l darstellt. Zusammen mit der PLANCK-Konstanten lässt sich daraus die atomare Masseneinheit u (s. 18.1) bestimmen und somit die Masseneinheit Kilogramm (s. 4.3) auf atomare Größen zurückführen. Die Methode „Watt-Waage“, bei der eine mechanische Leistung mit einer elektrischen Leistung verglichen wird, ist in Abschnitt 46.8 näher erläutert.

Ebenso gibt es zwei Darstellungsmethoden für die Einheit A m p e r e. Für sehr niedrige Stromstärken I kann die Einheit mittels des sog. COULOMB-*Blockade-Effekts* in mit der Frequenz f getakteten Einzelelektronen-Schaltungen durch direktes „elektronisches Zählen“ (Elektronenanzahl n) über die Beziehung $I = nef$ auf die Elementarladung e zurückgeführt werden. Für etwas höhere Stromstärken wird I nach dem OHMschen Gesetz $I = U/R_{\mathrm{H}}$ aus der mittels des JOSEPHSON-Effekts gemessenen Spannung U und dem Quanten-HALL-Widerstand R_{H} bestimmt (s. 46.8).

Die Realisierung der Temperatureinheit K e l v i n basiert auf der Bestimmung der BOLTZMANN-Konstanten k. Dies geschieht entweder aus der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in einem Gas, die proportional zu $(kT)^{1/2}$ ist (*akustisches Gasthermometer*, s. auch 37.1) oder aus der Veränderung der Permittivität eines Gases, z. B. Helium, bei isothermer Zustandsänderung (*Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer*), die proportional zu kT ist.

Die PLANCK-Einheiten. Einfache arithmetische Kombinationen von Naturkonstanten erlauben die Darstellung der Dimensionen *Länge* L, *Zeit* T und *Masse* M. Es sind dies die sog. PLANCK-*Einheiten*:

PLANCK-Länge	$l_{\mathrm{P}} = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1{,}616\cdot10^{-35}\,\mathrm{m}$
PLANCK-Zeit	$t_{\mathrm{P}} = l_{\mathrm{P}}/c = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5{,}391\cdot10^{-44}\,\mathrm{s}$
PLANCK-Masse	$m_{\mathrm{P}} = \sqrt{\hbar c/\gamma} = 2{,}176\cdot10^{-8}\,\mathrm{kg}$
PLANCK-Temperatur	$T_{\mathrm{P}} = m_{\mathrm{P}}c^2/k = \sqrt{\hbar c^3/k} = 1{,}417\cdot10^{32}\,\mathrm{K}$,

mit $\hbar = h/(2\pi)$. Diese Einheiten beschreiben einen Bereich, in dem Quanteneffekte und Gravitationswechselwirkung die gleiche Größenordnung haben und sind daher in der *Quanten-Kosmologie* bedeutsam (s. 50.6 und 50.7).

Teil II

Teilchen

Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers. Stoffe

Bei der Beschreibung von Bewegungsvorgängen ist es oft zulässig, von den Abmessungen und der Gestalt der beteiligten Körper sowie den Bewegungen ihrer einzelnen Teile gegeneinander (*innere* Bewegungen) abzusehen und die Körper als unveränderliche stoffliche **Teilchen** von konstanter Menge Substanz und gegebenenfalls konstanter elektrischer Ladung zu idealisieren. Das Teilchen dient so als *Denkmodell* für Körper sowohl in der Mikro- als auch in der Makrophysik, indem einerseits z. B. Elektronen, Atomkerne und die Moleküle eines Gases, andererseits aber auch die Planeten, deren Abmessungen klein sind im Verhältnis zu den Räumen, in denen sie sich bewegen, als Teilchen idealisiert werden können.

Für die mathematische Behandlung ist es zweckmäßig, wenn man sich die gesamte stoffliche Substanz sowie die daran gebundene elektrische Ladung des Teilchens in einem Punkt konzentriert denkt, so dass seine Lage durch die drei Koordinaten des Raumes angegeben werden kann. Man spricht dann von einer **Punktmasse** bzw. **Punktladung**. Diese kann keine Drehungen, sondern nur fortschreitende Bewegungen ausführen.

Makroskopische Körper lassen sich durch ein *System von Punktmassen* bzw. *Punktladungen* darstellen, so z. B. die Gase durch die Gesamtheit der Gasmoleküle oder die festen kristallinen **Stoffe** durch die Atome bzw. Ionen des Kristallgitters. Der **starre Körper** kann modellmäßig durch ein System starr gekoppelter Punktmassen aufgefasst werden.

3 Kinematik der Punktmasse

Die *Kinematik* ist die *Lehre von den Bewegungen* der Körper, in der die Ursachen der Bewegungen (die beteiligten Kräfte) sowie die durch sie hervorgerufenen Wirkungen auf andere Körper außer Acht bleiben.

3.1 Raum, Zeit, Bezugssystem

Jeder physikalische Vorgang läuft *in Raum und Zeit* ab. Das ist daraus zu ersehen, dass in allen Bereichen der Physik jedes Gesetz – offen oder verdeckt (explizit oder implizit) – Raum-Zeit-Beziehungen in Form von Längen und Zeitintervallen enthält.

Zur **Längenmessung** dienen Geräte, mit denen sich zwei Abstandsmarken reproduzierbar einstellen lassen, durch deren Entfernung die *Längeneinheit* festgelegt werden kann. Die zu vermessende Strecke wird dann mit der Längeneinheit verglichen und in Vielfachen oder Teilen derselben ausgedrückt.

Die Längeneinheit ist das **Meter (m)**. Die Meter-Definition basiert (seit 1983) auf einem festgelegten Wert der **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum** von 299 792 458 m/s. Sie wurde möglich durch die absolute Messung der Frequenz von Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich. Da Frequenz f und Wellenlänge λ der Strahlung mit der Lichtgeschwindigkeit c durch die Beziehung $c = f\lambda$ verknüpft sind (vgl. 36.1), kann die hohe Genauigkeit von Frequenzmessungen zur Darstellung der Längeneinheit genutzt werden. Aus dem oben angegebenen Wert für die Lichtgeschwindigkeit folgt als *Meter-Definition*:

> **Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunde durchläuft.**

Für die praktische Handhabung wird die so definierte Längeneinheit auf körperliche Vergleichsmaßstäbe übertragen, die Abstandsmarken tragen (für eine bestimmte Temperatur und weitere genau festgelegte Umgebungsbedingungen). Die Genauigkeit solcher Vergleichsmaßstäbe beträgt einige 10^{-7}, d. h., bezogen auf die Länge von 1 m beträgt der prinzipiell nicht unterschreitbare Fehler in der Längenangabe einige 10^{-7} m.

Eine außerordentlich hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit besitzen Verfahren zur Längenbestimmung, bei denen als maßverkörperndes Normal die Wellenlänge des Lichts zu Grunde gelegt wird *(optische Interferenzlängenmessung)*. Diese Methode besteht vom Prinzip her im Auszählen von Wellenlängen des zur Messung verwendeten Lichts. Auf diese Weise lässt sich das Meter auf Bruchteile der Lichtwellenlänge ($\approx 10^{-8}$ m) genau vermessen. Bezogen auf die Entfernung Erde–Mond entspricht dies einer Messungenauigkeit von nur wenigen Metern!

Mit Hilfe von *Endmaßen* lassen sich Längen zwischen etwa 0,1 mm und allgemein 0,25 m mit einer Genauigkeit von einigen Zehntel Mikrometer vermessen. Die häufig anzutreffende *Messschraube* („Mikrometerschraube“) gestattet die Messung von Längen zwischen 0,01 mm und meist 25 mm auf