

Ulrich Haas

Physik

Für Pharmazeuten, Mediziner
und Studierende
mit Physik als Nebenfach

7. AUFLAGE

LEHRBUCH

WVG

Wissenschaftliche
Verlagsgesellschaft
Stuttgart

Ulrich Haas
Physik

Ulrich Haas

Physik

Für Pharmazeuten, Mediziner
und Studierende
mit Physik als Nebenfach

Prof. Dr. Ulrich Haas, Stuttgart

7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 781 Abbildungen und 82 Tabellen

Anschrift des Autors

Prof. Dr. Ulrich Haas

Universität Hohenheim

Fakultät Naturwissenschaften (220)

D-70593 Stuttgart

Alle Angaben in diesem Buch wurden sorgfältig geprüft.
Dennoch können der Autor und der Verlag keine Gewähr
für deren Richtigkeit übernehmen.

Ein Markenzeichen kann warenzeichenrechtlich geschützt sein, auch wenn
ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

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

7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage
ISBN 978-3-8047-2553-9

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des
Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar.
Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdrucke,
Mikroverfilmungen oder vergleichbare Verfahren sowie
für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© 2012 Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH
Birkenwaldstr. 44, 70191 Stuttgart
www.wissenschaftliche-verlagsgesellschaft.de
Printed in Germany
Satz: CMS – Cross Media Solutions GmbH, Würzburg
Druck und Bindung: Stürtz GmbH, Würzburg
Umschlaggestaltung: deblik, Berlin
Umschlagsabbildung: Dmitry Koksharov/fotolia.com

Vorwort zur 7. Auflage

Dieses Lehrbuch vermittelt die Grundlagen der Physik für alle Studierenden mit Physik als Nebenfach und ist begleitend zu Vorlesungen zur Aufarbeitung und Vertiefung des dort gehörten Lehrstoffs gedacht. Die Studierenden sollen aber auch dazu motiviert werden, in ihrem jeweiligen Fach die physikalischen Aspekte zu hinterfragen und deren physikalische Zusammenhänge zu erkennen. Darüber hinaus gibt es den an Physik Interessierten auf den unterschiedlichsten Gebieten durch weiterführende Darstellungen physikalischer wie auch technischer Sachverhalte und deren Anwendungen tiefere Einblicke sowie Anregungen und Hinweise zu Themenfeldern benachbarter Wissenschaftsbereiche.

Zwar sind in den unterschiedlichen Fachdisziplinen die Lehrinhalte des Nebenfachs Physik grundsätzlich vergleichbar, durch die jeweiligen Gegenstandskataloge werden den Studierenden der Pharmazie bzw. Medizin jedoch fachspezifische Schwerpunkte vorgegeben. Das Grundkonzept dieses Buches, das sich an den Vorgaben der Gegenstandskataloge für den ‚Ersten Abschnitt der Pharmazeutischen Prüfung‘ bzw. die ‚Ärztliche Vorprüfung‘ orientiert, wurde beibehalten, wie auch die Gliederung in Anlehnung an diese Gegenstandskataloge. Aber ebenso sind Teile des dargebotenen Lehrstoffs bzw. ganze Kapitel, wie beispielsweise das Kapitel „Schwingungen und Wellen“, die nicht mehr in der prüfungsrelevanten Auflistung der Gegenstandskataloge enthalten sind, als unverzichtbar beibehalten worden, da darauf z. B. in anderen Kapiteln zu-

rückgegriffen wird, sie aber außerdem für das Grundwissen im Fach Physik unentbehrlich sind.

Bei der Überarbeitung wurde, neben einer gründlichen und kritischen Durchsicht, das Buch für diese Neuauflage in zahlreichen Teilgebieten vertiefend ergänzt sowie aktualisiert und erweitert. Hierbei flossen ebenso prüfungsrelevante Fragestellungen in den Lehrstoff und in erläuternde Beispiele mit ein, wie auch diverse physikalische bzw. technische Neuerungen und Fortentwicklungen der letzten Jahre mit aufgenommen wurden, die entweder technologischer Art sind oder aber hohe Relevanz bei Diagnose- und Nachweisverfahren haben, die in den Naturwissenschaften und der Medizin vielfältig Anwendung finden.

Derjenige Lehrstoff, der gemäß den Gegenstandskatalogen nur von Studierenden der Pharmazie bzw. Medizin gefordert wird, wird im Allgemeinen durch ein **P** bzw. **M** links neben der Überschrift des jeweiligen Abschnitts gekennzeichnet. In Kleindruck gehaltener Text dient der Vertiefung und Erweiterung des sonstigen Lehrstoffs und kann für eine erste Orientierung ggf. überschlagen werden, ist aber für ein besseres Verständnis äußerst hilfreich. Am Ende eines Teilgebietes oder Kapitels sind zu Übungszwecken des jeweiligen Lehrstoffs Aufgaben eingefügt, deren Lösungen im Anhang zu finden sind.

Das ausführlich gehaltene Sachverzeichnis soll den Studierenden und auch allen anderen Nutzern dieses Buches, z.B. als Nachschlagewerk, den Zugang erleichtern.

Die verwendete Nomenklatur und die Einheiten sind wie bislang weitgehend dem von der Internationalen Union für reine und angewandte Physik (IUPAP) empfohlenen Standard sowie den DIN-Normen angepasst. Die angegebenen physikalischen Konstanten sind nach „P.J. Mohr, B.N. Taylor and D.B. Newells, CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants, 2006“: J. of Physical and Chemical Reference Data, 37(3), 2008 und Rev. of Modern Physics, 80(2), 2008. Siehe dazu auch ‚Physikalisch Technische Bundesanstalt [<http://www.ptb.de/>] oder ‚National Institute of Standards and Technology (NIST)‘, USA [<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>].

Der Autor dankt allen Nutzern dieses Buches an der Universität Hohenheim aber auch allen externen, die ihm Anregungen und Hinweise

gegeben haben, denn ein Lehrbuch kann von der kritischen Mitarbeit seiner Leser nur profitieren.

Dank sagen möchte ich auch meinem familiären Umfeld, das viel Verständnis aufbringen musste für die zahlreichen Wochen, inklusive der Wochenenden, die dem Buch gewidmet waren, dabei gebührt meiner lieben Frau auch diesmal wieder besonderer herzlicher Dank für ihre aktive Mitarbeit und konstruktiv kritische Manuskript- und Korrekturlesung.

Der Wissenschaftlichen Verlagsgesellschaft, Stuttgart, gilt nicht zuletzt mein Dank für die stets gleich bleibend gute Zusammenarbeit, die Unterstützung und die Geduld während der Herstellungsphase.

Stuttgart, Frühjahr 2011

Ulrich Haas

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1 Physikalische Größen – Einheiten – Mengenbegriffe

§ 1	Einheit – Maßzahl – Dimension	1	§ 2.3	Abgeleitete SI-Einheiten mit besonderem Namen	6
§ 2	Internationales Einheitensystem	2	§ 3	Mengenbegriffe – Bezogene Größen	7
§ 2.1	Definitionen der SI-Basiseinheiten	3		Aufgaben	12
§ 2.2	Vorsilben zur Bezeichnung von dezimalen Vielfachen und Teilen	5			

KAPITEL 2 Mechanik

§ 4	Bewegungen	13	§ 5	Kräfte – Drehmoment	35
§ 4.1	Translationsbewegungen	14	§ 5.1	Kräfte	35
§ 4.1.1	Die Geschwindigkeit	15	§ 5.1.1	Trägheitskraft	35
§ 4.1.2	Die Beschleunigung	21	§ 5.1.2	Gravitationskraft	37
§ 4.1.3	Zusammenhang von Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg und Zeit	23	§ 5.1.3	Federkraft	45
§ 4.1.4	Der Freie Fall und der Wurf im Schwerfeld der Erde	26	§ 5.1.4	Kraft als Vektor	45
§ 4.2	Rotationsbewegungen	28	§ 5.1.5	Zentripetalkraft – Zentrifugalkraft	46
§ 4.2.1	Gleichförmige Kreisbewegung	29	§ 5.1.6	Reibungskraft	49
§ 4.2.2	Zusammenhänge einiger Größen bei Rotationsbewegungen	31	§ 5.2	Drehmoment	51
	Aufgaben	33	§ 5.2.1	Das Drehmoment	52
			§ 5.2.2	Statisches Gleichgewicht	53
			§ 5.2.3	Statisches Gleichgewicht an Hebel, Waage und Rolle	55
			§ 5.2.4	Drehmoment – Winkelbeschleunigung – Trägheitsmoment	59

Aufgaben **64**

- § 6 Arbeit – Energie – Leistung 66
- § 6.1 Arbeit 66
- § 6.2 Energie 67
 - § 6.2.1 Potentielle Energie 67
 - § 6.2.2 Kinetische Energie 70
- § 6.3 Energieerhaltungssatz 72
- § 6.4 Leistung 76

Aufgaben 79

- § 7 Impuls – Drehimpuls 81
- § 7.1 Impuls 81
 - § 7.1.1 Kraftstoß 83
 - § 7.1.2 Impulserhaltungssatz 84
 - § 7.1.3 Beispiele zur Anwendung des Impuls- und Energie-Erhaltungssatzes 85
- § 7.2 Drehimpuls 91
 - § 7.2.1 Drehimpulserhaltungssatz 92
 - § 7.2.2 Vergleich von Translations- und Rotationsbewegungen 94
- § 7.3 Starre Körper bei freier Drehachse – Kreisel 94

Aufgaben 97

- § 8 Deformierbare feste Körper 98
- § 8.1 Einseitige Dehnung oder Kompression 98
- § 8.2 Biegung – Knickung – Bruch 100
- § 8.3 Querkontraktion – Querdehnung – Poisson-Zahl 101
- § 8.4 Allseitige Dehnung oder Kompression (reine Volumenelastizität) 102
- § 8.5 Scherung – Torsion (reine Formelastizität) 102
- § 8.6 Viskoelastizität 104

Aufgaben 105

- § 9 Ruhende Flüssigkeiten und Gase 106
- § 9.1 Begriff des Druckes 106
- § 9.2 Ruhende Flüssigkeiten (Hydrostatik) 107
 - § 9.2.1 Stempeldruck – Kolbendruck 107
 - § 9.2.2 Kolbenpumpe – Membranpumpe 109
 - § 9.2.3 Schweredruck 110
 - § 9.2.4 Kommunizierende Röhren 111
- § 9.3 Ruhende Gase (Aerostatik) 112
 - § 9.3.1 Gesetz von Boyle und Mariotte 112
 - § 9.3.2 Atmosphärendruck – Barometrische Höhenformel 113
 - § 9.3.3 Partialdruck 116
- § 9.4 Auftrieb in Flüssigkeiten und Gasen 116
 - § 9.4.1 Auftrieb und Archimedisches Prinzip 116
 - § 9.4.2 Schwimmen, Schweben, Sinken 117
 - § 9.4.3 Eintauchen eines Körpers in eine Flüssigkeit 118
- § 9.5 Druckmessung 119
- § 9.6 Dichtebestimmung 123

Aufgaben 128

- § 10 Bewegte Flüssigkeiten und Gase (Hydro- und Aerodynamik) 130
- § 10.1 Kontinuitätsbedingung 132
- § 10.2 Bernoulli-Gleichung 133
- § 10.3 Viskosität 137
- § 10.4 Stokes'sche Formel 140
- § 10.5 Strömungen realer Fluide 143
 - § 10.5.1 Laminare Strömung viskoser Fluide 144
 - § 10.5.2 Gesetz von Hagen-Poiseuille 145
 - § 10.5.3 Strömungswiderstand Newton'scher Fluide 147
 - § 10.5.4 Turbulente Strömung viskoser Fluide – Reynolds-Zahl 151
 - § 10.5.5 Dynamischer Auftrieb 155

Aufgaben 157

§ 11	Grenzflächeneffekte	158	§ 11.4	Bestimmung der Oberflächen- spannung	165
§ 11.1	Oberflächenspannung	158	§ 11.5	Adsorption an Grenzflächen	166
§ 11.2	Adhäsion – Kohäsion – Randwinkel	161		Aufgaben	169
§ 11.3	Kapillarwirkung	164			

KAPITEL 3 Wärmelehre

§ 12	Grundbegriffe – Temperaturskalen – Temperaturmessung	171	§ 15	Wärme als Energieform	197
§ 12.1	Grundbegriffe	171	§ 15.1	Wärmemenge – Wärmekapazität	198
§ 12.2	Temperaturskalen	171	§ 15.1.1	Wärmekapazität – Molare Wärmekapazität	200
§ 12.3	Temperaturmessung	172	§ 15.1.2	Kalorimetrie	203
	Aufgaben	176	§ 15.2	Hauptsätze der Wärmelehre	204
§ 13	Einige thermische Eigenschaften von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen	176	§ 15.2.1	Erster Hauptsatz der Wärmelehre	206
§ 13.1	Thermische Ausdehnung von Festkörpern und Flüssigkeiten	176	§ 15.2.2	Beispiele spezieller Prozesse zur Anwendung des 1. Hauptsatzes	207
§ 13.1.1	Lineare Ausdehnung	176	§ 15.2.3	Kreisprozesse	211
§ 13.1.2	Volumenausdehnung	177	§ 15.2.4	Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre	214
§ 13.1.3	Temperaturabhängigkeit der Dichte	179	§ 15.2.5	Thermodynamische Potentiale und Gleichgewichte	217
§ 13.2	Ausdehnung von Gasen – Zustandsgleichungen	180	§ 15.2.6	Dritter Hauptsatz der Wärmelehre	219
§ 13.2.1	Gesetz von Boyle und Mariotte	180		Aufgaben	220
§ 13.2.2	Gesetze von Gay-Lussac	181	§ 16	Aggregatzustände der Materie	222
§ 13.2.3	Zustandsgleichung idealer Gase	183	§ 16.1	Umwandlungswärmen	223
§ 13.2.4	Zustandsgleichung realer Gase	185	§ 16.1.1	Atomistisches Bild	225
§ 13.2.5	Zustandsgleichung von Gasgemischen	187	§ 16.1.2	Reaktionswärme, -enthalpie und -energie	226
	Aufgaben	189	§ 16.2	Gleichgewicht von Aggregatzuständen	228
§ 14	Grundzüge der kinetischen Wärme- und Gastheorie	191	§ 16.2.1	Sättigungsdampfdruck – Dampfdruckkurve	229
	Aufgaben	196	§ 16.2.2	Clausius-Clapeyron'sche Gleichung	231
			§ 16.2.3	Verdunsten – Sieden – Kondensation	232
			§ 16.2.4	Schmelzen und Erstarren	234

§ 16.3	Phasendiagramm	235
§ 16.3.1	Gefriertrocknung	236
§ 16.3.2	Gibbs'sche Phasenregel	236
§ 16.4	Joule-Thomson-Effekt – Gasverflüssigung	237
§ 16.5	Luftfeuchtigkeit	239
	Aufgaben	241

§ 17	Wärmeübertragung	242
§ 17.1	Wärmeleitung	242
§ 17.1.1	Wärmeübergang	245
§ 17.1.2	Wärmedurchgang	245
§ 17.1.3	Fourier-Gleichung	247
§ 17.1.4	Mechanismen der Wärmeleitung	247
§ 17.1.5	Einige Beispiele zu: Wärmetransport – Wärmeleitung – Wärmedämmung	248
§ 17.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	248
§ 17.2.1	Einige Beispiele und Anwendungen zum Transport von Wärme durch Konvektion bzw. zu Möglichkeiten der Vermeidung von Konvektionsströmung	249
§ 17.3	Wärmeübertragung durch Strahlung	250
§ 17.3.1	Anmerkungen zur theoretischen Beschreibung der Spektralverteilung der Hohlraumstrahlung	254

§ 17.3.2	Einige Anwendungsbeispiele zu Möglichkeiten der Wärmeisolierung bzw. zur Wärmestrahlung	255
----------	---	-----

Aufgaben	256
-----------------	------------

§ 18	Diffusion	257
------	-----------	-----

Aufgaben	262
-----------------	------------

§ 19	Eigenschaften von Lösungen	263
§ 19.1	Lösungsenthalpie bzw. -wärme	265
§ 19.2	Dampfdruckerniedrigung bei Lösungen	267
§ 19.3	Osmose	271
§ 19.4	Lösung von Gasen in Flüssigkeiten	274
§ 19.5	Einfache Grundlagen der Reaktionskinetik	276
§ 19.5.1	Reaktionen nullter Ordnung	277
§ 19.5.2	Reaktionen erster Ordnung	277
§ 19.5.3	Reaktionen zweiter Ordnung	278
§ 19.5.4	Reaktionen dritter Ordnung	278
§ 19.5.5	Gegenläufige Reaktion erster Ordnung	279
§ 19.5.6	Parallel ablaufende Reaktion erster Ordnung	280
§ 19.5.7	Folgereaktionen erster Ordnung	280
§ 19.5.8	Die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeiten	281

Aufgaben	282
-----------------	------------

KAPITEL 4 Elektrizität und Magnetismus

§ 20	Das elektrostatische Feld	283
§ 20.1	Grundtatsachen	283
§ 20.1.1	Elektrische Ladungen	283
§ 20.1.2	Influenz	285
§ 20.1.3	Polarisation	285
§ 20.1.4	Begriff des elektrischen Feldes – Feldlinienbilder	285
§ § 20.2	Kräfte zwischen Ladungen – Elektrische Feldstärke	287
§ 20.2.1	Coulomb'sches Gesetz	287

§ 20.2.2	Elektrische Feldstärke	288
§ 20.2.3	Einfluss des Dielektrikums zwischen den Ladungen	291
§ 20.3	Metallische Leiter, elektrische Ladungen und elektrische Dipole im elektrischen Feld	292

Aufgaben	296
-----------------	------------

§ 21	Elektrisches Potential – Elektrische Spannung	297	
	Aufgaben		302
§ 22	Die Kapazität	302	
§ 22.1	Kapazität von Kondensatoren	303	
§ 22.2	Parallel- und Serienschaltung von Kondensatoren	306	
§ 22.3	Die Energie des elektrischen Feldes – Der Energieinhalt eines Kondensators	308	
	Aufgaben		309
§ 23	Der elektrische Strom	311	
§ 23.1	Stromstärke – Stromdichte	312	
§ 23.2	Arbeit, Leistung und Wirkungen des elektrischen Stromes	313	
	Aufgaben		315
§ 24	Elektrischer Widerstand – Leitwert	316	
§ 24.1	Ohm'sches Gesetz	316	
§ 24.2	Spannungsabfall am Wider- stand	319	
§ 24.3	Kirchhoff'sche Regeln – Schaltung von Widerständen	320	
§ 24.3.1	Kirchhoff'sche Regeln	320	
§ 24.3.2	Schaltungsarten von Widerständen	322	
§ 24.3.3	Messung elektrischer Widerstände mit der Wheatstone-Brücke	323	
§ 24.4	Spannungsquellen und Stromkreise	324	
§ 24.4.1	Innenwiderstand einer Spannungs- quelle – Elektromotorische Kraft	324	
§ 24.4.2	Kompensationsschaltung nach Poggendorff	325	
§ 24.4.3	Serien- und Parallelschaltung von Spannungsquellen	326	
§ 24.4.4	Beispiele von Stromkreisen mit elektrischen Verbrauchern	327	
	Aufgaben		330
§ 25	Ladungstransport in Materie und Vakuum	333	
§ 25.1	Metallische Leiter	333	
§ 25.1.1	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Metallen	335	
§ 25.1.2	Supraleitung	337	
§ 25.1.3	Thermoelektrische Erscheinungen	341	
§ 25.2	Ladungstransport in Halb- leitern	345	
§ 25.2.1	Störstellen-Leitung	346	
§ 25.2.2	Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Halbleitern	347	
§ 25.2.3	p - n -Übergänge	348	
§ 25.2.4	Das Bändermodell	354	
§ 25.3	Ladungstransport in Flüssigkeiten	356	
§ 25.3.1	Elektrolyte – Dissoziation – Elektrolyse	356	
§ 25.3.2	Faraday'sche Gesetze	360	
§ 25.3.3	Galvanische Elemente	362	
§ 25.3.4	Akkumulatoren	364	
§ 25.3.5	Membranspannung	366	
§ 25.3.6	Konzentrationselement – Diffusionsspannung	367	
§ 25.4	Elektrizitätsleitung in Gasen	368	
§ 25.4.1	Gasentladungen	368	
§ 25.4.2	Ionisationskammer	371	
§ 25.4.3	Geiger-Müller-Zählrohr – Proportionalzählrohr	371	

- § 25.5 Ladungstransport im Vakuum 372
- § 25.5.1 Thermische Elektronen-
emission 373
- § 25.5.2 Röntgenröhre 374
- § 25.5.3 Elektronenstrahloszillograph 375

Aufgaben **376**

- § 26 Elektromagnetismus – Induktion 377
- § 26.1 Grundtatsachen 377
- § 26.2 Magnetische Kraftflussdichte
– Magnetische Feldstärke
– Magnetischer Fluss 379
- § 26.3 Kräfte auf stromdurchflossene
Leiter, bewegte Ladungen
und magnetische Dipole
im Magnetfeld 382
- § 26.3.1 Kräfte auf stromdurchflossene
Leiter im Magnetfeld 382
- § 26.3.2 Kräfte auf bewegte Ladungen
und magnetische Dipole
im Magnetfeld 383
- § 26.3.3 Anwendungsbeispiele zu den
Kraftwirkungen in magnetischen
Feldern 385
- § 26.4 Magnetische Induktion 388
- § 26.4.1 Das Induktionsgesetz 388
- § 26.4.2 Lenz'sche Regel 391
- § 26.4.3 Selbstinduktion 393
- § 26.4.4 Gegenseitige Induktion 394
- § 26.4.5 Der Energieinhalt einer Spule –
Die Energie des magnetischen
Feldes 394

Aufgaben **395**

- § 27 Wechselstrom 396
- § 27.1 Effektivwerte von Spannung und
Strom 396
- § 27.2 Wechselstromwiderstand 398
- § 27.2.1 Ohm'scher Widerstand 399
- § 27.2.2 Kapazitiver Widerstand 399

- § 27.2.3 Induktiver Widerstand 400
- § 27.2.4 Widerstand R , Kapazität C
und Induktivität L im Wechsel-
stromkreis 401

- § 27.3 Ein- und Abschaltvorgänge an
Kondensator und Spule 403
- § 27.4 Leistung eines Wechselstromes 406
- § 27.5 Erzeugung und Transformation
von Wechselspannungen –
Weitere elektrotechnische
Anwendungen 408
- § 27.5.1 Erzeugung von
Wechselspannungen 408
- § 27.5.2 Transformation von Wechsel-
spannungen 410
- § 27.5.3 Weitere technische Anwendungen
mechanoelektrischer Energie-
umwandlung 412

Aufgaben **413**

- § 28 Messung elektrischer Ströme
und Spannungen 414
- § 28.1 Messung von Strömen 414
- § 28.2 Messung von Spannungen 415
- § 28.3 Messbereichserweiterung 417
- § 28.4 Wirkung der Elektrizität
auf den menschlichen
Organismus 418

Aufgaben **420**

- § 29 Dielektrische und magnetische
Eigenschaften der Materie 420
- § 29.1 Dielektrische Eigenschaften
der Materie 420
- § 29.2 Magnetische Eigenschaften
der Materie 423

Aufgaben **427**

KAPITEL 5 Schwingungen und Wellen

§ 30	Schwingungen	429		
§ 30.1	Allgemeines	429		
§ 30.2	Schwingung als periodischer Wechsel zwischen verschiedenen Energieformen	433		
§ 30.2.1	Federpendel – Fadenpendel – Drehpendel	433		
§ 30.2.2	Elektrischer Schwingkreis	436		
§ 30.3	Gedämpfte Schwingung	439		
§ 30.3.1	Gedämpfte mechanische Schwingungen	439		
§ 30.3.2	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	441		
§ 30.4	Erzwungene und selbsterregte Schwingungen – Gekoppelte Oszillatoren	442		
§ 30.4.1	Erzwungene Schwingungen – Resonanz	443		
§ 30.4.2	Selbstgesteuerte und selbsterregte Schwingungen – Rückkopp- lung	446		
§ 30.4.3	Gekoppelte Oszillatoren – Eigenschwingungen	447		
§ 30.5	Überlagerung und Zerlegung von Schwingungen	451		
§ 30.5.1	Überlagerung harmonischer Schwingungen	451		
§ 30.5.2	Anharmonische Schwingungen – Fourier-Analyse	455		
§ 30.6	Pegelmaß	456		
	Aufgaben		458	
§ 31	Wellen	460		
§ 31.1	Allgemeine Grundlagen	460		
§ 31.1.1	Grundsätzliches zur Ausbreitung von Wellen – Prinzip von Huygens- Fresnel	462		
§ 31.1.2	Transversale und longitudinale Wellen	463		
§ 31.2	Reflexion – Brechung	464		
§ 31.2.1	Reflexion	464		
§ 31.2.2	Brechung	464		
§ 31.3	Interferenz	465		
§ 31.3.1	Zweistrahlinterferenz	465		
§ 31.3.2	Kohärenz	466		
§ 31.3.3	Stehende Wellen	467		
§ 31.4	Beugung	470		
§ 31.4.1	Beugung am Spalt	470		
§ 31.4.2	Beugung am Doppelspalt	471		
§ 31.4.3	Beugung an der Kreis- oder Lochblende	472		
§ 31.4.4	Beugung am Gitter	472		
§ 31.4.5	Röntgenbeugung	473		
§ 31.5	Doppler-Effekt	473		
	Aufgaben		474	
§ 32	Elektromagnetische Wellen	475		
	Aufgaben		480	
§ 33	Schallwellen – Akustik	480		
§ 33.1	Stehende Schallwellen – Schall- resonatoren	483		
§ 33.2	Schallfeldgrößen	485		
§ 33.3	Infra-, Ultra- und Hyperschall – Echolotverfahren	488		
	Aufgaben		491	

KAPITEL 6 Optik

§ 34 Allgemeine Eigenschaften
des Lichtes 493

Aufgaben 494

§ 35 Geometrische Optik 495

§ 35.1 Reflexion – Brechung 496

§ 35.1.1 Reflexion 496

§ 35.1.2 Brechung 497

§ 35.1.3 Totalreflexion 499

§ 35.1.4 Dispersion 500

§ 35.2 Abbildung durch Reflexion 502

§ 35.3 Abbildung durch Brechung 505

§ 35.3.1 Strahlableitung durch
Brechung 505

§ 35.3.2 Abbildung mittels Linsen 508

§ 35.3.3 Abbildungsfehler von Linsen 519

Aufgaben 521

§ 36 Optische Einrichtungen
und Systeme 522

§ 36.1 Das menschliche Auge
als optisches Instrument 522

§ 36.1.1 Refraktionsanomalien des Auges
(Sehfehler) 526

§ 36.1.2 Schwinkel – Vergrößerung 527

§ 36.2 Abbildende optische
und elektronenoptische
Instrumente – Auflösungs-
vermögen 529

§ 36.2.1 Die Lupe 529

§ 36.2.2 Das Lichtmikroskop 529

§ 36.2.3 Auflösungsvermögen –
Auflösungsgrenze 530

§ 36.2.4 Das konfokale Mikroskop 532

§ 36.2.5 Elektronenmikroskope –
Mikroskope atomarer Auflö-
sung 533

§ 36.2.6 Fernrohre 536

§ 36.2.7 Photographische Apparate 538

§ 36.2.8 Projektoren 539

§ 36.3 Spektral selektive optische
Instrumente 540

§ 36.3.1 Optische Filter 540

§ 36.3.2 Spektralapparate –
Fourier-Spektrometer 540

§ 36.4 Holographie 543

Aufgaben 545

§ 37 Polarisation 546

§ 37.1 Erzeugung polarisierten Lich-
tes 547

§ 37.2 Drehung der Polarisationsbe-
ne 552

Aufgaben 556

KAPITEL 7 Atomistische Struktur der Materie

§ 38 Atome 557

§ 38.1 Grundbegriffe 557

§ 38.2 Die Atomhülle 559

§ 38.2.1 Bohr'sches Atommodell 560

§ 38.2.2 Das wellen- und quanten-
mechanische Atommodell 562

§ 38.2.3 Quantenzahlen 564

§ 38.2.4 Aufbau der Atomhülle und
periodisches System der
Elemente 564

§ 38.2.5 Emission und Absorption
elektromagnetischer Strahlung 567

§ 38.3 Der Atomkern 569

§ 38.3.1 Isotope Nuklide 571

§ 38.3.2 Bindungsenergien 571

§ 38.3.3 Kernmodelle 573

§ 38.4 Die magnetische Kernresonanz 574

Aufgaben 577

§ 39 Moleküle – Festkörper 578

§ 39.1 Bindungsarten 578

§ 39.1.1 Van der Waals Bindung 578

§ 39.1.2 Wasserstoffbrücken-Bindung 578

§ 39.1.3 Homöopolare Bindung 579

§ 39.1.4 Heteropolare Bindung 580

§ 39.1.5 Metallische Bindung 580

§ 39.2 Festkörper 581

§ 39.3 Strukturanalyse von Molekülen
und Festkörpern 584

Aufgaben 587

§ 40 Radioaktivität 588

§ 40.1 Zerfallsgesetz 589

§ 40.2 Natürliche Radioaktivität 591

§ 40.3 Gewinnung radioaktiver Nuklide –
Neutronenerzeugung 595

§ 40.4 Kernspaltung – Transurane 598

§ 40.5 Tracer-Methode – Szintigraphie 600

§ 40.6 Elementarteilchen 603

Aufgaben 605

KAPITEL 8 Strahlung (Quellen – Größen – Spektren – Wirkungen – Nachweis)

§ 41 Strahlungsquellen –
Strahlungsgrößen 607

§ 41.1 Strahlungsquellen 607

§ 41.2 Strahlungsgrößen 613

§ 41.2.1 Größen der Radiometrie 614

§ 41.2.2 Größen der Photometrie 615

§ 41.2.3 Photonengrößen 616

§ 41.2.4 Quadratisches
Abstandsgesetz 616

Aufgaben 617

§ 42 Spektren 618

§ 42.1 Linienspektren – Bandenspek-
tren 618

§ 42.2 Röntgenspektren 621

§ 43 Wechselwirkung von Strahlung
und Materie 624

§ 43.1 Strahlungswirkungen
und Strahlungsnachweis 624

§ 43.1.1 Erwärmung 624

§ 43.1.2 Anregung 624

§ 43.1.3 Lumineszenz 626

§ 43.1.4 Photochemische Reaktionen 627

§ 43.1.5 Ionisation 628

§ 43.2 Absorption und Streuung
von Strahlung 629

§ 43.2.1 Sichtbares Licht, nahes UV
und IR 630

§ 43.2.2 Röntgen- und γ -Strahlung 632

§ 43.2.3 Teilchenstrahlung
(α -, β - und n -Strahlen) 636

§ 43.3 Dosimetrie – Strahlenbelastung –
Strahlenschutz 638

Aufgaben 648

KAPITEL 9 Steuerung – Regelung – Informationsübertragung

- | | | | | | |
|--------|---------------------------------------|-----|--------|-------------------------|-----|
| § 44 | Steuerung und Regelung | 649 | § 44.3 | Übertragungsfunktionen | 651 |
| § 44.1 | Prinzip der Steuerung
und Regelung | 649 | § 44.4 | Rückkopplung | 653 |
| § 44.2 | Regelkreis | 650 | § 45 | Informationsübertragung | 655 |

KAPITEL 10 Physikalische Messung – Messfehler

- | | | | | | |
|--------|---|-----|------|---------------------------------------|------------|
| § 46 | Beispiele einiger Messgeräte | 659 | § 47 | Systematische und zufällige
Fehler | 665 |
| § 46.1 | Messung von Längen, Flächen,
Volumen | 659 | § 48 | Fehlerrechnung | 667 |
| § 46.2 | Zeitmessung | 662 | | Aufgaben | 669 |

Anhang

- | | | | |
|-------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| Mathematische Grundlagen | 671 | Weiterführende Lehrbücher | 714 |
| Kurzer historischer Überblick | 698 | Einige physikalische Konstanten | 715 |
| Lösungen zu den Aufgaben | 709 | Das griechische Alphabet | 717 |

Sachregister

718

- Der Autor 759

Physikalische Größen, Einheiten, Mengenbegriffe

Die Physik ist eine Naturwissenschaft, welche für die Erfassung von Gesetzmäßigkeiten der Natur nicht nur Beobachtungen anstellt und rein qualitative Beschreibungen abgibt, sondern überwiegend quantitative Aussagen mittels genau durchgeführter Messungen macht. Sehr oft konnten Naturgesetze aus zahlenmäßigen Zusammenhängen, gewonnen durch Messungen, abgeleitet werden. Präzise Messmethoden, mehrfach wiederholte kritisch durchgeführte Einzelmessungen und eine solide Fehlerbetrachtung sind dabei unabdingbar.

Wir wollen in diesem Kapitel die Grundbegriffe des Messens ansprechen, die Basisgrößen und -einheiten des internationalen Einheitensystems und ihre Definitionen kennen lernen, um dann noch einige grundlegende Mengen- und Größenbegriffe zu betrachten. Ergänzende Bemerkungen zu physikalischen Messungen, insbesondere der dabei möglicherweise auftretenden Messfehler und ihrer Behandlung finden sich im Kapitel 10.

§ 1 Einheit, Maßzahl, Dimension

Eine **physikalische Größe** beschreibt Eigenschaften und Beschaffenheit physikalischer Objekte, Zustände oder Vorgänge. Die verschiedenen Arten physikalischer Größen werden auf möglichst wenige **Basisgrößen** zurückgeführt. Diesen Basisgrößen wird eine willkürlich ge-

wählte Bezugsgröße zugeordnet, die **Einheit**. Alle anderen physikalischen Größen sind aus diesen Basisgrößen abgeleitete Größen mit abgeleiteten Einheiten. Die Basisgrößen und deren Einheiten sind international festgelegt und werden im nachfolgenden Paragraphen detailliert behandelt. Einige abgeleitete Größen mit ihren Einheiten, wie beispielsweise die Dichte, die Geschwindigkeit, die Kraft, der Druck, die Energie, die elektrische Feldstärke etc., werden z. T. ebenfalls angeführt, jedoch erst in den entsprechenden Kapiteln definiert und eingehend besprochen.

Zur Bestimmung physikalischer Größen muss ein Messverfahren vereinbart werden. Bei dieser Messung wird die zu bestimmende Größe mit der *Einheit* der Größe gleicher Art verglichen. Die bei diesem Vergleich sich ergebende reelle Zahl heißt der **Zahlenwert** (früher: die *Maßzahl*). Eine physikalische Größe ist also immer gleich Zahlenwert mal Einheit.

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}$$

Beispiel: Bestimmung des Abstandes zweier Punkte P_1 und P_2 . Das vereinbarte Messverfahren ist das Anlegen eines Maßstabes. Auf dem Maßstab ist das Meter, die Einheit der Größe gleicher Art, abgetragen, mit welcher der Abstand der beiden Punkte verglichen wird. Dies ergibt den Zahlenwert. Der Abstand der beiden Punkte ist dann als Zahlenwert mal Einheit bekannt; etwa: $P_1 P_2 = 25 \text{ m}$.

Bei Wechsel der Einheit einer Größe ergibt sich i. Allg. ein anderer Zahlenwert. Wird beispielsweise die Fläche A eines Rechtecks zunächst in

der Einheit mm^2 dargestellt und dann stattdessen für die Länge der Seitenkanten des Rechtecks die Einheit cm verwendet, d. h. die Fläche soll nun in cm^2 angegeben werden, so ändert sich der Zahlenwert der Flächenangabe um den Faktor $(10^{-1})^2 = 10^{-2}$. Zu beachten ist, dass bei Wechsel der Einheit einer Größe, im Beispiel hier jene der Länge, u. U. entsprechende Potenzen der Umrechnungsfaktoren zwischen den Einheiten dieser Größe berücksichtigt werden müssen (im Beispiel der Angabe einer Fläche ist es das Quadrat des Umrechnungsfaktors der Längeneinheit).

Allgemein gilt bei Wechsel der Einheit einer Größe:

Für die **gleiche** Größe ergibt sich beim Übergang zu einer um den Faktor k größeren (bzw. kleineren) Einheit, ein $1/k$ -fach kleinerer (bzw. k -fach größerer) Zahlenwert der Größe.

Umrechnungen zwischen unterschiedlichen Einheiten sind i. Allg. auch erforderlich, wenn bei der Darstellung der Größen ein Wechsel des zugrunde liegenden Maßsystems vorgenommen wird. Eine Länge sei z. B. in ‚inch‘ ($1 \text{ inch} \cong 2,54 \text{ cm}$) angegeben, wie mitunter im angelsächsischen Bereich noch häufig verwendet. Es ist dann der Zahlenwert einer in $(\text{inch})^2$ bestimmten Fläche mit dem Faktor $(2,54)^2$ zu multiplizieren, um den Zahlenwert für die Flächenangabe in cm^2 zu erhalten.

Die **Dimension** ist die Beschreibung der physikalischen Größe in ihren Basisgrößen (ohne Einheit). Die Dimension ist also nur abhängig von der Wahl der Basisgröße, nicht aber von der Einheit, in der die physikalische Größe gemessen wird.

Beispiel: Die Geschwindigkeit ist gegeben durch

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \text{ dann ist die Dimension der Geschwindigkeit}$$

$$v = \frac{\text{Länge}}{\text{Zeit}}.$$

Physikalische Größen können sowohl **skalare** als auch **vektorielle Größen** sein. Wie im Anhang Mathematische Grundlagen, V.A. behandelt wird, bezeichnet man eine Größe, die bei vorgegebener Maßeinheit, allein durch die Angabe einer *einzig*en Zahl, den **Betrag**, eindeutig festgelegt ist, als einen **Skalar**. Beispiele für skalare Größen sind: die Masse, die Zeit, die Frequenz, die Dichte, das Volumen, die Arbeit, die Energie, die Leistung, die Temperatur, die Wärmekapazität, die Brechzahl etc.

Zur Beschreibung eines **Vektors** sind zwei Angaben erforderlich, ein **Betrag** (reine Zahl, i. Allg. mit Maßeinheit) und eine **Richtung**, wie beispielsweise zur Angabe von Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Impuls, Winkelgeschwindigkeit, Drehmoment, Drehimpuls, oder elektrischer und magnetischer Feldstärke, u. v. a. m.

Zwei einfache Beispiele: Die Angabe einer Verschiebung im Raum, z. B. um einen Weg der Länge von 50 m, oder die Angabe einer Windgeschwindigkeit von 50 km/h ist jeweils keine vollständige Beschreibung. Erst durch die zusätzliche Angabe einer Richtung, der „Bewegungsrichtung“, in welche die Verschiebung längs des Weges stattfindet bzw. der Wind bläst, werden diese Größen vollständig bestimmt. Der *Weg* und die *Geschwindigkeit* sind somit Vektoren.

§ 2 Internationales Einheitensystem

Für die Einheiten der physikalischen Größen werden die in der Bundesrepublik Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen Einheiten des ‚*Système International d’Unités*‘ (*SI-Einheit*) verwendet. (Zum Teil noch gebräuchliche Einheiten aus anderen Maßsystemen werden in einigen Fällen als Erinnerungshilfe mit angegeben.)

Die Größen der verschiedenen Teilgebiete der Physik lassen sich auf insgesamt sieben Basisgrößen zurückführen (Tab. 2.1).

Tab. 2.1

Basisgröße	SI-Einheit	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Alle anderen SI-Einheiten sind aus diesen Basiseinheiten abgeleitete Einheiten.

§ 2.1 Definitionen der SI-Basiseinheiten

Meter (m): Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während des Intervalls von $\frac{1}{299\,792\,458}$ s durchläuft.

Die Überlieferung der Festlegung von Längeneinheiten reicht weit zurück bis in die Zeit Mesopotamiens und des frühen Ägypten. So waren z. B. in Ägypten übliche Längenmaße die *Handbreite*, die *Elle* oder der *Fuß*, natürlich jeweils abhängig von der festlegenden Person bzw. dem Personenkreis. In der hellenistischen Zeit wurde in einigen der wissenschaftlichen Schulen u. a. bereits die Kugelgestalt der Erde als existent belegt und auch deren Umfang, womit der Schritt zur später erfolgten Festlegung der Längeneinheit Meter nicht mehr weit war. Im Jahr 1101 führte in England Henry I. die heute in den angelsächsischen Ländern noch vielfach verwendeten Längenmaße ein, wie „Inch“ (1 in = 1" \cong 2,54 cm: Breite seines Daumens), „Yard“ (1 yd \cong 91,44 cm: Abstand zwischen seiner Nasenspitze und dem senkrecht nach oben gespreizten Daumen seines ausgestreckten Armes) und „Foot“ (1 ft \cong 30,48 cm: Länge seines Fußes). Erst Eduard II. von England legte die Längeneinheit „Inch“ im Jahre 1234 als offizielles Längenmaß fest, als die Länge, die drei hintereinander gelegten Reiskörnern entspricht. Ähnlich alte Maßeinheiten des europäischen Kontinents sind der *Schritt* (Länge eines Schrittes), die *Elle* (Abstand zwischen Ellenbogen und Spitze des Mittelfingers), der *Fuß* (Länge eines Fußes), die *Spanne* (Abstand zwischen jeweils der Spitze des kleinen Fingers und des Daumens der gespreizten Hand) oder ein *Klafter* (Längenabstand zwischen den ausgestreckten Armen eines erwachsenen Mannes). So gab es beispielsweise

einen *preußischen Fuß* und einen *württembergischen Fuß* oder eine *preußische, badische und Bamberger Elle* etc., die aber jeweils unterschiedlich lang waren. Hier stellte die Festlegung der Längeneinheit Meter durch den Beschluss der französischen Nationalversammlung nach Ende der französischen Revolution Ende des 18. Jahrhunderts einen großen Fortschritt in Richtung einer Vereinheitlichung und Vergleichbarkeit der Längenmessung dar. Die Längeneinheit Meter leitet sich über den Erdumfang als dem zehnmillionsten Teil eines Erdmeridianquadranten ab. Aufgrund dieser Definition wurde nach mehreren Zwischenschritten schließlich am 26. September 1889 das sog. *Urmeter* als Prototyp des Meters aus einer Legierung, bestehend aus 90% Platin und 10% Iridium realisiert, das in Sèvres bei Paris unter konstanten Bedingungen aufbewahrt wurde. Das Längennormal, dessen Querschnitt X-förmig ist (Länge der Schenkel jeweils 20 mm) hat eine Gesamtlänge von 102 cm, mit zwei Marken innerhalb einer Strichgruppe, die bei einer Temperatur von 0 °C einen Abstand von einem Meter haben. Die mangelhafte Qualität dieser Striche bedingte die relative Unsicherheit mit der das Meter damals realisiert werden konnte, die relative Genauigkeit betrug $\pm 1 \cdot 10^{-7}$. Das Urmeter wird auch heute noch in Sèvres bei Paris aufbewahrt. Die Prototypdefinition von 1889 wurde 1960 aber aufgegeben und durch einen atomaren Standard ersetzt, wobei das Meter mittels einer interferometrischen Messmethode (s. § 46.1) als ein bestimmtes Vielfaches der Vakuumwellenlänge eines optischen Übergangs des Krypton-86-Isotops festgelegt wurde. Die XVII. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (kurz: CGPM, Conférence Générale des Poids et Mesures) löste schließlich 1983 diese Festlegung durch die oben angegebene ab: die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, eine universelle Naturkonstante, wird definiert zu exakt $c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und die Längeneinheit Meter über eine Laufzeitdefinition festgelegt, welche mit Hilfe der modernen Frequenzmesstechnik mit großer Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bestimmt werden kann.

Beispiele einiger Längen sind in Tab. 46.1 (§ 46.1) zusammengestellt.

Kilogramm (kg): Das Kilogramm ist die Einheit der Masse, es ist gleich der Masse des internationalen Kilogramm-Prototyps.

Ursprünglich wurde das Kilogramm als die Masse von 1 dm³ Wasser bei einer Temperatur von +4 °C definiert. Die I. CGPM, 1889 legte die Masseneinheit durch die Masse eines Zylinders mit einem Durchmesser und einer Höhe von je 39 mm fest, der aus einer chemisch und physikalisch resistenten Legierung aus 90% Platin und 10% Iridium angefertigt ist, mit einer Dichte von ca. $21,5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Dieses *Urki-*

gramm wird im Internationalen Büro für Maß und Gewichte in Sèvres bei Paris unter konstanten Bedingungen (wie das Urmeter) aufbewahrt.

Das Kilogramm ist im System die einzige Einheit, die nicht durch Natur- oder Fundamentalkonstanten festgelegt ist, sondern noch einer materiellen Verkörperung bedarf. Die Forschung ist seit vielen Jahren schon auf der Suche nach einer Festlegung des Kilogramms auf der Basis einer unveränderlichen Methode, jedoch hat weder eines der Experimente noch einer der Vorschläge die Reproduzierbarkeit erreicht, um zu einer Neudefinition zu gelangen.

Sekunde (s): Eine Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer eines Strahlungsübergangs von Atomen des Nuklids ^{133}Cs (Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus im Grundzustand).

Bei physikalischen Zeitmessungen kann nur die Differenz von zwei Zeiten, ein Zeitintervall, ermittelt werden. Es ist unmöglich, ähnlich wie bei der Angabe der Lage im Raum, physikalisch eine „absolute Zeit“ anzugeben.

Die Festlegung der Sekunde erfolgte bis 1956 auf der Basis der Drehung der Erde um ihre eigene Achse und eine Sekunde war der 86 400ste Teil des mittleren Sonnentages. Schon erste Messungen im Jahre 1936 mit Quarzuhren zeigten, dass die Erdrotation jahreszeitliche und auch unregelmäßige nicht vorhersehbare Schwankungen aufweist sowie eine Abbremsung der Erdrotation zu beobachten ist. Die relative Unsicherheit bei der Bestimmung der Weltzeitsekunde lag bei ca. 10^{-8} . Danach dienten bestimmte Bruchteile der als sehr gleichmäßig angesehenen Umlaufzeit der Erde um die Sonne (sog. mittleres tropisches Jahr) zur Festlegung der Sekunde (Ephemeriden-Sekunde). Die oben angegebene Definition der SI-Sekunde beruht auf atomarer Grundlage und wurde im Jahre 1967 durch die XIII. CGPM eingeführt.

Die Tab. 46.2 (§ 46.2) enthält eine Auswahl von in der Natur auftretenden Zeiten.

Ampere (A): Das Ampere ist die Stärke eines zeitlich konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei im Abstand von 1 Meter angeordnete parallele Leiter fließend, zwischen diesen eine Kraft erzeugt, die pro Meter Leiterlänge $2 \cdot 10^{-7}$ N beträgt.

Dabei ist vorausgesetzt, dass die zwei parallelen Leiter sich im Vakuum befinden, vernachlässigbare kreisförmige Querschnittsfläche besitzen, geradlinig und unendlich lang sind.

Die früher übliche Definition der Stromstärke bzw. Ladungseinheit erfolgte über die chemische Wirkung des Stromes: die Stromstärke von 1 A scheidet in 1 s

bei einem elektrolytischen Leitungsvorgang in einer Silbersalzlösung 1,118 mg Silber an der Kathode ab (s. § 25.3.2). Aus Gründen der Messgenauigkeit wurde 1948 durch die IX. CGPM die auf der Kraftwirkung zwischen zwei Strömen (s. §§ 26.3 u. 26.3.1) basierende Festlegung getroffen.

Kelvin (K): Das Kelvin ist das $\frac{1}{273,16}$ -fache der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.

Die XIII. CGPM führte die Temperaturmessung auf der Basis der thermodynamischen (oder absoluten) Temperaturskala mit der Einheit Kelvin (K) als Basiseinheit ein. Daneben dürfen Temperaturdifferenzen auch in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) angegeben werden (s. § 12.2).

Mol (mol): Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, welches so viele Einzelteilchen enthält, wie Atome in 0,012 kg des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind.

Anmerkung: Bei Verwendung des Mols müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen, andere Teilchen oder spezifizierte Gruppen solcher Teilchen sein.

Die physikalische Größe Stoffmenge n mit der Einheit mol wurde von der XIV. CGPM 1971 festgelegt und ist als die Basisgröße der Atomistik und des Diskontinuums zu betrachten. Sie trägt der Abzählbarkeit gleicher Individuen eines Systems Rechnung und ist deren Anzahl N proportional (s. § 3).

Candela (cd): Die Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, welche monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz in eine bestimmte Richtung aussendet, in der die Strahlstärke $1/683$ Watt durch Steradian beträgt.

Diese neue Definition der Candela nahm die XVI. CGPM im Jahre 1979 an und ersetzte damit die seitherige Festlegung (XIII. CGPM, 1967) der Candela, als der Lichtstärke in senkrechter Richtung einer $1/600\,000$ m² großen Oberfläche eines schwarzen Körpers bei der Temperatur des erstarrenden Platins (2042,5 K) unter einem Druck von $101\,325$ N·m⁻².

Früher wurde als Einheit die Hefnerkerze (HK) verwendet, welche die Lichtstärke einer Amylacetatlampe bestimmter Flammhöhe zugrunde gelegt hatte.

§ 2.2 Vorsilben zur Bezeichnung von dezimalen Vielfachen und Teilen

Die physikalischen Größen treten in den einzelnen Gebieten der Physik in sehr verschiedenen Größenordnungen auf. Zur bequemeren Schreibweise hat man daher ein international gültiges System von Kurzzeichen für dezimale Vielfache und Teile der Einheiten vereinbart, welche anstatt von Zehnerpotenzen als Vorsatz vor die SI-Einheit gesetzt werden. Das Hintereinandersetzen mehrerer SI-Vorsätze ist unzulässig (z. B. **nicht** 1 μm , **sondern** 1 nm). Eine Zusammenstellung findet sich in Tab. 2.2.

Einige Beispiele für die Anwendung der Vorsilben sowie weitere Einheiten, die gemeinsam mit dem Internationalen Einheitensystem verwendet werden bei:

- Längenangaben: 1 fm = 10^{-15} m; 1 nm = 10^{-9} m;
1 mm = 10^{-3} m; 1 cm = 10^{-2} m;
1 dm = 10^{-1} m; 1 km = 10^3 m
Vielfach verwendet wird in der Atom- und Kernphysik noch das Ångström (Einheitenzeichen Å):
1 Å = 10^{-10} m
- Flächenangaben:
1 m² = 10^2 dm² = 10^4 cm² = 10^6 mm²;
1 μm^2 = 10^{-12} m². Mitunter wird noch das Hektar (**ha**) bzw. Ar (**a**) verwendet:
1 ha = 100 a; 1 a = 100 m²
In der Kernphysik findet man häufig das Barn (Einheitenzeichen b): 1 b = 10^{-28} m² = 10^{-24} cm²
- Volumenangaben:
1 m³ = 10^3 dm³ = 10^6 cm³ = 10^9 mm³
Gemeinsam mit dem SI verwendet wird **der Liter** (Einheitenzeichen **l** oder **L**):
1 L = 1 dm³ = 10^{-3} m³
Gebraucht werden oft folgende dezimale Vielfache und Teile:
1 hL = 100 L = 10^{-1} m³; 1 dL = 10^{-1} L = 10^2 cm³;
1 cL = 10^{-2} L = 10 cm³; 1 mL = 10^{-3} L = 1 cm³;
1 μL = 10^{-6} L = 1 mm³
- Massenangaben: Als einzige SI-Basiseinheit enthält die Masse aus historischen Gründen bereits im Namen eine Vorsilbe. Die Bezeichnung der dezimalen Vielfachen und Teile der Basiseinheit der Masse werden daher durch Hinzufügen der Vorsilben vor das Wort „Gramm“ gebildet, wie beispielsweise:
1 kg = 10^3 g = 10^6 mg; 1 μg = 10^{-6} g = 10^{-9} kg.
Gemeinsam mit dem SI verwendet wird die Tonne (Einheitenzeichen t): 1 t = 1 Mg = 10^3 kg
Vielfache einer Tonne können auch mit den ent-

Tab. 2.2

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

sprechenden Präfixen z. B. t, kt, Mt, Gt etc. verwendet werden.

Die Masse von Edelsteinen darf bei Wägungen auch in metrischen Karat (Kurzzeichen ct oder Kt) angegeben werden, wobei 1 ct = 0,2 g entspricht.

- Zeitangaben:
1 ps = 10^{-3} ns = 10^{-12} s; 1 μs = 10^{-3} ms = 10^{-6} s.
Gemeinsam mit dem SI verwendet wird:
⇒ die Minute (Einheitenzeichen **min**):
1 min = 60 s
⇒ die Stunde (Einheitenzeichen **h**):
1 h = 60 min = 3600 s
⇒ der Tag (Einheitenzeichen **d**):
1 d = 24 h = 86 400 s
Das allgemeine Einheitenzeichen für die Zeiteinheit ein Jahr ist **1 a** unabhängig von seiner speziellen Definition.
- Ebener Winkel: Gemeinsam mit dem SI verwendet wird:
⇒ der Grad (Einheitenzeichen $^\circ$): $1^\circ = (\pi/180)$ rad
⇒ die Winkelminute (Einheitenzeichen $'$):
 $1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800)$ rad.
⇒ die Winkelsekunde (Einheitenzeichen $''$):
 $1'' = (1/60)' = (\pi/648000)$ rad.

§ 2.3 Abgeleitete SI-Einheiten mit besonderem Namen

Ausgehend von den in § 2.1 definierten Basiseinheiten ist das Internationale Einheitensystem SI als ein kohärentes Maßeinheitensystem aufgebaut. Die Maßeinheit einer abgeleiteten physikalischen Größe wird aus den Basiseinheiten ebenso multiplikativ zusammengesetzt, wie die physikalische Größe selbst als multiplikative Verknüpfung aus den Basisgrößen definiert ist.

Beispiele: Die abgeleitete Einheit einer *Fläche*, mit der Dimension $(\text{Länge})^2$, ergibt sich zu: Meter \cdot Meter = $\text{m} \cdot \text{m} = \text{m}^2$, dem Quadratmeter (auch Meterquadrat), oder für das *Volumen*, mit der Dimension $(\text{Länge})^3$, folgt die Einheit Kubikmeter (auch Meterkubus) zu Meter \cdot Meter \cdot Meter = $\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{m} = \text{m}^3$.

Die physikalische Größe *Geschwindigkeit* hat gemäß ihrer Definition die Dimension $(\text{Länge} \cdot \text{Zeit}^{-1})$ und somit lautet die abgeleitete Einheit $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, d. h. Meter pro Sekunde.

Der *Impuls*, definiert als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit, hat die Dimension $(\text{Masse} \cdot \text{Länge} \cdot \text{Zeit}^{-1})$ und somit die abgeleitete Einheit $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Unter den abgeleiteten SI-Einheiten gibt es welche, die mit einem besonderen Namen versehen sind und deren Kurzform für die Produkte der Basiseinheiten verwendet werden. Einige von ihnen sind mit den Namen von Wissenschaftlern verknüpft, die sich um die betreffenden Teilgebiete der Physik verdient gemacht haben. In Tabelle 2.3 sind die wesentlichen abgeleiteten Einheiten, die einen besonderen Namen und besondere Einheitenzeichen haben, angegeben.

Außer den in diesem Abschnitt angegebenen SI-Einheiten für die Basisgröße Masse und die abgeleitete Größe Energie (Tab. 2.3), werden neben dem SI-System für spezielle Zwecke besondere Einheiten für diese Größen benutzt, deren in SI-Einheiten ausgedrückten Größenwerte experimentell ermittelt werden (Tab. 2.4). Dabei wird mit N_A (in mol^{-1}) die Avogadro-Konstante (s. § 3) und mit e (in C) die Elementarladung (s. § 23) bezeichnet.

Tab. 2.3

Größe	Name und Einheitenzeichen		Darstellung in	
			Basiseinheiten	anderen SI-Einheiten
Ebener Winkel	Radian	rad	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	
Raumwinkel	Steradian	sr	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$	
Frequenz	Hertz	Hz	s^{-1}	
Kraft	Newton	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	J/m
Druck	Pascal	Pa	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	N/m ²
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	N \cdot m
Leistung, Energiestrom	Watt	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$	J/s
elektrische Ladung, Elektrizitätsmenge	Coulomb	C	$\text{s} \cdot \text{A}$	A \cdot s
elektrisches Potential, elektrische Spannung, elektromotorische Kraft	Volt	V	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$	W/A
elektrische Kapazität	Farad	F	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$	C/V
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$	V/A
elektrischer Leitwert	Siemens	S	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$	A/V
magnetischer Fluss	Weber	Wb	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$	V \cdot s
magnetische Flussdichte, Induktion	Tesla	T	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$	Wb/m ²
Induktivität	Henry	H	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$	Wb/A
Lichtstrom	Lumen	lm		cd \cdot sr
Beleuchtungsstärke	Lux	lx		$\text{m}^{-2} \cdot \text{cd} \cdot \text{sr}$
Aktivität (radioaktive)	Becquerel	Bq	s^{-1}	
Energiedosis	Gray	Gy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	J/kg
Äquivalentdosis	Sievert	Sv	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	J/kg

Tab. 2.4

Größe	Name	Einheiten- zeichen	Definition
Masse	atomare Massen- einheit	u	$1 \text{ u} = 10^{-3} \cdot N_{\text{A}}^{-1} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
	Energie	Elektronvolt (früher: Elektronen- volt)	$1 \text{ eV} = e \text{ J/C}$ $= 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Zur atomaren Masseneinheit siehe auch § 38.1 und zur Elementarladung § 23.2.

§ 3 Mengenbegriffe – Bezogene Größen

Mengenbegriffe

Masse: Die *Masse* ist eine der wichtigsten Eigenschaften der materiellen Stoffe. Sie ist eine für den betreffenden Körper charakteristische und ortsunabhängige physikalische Größe. Besitzt beispielsweise 1 dm^3 Wasser eine bestimmte Masse, dann haben 2 dm^3 Wasser die doppelte und 3 dm^3 die dreifache Masse. Eine Änderung des Aggregatzustandes (d.h. fest zu flüssig zu gasförmig und *vice versa*) ist ohne Einfluss auf die Masse. Gefriert z. B. Wasser zu Eis oder wandelt es sich in Dampf um, so bleibt die Masse erhalten.

Die Masse, häufig mit dem Buchstaben m bezeichnet, ist ein Skalar und stellt eine der sieben Basisgrößen des SI dar (s. § 2).

Einheit:

Kilogramm (kg)

Weitere gebräuchliche Einheiten:

1 Tonne (t) = 10^3 kg

1 Gramm (g) = 10^{-3} kg

Tab. 3.1

	Masse in kg
Elektron	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Proton	$1,673 \cdot 10^{-27}$
Neutron	$1,675 \cdot 10^{-27}$
Bleiatom	$3,441 \cdot 10^{-25}$
Virus	ca. $10^{-21} \dots 10^{-19}$
Staubkorn	ca. 10^{-10}
Erdmond	$7,36 \cdot 10^{22}$
Erde	$5,98 \cdot 10^{24}$
Sonne	$1,99 \cdot 10^{30}$
unsere Galaxie (Milchstraße)	ca. $6 \cdot 10^{41}$
gesamtes Universum	ca. 10^{52}

In Tabelle 3.1 sind einige Beispiele von Massen zusammengestellt.

Volumen: Das *Volumen* V ist wie die Masse ein Begriff zur Beschreibung bestimmter Mengen eines Stoffes. Der Rauminhalt eines Körpers beispielsweise im dreidimensionalen Raum hat die Dimension (Länge)³.

Einheit:

Kubikmeter, auch Meterkubus (m^3)

Weitere gebräuchliche Einheiten (s. auch § 2.2):

$1 \text{ mm}^3 = 10^{-3} \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ dm}^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$

$1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L}$

Das Volumen eines Stoffes ist von Druck und Temperatur abhängig.

Stoffmenge: Der Mengenbegriff *Stoffmenge* ist eine der Basisgrößen des SI. Die Stoffmenge n ist der Anzahl N näher zu bezeichnender gleicher Einzelteilchen eines Systems (einer Substanz) proportional. Die Einzelteilchen können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein. Der Proportionalitätsfaktor ist $(N_{\text{A}})^{-1}$, wobei die **Avogadro-Konstante** N_{A} die Anzahl der Teilchen in einem Mol der Substanz angibt (s. auch §§ 13.2.3 und 14).

Definition:

$$n = \frac{N}{N_{\text{A}}} \quad (3.1)$$

dabei ist der Zahlenwert der **Avogadro-Konstante** N_A gegeben durch:

$$N_A = (6,02214179 \pm 0,00000030) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \\ \approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Einheit:

Mol (mol) (Basiseinheit)

Beispiel: Gemäß der Definition des Mol enthalten verschiedenartige Substanzen pro Mol jeweils die gleiche Anzahl von Teilchen, d.h. ein mol Eis, ein mol Wasser, wie auch ein mol Benzol enthalten die gleiche Anzahl von Molekülen.

Weitere Erläuterungen und Beispiele § 13.2.3.

Teilchenanzahl: Die Anzahl der Teilchen N einer Substanz ist ebenso ein Mengenbegriff. Die Teilchenanzahl ist der Stoffmenge n proportional (s. auch Gleichung (3.1)).

Definition:

$$N = n \cdot N_A \quad (3.2)$$

Einheit:

dimensionslos

Bezogene Größen

Mit den Größen Masse, Volumen und Stoffmenge bzw. Teilchenanzahl können bestimmte Mengen eines Stoffes beschrieben werden. Zur Charakterisierung von Stoffen werden aber auch oft sog. bezogene Größen verwendet, wie volumenbezogene, massenbezogene und stoffmengenbezogene sowie bei Stoffgemischen und Lösungen, Größen, die einen „Gehalt“ bzw. eine „Konzentration“ bezeichnen.

a) Volumenbezogen

Dichte: Verschiedene Stoffe können bei gleicher Masse unterschiedliche Volumina aufweisen. Typisch für den betreffenden Stoff ist der Quotient aus seiner Masse und seinem Volumen, der als *Dichte* bezeichnet wird, zur Unterscheidung mitunter präziser als *Massendichte*. Man verwendet für die Dichte meist den griechischen Buchstaben ρ .

Definition:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

Dichte = Masse durch Volumen

Einheit:

$$\frac{\text{Kilogramm}}{(\text{Meter})^3} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Weitere gebräuchliche Einheit:

$$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \left(\text{Umrechnung: } 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right);$$

$$\text{aber auch: } \frac{\text{kg}}{\text{L}}; \frac{\text{g}}{\text{L}}; \frac{\text{g}}{\text{mL}}$$

Mit den weiter unten definierten Größen *molare Masse* M und *molares Volumen* V_m kann die Dichte auch durch $\rho = M/V_m$ angegeben werden.

Die Dichte der Stoffe ist i.Allg. abhängig von Temperatur (s. §13.1.3) und Druck (s. §13.2.1). Bei festen und auch bei flüssigen Substanzen ändert sich die Dichte über weite Bereiche des Druckes und der Temperatur nur wenig. Dagegen ist die Dichte von Gasen stark druck- und temperaturabhängig. Die Tabelle 3.2 zeigt Werte der Dichte einiger fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe für bestimmte Werte von Druck und Temperatur.

Die Dichte von Stoffen wird mitunter auf die Dichte bestimmter Bezugssubstanzen bezogen und als *Dichteverhältnis* bzw. *relative Dichte* angegeben. Feste Stoffe und Flüssigkeiten werden gewöhnlich auf Wasser von 4 °C ($\rho = 0,999975 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) bezogen und für Gase ist die Bezugssubstanz üblicherweise Luft bei entsprechenden Werten von Druck und Temperatur.

Beispiele von Methoden zur Dichtebestimmung werden in § 9.6 beschrieben.

Die Dichte darf keinesfalls verwechselt werden mit dem manchmal (leider) immer noch verwendeten Begriff der „Wichte“ bzw. des „spezifischen Gewichtes“, definiert als der Quotient von *Gewicht/Volumen* und demzufolge mit der Einheit N/m^3 . Da das Gewicht (als Kraft in Richtung des Erdmittelpunktes) an verschiedenen Orten der Erdoberfläche unter-

Tab. 3.2

Feste Stoffe (bei 20 °C)	Dichte in $10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Feste Stoffe (bei 20 °C)	Dichte in $10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Aluminium, rein	2,702	Holz, trocken	0,4 ... 0,8
Bernstein	1,0 ... 1,1	Kupfer, rein	8,933
Blei	11,34	Papier	0,7 ... 1,2
Diamant	2,6	Paraffin	0,8 ... 0,9
Eis (0 °C)	0,917	Platin	21,4
Eisen, Roh-, grau	6,6 ... 7,4	Plexiglas	1,2
Fette	0,90 ... 0,95	Polyamid	1,08 ... 1,14
Germanium	5,323	(Perlon, Nylon u. ä.)	
Glas, Fenster-	2,48	Polivinylchlorid (PVC)	1,38
Glas, Pyrex-	2,59	Porzellan	2,3 ... 2,5
Glas, Quarz-	2,2	Silber	10,5
Gold	19,29	Teflon (Hostaflon)	2,1 ... 2,2
Flüssigkeiten (bei 20 °C)	Dichte in $10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Flüssigkeiten (bei 20 °C)	Dichte in $10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Aceton	0,791	Methylalkohol (Methanol)	0,7915
Äthylalkohol (Ethanol)	0,7892	Milch, mittelfett	1,032
Benzin	0,68 ... 0,78	Quecksilber	13,546
Benzol	0,879	Salpetersäure (100 %)	1,512
Chloroform	1,489	Salzsäure (40 %)	1,195
Diethylether	0,714	Schwefelsäure (100 %)	1,834
Dieselmotortreibstoff	0,85 ... 0,88	Silikonöl	0,76 ... 0,97
Erdöl	0,73 ... 0,94	Wasser (H ₂ O), rein	0,9982
Glycerin	1,261	Wasser, Meer-	1,01 ... 1,03
Heizöl	0,95 ... 1,08	Wasser, schweres (D ₂ O)	1,105
Gase (bei 0 °C, 1013 hPa)	Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Gase (bei 0 °C, 1013 hPa)	Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Acetylen	1,173	Luft	1,2928
Ammoniak	0,771	Methan	0,7168
Argon	1,784	Neon	0,9002
Butan	2,732	Ozon	2,139
Chlor	3,214	Propan	2,0096
Dimethylether	2,1098	Sauerstoff	1,4290
Helium	0,1785	Stadtgas	ca. 0,6
Kohlenstoffdioxid	1,977	Stickstoff	1,2505
Kohlenstoffmonoxid	1,250	Wasserstoff	0,0899
Krypton	3,744	Xenon	5,897

schiedliche Werte annimmt (s. § 5.1.2), ist die Wichte keine Stoffkonstante und sollte daher nicht verwendet werden.

Teilchenanzahldichte: Sie gibt die Anzahl der Teilchen (Def. s. Gleichung (3.2)) in der Volumeneinheit an.

Definition:

$$\varrho_N = \frac{N}{V} \quad (3.4)$$

Einheit:

$$\text{m}^{-3}$$

b) Massenbezogen

Massenbezogene Größen werden üblicherweise als *spezifische Größen* bezeichnet. Beispiele dazu sind die *spezifische Wärmekapazität* als Quotient von Wärmekapazität und Masse (s. dazu §§ 15.1 und 15.1.1) und das *spezifische Volumen*.

Spezifisches Volumen: Als Quotient aus Volumen V und Masse m stellt das spezifische Volumen v den Kehrwert der (Massen-)Dichte ϱ dar.

Definition:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\varrho} \quad (3.5)$$

Einheit:

$$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

c) Stoffmengenbezogen

Auf die Stoffmenge bezogene Größen bezeichnet man als „molare Größen“, die stoffmengenbezogene Masse bzw. das stoffmengenbezogene Volumen wird daher *molare Masse* bzw. *molares Volumen* genannt. Beispiele zu diesen Größen finden sich in § 13.2.3.

Molare Masse: Die molare Masse M eines Stoffes, bezogen auf seine Einzelteilchen (Atome, Moleküle, etc.) ist der Quotient aus der Masse m und der Stoffmenge n des Teilchensystems.

Definition:

$$M = \frac{m}{n} \quad (3.6)$$

Einheit:

$$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

Weitere gebräuchliche Einheiten:

$$\frac{\text{mg}}{\text{mol}}, \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Beispiele dazu siehe § 13.2.3.

Molares Volumen: Das molare Volumen V_m eines Stoffes ist der Quotient aus dem Volumen V und der Stoffmenge n des Teilchensystems.

Definition:

$$V_m = \frac{V}{n} \quad (3.7)$$

V_m ist, wie das Volumen V , von Druck und Temperatur abhängig.

Einheit:

$$\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

Weitere gebräuchliche Einheiten:

$$\frac{\text{L}}{\text{mol}} \text{ (bei Gasen); } \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \text{ (bei festen und flüssigen$$

Stoffen)

$$\left(\text{Umrechnungen: } 1 \frac{\text{L}}{\text{mol}} = 1 \frac{\text{dm}^3}{\text{mol}} = 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \right).$$

Weitere *molare Größen* sind beispielsweise die *molare Wärmekapazität* (s. § 15.1.1) oder die *molare Schmelz- und Verdampfungswärme* (s. dazu § 16.1).

d) Gehalt

Massengehalt: Angegeben wird der Quotient des *Massenanteils* einer Substanzkomponente B und der Gesamtmasse $\sum_i m_i$ der Mischsubstanz (z. B. einer Lösung oder eines Gasgemisches).

Definition:

$$w_B = \frac{m_B}{\sum_i m_i} \quad (3.8)$$

Einheit:

dimensionslos oder in %

Die früher verwendete Bezeichnung Massenbruch oder Gewichtsprozent (Gew.%) sollte nicht mehr verwendet werden.

Als Einheit für den Massegehalt sind außer den genannten, mehrere Möglichkeiten gebräuchlich und – mutatis mutandis – auch für den untenstehend angegebenen Volumen- und Stoffmengengehalt. Einige wichtige Einheiten, welche insbesondere oft zur Angabe von Nachweisgrenzen analytischer Untersuchungen verwendet werden, sind – stellvertretend – für den Massenanteil in Tab. 3.3 angegeben.

Tab. 3.3

Quotient zweier Masseneinheiten	$\frac{g}{g}$	$\frac{cg}{g}$	$\frac{mg}{g}$	$\frac{\mu g}{g}$	$\frac{ng}{g}$	$\frac{pg}{g}$
Dezimalquotient	1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
Verwendetes Einheitenzeichen	1	%	‰	ppm	ppb	ppt

Dabei bedeuten: ppm \equiv parts per million; ppb \equiv parts per billion; ppt \equiv parts per trillion, wobei im Angelsächsischen gilt: $10^9 =$ billion und $10^{12} =$ trillion.

Volumengehalt: Angegeben wird der Quotient des *Volumenanteils* der Substanzkomponente B und dem Gesamtvolumen $\sum V_i$ der Mischsubstanz (z. B. einer Lösung oder eines Gasgemisches).

Definition:

$$\varphi_B = \frac{V_B}{\sum_i V_i} \quad (3.9)$$

Einheit:

dimensionslos oder in %

Die früher verwendete Bezeichnung Volumenbruch oder Volumenprozent (Vol.%) sollte nicht mehr verwendet werden.

Zur Berechnung des Gesamtvolumens werden die Volumina der reinen Komponenten eingesetzt, das jedoch nicht unbedingt gleich $\sum_i V_i$ sein muß, da z. B. beim Lösen Volumeneffekte auftreten können.

Stoffmengengehalt: Angegeben wird der *Stoffmengenanteil* der Substanzkomponente B, d. h. der Anteil der Mole dieser Komponente an der Summe der Molzahlen $\sum_i n_i$ aller vorhandenen

Komponenten der Mischsubstanz. Der Stoffmengengehalt wurde bisher auch *Molenbruch* genannt.

Definition:

$$x_B = \frac{n_B}{\sum_i n_i} \quad (3.10)$$

Einheit:

dimensionslos oder in %

e) Konzentration

Massenkonzentration: Sie wird angegeben als der Quotient aus der Masse der Substanzkomponente B und dem Gesamtvolumen V der Mischsubstanz (z. B. einer Lösung).

Definition:

$$\rho_B^* = \frac{m_B}{V} \quad (3.11)$$

Einheit:

$$\frac{kg}{m^3}$$

Stoffmengenkonzentration: Die Stoffmengenkonzentration ist gegeben als Stoffmenge der Komponente des Stoffes B (d. h. die Anzahl der Mole dieser Substanz) dividiert durch das Gesamtvolumen der Mischsubstanz (z. B. einer Lösung).

Definition:

$$c_B = \frac{n_B}{V} \quad (3.12)$$

Einheit:

$$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \left(\frac{\text{mol Substanz}}{\text{m}^3 \text{ Lösung}} \right)$$

Weitere gebräuchliche Einheit:

$\frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} = \frac{\text{mol}}{\text{L}}$, mit der häufig verwendeten Bezeichnung **Molarität** für die Stoffmengenkonzentration.

Beispielsweise bezeichnet man eine Lösung von 2 mol/L als eine 2 molare Lösung und schreibt hierfür oft einfach: 2 M Lösung.

Molalität: Sie ist gegeben als Stoffmenge der Komponente des (z. B. gelösten) Stoffes B dividiert durch die Masse des Lösungsmittels m_L .

Definition:

$$m_B^* = \frac{n_B}{m_L} \quad (3.13)$$

Einheit:

$$\frac{\text{mol}}{\text{kg}} \left(\frac{\text{mol Substanz}}{\text{kg Lösungsmittel}} \right)$$

Als Größenzeichen soll für die Molalität nach IUPAP der Buchstabe m verwendet werden; um jedoch Verwechslungen zu vermeiden, wird in der Definition (3.13) für die Bezeichnung der Molalität m^* benützt.

Der Unterschied zwischen der Molarität in mol/l und der Molalität in mol/kg ist bei konstanter Temperatur für verdünnte wässrige Lösungen nicht sehr groß. Die Verwendung der Molalität als Konzentrationsmaß bietet den Vorteil von äußeren Parametern wie Druck und Temperatur unabhängig zu sein, da sie im Gegensatz zur Stoffmengenkonzentration (Molarität) nicht auf das Volumen bezogen ist.

Aufgaben

Aufgabe 3.1: Was versteht man unter einer *physikalischen Größe*?

Aufgabe 3.2: Welche *Basisgrößen* verwendet das „Internationale Einheitensystem SI“?

Aufgabe 3.3: Was versteht man unter einer *vektoriellen* und was unter einer *skalaren Größe*?

Aufgabe 3.4: Geben Sie die Einheit der *Länge*, der *Masse* und der *Zeit* im SI an.

Aufgabe 3.5: Wie werden die Einheiten der in Aufgabe 3.4 genannten Größen festgelegt?

Aufgabe 3.6: Wie lautet die Definition der SI-Einheit mol?

Aufgabe 3.7: Welche a) *dezimale Vielfache* und b) *dezimale Teile* gibt es im SI; wie werden sie benannt und wie lauten ihre Vorsatzzeichen?

Aufgabe 3.8: Wie wird die (*Massen*-)Dichte definiert und wie lautet ihre SI-Einheit?

Aufgabe 3.9: Was versteht man unter der *Avogadro-Konstante* und welchen Zahlenwert (mit Einheit) hat diese?

Aufgabe 3.10: Wie ist die *Stoffmengenkonzentration* definiert und wie lautet ihre Einheit?

Mechanik

Die Mechanik ist jenes Teilgebiet der Physik, in welchem die Bewegung bzw. die Bewegungsänderung und die Formänderung von Körpern unter der Wirkung von Kräften untersucht wird. Die dabei gewonnenen physikalischen Gesetze sind grundlegend und können beispielsweise ebenso zur Beschreibung der Bewegung geladener Teilchen in elektrischen und/oder magnetischen Feldern wie für die der Planeten im Gravitationsfeld der Sonne herangezogen werden. Die Natur der wirkenden Kräfte spielt dabei in der Beschreibung ihrer Wirkung durch die Gesetzmäßigkeiten der klassischen Mechanik eine untergeordnete Rolle. Weit über den Rahmen der Mechanik hinaus finden Begriffe und Gesetze der klassischen Mechanik – man denke z. B. an den Begriff der Energie, insbesondere an deren Erhaltungssatz – in allen Bereichen der Naturwissenschaften ihre Anwendung.

Wir beginnen den zu behandelnden Stoff der klassischen Newton'schen Mechanik mit der **Kinematik**, der Lehre von der *Bewegung* von Körpern in Raum und Zeit.

§ 4 Bewegungen

Ein Körper ist im **Zustand der Ruhe**, wenn er seine Lage in Bezug auf seine Umgebung bzw. auf ein die Umgebung beschreibendes Koordinatensystem **mit der Zeit nicht verändert**.

Trägt man auf der Abszisse eines rechtwinkligen Koordinatensystems die *Zeit t* und auf der Ordinate den *Weg s* in den entsprechenden Ein-

heiten ab, so erhält man ein **Weg-Zeit**-Diagramm (Abb. 4.1). Befindet sich ein Körper im *Zustand der Ruhe*, so ergibt dies in einem solchen *Weg-Zeit*-Diagramm eine Parallele zur Abszissenachse (s. Abb. 4.1 (1)).

Verändert er seine Stellung dauernd, so ist der Körper in **Bewegung**. Alle Bewegungen sind Relativbewegungen bezüglich einer ruhend gedachten Umgebung bzw. eines Koordinatensystems. Ein absolut festes Koordinatensystem gibt es nicht. Die bei der Bewegung in Abhängigkeit von der *Zeit t* zurückgelegten Wege *s*, bezüglich des ruhend gedachten Ausgangspunktes, ergeben im *Weg-Zeit*-Diagramm Kurven $s = f(t)$, wie in Abb. 4.1 (2) – (4) beispielhaft dargestellt.

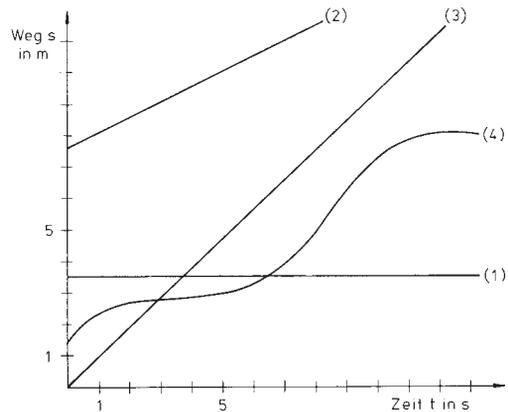


Abb. 4.1

- (1): Körper im Zustand der Ruhe
- (2)/(3): Körper im Zustand der gleichförmig geradlinigen Bewegung
- (4): Körper im Zustand der ungleichförmigen Bewegung

Betrachtet man die allgemeine Bewegung eines Körpers, so unterscheidet man zur Vereinfachung der Beschreibung der Bewegung zunächst grundsätzlich zwischen der **translatorischen** und der **rotatorischen Bewegung**. Diese beiden Arten der Bewegung eines Körpers, *Translation* und *Rotation*, können folgendermaßen definiert werden:

Translation:

Alle Punkte des Körpers bewegen sich auf parallelen Linien um gleiche Stücke in der gleichen Zeit.

Wird der Quader der Abb. 4.2 in Pfeilrichtung durch eine Translation um den Verschiebungsvektor $\Delta \vec{r}$ bewegt, so bewegen sich die beliebig herausgegriffenen drei Punkte 1, 2 und 3 des Quaders auf parallelen Geraden um gleiche Stücke nach 1', 2' bzw. 3'.

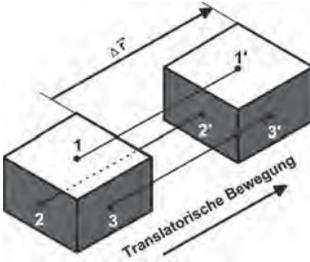


Abb. 4.2

Rotation:

Alle Punkte des Körpers bewegen sich auf konzentrischen Kreisen um ein festes Drehzentrum.

Rotiert die Scheibe der Abb. 4.3 um das ortsfeste Drehzentrum D, so bewegen sich die beliebig herausgegriffenen drei Punkte 1, 2 und 3 der Scheibe auf konzentrischen Kreisen (beispielsweise nach einer Drehung der Scheibe um $\Delta\varphi = 90^\circ$ bis zur Position 1', 2' bzw. 3').

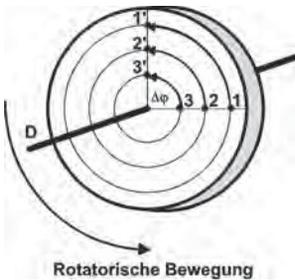


Abb. 4.3

Die Zusammensetzung beider Bewegungsarten ist z. B. bei einem rollenden Rad zu beobachten (s. z. B. § 6.2.2 ff.).

Weiterhin unterscheidet man zwischen **gleichförmiger** und **ungleichförmiger** Bewegung.

Die Bewegung heißt **gleichförmig**, wenn in gleichen Zeitabschnitten bei einer Translation gleiche Wege zurückgelegt, bzw. bei einer Rotation gleiche Winkel überstrichen werden. Sind die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege bzw. überstrichenen Winkel verschieden, so handelt es sich um eine **nicht gleichförmige** oder **ungleichförmige Bewegung**.

Im Weg-Zeit-Diagramm $s = f(t)$ einer Translation stellen die Geraden (2) und (3) der Abb. 4.1 eine gleichförmige und die Kurve (4) eine ungleichförmige Bewegung eines Körpers dar.

§ 4.1 Translationsbewegungen

In diesem Abschnitt untersuchen wir kinematische Größen im speziellen Fall der eindimensionalen Bewegung, d. h. der fortschreitenden Bewegung auf einer Geraden. Wir betrachten dabei die Bewegung eines idealisierten Körpers, eines **Massenpunktes**, dessen gesamte Masse in einem mathematischen Punkt vereinigt gedacht ist. Jeder reelle Körper, dessen Form bzw. Größe bei dem untersuchten physikalischen Problem keinen Einfluss hat, kann als Massenpunkt betrachtet werden.

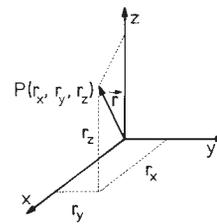


Abb. 4.4

In einem dreidimensionalen kartesischen x, y, z -Koordinatensystem wird der Ort eines Massenpunktes P durch einen **Ortsvektor** \vec{r} (Abbildung 4.4) bzw. durch die entsprechenden Ortskoordinaten r_x, r_y, r_z beschrieben (s. auch Anhang Mathematische Grundlagen, V.C). Der Ortsvektor, der bei Bewegung des Massen-