

Paul Wagner, Georg Reischl, Gerhard Steiner

# Einführung in die Physik

inkl. Neudefinition  
des Internationalen  
Einheitensystems (SI)

4., überarb. Auflage

facultas



Paul Wagner, Georg Reischl, Gerhard Steiner

**Einführung in die Physik**



Paul Wagner

Georg Reischl

Gerhard Steiner

# **Einführung in die Physik**

Inkl. Neudefinition

des Internationalen Einheitensystems (SI)

**4., überarbeitete Auflage**

**facultas**

**Ao. Univ. Prof. Dr. h.c. Dr. Paul Wagner**

Professor für Experimentalphysik, Fakultät für Physik, Universität Wien;  
Gastprofessur an der Universität Helsinki

**Ao. Univ. Prof. Dr. Georg Reischl**

Professor für Experimentalphysik, Fakultät für Physik, Universität Wien

**Dr. Gerhard Steiner**

Senior Scientist, Grimm Aerosol Technik, Ainring

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.

4., überarbeitete Auflage 2020

Copyright © 2010, Facultas Verlags- und Buchhandels AG,  
facultas Universitätsverlag, Wien, Austria

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und der Verbreitung  
sowie der Übersetzung sind vorbehalten.

Umschlagbild: © siloto – Fotolia.com

Druck: Finidr, Tschechien

ISBN 978-3-7089-1937-9

# Vorwort zur 4. Auflage

Das vorliegende Buch ist im Zusammenhang mit Physik-Einführungsvorlesungen der Autoren an der Universität Wien entstanden. Das Schwergewicht liegt auf einer kompakten und systematischen Darstellung. Besonders die begrifflichen Grundlagen werden ausführlich erläutert und die physikalisch-anschauliche Bedeutung mathematischer Beziehungen herausgearbeitet. Bei der Darstellung der einzelnen Stoffgebiete werden insbesondere auch diverse in der Physik angewendete Problemlösungsmethoden vorgestellt.

Aus Anlass der am 20. Mai 2019 in Kraft getretenen umfassenden Neudefinition des Internationalen Einheitensystems (SI) wurde ein Kapitel über die nunmehr gültigen Definitionen der Basiseinheiten aufgenommen. Mehreren fundamentalen Naturkonstanten werden exakte Werte zugewiesen und es erfolgt eine Trennung der Definition von der konkreten Realisierung der Basiseinheiten. Die Auswirkungen dieser grundlegenden Neukonzeption in verschiedenen Gebieten der Physik werden an mehreren Stellen des Buches erläutert.

Der Hauptteil des Buches beschäftigt sich mit der klassischen Physik. Ausgehend von Elektrodynamik und Optik erfolgt jedoch auch eine Darstellung von Grundzügen der relativistischen Mechanik und der Quantenmechanik. Das Buch eignet sich zum Gebrauch bei Einführungsvorlesungen für Studierende der Physik, Chemie, Astronomie, Meteorologie, Geophysik und verwandter Fächer. Außerdem vermittelt das Buch einen allgemeinen Überblick, der als Ausgangspunkt für die Beschäftigung mit speziellen weiterführenden Gebieten der Physik dienen kann. Der mathematische Formalismus steht nicht im Vordergrund, für eine übersichtliche und konsequente Darstellung kann jedoch auf die Anwendung mathematischer Hilfsmittel nicht verzichtet werden. An einzelnen Stellen im Text werden einige der erforderlichen mathematischen Grundlagen kurz erläutert.

Die Autoren sind dem Verlag für die Kooperationsbereitschaft und professionelle Unterstützung zu Dank verpflichtet. Die Autoren danken auch den zahlreichen Hörerinnen und Hörern, die mit kritischen Fragen und Bemerkungen zu Verbesserungen der Darstellung beigetragen haben.

Wien, im Februar 2020

Paul Wagner  
Georg Reischl  
Gerhard Steiner



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1 Entwicklung des physikalischen Weltbildes .....	13
1.2 Bedeutung der Physik in verschiedenen Wissensgebieten und Anwendungen .	16
1.3 System und Modell .....	16
1.4 Der Messvorgang .....	18
1.5 Physikalische Größen und Einheiten .....	19
1.5.1 Basisgrößen, abgeleitete Größen und Größensysteme .....	20
1.5.2 Internationales Einheitensystem (SI) .....	24
1.6 Messgenauigkeit .....	28
<b>2 Mechanik</b> .....	<b>35</b>
2.1 Mechanik von Massenpunkten .....	35
2.1.1 Kinematik von Massenpunkten .....	35
2.1.2 Dynamik von Massenpunkten, Erhaltungssätze .....	43
2.1.3 Wechselwirkungskräfte .....	62
2.1.3.1 Gravitationswechselwirkung, Newton'sches Gravitationsgesetz .....	63
2.1.3.2 Molekulare Wechselwirkung und harmonischer Oszillator .....	73
2.2 Bewegte Bezugssysteme, Trägheitskräfte .....	76
2.2.1 Translation von Bezugssystemen .....	77
2.2.2 Rotation von Bezugssystemen .....	81
2.3 Streuvorgänge .....	86
2.4 Mechanik starrer Körper .....	97
2.4.1 Statik starrer Körper .....	98
2.4.2 Dynamik der Rotation starrer Körper .....	103
2.4.3 Rotation starrer Körper um feste Achsen .....	107
2.4.4 Rotation starrer Körper um freie Achsen, Kreiselbewegung .....	116
2.5 Mechanik fester Körper, Elastizitätslehre .....	122
2.5.1 Deformationen (Verzerrungen) fester Körper .....	122
2.5.2 Spannungen in festen Körpern .....	124
2.5.3 Elastische Eigenschaften isotroper und anisotroper Festkörper .....	126
2.5.4 Spezielle elastische Verformungen isotroper Festkörper .....	129
2.5.5 Oberflächeneigenschaften fester Körper .....	132
2.5.5.1 Härte von Festkörpern .....	132
2.5.5.2 Reibung von Festkörpern .....	133
2.6 Mechanik von Flüssigkeiten und Gasen .....	136
2.6.1 Mechanik ruhender Flüssigkeiten und Gase (Hydrostatik) .....	136

2.6.2	Oberflächeneigenschaften ruhender Flüssigkeiten .....	141
2.6.3	Mechanik strömender Flüssigkeiten und Gase (Hydrodynamik) .....	143
2.6.3.1	Grundbegriffe .....	144
2.6.3.2	Erhaltung der Masse, Kontinuitätsgleichung .....	145
2.6.3.3	Strömung reibungsfreier Fluide .....	147
2.6.3.4	Strömung zäher Fluide .....	153
<b>3</b>	<b>Schwingungen und Wellen .....</b>	<b>159</b>
3.1	Grundbegriffe .....	159
3.2	Schwingungen .....	160
3.2.1	Ungedämpfte Schwingungen .....	160
3.2.2	Überlagerung ungedämpfter Schwingungen .....	162
3.2.3	Gedämpfte Schwingungen .....	165
3.2.4	Erzwungene Schwingungen .....	168
3.2.5	Gekoppelte Schwingungen .....	171
3.3	Wellen .....	172
3.3.1	Grundbegriffe .....	172
3.3.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen .....	174
3.3.3	Wellengleichung .....	178
3.3.4	Ausbreitung und Überlagerung von Wellen .....	179
3.3.5	Dopplereffekt .....	180
3.3.6	Mechanische Wellen in elastisch deformierbaren Medien .....	183
3.4	Musikalische Akustik .....	186
3.4.1	Lautstärke .....	187
3.4.2	Tonhöhe, Klangfarbe und Intervalle .....	188
3.4.3	Tonsysteme .....	191
<b>4</b>	<b>Thermodynamik .....</b>	<b>199</b>
4.1	Grundlagen .....	199
4.2	Temperatur und Temperaturskalen .....	200
4.2.1	Temperaturmessung, Celsius-Skala .....	200
4.2.2	Zustandsgleichung idealer Gase, Kelvin-Skala .....	201
4.3	Wärmemenge und mechanische Energie .....	204
4.4	Kinetik idealer Gase .....	206
4.4.1	Kinetische Berechnung des Gasdruckes .....	206
4.4.2	Kinetische Definition der Temperatur .....	208
4.4.3	Brown'sche Bewegung .....	210
4.4.4	Maxwell-Boltzmann'sche Geschwindigkeitsverteilung .....	212
4.4.5	Mittlere freie Weglänge .....	216
4.5	Wärmekapazität .....	217
4.5.1	Wärmekapazität von idealen Gasen .....	218

4.5.2 Wärmekapazität fester Körper .....	221
4.6 Transportvorgänge .....	223
4.6.1 Impulstransport .....	223
4.6.2 Massetransport .....	224
4.6.3 Wärmetransport .....	227
4.6.3.1 Wärmeleitung .....	227
4.6.3.2 Wärmetransport durch Konvektion .....	229
4.6.3.3 Wärmestrahlung .....	229
4.7 Energieaustausch thermodynamischer Systeme, Hauptsätze der Thermodynamik .....	234
4.7.1 Grundbegriffe .....	234
4.7.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik .....	235
4.7.3 Spezielle Zustandsänderungen idealer Gase .....	236
4.7.3.1 Isochore Zustandsänderungen .....	236
4.7.3.2 Isobare Zustandsänderungen .....	236
4.7.3.3 Isotherme Zustandsänderungen .....	237
4.7.3.4 Adiabatische Zustandsänderungen .....	238
4.7.4 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik .....	239
4.7.5 Kreisprozesse in idealen Gasen .....	241
4.7.6 Entropie und dritter Hauptsatz der Thermodynamik .....	244
4.7.7 Statistische Interpretation der Entropie .....	248
4.7.8 Thermodynamische Potenziale, Gleichgewichtsbedingungen .....	252
4.8 Reale Gase .....	253
4.8.1 Van der Waals'sche Zustandsgleichung .....	253
4.8.2 Phasenübergänge .....	255
<b>5 Elektrodynamik .....</b>	<b>261</b>
5.1 Grundbegriffe .....	261
5.2 Elektrostatik .....	262
5.2.1 Grundlagen, Coulomb'sches Kraftgesetz, Gauß'sches Gesetz .....	262
5.2.2 Elektrische Felder statischer Ladungsverteilungen, Influenz .....	269
5.2.3 Kondensatoren .....	275
5.2.4 Energiedichte des elektrischen Feldes .....	284
5.2.5 Elektrische Dipole .....	286
5.2.6 Isolierende Stoffe (Dielektrika) im elektrischen Feld .....	289
5.2.7 Freie Ladungen und dielektrische Verschiebung .....	293
5.3 Elektrische Ströme .....	302
5.3.1 Grundbegriffe .....	303
5.3.2 Erhaltung der Ladung, Kontinuitätsgleichung .....	304
5.3.3 Leitfähigkeit elektrischer Leiter, Ohm'sches Gesetz .....	305

5.3.4 Gleichstromnetzwerke .....	307
5.3.5 Stromleistung .....	312
5.3.6 Schaltvorgänge bei Kondensatoren .....	314
5.3.7 Stromleitung in materiellen Medien .....	316
5.3.7.1 Stromleitung in Festkörpern, elektrische Kontaktspannungsreihe ...	317
5.3.7.2 Stromleitung in Flüssigkeiten, elektrochemische Spannungsreihe ..	323
5.3.7.3 Stromleitung in Gasen .....	326
5.4 Magnetostatik .....	328
5.4.1 Grundlagen, Ampere'sches Gesetz, Quellfreiheit .....	328
5.4.2 Magnetfelder elektrischer Ströme, Biot-Savart'sches Gesetz .....	334
5.4.3 Magnetfelder spezieller stromdurchflossener Leiter, Spulen .....	337
5.4.4 Kräfte auf Ladungen im Magnetfeld, Lorentz-Kraft .....	344
5.4.5 Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern .....	346
5.5 Zeitabhängige elektromagnetische Felder .....	348
5.5.1 Zeitabhängige Magnetfelder, Faraday'sches Induktionsgesetz .....	348
5.5.2 Induktivität von Leiteranordnungen, Spulen .....	352
5.5.3 Schaltvorgänge bei Spulen .....	355
5.5.4 Energiedichte des magnetischen Feldes .....	358
5.5.5 Zeitabhängige elektrische Felder, Maxwell'scher Verschiebungsstrom ....	359
5.5.6 Magnetische Dipole .....	363
5.5.7 Materielle Medien (Magnetika) im magnetischen Feld .....	365
5.5.8 Freie Ströme und magnetische Feldstärke .....	371
5.5.9 Grundgleichungen der Elektrodynamik .....	377
5.6 Elektromagnetische Schwingungen .....	379
5.6.1 Wechselspannung und Wechselstrom .....	379
5.6.2 Drehstrom .....	382
5.6.3 Transformator .....	384
5.6.4 Komplexe Impedanz .....	386
5.6.5 Impedanzen spezieller Wechselstromwiderstände .....	388
5.6.6 Spezielle Wechselstromschaltungen, Resonanzerscheinungen .....	392
5.7 Elektromagnetische Wellen .....	396
5.7.1 Elektromagnetische Schwingkreise .....	396
5.7.2 Ausbreitung elektromagnetischer Wellenfelder .....	399
5.7.2.1 Wellenausbreitung in Abwesenheit freier Ladungen und Ströme ...	399
5.7.2.2 Wellenausbreitung in Anwesenheit freier Ladungen und Ströme ...	401
5.7.3 Ebene elektromagnetische Wellen im Vakuum .....	403
5.7.4 Energietransport in elektromagnetischen Wellen .....	406
<b>6 Optik .....</b>	<b>409</b>
6.1 Grundlagen .....	410

6.2 Strahlungsmessung und Fotometrie .....	412
6.3 Grundprinzipie der Optik .....	417
6.4 Strahlenoptik .....	418
6.4.1 Grundbegriffe .....	418
6.4.2 Reflexion des Lichtes .....	420
6.4.3 Abbildung durch Spiegel .....	420
6.4.4 Brechung des Lichtes .....	424
6.4.5 Lichtbrechung an einem Prisma .....	426
6.4.6 Abbildung durch dünne Linsen .....	428
6.4.7 Abbildungsfehler .....	436
6.4.8 Optische Instrumente .....	437
6.4.8.1 Kamera und Projektor .....	437
6.4.8.2 Lupe und Mikroskop .....	438
6.4.8.3 Fernrohr und Spiegelteleskop .....	439
6.5 Wellenoptik .....	439
6.5.1 Interferenz und Kohärenz .....	440
6.5.2 Interferometrie .....	444
6.5.2.1 Zweistrahlinterferenz .....	444
6.5.2.2 Vielstrahlinterferenz .....	447
6.5.3 Fraunhofer'sche Beugung .....	453
6.5.3.1 Fraunhofer'sche Beugung an einem einfachen Spalt .....	453
6.5.3.2 Fraunhofer'sche Beugung an einer kreisförmigen Öffnung .....	457
6.5.3.3 Fraunhofer'sche Beugung an einem Doppelspalt .....	458
6.5.3.4 Fraunhofer'sche Beugung an einem Gitter .....	460
6.5.4 Fresnel'sche Beugung .....	463
6.5.5 Auflösungsvermögen optischer Instrumente .....	465
6.5.5.1 Auflösungsvermögen eines Fernrohrs .....	465
6.5.5.2 Auflösungsvermögen eines Mikroskops .....	467
6.5.5.3 Auflösungsvermögen eines Gitterspektrometers .....	468
6.5.6 Reflexion und Polarisation des Lichtes .....	469
6.5.7 Optik anisotroper Medien und Doppelbrechung .....	473
<b>7 Grundzüge der Relativitätsmechanik .....</b>	<b>481</b>
7.1 Elektromagnetische Felder in verschiedenen Inertialsystemen .....	481
7.2 Grundprinzipie der speziellen Relativitätsmechanik .....	484
7.3 Gleichzeitigkeit .....	485
7.4 Zeitdilatation .....	487
7.5 Längenkontraktion .....	491
7.6 Lorentz-Transformation .....	493
7.7 Minkowski-Diagramme .....	496

7.8 Geschwindigkeitsaddition .....	500
7.9 Masse und Energie .....	501
<b>8 Grundzüge der Quantenmechanik .....</b>	<b>505</b>
8.1 Teilchennatur elektromagnetischer Wellen .....	505
8.2 Quantenzustände von Atomen .....	508
8.3 Wellennatur von Teilchen .....	511
8.4 Die Schrödinger-Gleichung .....	512
8.5 Beschreibung quantenmechanischer Zustände und Messgrößen .....	514
8.6 Die Heisenberg'sche Unschärferelation .....	516
8.7 Aufbau von Atomen .....	518
Fundamentale physikalische Konstanten (CODATA 2018) .....	521
Die SI-Basiseinheiten .....	523
Abgeleitete SI-Einheiten .....	523
Gültige inkohärente Einheiten .....	524
SI-Präfixe .....	524
Sachregister .....	525

# 1 Einleitung

Die Bezeichnung Physik hat ihren Ursprung im griechischen *φύσις* bzw. *φυσικός* in der Bedeutung Naturordnung bzw. Naturforschung. Der Aufgabenbereich der Physik umfasst die Untersuchung von Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhängen in den beobachteten Naturerscheinungen. Die Basis der Physik, wie auch jeder anderen Naturwissenschaft, besteht in Beobachtungen und Experimenten.

Ein wesentlicher Aspekt physikalischer Forschung besteht darin, beobachtete Phänomene mit physikalischen Grundprinzipien in Beziehung zu setzen. Nötigenfalls können dabei bereits bestehende Grundprinzipien modifiziert oder erweitert, oder neue Grundprinzipien eingeführt werden. Durch Rückführung beobachteter Phänomene auf physikalische Grundprinzipien werden die Phänomene erklärt und gelten damit im Rahmen der Physik als verstanden. Weitergehende Aussagen über die „eigentliche Natur“ der betrachteten Phänomene werden damit im Allgemeinen nicht gemacht.

## 1.1 Entwicklung des physikalischen Weltbildes

Bereits aus der Antike sind astronomische Beobachtungen durch Babylonier und Ägypter überliefert. Entscheidende Beiträge kamen aus dem antiken Griechenland. In seiner Naturphilosophie hat Aristoteles mit der Diskussion der Begriffe Raum, Zeit, Bewegung und Kausalität den Rahmen für die Beschreibung der Natur festgelegt. Thales von Milet berichtete im 6. Jh. v. Chr. bereits von Magnetismus und Reibungselektrizität. Neben ihren bahnbrechenden Arbeiten im Bereich der Mathematik begründeten die Pythagoräer mit der Einführung der harmonischen Tonintervalle und der Tonleiter die musikalische Akustik und schufen die Basis für die Entwicklung unserer Musik. Von Demokrit stammt das Postulat vom Aufbau der Welt aus Atomen, also nicht weiter teilbaren Einheiten. Die Annahme eines molekularen Aufbaues der Materie gilt allerdings erst seit Beginn des 20. Jh. als unbestritten. Eine Vielzahl von Beiträgen mit großer praktischer Bedeutung stammt von Archimedes aus dem 3. Jh. v. Chr., wobei vor allem das Hebelgesetz und das Gesetz vom Auftrieb in Flüssigkeiten zu nennen sind. Die aus der Antike bekannten Arbeiten sind durch eine eher spekulative Vorgangsweise gekennzeichnet, experimentelle Überprüfungen behaupteter Gesetzmäßigkeiten wurden im Allgemeinen nicht als notwendig angesehen.

In der Neuzeit, beginnend im 16. Jh., führte Galilei die experimentelle Methode ein und begründete damit die Physik im heutigen Sinn. In Experimenten mit Hilfe einer schiefen Ebene hat Galilei das Fallgesetz gefunden. Seine astronomischen Beobachtungen bestätigten das Kopernikanische (heliozentrische) Weltbild, demzufolge sich die Erde um die Sonne bewegt. Dies führte dazu, dass Galilei von der Inquisition ver-

folgt wurde, seine offizielle Rehabilitation erfolgte schließlich Ende des 20. Jh. Auf Grund der von Tycho de Brahe durchgeführten astronomischen Beobachtungen stellte Kepler drei Gesetze auf, die quantitative Aussagen über die Planetenbewegung beinhalten. Im 17. Jh. führte Newton das Trägheitsprinzip und den Kraftbegriff ein und schuf damit die Grundlage der klassischen Mechanik. Ferner hat Newton die Gravitationswechselwirkung mit Hilfe des Gravitationsgesetzes quantitativ beschrieben. Damit gelang es Newton, sowohl das Fallgesetz, als auch die Planetenbewegung auf die Gravitationswechselwirkung zurückzuführen und somit eine bedeutende Vereinheitlichung zu erzielen.

Ebenfalls im 17. Jh. studierte Boyle gemeinsam mit Mariotte das Verhalten idealer Gase. Die Atomvorstellung wurde von Dalton bereits im 18. Jh. im Bereich der Thermodynamik eingeführt. Anfang des 19. Jh. entdeckte Brown bei der Untersuchung von in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen die heute nach ihm benannte statistische Zitterbewegung kleiner Partikel. Brown schuf damit die experimentelle Grundlage der etwa 80 Jahre später von Einstein und Smoluchowski unabhängig voneinander erbrachten Bestätigung des molekularen Aufbaues der Materie. Mitte des 19. Jh. wurde die Beziehung von Wärme und mechanischer Energie untersucht. Mayer, Joule und Helmholtz stellten den Ersten Hauptsatz, Clausius den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik auf. Clausius prägte in diesem Zusammenhang den Entropiebegriff. Ende des 19. Jh. hat Boltzmann seine berühmte statistische Interpretation der Entropie gegeben und damit eine Vereinheitlichung von Thermodynamik und statistischer Physik erzielt. Boltzmanns Arbeiten wurden von Mach vehement kritisiert, der die von Boltzmann vertretene atomistische Vorstellung ablehnte. Avogadro erkannte, dass gleiche Volumina verschiedener idealer Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. Experimente von Loschmidt erlaubten erstmals eine quantitative Bestimmung der Anzahl der Gasmoleküle pro Volumseinheit.

Seit Anfang des 17. Jh. rückte auch die Optik ins Zentrum des Interesses. Snellius stellte das Brechungsgesetz auf. Newton vertrat eine Korpuskulartheorie des Lichtes, Fresnel beobachtete Interferenz von Lichtwellen und bestätigte damit den Wellencharakter des Lichtes. Gegen Ende des 17. Jh. gelang es Rømer, durch Beobachtung der Bewegung eines Jupitermondes erstmals die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes zu ermitteln.

Im 18. Jh. leitete Coulomb aus seinen Experimenten mit der nach ihm benannten Drehwaage das Coulomb'sche Kraftgesetz her, das die elektrostatische Wechselwirkungskraft zweier Punktladungen beschreibt. Ørsted entdeckte Anfang des 19. Jh. das magnetische Feld in der Umgebung elektrischer Ströme. Diese folgenreiche Entdeckung führte zur Vereinheitlichung elektrischer und magnetischer Phänomene. Der hervorragende Experimentator Faraday stellte nach einer Serie von Experimenten das später nach ihm benannte Induktionsgesetz auf. Maxwell veröffentlichte im Jahr 1865 die heute nach ihm benannten Gleichungen zur Beschreibung der Elektrodynamik, die insbesondere die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen vorhersa-

gen. Maxwell erkannte die elektromagnetische Natur der Lichtwellen, was eine Vereinheitlichung elektromagnetischer und optischer Phänomene zur Folge hatte.

Um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert setzten bedeutende neue Entwicklungen in der Physik ein. Michelson versuchte in seinem berühmten Experiment gemeinsam mit Morley 1887 die Geschwindigkeit der Erde relativ zu dem als Trägermedium der Lichtwellen postulierten Lichtäther zu bestimmen. Aus dem ergebnislosen Ausgang des Experimentes hatte bereits Mach geschlossen, dass das Postulat der Existenz des Lichtäthers fallengelassen werden muss. In weiterer Folge entwickelte Einstein 1905 die spezielle Relativitätsmechanik, die insbesondere zur Aufgabe des Begriffes der absoluten Zeit führte. Beeinflusst von Mach verallgemeinerte Einstein 1916 die spezielle Relativitätsmechanik und gelangte zur allgemeinen Relativitätsmechanik, bei der die Gravitationswechselwirkung auf Grund von Trägheitsbewegungen in einer gekrümmten vierdimensionalen Raumzeit interpretiert wird. Dies führte zu einem Wegfall der begrifflichen Unterscheidung zwischen träger und schwerer Masse und somit zu einer unmittelbaren Erklärung des Prinzips der Äquivalenz von träger und schwerer Masse.

Um zu einer realistischen Beschreibung der spektralen Intensitätsverteilung der Wärmestrahlung zu gelangen, postulierte Planck im Jahr 1900 eine Quantisierung der Energie elektromagnetischer Oszillatoren und begründete damit die Quantenmechanik. Die von Hertz und Hallwachs 1887 durchgeführten Experimente zum photoelektrischen Effekt lieferten eine Grundlage für die 1905 von Einstein postulierte Teilchennatur elektromagnetischer Wellen und somit für die Einführung des Welle-Teilchen-Dualismus. Die bereits seit 1885 bekannten diskreten optischen Spektralserien veranlassten Bohr zur Annahme diskreter Energiezustände der Atome, was 1913 durch Experimente von Franck und Hertz auch direkt bestätigt wurde. Im gleichen Jahr hat Bohr, aufbauend auf drei Postulaten, ein Atommodell aufgestellt, das die Berechnung der diskreten Elektronenenergien in Atomen in Übereinstimmung mit den experimentellen Spektralserien ermöglicht. Eines der Bohr'schen Postulate konnte 1924 mit Hilfe der von de Broglie postulierten Materiewellen plausibel gemacht werden. Anschließend an dieses Konzept stellte dann Schrödinger 1926 die berühmte Wellengleichung für Materiewellen auf, die für die Quantenmechanik von grundlegender Bedeutung ist. Im darauffolgenden Jahr haben Davisson und Germer durch Interferenzexperimente mit Elektronenstrahlen den Wellencharakter von Elektronenstrahlen direkt bewiesen. In der Kopenhagener Interpretation liefert die Wellenfunktion für Materiewellen Information über die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen. Eine deterministische Vorhersage der zeitlichen Entwicklung eines Systems erweist sich im Rahmen der Quantenmechanik als unmöglich. Gemäß der von Heisenberg 1927 formulierten Unschärferelation sind bestimmte physikalische Größen nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit messbar. In neuerer Zeit haben Fragen der Verschränkung und der Nichtlokalität quantenmechanischer Zustände zunehmend Beachtung gefunden.

## 1.2 Bedeutung der Physik in verschiedenen Wissensgebieten und Anwendungen

Die Physik liefert wesentliche Grundlagen für praktisch alle Naturwissenschaften. Im Bereich der **Chemie** spielt die thermodynamische Beschreibung von Systemen eine ausschlaggebende Rolle. Die physikalische Beschreibung des Atombaus hat zu einer Erklärung des periodischen Systems der Elemente geführt. Chemische Bindungen und Molekülstrukturen können mit Hilfe quantenmechanischer Methoden quantitativ beschrieben werden.

Zwischen **Astronomie** und Physik besteht eine enge Beziehung. Einerseits liefert die Physik Modelle zur Beschreibung der Entwicklung von Sternen, Galaxien und des gesamten Kosmos. Andererseits beruht die Entwicklung neuerer Beobachtungsinstrumente, wie etwa Radioteleskope, auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Die im Rahmen der **Meteorologie** erfolgende Beschreibung von Vorgängen in der Erdatmosphäre erfolgt zu einem erheblichen Teil mit Hilfe von Hydrodynamik und Thermodynamik. Die Entstehung von Wolken wird wesentlich durch Phasenübergangsvorgänge, insbesondere Nukleation an Aerosolpartikeln, bestimmt. Die physikalische Wechselwirkung von solarer Strahlung mit Gasmolekülen, Aerosolpartikeln und Wolkentropfen hat erheblichen Einfluss auf die globale Klimaentwicklung.

Auch im Bereich der **Biologie** und der **Medizin** bestehen vielfältige Beziehungen zur Physik. Der Energiehaushalt von biologischen Zellen, Transportvorgänge durch Zellmembranen, sowie Wechselwirkung elektromagnetischer und radioaktiver Strahlung mit Zellgewebe werden mit physikalischen Methoden beschrieben. Darüber hinaus beruhen diverse neuere Markierungsverfahren und Diagnosemethoden auf physikalischen Grundlagen.

Physikalische Erkenntnisse haben auch zu diversen **technischen Anwendungen** geführt. Genannt seien Dampfmaschine, Elektromotor und Generator, Halbleiterentwicklung und Laser. Energiegewinnung aus Kernenergie, Solarenergie etc. ist von hoher Aktualität. Besonders vielfältige Anwendungen der Physik bestehen im Bereich der Nachrichtenübertragung und Informationstechnologie.

Besonders sei auch auf die wichtigen Beziehungen der Physik zu **Philosophie** und **Ethik** hingewiesen. Ergebnisse physikalischer Forschung haben unter Anderem die Erkenntnistheorie maßgeblich beeinflusst. Auswirkungen der Anwendung neuer physikalischer Forschungsergebnisse in verschiedenen Bereichen der menschlichen Gesellschaft, und insbesondere potenzielle Gefahrenquellen, müssen laufend eingehend untersucht werden, wobei den Physikern wesentliche Verantwortung zukommt.

## 1.3 System und Modell

Der Gegenstand physikalischer Forschung sind **Systeme**:

Ein System ist ein räumlicher Bereich, der durch eine Systemgrenze von einer Umgebung abgegrenzt ist.

Einzelne Atome und Moleküle, Cluster mehrerer in enger Wechselwirkung stehender Moleküle, sowie auch räumlich abgegrenzte makroskopische feste, flüssige oder gasförmige Körper, sind Beispiele physikalischer Systeme. Systeme stehen im Allgemeinen in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung. Ein zeitlich unveränderliches System wird als **Zustand** bezeichnet.

Beobachtungen oder Experimente an physikalischen Systemen sind Ausgangspunkt für eine mögliche Idealisierung in Form eines **Modells**, wie etwa das Modell eines deformierbaren festen Körpers. Aufbauend auf Grundprinzipien und (idealisierenden) Annahmen kann eine mathematische Beschreibung des betrachteten Modells in Form einer **Theorie** erfolgen, etwa die Elastizitätstheorie. Die Gültigkeit bzw. die Grenzen der Gültigkeit einer Theorie sind im Allgemeinen durch **Experimente** zu überprüfen, wie zum Beispiel Verformungsexperimente an Festkörpern. Durch Widerspruch eines experimentellen Ergebnisses zu einer zugehörigen theoretischen Vorhersage kann die entsprechende Theorie falsifiziert werden. So lange eine Theorie nicht falsifiziert wurde, kann sie als gültig angesehen werden. Die Gültigkeit einer Theorie ist jedoch im Allgemeinen auf einen bestimmten Bereich von physikalischen Bedingungen beschränkt. Für jede Theorie ist daher die Angabe des Gültigkeitsbereiches von ausschlaggebender Bedeutung.

Eine Theorie erlaubt die Rückführung beobachteter Phänomene auf physikalische Grundprinzipien. Damit gelten diese Phänomene im Rahmen der Physik als verstanden. Eine Theorie ermöglicht auch die Vorhersage des Verhaltens von Systemen unter Bedingungen, die noch nicht experimentell untersucht wurden oder noch nicht untersucht werden können. Insbesondere gestattet eine Theorie im Allgemeinen auch die Berechnung der zeitlichen Entwicklung eines Systems und damit eine Vorhersage des zukünftigen Verhaltens von Systemen. Im Rahmen der klassischen Physik kann das zukünftige Verhalten linearer Systeme bei hinreichender Kenntnis der Anfangsbedingungen beliebig genau konkret vorhergesagt werden, diese Systeme verhalten sich deterministisch. Bei der Beschreibung quantenmechanischer Systeme sind jedoch im Allgemeinen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich, für diese Systeme besteht somit kein strenger Determinismus, die Kausalität bleibt jedoch gültig. Nichtlineare klassische Systeme verhalten sich im Allgemeinen deterministisch, beliebig kleine Änderungen der Anfangsbedingungen können aber bereits zu gravierenden Änderungen der zukünftigen Entwicklung führen. Bei solchen chaotischen Systemen können daher grundsätzliche Probleme bei der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung auftreten. Meteorologische Vorgänge können etwa nur für verhältnismäßig kurze Zeitspannen vorhergesagt werden.

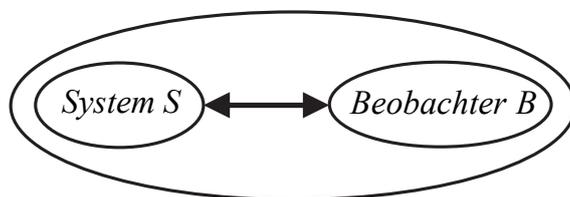
Manche Modelle können oft in gleichartiger Weise auf mehrere unterschiedliche Systeme angewendet werden. Ein wichtiges Modell ist der **Massenpunkt**, das ist ein System, bei dessen Beschreibung es nicht auf die innere Struktur ankommt. Atome,

Wolkentröpfchen, aber auch die Planeten auf ihrer Bahn um die Sonne, können unter gewissen Umständen als Massenpunkte aufgefasst werden. Eine detailliertere Beschreibung der betrachteten Systeme erfordert natürlich eine Verfeinerung des Modells. Ein weiteres weit verbreitetes Modell ist die **Welle**. Oberflächenwellen (etwa Wasserwellen), akustische Wellen, elektromagnetische Wellen inkl. Lichtwellen, sowie quantenmechanische Materiewellen, werden in gleichartiger Weise im Rahmen des Wellenmodells beschrieben.

Während es offenbar Modelle gibt, die auf unterschiedliche Systeme in gleichartiger Weise angewendet werden können, gibt es andererseits auch Systeme, deren Eigenschaften nicht ausschließlich im Rahmen eines einzigen Modells beschrieben werden können. Bei elektromagnetischer Strahlung wurde etwa gefunden, dass sie sowohl Wellen-, als auch Teilchencharakter aufweist (Welle-Teilchen-Dualismus). In diesem Fall hat es sich erwiesen, dass zur Beschreibung verschiedener Aspekte des gleichen physikalischen Systems zwei unterschiedliche Modelle erforderlich sind.

## 1.4 Der Messvorgang

Ein Messvorgang besteht darin, dass ein Beobachter  $B$  sich über die Eigenschaften eines Systems  $S$  Informationen verschafft. Der Beobachter  $B$  wird stets als makroskopisches System angesehen.  $B$  und  $S$  zusammen bilden ebenfalls ein System (siehe Abb. 1.1).



**Abb. 1.1:** Schematische Darstellung eines Messvorganges

Es ist davon auszugehen, dass durch den Messvorgang das betrachtete System  $S$  beeinflusst wird. Falls  $S$  ein makroskopisches System ist, dann kann der Einfluss des Beobachters  $B$  erfahrungsgemäß meistens sehr klein gemacht werden. Falls der Beobachtungseinfluss vernachlässigt werden kann ist es sinnvoll, die Messergebnisse als objektive Systemeigenschaften anzusehen und man kann eine objektive Wirklichkeit annehmen (**Realität**). Eine wesentliche Voraussetzung für die Verlässlichkeit makroskopischer Messungen ist deren **Reproduzierbarkeit**.

Falls das betrachtete System  $S$  mikroskopisch ist und somit im Rahmen der Quantenmechanik beschrieben wird, ist ein wesentlicher Einfluss des Beobachtungsvorganges auf das System  $S$  im Allgemeinen unvermeidbar. Einerseits können im Allgemeinen zwei verschiedene physikalische Größen, etwa Ort und Impuls eines Teilchens, nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden. Dieser Umstand wird mittels der **Heisenbergschen Unschärferelation**

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1.1)$$

quantitativ beschrieben, wobei  $\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$  als reduziertes Planck'sches Wirkungsquantum oder Drehimpulsquantum bezeichnet wird,  $h = 2\pi \cdot \hbar$  ist das Planck'sche Wirkungsquantum (siehe Kapitel 8). Je kleiner etwa die Unschärfe  $\Delta p_x$  bei der Messung des Impulses  $p_x$  eines Teilchens ist, desto größer ist die unvermeidliche Unschärfe  $\Delta x$  des Teilchenaufenthaltsortes  $x$ . Andererseits wird der Zustand eines mikroskopischen Systems auf Grund der Durchführung einer Messung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in einen von mehreren Eigenzuständen präpariert. Als Beispiel sei hier die beim berühmten Stern-Gerlach-Experiment erfolgte Messung des Spins von Silberatomen durch Beobachtung der Ablenkung im Magnetfeld genannt.

In vielen Fällen geht man davon aus, dass sich der quantenmechanische Zustand eines Systems auf einen verhältnismäßig eng begrenzten Bereich bezieht. (**Lokalität**). Neuere Experimente (siehe Kap. 8.5) haben jedoch gezeigt, dass quantenmechanische Zustände auch erhebliche räumliche Ausdehnung haben können.

## 1.5 Physikalische Größen und Einheiten

Systeme werden mit Hilfe **physikalischer Größen** beschrieben. Definition und Auswahl der verwendeten Größen sind im Allgemeinen modellabhängig und willkürlich. Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens mechanischer Systeme hat etwa Newton als neue physikalische Größe den Begriff der Kraft als Ursache der Beschleunigung eines Körpers eingeführt (siehe Kap. 2.1.2).

Die Festlegung einer Größe erfolgt stets durch Vergleich mit einer gleichartigen Größe. Die Vergleichsgröße wird als **Einheit** bezeichnet. Dementsprechend wird jede physikalische Größe in der Form

$$\boxed{\text{Größe} = \text{Maßzahl} \times \text{Einheit}} \quad (1.2)$$

angegeben.

Eine Beziehung zwischen verschiedenen Größen in einem System wird mit Hilfe einer **physikalischen Relation** dargestellt. Physikalische Relationen werden entweder als Relationen zwischen den betrachteten Größen selbst, oder als Relationen zwischen den entsprechenden Maßzahlen angesehen.

Beispiele physikalischer Relationen sind

$$v = \frac{\ell}{t} \quad \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad C = \frac{Q}{U}$$

für Geschwindigkeit  $v$ , Kraft  $\vec{F}$  und Kapazität  $C$ .

An dieser Stelle sei besonders darauf hingewiesen, dass bei der Angabe einer physikalischen Größe neben der Maßzahl stets auch die Einheit anzugeben ist.

### 1.5.1 Basisgrößen, abgeleitete Größen und Größensysteme

Um die Vielzahl unterschiedlicher physikalischer Größen übersichtlich darzustellen und auch unnötige Umrechnungsfaktoren zu vermeiden ist es zweckmäßig, zunächst nach grundsätzlichen und praktischen Gesichtspunkten willkürlich **Basisgrößen** und zugehörige **Basiseinheiten** zu definiert. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die im Folgenden genannten sieben Größen als Basisgrößen zu bestimmen:

**Zeit** (Einheit Sekunde)

**Länge** (Einheit Meter)

**Masse** (Einheit Kilogramm)

**Elektrische Stromstärke** (Einheit Ampere)

**Temperatur** (Einheit Kelvin)

**Stoffmenge** (Einheit Mol)

**Lichtstärke** (Einheit Candela).

Es zeigt sich, dass einige physikalische Größen durch Relationen miteinander in Beziehung stehen, die konstante Größen, sogenannte **universelle Konstanten** enthalten. Diese universellen Konstanten sind dann im Allgemeinen unsicherheitsbehaftete Messgrößen, deren Werte von der konkreten Definition der jeweils betrachteten Größen und deren Einheiten abhängen. Wenn einer universellen Konstanten jedoch ein (willkürlich festgelegter) *exakter* Wert zugewiesen wird, dann ergibt sich eine Definitionsrelation für eine entsprechende Basisgröße und die zugehörige Basiseinheit. Die Definition von Basisgrößen und zugehörigen Basiseinheiten, sowie die Rolle von universellen Konstanten, wird im Folgenden an einigen konkreten Beispielen erläutert.

Eine Basisgröße kann durch ein Messverfahren und eine festgelegte Basiseinheit definiert werden. Für die **Masse** war (von 1889 bis 2019) das Messverfahren die Vergleichswaage, die Basiseinheit **Kilogramm** (*kg*) war durch ein ortsfestes Normal (Urkilogramm bei Paris) festgelegt.

Für die **Zeit** ist (seit 1967) das Messverfahren die Cs-Atomuhr, die Basiseinheit **Sekunde** (*s*) wird definiert als ein bestimmtes Vielfaches der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Cäsium-Isotops  $^{133}\text{Cs}$  entspricht.

Bei der (absoluten) **Temperatur** war (seit 1968 bis 2019) das Messverfahren das Thermometer und die Basiseinheit **Kelvin** (*K*) war als  $1/273.16$  der Temperatur des Tripelpunktes von Wasser definiert (siehe Kapitel 4.2).

Die **Stoffmenge** (Molzahl)  $n$  einer Substanz ist proportional zur Zahl  $N$  der Einzelteilchen (Atome, Moleküle, Ionen etc.), aus denen die betrachtete Substanz besteht. Es gilt:

$$n = \frac{1}{N_A} \cdot N,$$

wobei die Avogadrokonstante  $N_A$  eine universelle Konstante ist. Die zugehörige Basiseinheit **Mol** (*mol*) war (seit 1971 bis 2019) definiert als diejenige Stoffmenge, die aus der gleichen Zahl von Einzelteilchen besteht wie Atome in *exakt* 12 g des Kohlenstoff-Isotops  $^{12}\text{C}$  enthalten sind. Diese Zahl der Einzelteilchen in 1 mol ist die Avogadrokonstante  $N_A$  und war (bis 2019) eine unsicherheitsbehaftete Messgröße (siehe Kapitel 4.2).

Im Fall der **Länge** wird (seit 1983) die Definitionsrelation

$$\ell = c_0 \cdot t$$

verwendet, die die Ausbreitung des Lichtes im Vakuum beschreibt. Dabei ist  $t$  die Ausbreitungszeit des Lichtes und  $\ell$  die entsprechende Weglänge. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  ist eine universelle Konstante. Bei separat definierten Einheiten für Zeit und Länge wäre die Vakuumlichtgeschwindigkeit eine unsicherheitsbehaftete Messgröße. Wenn andererseits der Vakuumlichtgeschwindigkeit der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s}$  zugewiesen wird, dann wird bei vorgegebener Basisgröße Zeit mit Einheit Sekunde (s) die Länge ebenfalls zur Basisgröße. Die entsprechende Basiseinheit **Meter** (*m*) ist somit definiert als die Weglänge, die das Licht im Vakuum in der Zeit

$t = (1/299\,792\,458)\text{ s} = 3.335\,640\,952 \times 10^{-9}\text{ s}$  zurücklegt. Der Wert der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  wurde derart festgelegt, dass die vorher gültige Meterdefinition möglichst genau reproduziert wird.

Im Fall der **elektrischen Stromstärke** wurde (seit 1948 bis 2019) gemäß dem Ampere'schen Kraftgesetz (siehe Kapitel 5.4.5) die Definitionsrelation

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I^2 \cdot \ell}{d}$$

verwendet, die die Kraftwirkung zwischen zwei langen, dünnen, geradlinigen, parallelen, vom gleichen Strom  $I$  durchflossenen Leitern beschreibt. Dabei ist  $d$  der Normalabstand der beiden Leiter und  $F$  die Kraft auf einen Abschnitt mit Länge  $\ell$  eines Leiters herrührend vom anderen Leiter. Die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  ist eine universelle Konstante. Wenn der magnetischen Feldkonstante der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ N/A}^2$  zugewiesen wird, dann wird die Stromstärke zur neuen Basisgröße. Die entsprechende Basiseinheit **Ampere** (*A*) wurde somit (bis 2019) definiert als die Stromstärke durch jeden der beiden parallelen Leiter im Abstand 1 m, die pro Meter Leiterlänge eine Kraft  $F = 2 \times 10^{-7}\text{ N}$  bewirkt. Es

besteht der Zusammenhang  $c_0 = 1 / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  der Vakuumlichtgeschwindigkeit mit elektrischer und magnetischer Feldkonstante (siehe Kap. 5.7.2.1). Somit wurde durch exakte Festlegung von  $c_0$  und  $\mu_0$  auch  $\varepsilon_0$  exakt festgelegt. Folglich wurden (bis 2019) *allen drei* universellen Konstanten  $c_0$ ,  $\varepsilon_0$  und  $\mu_0$  exakte Werte zugewiesen.

Ausgehend von den Basisgrößen und den zugehörigen Basiseinheiten können dann **abgeleitete Größen** und zugehörige **abgeleitete Einheiten** festgelegt werden. Eine **abgeleitete Größe** wird definiert durch eine physikalische Definitionsrelation mit Basisgrößen. Die Definitionsrelation bestimmt ein Messverfahren und eine **abgeleitete Einheit**. Die Geschwindigkeit  $v$  wird etwa mit Hilfe der Definitionsrelation

$$v = \frac{\ell}{t}$$

definiert, wobei  $\ell$  die Weglänge und  $t$  die Zeit bezeichnet. Die Geschwindigkeit  $v$  ist die abgeleitete Größe, die abgeleitete Einheit  $m/s$  ist definiert als die Geschwindigkeit, bei der in der Zeit  $t = 1 s$  die Weglänge  $\ell = 1 m$  zurückgelegt wird.

Zur Charakterisierung physikalischer Größen wird häufig die **Dimension** einer Größe betrachtet. Dieser Begriff kann in zwei unterschiedlichen Bedeutungen verwendet werden. Einerseits ergibt sich die Dimension unmittelbar aus der Definitionsrelation, andererseits kann auch die Einheitenbezeichnung als Dimension verwendet werden. Die Geschwindigkeit hat etwa die Dimension  $[v] = [\ell t^{-1}]$  oder  $[v] = [m s^{-1}]$ . Durch Überprüfung der Dimension aller in einer physikalischen Relation enthaltenen Größen kann die Konsistenz dieser Relation festgestellt werden. Die Zentrifugalkraft (siehe Kap. 2.2.2) kann etwa durch die Relation

$$F_{Zf} = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

ausgedrückt werden. Durch Einsetzen der Dimensionen  $[m] = [kg]$ ,  $[\omega] = [s^{-1}]$ ,  $[r] = [m]$  und  $[F_{Zf}] = [kg m s^{-2}]$  zeigt sich die Konsistenz dieser Relation.

Die Basisgrößen zusammen mit den abgeleiteten Größen bilden ein **kohärentes Größensystem**, die zugehörigen Einheiten bilden ein **kohärentes Einheitensystem**.

Aus praktischen und traditionellen Gründen werden gelegentlich neben den kohärenten Einheiten auch inkohärente Einheiten verwendet. Insbesondere die **Zehnerpotenzvorsätze** haben große praktische Bedeutung:

$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$	$10^{15}$	$10^{18}$
<i>da</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>M</i>	<i>G</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>E</i>
Deka	Hekto	Kilo	Mega	Giga	Tera	Peta	Exa

$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$	$10^{-18}$
<i>d</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	$\mu$	<i>n</i>	<i>p</i>	<i>f</i>	<i>a</i>
Dezi	Centi	Milli	Micro	Nano	Piko	Femto	Atto

Darüber hinaus werden unter anderem auch weitere inkohärente Einheiten verwendet:

$$\begin{aligned}
1 \text{ min} &= 60 \text{ s} \\
1 \text{ h} &= 3600 \text{ s} \\
1 \ell &= 10^{-3} \text{ m}^3 \\
1 \text{ t} &= 10^3 \text{ kg} \\
1 \text{ cal} &= 4.1868 \text{ J} \\
1 \text{ eV} &= 1.602\,177 \times 10^{-19} \text{ J} \\
1 \text{ ly} &= 9.460\,730 \times 10^{15} \text{ m}
\end{aligned}$$

Wie erwähnt erfolgt die **Auswahl der Basisgrößen** nach grundsätzlichen und praktischen Gesichtspunkten willkürlich. Dementsprechend wurden bei der Definition von Basisgrößen im Laufe der Zeit manchmal Änderungen vorgenommen. Die *Wärmemenge* etwa wurde anfangs als Basisgröße definiert, die Basiseinheit Kalorie (*cal*) wurde festgelegt als die Wärmemenge, die zur Erwärmung von 1 g Wasser um 1 °C erforderlich ist. Die berühmten Jouleschen Experimente (siehe Kap. 4.3) zeigen, dass zugeführte Wärmemenge  $\Delta Q$  und zugeführte mechanische Arbeit  $\Delta W$  durch die Relation

$$\Delta Q = K_W \cdot \Delta W$$

miteinander in Beziehung stehen, wobei das Wärmeäquivalent  $K_W$  *stets* den gleichen Wert  $K_W = 0.23885 \text{ cal/J}$  hat. Das Wärmeäquivalent ist somit eine universelle Konstante, die experimentell zu bestimmen ist. Im Rahmen der statistischen Thermodynamik wurden Wärmemenge und mechanische Energie als gleichartige Größen erkannt (siehe Kap. 4.4.2). Dementsprechend wird die Wärmemenge seit 1948 in der Energieeinheit Joule gemessen. Als Folgerung daraus kann die universelle Konstante  $K_W = 0.23885 \text{ cal/J} = 1$  gesetzt werden. Damit ergibt sich, wie gegenwärtig allgemein üblich, dass die Wärmemenge nichtmehr als unabhängig definierte Größe angesehen wird und die zugehörige Basiseinheit  $1 \text{ cal} = (1/0.23885) \text{ J} = 4.1868 \text{ J}$  zur inkohärenten Energieeinheit wird.

Als weiteres Beispiel wenden wir uns der *Länge* zu, die im Allgemeinen als Basisgröße definiert wird. Seit 1983 erfolgt diese Definition mit Hilfe der Definitionsrelation

$$\ell = c_0 \cdot t,$$

wobei  $t$  die Ausbreitungszeit des Lichtes und  $\ell$  die entsprechende Weglänge ist. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  ist eine universelle Konstante, der der exakte Wert  $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s}$  zugewiesen wird. Im Rahmen der Relativitätsmechanik können Länge und Zeit als gleichartige Größen angesehen werden (siehe Kap. 7.6). Als Folgerung daraus kann die universelle Konstante  $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s} = 1$  gesetzt werden. Für diesen Fall ergibt sich, dass die Länge nichtmehr als unabhängig definierte Größe angesehen wird und die zugehörige Basiseinheit  $1\text{ m} = (1/299\,792\,458)\text{ s} = 3.33564 \times 10^{-9}\text{ s}$  zur inkohärenten Zeiteinheit wird. Die damit definierten Einheiten werden als **natürliche Einheiten** bezeichnet. In natürlichen Einheiten ist die Geschwindigkeit dimensionslos,  $c_0 = 1$  ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit. Gleichungen auf dem Gebiet der Relativitätsmechanik können in natürlichen Einheiten symmetrisch und sehr übersichtlich formuliert werden. Andererseits ist es für praktische Anwendungen zweckmäßig, wenn Länge und Zeit unterschiedliche Größen sind, die in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden.

### 1.5.2 Internationales Einheitensystem (SI)

Am 20. Mai 2019 trat eine umfassende **Neudefinition von Basiseinheiten** in Kraft. Zur einheitlichen Definition von *sieben* Basiseinheiten sind nunmehr *sechs* fundamentale Naturkonstanten *exakt* festgelegt. Bereits seit Längerem wurden der Vakuumlichtgeschwindigkeit und dem fotometrischen Strahlungsäquivalent (für  $\lambda = 555\text{ nm}$ ) *exakte* Werte zugewiesen. Im Jahr 2019 wurden nunmehr der elektrischen Elementarladung, der Avogadro-Konstanten, der Boltzmann-Konstanten und dem Planckschen Wirkungsquantum ebenfalls *exakte* Werte zugewiesen. Diese Naturkonstanten sind somit *exakt* vorgegeben und *keine* unsicherheitsbehafteten Messgrößen. Damit erfolgt eine Trennung der Definition von der konkreten Realisierung der Basiseinheiten. Ortsfeste Normale werden nichtmehr verwendet. Die neu definierten Basiseinheiten stimmen möglichst genau mit den bisher gültigen Einheiten überein.

Bei den drei Basiseinheiten für Zeit (Sekunde), Länge (Meter) und Lichtstärke (Candela) bleiben die bisherigen Definitionen weiterhin gültig, die vier Basiseinheiten für elektrische Stromstärke (A), Stoffmenge (Mol), Temperatur (Kelvin) und Masse (Kilogramm) sind nunmehr neu definiert.

Die im Folgenden definierten **sieben Basiseinheiten** zusammen mit allen daraus **abgeleiteten Einheiten** bilden das nunmehr gültige kohärente Einheitensystem: **Système international d'unités (SI)**.

(1) **Zeit:** Seit 1967 ist das Messverfahren die Cäsium-Atomuhr. Die Basiseinheit **Sekunde** (s) ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Cäsium-Isotops  $^{133}\text{Cs}$  entspricht.

(2) **Länge:** Seit 1983 wird die Definitionsrelation

$$\ell = c_0 \cdot t \quad (1.3)$$

verwendet, die die Ausbreitung des Lichtes im Vakuum beschreibt. Dabei ist  $t$  die Ausbreitungszeit des Lichtes und  $\ell$  die entsprechende Weglänge. Die **Vakuumllichtgeschwindigkeit**  $c_0$  ist eine universelle Konstante. Der Vakuumllichtgeschwindigkeit wird der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $c_0 = 299\,792\,458\text{ m/s}$  zugewiesen. Damit wird bei vorgegebener Basisgröße Zeit mit Einheit Sekunde ( $s$ ) die Länge ebenfalls zur Basisgröße. Die zugehörige Basiseinheit **Meter** ( $m$ ) ist somit definiert als die Weglänge, die das Licht im Vakuum in der Zeit  $t = (1/299\,792\,458)\text{ s} = 3.335\,640\,952 \times 10^{-9}\text{ s}$  zurücklegt.

(3) **Lichtstärke:** Seit 1979 wird die Definitionsrelation

$$J_f = K_f(\lambda = 555\text{ nm}) \cdot J \quad (1.4)$$

verwendet. Diese Relation beschreibt den Zusammenhang der physikalischen Strahlungsstärke  $J$  einer Lichtstrahlungsquelle mit der entsprechenden Lichtstärke  $J_f$ . Das **fotometrische Strahlungsäquivalent**  $K_f(\lambda = 555\text{ nm})$  beim Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges ist eine universelle Konstante. Dem fotometrischen Strahlungsäquivalent wird der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $K_f(\lambda = 555\text{ nm}) = 683 \frac{\text{cd}}{\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}}$  zugewiesen. Damit wird bei vorgegebener physikalischer Strahlungsstärke mit Einheit  $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$  die Lichtstärke zur Basisgröße. Die zugehörige Basiseinheit **Candela** ( $\text{cd}$ ) ist somit definiert als die Lichtstärke einer Lichtstrahlungsquelle ( $\lambda = 555\text{ nm}$ ), die Licht mit einer Strahlungsstärke  $J = (1/683)\text{ W sr}^{-1} = 1.4641 \times 10^{-3}\text{ W sr}^{-1}$  ausstrahlt (siehe Kapitel 6.2).

(4) **Elektrische Stromstärke:** Seit 2019 wird die Definitionsrelation

$$I = e \cdot \Phi_{en} \quad (1.5)$$

verwendet (siehe Kapitel 5.3.1, Gl. (5.112)). Diese Relation beschreibt den Zusammenhang des Anzahlflusses  $\Phi_{en}$  von elektrischen Elementarladungen durch den Querschnitt eines Leiters (Zahl der Elementarladungen, die pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt hindurchtreten) mit der entsprechenden elektrischen Stromstärke  $I$ . Die **elektrische Elementarladung**  $e$  ist eine universelle Konstante. Wenn der elektrischen Elementarladung der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ As}$  zugewiesen wird, dann wird bei vorgegebenem Anzahl-

fluss der Elementarladungen mit Einheit  $s^{-1}$  die elektrische Stromstärke zur Basisgröße.

Die zugehörige Basiseinheit **Ampere** ( $A$ ) ist somit definiert als die Stromstärke in einem Leiter, bei dem der Anzahlfluss

$\Phi_{en} = \left(1/1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\right) s^{-1} = 6.241\,509\,074 \times 10^{18} s^{-1}$  von Elementarladungen durch den Leiterquerschnitt tritt. Auf Grund der *exakten* Festlegung der elektrischen Elementarladung muss allerdings in Kauf genommen werden, dass elektrische und magnetische Feldkonstante nunmehr *unsicherheitsbehaftete* Messgrößen sind, wobei jedoch in sehr guter Näherung weiterhin gilt:

$$\mu_0 \cong 4\pi \times 10^{-7} \frac{As}{Vm}.$$

Andererseits ist die neue Definition messtechnisch leichter umzusetzen als die bisherige.

(5) **Stoffmenge (Molzahl):** Seit 2019 wird die Definitionsrelation

$$n = \frac{1}{N_A} \cdot N \quad (1.6)$$

verwendet (siehe Kapitel 4.2.2). Diese Relation beschreibt den Zusammenhang der Zahl  $N$  der Einzelteilchen (Atome, Moleküle, Ionen etc.), aus denen eine Substanz besteht mit der entsprechenden Stoffmenge (Molzahl)  $n$ . Die **Avogadrokonstante**  $N_A$  ist eine universelle Konstante. Wenn der Avogadrokonstanten der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  zugewiesen wird, dann wird bei vorgegebener Einzelteilchenzahl (ohne Einheit) die Stoffmenge (Molzahl) zur Basisgröße. Die zugehörige Basiseinheit **Mol** ( $mol$ ) ist somit definiert als eine Stoffmenge mit der Einzelteilchenzahl  $N = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ . Die *exakte* Festlegung der Einzelteilchenzahl in  $1 \text{ mol}$  hat allerdings zur Folge, dass nunmehr die Masse einer Stoffmenge von  $1 \text{ mol}$  des Kohlenstoff-Isotops  $^{12}\text{C}$  einen *unsicherheitsbehafteten* Messwert von  $\cong 12 \text{ g}$  hat. Zur direkten Bestimmung der Stoffmenge (Molzahl)  $n$  eines einkomponentigen idealen Gases kann die Zustandsgleichung idealer Gase

$$pV = nRT \quad (1.7)$$

verwendet werden (siehe Kapitel 4.2.2). Dabei ist die allgemeine Gaskonstante  $R = N_A k$  eine exakte Konstante. Druck  $p$ , Volumen  $V$  und Temperatur  $T$  sind Messgrößen. Eventuelle Korrekturterme mit Virialkoeffizienten sind im Allgemeinen klein.

(6) **Absolute Temperatur:** Seit 2019 wird zur Definition der Einheit der (absoluten) Temperatur der **Boltzmannkonstante**  $k$  der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert  $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  zugewiesen. Damit ist die Temperatur  $T_{TPW}$  des Tripelpunktes von Wasser nunmehr eine *unsicherheitsbehaftete* Messgröße. Die Wahl des Wertes der Boltzmannkonstanten stellt jedoch jedenfalls sicher, dass  $T_{TPW}$  mit einer Standardunsicherheit von 0.1 mK bei  $T_{TPW} \cong 273.16 \text{ K}$  verbleibt (siehe Kap. 4.2). Eine präzisere Temperaturmesstechnik ist gegenwärtig nicht bekannt und  $T_{TPW}$  hat eine Langzeitstabilität wie eine fundamentale Naturkonstante. Dementsprechend wird der Wert von  $T_{TPW}$  auch in absehbarer Zukunft unverändert bleiben. Für direkte Temperaturmessungen zur Realisierung der Basiseinheit **Kelvin** (K) ist ein gut theoretisch verstandenes Messsystem erforderlich. Bei der primären **akustischen Gasthermometrie** wird die Relation

$$v = \sqrt{\frac{\kappa k T}{m}} \quad (1.8)$$

der Schallgeschwindigkeit  $v$  in einem idealen Gas mit der Gastemperatur  $T$  verwendet. Dabei ist  $m$  die mittlere Masse eines Gasmoleküls und  $\kappa$  der Adiabatenindex (für ideale einatomige Gase ist  $\kappa = 5/3$ ). Die obige Relation ergibt sich aus Gl. (3.63) durch Einsetzen des Ausdruckes  $\rho = pm/kT$  für die Dichte idealer Gase.

(7) **Masse:** Seit 2019 wird zur Definition der Einheit der Masse dem **Planckschen Wirkungsquantum**  $h$  der (willkürlich festgelegte) *exakte* Wert

$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$  zugewiesen. Damit ist die Masse des Urkilogramms nunmehr eine *unsicherheitsbehaftete* Messgröße. Zur Realisierung der Basiseinheit **Kilogramm** (kg) sind gegenwärtig zwei Methoden verfügbar, die hinreichende Präzision ermöglichen. Die **Kibble-Waage** (auch Watt-Waage) beruht auf einem Vergleich der Gewichtskraft mit einer elektromagnetischen Kraft. Zunächst wird im *Wägemodus* die Gewichtskraft auf einen Testkörper mit Masse  $m_x$  durch eine gleich große elektromagnetische Kraft auf eine von einem passenden Strom  $I_1$  durchflossene Spule mit Leiterlänge  $\ell$  in einem Magnetfeld mit Flussdichte  $B$  kompensiert und es gilt  $m_x g = I_1 B \ell$ . Im darauffolgenden *Bewegungsmodus* bewegt sich der Testkörper zusammen mit der Spule in vertikaler Richtung mit einer interferometrisch kontrollierten Geschwindigkeit  $v$  durch das Magnetfeld und es resultiert eine Induktionsspannung  $U_2 = v B \ell$  an den Spulenklammern. Leiterlänge  $\ell$  der Spule und magnetische Flussdichte  $B$  des Magnetfeldes können eliminiert werden und es verbleibt

$$m_x g v = I_1 U_2, \quad (1.9)$$

wobei  $g$  die lokale Fallbeschleunigung ist. Eine direkte elektrische Leistungsmessung würde durch Joulesche Wärme verfälscht. Um dies zu vermeiden wird  $U_2$  als Vielfaches einer Josephson-Spannung gemessen,  $I_1$  wird mit Hilfe des Quanten-Hall-Effektes ebenfalls über eine Spannung bestimmt. Auf Grund der Anwendung dieser beiden Quanteneffekte tritt im resultierenden Ausdruck für die Masse  $m_x$  das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  auf, dessen definitionsgemäß festgelegter Wert somit das Messergebnis beeinflusst. Eine alternative Realisierungsmöglichkeit für die Basiseinheit Kilogramm ist die **Röntgenstrahlungs-Kristalldichte Methode** (auch Avogadro-Projekt). Das Ziel dieser Methode ist die Herstellung eines Testkörpers mit Masse  $\cong 1 \text{ kg}$  mit präzise kontrollierter Anzahl  $N$  von Atomen bekannter Masse. Besonders geeignet dafür erscheinen kugelförmige Silizium-Einkristalle aus chemisch höchstreinem und isotopenreinem  $^{28}\text{Si}$ , die praktisch ohne Gitterfehler hergestellt werden können. Die Gitterkonstante wird mit einem Röntgenlaser-Interferometer präzise bestimmt, der Kugeldurchmesser kann interferometrisch mit Unsicherheiten  $< 1 \text{ nm}$  gemessen werden. Die Masse  $m(^{28}\text{Si})$  eines Silizium-Atoms steht in einem genau bekannten Verhältnis zum Planckschen Wirkungsquantum  $h$ . Damit erhält man die Masse des sphärischen Testkörpers mit hinreichender Präzision in der Form

$$m_S = h \cdot N \cdot \left( \frac{m(^{28}\text{Si})}{h} \right). \quad (1.10)$$

Im resultierenden Ausdruck für die Masse  $m_S$  tritt das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  auf, dessen definitionsgemäß festgelegter Wert somit das Messergebnis beeinflusst.

## 1.6 Messgenauigkeit

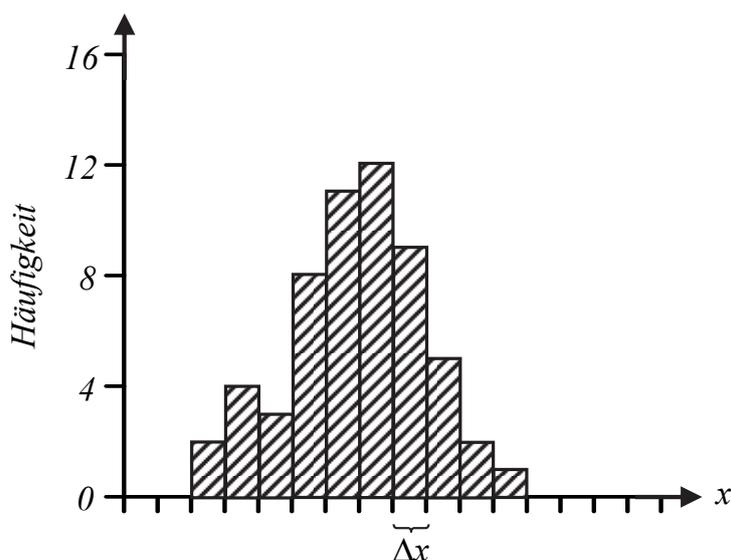
Ergebnisse physikalischer Messungen sind stets mit Fehlern behaftet, wobei zwischen zwei Arten von Fehlern unterschieden werden kann.

**Systematische Fehler** entstehen durch ungenügende Ausschaltung oder ungenügende Berücksichtigung störender Effekte, durch unrichtige Eichung von Messinstrumenten, fehlerhafte Messdatenübertragung oder Ähnliches.

**Statistische Fehler** hingegen werden hervorgerufen durch zufällige Schwankungen auf Grund der gleichzeitigen Wirkung vieler unkontrollierbarer Einflüsse. Eine quantitative Abschätzung des Fehlerbereiches ist von großer Bedeutung. Systematische Fehler sind oft schwer zu quantifizieren. Im Folgenden werden nur statistische Fehler betrachtet.

Wir betrachten die experimentelle Bestimmung einer Größe  $x$ . Es werde eine Messserie mit  $n$  Einzelmessungen mit den Einzelmesswerten  $x_i$  durchgeführt. Die Verteilung der Häufigkeiten, dass die Einzelmesswerte innerhalb gewisser Intervalle

(Klassen) liegen, kann in Form eines **Histogramms** graphisch dargestellt werden (siehe Abb. 1.2). Dabei ist auf der Messwertskala die Klasseneinteilung eingetragen.



**Abb. 1.2:** Histogramm zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Messwerte  $x_i$  bei einer Messserie. Auf der Messwertskala ist die Klasseneinteilung eingetragen.

Die erwähnte Messserie kann durch einen **repräsentativen Wert der Messgröße** charakterisiert werden. Dieser repräsentative Wert liefert eine Abschätzung für den wahren Wert der Messgröße. Zur Festlegung eines solchen repräsentativen Wertes  $\bar{x}$  für die Messserie gehen wir davon aus, dass alle Einzelmesswerte  $x_i$  gleichermaßen nach oben und unten von  $\bar{x}$  abweichen und dementsprechend alle Abweichungen  $x_i - \bar{x}$  einander gerade kompensieren:

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0. \quad (1.11)$$

Daraus ergibt sich

$$\sum_{i=1}^n x_i - n \cdot \bar{x} = 0$$

und man erhält damit als repräsentativen Wert für die Messserie den **arithmetischen Mittelwert aller Einzelmesswerte**  $x_i$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.12)$$

Die betrachtete Messserie kann ferner durch ein **Maß für die Streuung der Einzelmesswerte** charakterisiert werden. Wir betrachten zunächst die Abweichungen  $x_i - \bar{x}$  der Einzelmesswerte  $x_i$  vom repräsentativen Wert  $\bar{x}$ . Als Maß für die Streuung der Einzelmesswerte könnte der arithmetische Mittelwert aller Abweichungen