9 Allgemeines über Messungen und ihre Auswertung

Redakteur: S. German

Hierzu Tabellen T 9.01 bis T 9.13 im Anhang

9.1 Begriffs- und Einheitensysteme (S. German)

9.1.1 Physikalische Größe und Größensystem

Die Größenlehre ist die Basis für die Beschreibung naturgesetzlicher und ingenieurwissenschaftlicher Erscheinungen. Sie liefert die Grundlage für die gemeinsame Sprache und ist deshalb die Voraussetzung dafür, die Erkenntnisse darzulegen und sich gegenseitig zu verständigen. Und da es das Ziel dieses Buches ist, die erprobten Methoden zusammenfassend darzustellen, die in den verschiedenen Gebieten der praktischen Physik angewendet werden, um eine Größe zu messen, ist es notwendig, dieses Begriffsgebäude zu verstehen.

Die letzten hundert Jahre sind geprägt von der Vielfalt der verwendeten Größensysteme, Dimensionssysteme und Einheitensysteme und von mancherlei Mißverständnissen über deren Bedeutung. Diese Situation wurde inzwischen weitgehend bereinigt. Die Grundlage jeder objektiven Untersuchung und Prüfung vermuteter oder bereits bekannter Gesetzmäßigkeiten in der Natur bildet das Experiment, dessen Wesen im messenden Verfolgen spezieller Vorgänge oder allgemeiner Zusammenhänge begründet liegt. Die Messung hat das Ziel, den Einfluß und den Zusammenhang beteiligter Größen quantitativ zu erfassen. Hierbei vergleicht man die experimentell faßbaren Äußerungen (Werte physikalischer Größen) des untersuchten Vorgangs oder Zustands (Sachbezug) nach geeigneten und vorgegebenen Meßverfahren mit gleichartigen, zahlenmäßig eindeutig festgelegten oder vereinbarten Äußerungen des physikalischen Geschehens (Einheiten).

Physikalische Phänomene (Körper, Vorgänge, Zustände) werden mit Hilfe physikalischer Größen, meist kurz Größen genannt, qualitativ und quantitativ beschrieben. Größen, die Skalare, Vektoren oder Tensoren sein können, beschreiben meßbare Eigenschaften. Die Größen sind durch Abstraktion gewonnene physikalische Begriffe, die man zur Beschreibung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten eingeführt hat.

Jeder spezielle Wert einer physikalischen Größe kann als Produkt ausgedrückt werden:

Größenwert = Zahlenwert · Einheit.

Eine physikalische Größe muß so definiert sein, daß Summen und Differenzen einzelner Größenwerte wieder Größenwerte derselben Größe ergeben. Auch muß sich die Differenz zweier Größenwerte in gleiche Teile teilen lassen.

Die physikalischen Größen sind begrifflich und formelmäßig durch die allgemeinen Gleichungen eines physikalischen Begriffssystems miteinander verknüpft und werden durch diese festgelegt. Man kann sie vermittels dieser Gleichungen jeweils auf andere, schon definierte Größen zurückführen. Bei dieser Rückführung kommt man schließlich auf eine Anzahl voneinander unabhängiger Basisgrößen, aus denen sich die abgeleiteten Größen herleiten lassen. Welche Größen und wieviele Größen man als Basisgrößen festlegt, ist eine Zweckmäßigkeitsfrage. Keine physikalische Größe ist naturnotwendig eine Basisgröße. Aus den Nebenbedingungen der Eindeutigkeit und der Unabhängigkeit läßt sich begründen, daß die Basisgrößen nicht völlig beliebig gewählt werden können. Wenn ein neues physikalisches Gebiet erschlossen wird, das nach seinen Erscheinungen und Gegebenheiten eine neue, aus den zuvor behandelten Gebieten nicht bekannte physikalische Qualität enthält, muß man nach einem diese neue Qualität erfassenden Meßverfahren suchen, und es kann zweckmäßig sein, über dieses Meßverfahren eine neue Basisgröße einzuführen. So hat sich in der Physik die Anzahl der Basisgrößen, ausgehend von der Mechanik (Länge, Masse, Zeit) durch das Hinzukommen der Elektrodynamik (elektrische Stromstärke), der Thermodynamik (thermodynamische Temperatur), der Molekularphysik (Stoffmenge) und der Photometrie (Lichtstärke) auf sieben erhöht. Die Entscheidung, ob ein neues Gebiet auf die bisherigen Gebiete zurückführbar ist, wird nicht von der Natur vorgegeben, sondern wird vom die Naturvorgänge beschreibenden Menschen getroffen.

Das auf den sieben Basisgrößen Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke beruhende System ist das dem Internationalen Einheitensystem (SI) zugeordnete Größensystem.

Die physikalischen Zusammenhänge werden heute nach Möglichkeit als Größengleichungen mathematisch dargestellt, die in der Regel den Zahlenwertgleichungen vorzuziehen sind. In einer Größengleichung wird eine Beziehung zwischen Größen dargestellt, die unabhängig von der Wahl der Einheiten ist.

Als Formelzeichen (Symbole) für Größen werden Buchstaben benutzt (s. Tab. T 9.01 im Anhang). Diese Buchstaben werden im Druck – unabhängig von der Schriftart des umgebenden Textes – *kursiv* (schräg) wiedergegeben.

9.1.2 Dimension und Dimensionssystem

Unter der Dimension einer Größe verstehen wir den Aspekt, der nur ihre Qualität (also nicht ihre Quantität) enthält. Man gelangt zur Dimension einer Größe, indem man in ihrer Definitionsgleichung von deren Vektor- oder Tensoreigenschaft, allen numerischen Faktoren einschließlich des Vorzeichens und gegebenenfalls bestehenden Sachbezügen absieht. (Länge, Breite, Höhe, Radius, Durchmesser, Kurvenlänge haben alle die Dimension Länge.)

Der Begriff Größenart innerhalb einer Dimension (auch Art einer Größe genannt) umfaßt ebenfalls nur qualitative Eigenschaften physikalischer Größen. Er wird allerdings nicht einheitlich definiert. Meist wird darunter etwas verstanden, was man aus einer physikalischen Größe erhält, wenn man von allen numerischen Faktoren absieht, aber Vektor- oder Tensorcharakter sowie Sachbezüge beibehält. Durch den Übergang vom CGS-System zum SI hat der Begriff Größenart an Bedeutung abgenommen. Im SI hat die Dimension eine zentrale Bedeutung.

Ein Dimensionssystem gründet sich auf eine endliche Menge von Basisdimensionen. Diese müssen so ausgewählt werden, daß sie voneinander unabhängig sind und aus ihnen alle übrigen Dimensionen des Systems, die abgeleiteten Dimensionen, durch Multiplikation, Division und Potenzierung ableitbar sind.

Beispiel: Für die Kinetik können die Dimensionen Länge ($\dim l$), Zeit ($\dim t$) und Masse ($\dim m$) als Basisdimensionen gewählt werden. Die Dimension Geschwindigkeit $\dim v = \dim l \cdot (\dim t)^{-1} = \dim(lt^{-1})$ ist dann eine abgeleitete Dimension.

Das für eine physikalische Größe aus den Basisdimensionen gebildete Potenzprodukt wird als ihr Dimensionsprodukt oder ihre Dimension in bezug auf die Basisdimensionen bezeichnet. Ein Dimensionsprodukt kann auch aus abgeleiteten Dimensionen gebildet werden. So ist z.B. die Dimension der elektrischen Feldstärke $\dim E = \dim(Ul^{-1}) = \dim(lmt^{-3}I^{-1})$. Ein Dimensionsprodukt kann man schreiben:

$$\dim Z = \dim X_1^\alpha \dim X_2^\beta \ldots \dim X_n^\nu = \dim(X_1^\alpha X_2^\beta \ldots X_n^\nu)\,. \tag{9.1}$$

Hierbei sind die $\dim X_1$ bis $\dim X_n$ die Dimensionen. Die Exponenten $\alpha, \beta, \ldots, \nu$ heißen Dimensionsexponenten.

Physikalische Größen, in deren Dimensionsprodukt alle Dimensionsexponenten Null sind, nennt man Größen mit dem Dimensionsprodukt 1 (der Dimension 1). In der englischen Literatur wird hierfür häufig der Ausdruck „dimensionless" verwendet.

Sind $\dim l$, $\dim m$, $\dim t$, $\dim I$, $\dim T$, $\dim n$ und $\dim I_v$ die Basisdimensionen Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke, so wird die Dimension irgendeiner Größe Z

$$\dim Z = \dim(l^\alpha m^\beta t^\gamma I^\delta T^\varepsilon n^\zeta I_v^\eta)\,. \tag{9.2}$$

Es handelt sich hierbei um das dem Internationalen Einheitensystem zugeordnete Dimensionssystem. In diesem System sind die Dimensionsexponenten meist ganzzahlig. In der internationalen Literatur werden häufig zur Darstellung obiger Dimension besondere Symbole in der Schriftart Linear-Antiqua ohne die kleinen Abschlußstriche bei den Schrifttypen (serifenlos) verwendet. Gl. (9.2) lautet dann:

$$\dim Z = \mathsf{L}^\alpha \mathsf{M}^\beta \mathsf{T}^\gamma \mathsf{I}^\delta \Theta^\varepsilon \mathsf{N}^\zeta \mathsf{J}^\eta)\,. \tag{9.3}$$

9.1.3 Einheit und Einheitensystem

Aus jeder Menge derjenigen Größen, die durch Messung miteinander vergleichbar sind, kann je ein Größenwert als Bezugsgröße herausgegriffen und als Einheit benutzt werden. Dabei wird bei der ausgewählten Größe von ihren Vektor- oder Tensoreigenschaften und ihrem Vorzeichen abgesehen. Einheiten sind Skalare.

In einem Dimensionssystem kann jeder Basisdimension eine Basiseinheit zugeordnet werden. Eine Basiseinheit ist eine aus der Menge der Größen gleicher Dimension bezüglich ihres Größenwertes ausgewählte und festgelegte Größe. Die Basiseinheiten bilden dann die Grundlage eines Einheitensystems. Die den abgeleiteten Dimensionen zugeordneten abgeleiteten Einheiten ergeben sich dadurch, daß man im Dimensionsprodukt die Basisdimensionen durch die ihnen entsprechenden Basiseinheiten ersetzt.

Ein Einheitensystem ist kohärent, wenn zu ihm außer den Basiseinheiten nur solche abgeleiteten Einheiten gehören, die als Potenzprodukt aus den Basiseinheiten entstehen und in deren Ableitungsgleichungen kein von 1 verschiedener Faktor auftritt.

Das auf den sieben Basiseinheiten Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere, Kelvin, Mol und Candela (Sprechweise: Kandéla, Betonung auf der zweiten Silbe) beruhende Internationale Einheitensystem (SI) ist ein kohärentes Einheitensystem. Es wird heute in den meisten Ländern der Erde in Wissenschaft, Lehre, Technik und Wirtschaft angewendet. Es ist ausführlich in **9**.1.4 dargestellt.

Einheitenzeichen (Einheitensymbole), die aus Buchstaben bestehen, werden im Druck – unabhängig von der Schriftart des umgebenden Textes – senkrecht (steil) wiedergegeben.

9.1.4 Das Internationale Einheitensystem

Im Jahre 1948 wurde anläßlich der 9. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (Meterkonvention) der Wunsch artikuliert, für Wissenschaft, Technik und Unterricht ein einheitliches praktisches Einheitensystem zu entwickeln. In den folgenden Generalkonferenzen ist ein solches System, nämlich das Internationale Einheitensystem (SI) geschaffen worden.

Das Internationale Einheitensystem, für das in allen Sprachen einheitlich das Kurzzeichen „SI" (von Système International d'Unités) verwendet wird, ist die erweiterte Version des metrischen Systems. Das Wort System besagt hierbei, daß alle erforderlichen Einheiten dieses Systems auf einige wenige bestimmte, geeignet ausgewählte „Basiseinheiten" zurückgeführt werden können (s. **9**.1.4.1). Aus ihnen werden die abgeleiteten SI-Einheiten gebildet (s. **9**.1.4.2). Außer den SI-Einheiten ist noch eine Reihe anderer Einheiten in Gebrauch. Über Einheiten außerhalb des SI wird in **9**.1.5 und **9**.1.6 berichtet.

Die sehr genaue Darstellung von SI-Einheiten gemäß ihrer Definition ist schwierig und zeitaufwendig. Solche Darstellungen (Normale) werden im allgemeinen in der Praxis nicht verwendet. Für einige Einheiten (z.B. Meter, Ohm, Volt) können Verfahren angegeben werden, die es erlauben, die Einheit unabhängig von Ort und Zeit wiederholt so darzustellen, daß die Unsicherheit beim Reproduzieren wesentlich geringer ist als die Unsicherheit bezüglich der Übereinstimmung mit der gemäß der Definition dargestellten Einheit. Die Verfahren beruhen auf makroskopischen Quantenphänomenen und führen zu international vereinheitlichten „Labornormalen", die für die einheitliche und genaue Weitergabe der Einheiten wichtig sind. Einzelheiten siehe in den betreffenden Kapiteln.

9.1.4.1 Die SI-Basiseinheiten

Im SI wird für sieben Basisgrößen je eine Basiseinheit festgelegt, wobei die sieben Basiseinheiten (Tab. 9.1) nach Übereinkunft bezüglich ihrer Dimension als voneinander unabhängig betrachtet werden.

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

Diese Definition, die im Oktober 1983 von der 17. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) angenommen wurde, ersetzt die bisherige aus dem Jahr 1960, die von einer Strahlung des Atoms des Nuklids ^{86}Kr ausging. Bei der neuen Definition geht man vom Wert der derzeit besten Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458$ m/s aus. Dieser Wert wird in Zukunft unverändert beibehalten. Trotz dieser nun bestehenden metrologischen Abhängigkeit des Meters von der Sekunde bleibt das Meter ein unabhängige Basiseinheit. Am Wert des Meters hat sich durch die neue Definition nichts geändert. Die Methoden der

Tab. 9.1 Die SI-Basiseinheiten

Dimension	SI-Basiseinheit Name	Einheitenzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	Ampere	A
thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

praktischen Längenmessung (s. **1**.2.1) werden von der Änderung der Definition nicht beeinflußt.

Die neue Meterdefinition macht keine Aussage über die Realisierung des Meter. Es bestehen folgende Möglichkeiten:

– Man mißt die Dauer t, in der eine ebene elektromagnetische Welle im Vakuum eine Strekke der Länge l durchläuft. Die Länge l ergibt sich dann aus der Beziehung $l = c \cdot t$ mit $c = 299\,792\,458$ m/s als dem Wert der Vakuumlichtgeschwindigkeit, der sich aus der Meterdefinition ergibt (die Frequenz ist frei wählbar).

– Man mißt die Frequenz f einer ebenen elektromagnetischen Welle im Vakuum. Die Wellenlänge λ ergibt sich dann aus der Beziehung $\lambda = c/f$ mit $c = 299\,792\,458$ m/s als dem Wert der Vakuumlichtgeschwindigkeit, der sich aus der Meterdefinition ergibt (die Frequenz ist frei wählbar).

– Man benützt eine der Strahlungen, für die es von den Organen der Meterkonvention empfohlene Werte für die Wellenlange λ (im Vakuum) und die Frequenz f gibt. (Hierbei sind λ und f über die Beziehung $\lambda \cdot f = c = 299\,792\,458$ m/s verknüpft. Die Werte für λ werden gerundet.)

Beispiel: Eine Linie des Methan-stabilisierten He-Ne-Lasers mit

$$f = 88\,376\,181\,608 \text{ kHz} \qquad \lambda = 3\,392\,231\,397{,}0 \text{ fm}$$

mit einer Unsicherheit (Summe der abgeschätzten Unsicherheit der systematischen Abweichungen) von etwa $1{,}3 \cdot 10^{-10}\lambda$. Weitere empfohlene Werte für Strahlungen gibt es für Iod-stabilisierte He-Ne-Laser, einen Iod-stabilisierten Argon-Laser und für einige Spektrallampen (z.B. die Engelhard-Lampe mit ^{86}Kr). Hierbei gelten etwas vergrößerte Unsicherheiten (s. **1**.2.1.1 und Tab. T 1.01).

BIPM (1991): Le Système International d'Unités (SI), 6. Aufl., 106–108

Editors note: Metrologia (1984), 163–177

Kilogramm *Das Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.*

Das Internationale Kilogrammprototyp (s. **9**.2.1) ist ein Zylinder aus einer Legierung von 90% Platin und 10% Iridium, dessen Höhe und Durchmesser gleich groß sind (etwa 39 mm). Es wird im Internationalen Büro für Maß und Gewicht in Sèvres bei Paris aufbewahrt. Die nationalen Kilogrammprototype werden jeweils im Abstand von 10 bis 15 Jahren mit dem Internationalen Kilogrammprototyp verglichen. Dies ist mit einer relativen Standardabweichung (s. **9**.3) von etwa $1 \cdot 10^{-9}$ möglich. Der Anschluß von Kilogramm-Normalen aus Stahl oder Messing (Dichte etwa 8 g/cm^3) an das nationale Prototyp aus Platin-Iridium (Dichte 21,5 g/cm^3) ist wegen der Unsicherheit der Luftauftriebskorrektion infolge des großen Dichteunterschieds nur mit einer relativen Standardabweichung von $2 \cdot 10^{-8}$ möglich.

Kochsiek, M. (1991): Die SI-Basiseinheit „Kilogramm". Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung, 13.

Girard, G. (1994): The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988–1992), Metrologia **31**, 317

Sekunde *Die Sekunde ist das* 9 192 631 770*fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands des Atoms des Nuklids* ^{133}Cs *entsprechenden Strahlung.*

Die zur Darstellung der Sekunde notwendige Strahlung wird in einer Atomstrahl-Resonanzapparatur erzeugt. Bei den derzeit besten Apparaturen beträgt die relative Unsicherheit der Frequenz nach Korrektion aller bekannten Einflüsse etwa 10^{-14}.

Obige Definition gilt in der Eigenzeit des Atoms. Zur Gewinnung von Zeitskalen müssen die Perioden der atomaren Schwingungen laufend gezählt werden. Beim Vergleich solcher Uhren müssen relativistische Effekte (Bewegung, Gravitationspotential) berücksichtigt werden.

Weltweit wird heute die Zeitskala UTC (koordinierte Weltzeit, Coordinated Universal Time) angewendet, die auf der „Internationalen Atomzeitskala" (TAI) aufbaut.

de Boer, G. (1991): Die SI-Basiseinheit „Sekunde". Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung, 19

Ampere *Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von* 1 *Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je* 1 *Meter Leiterlänge die Kraft* $2 \cdot 10^{-7}$ *Newton hervorrufen würde.*

Das für die Länge l eines im gegenseitigen Abstand d angeordneten und von elektrischen Strömen der Stärken I_1 und I_2 durchflossenen Leiterpaares gültige Kraftgesetz lautet in skalarer Schreibweise: $F/l = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$. Unter Einsetzen der in der Ampere-Definition enthaltenen Daten folgt für die magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2. Diese Relation ist also mit der Definition des Ampere gleichwertig.

Eine Darstellung des Amperes gemäß der Definition ist nicht möglich. Ersetzt man aber die in der Definition verwendete unendlich lange Doppelleitung durch zwei koaxiale Kreisringe, so bleibt das Verhältnis des Produkts $I_1 \cdot I_2$ der elektrischen Stromstärke zur erzeugten Kraft F aus den geometrischen Abmessungen berechenbar. Die zur Ampere-Darstellung verwendete Stromwaage besteht aus einer feststehenden Spule, in der sich eine kleine Spule vertikal ausgerichtet und beweglich an der einen Seite eines Waagebalkens hängend befindet. Die bisher erzielte kleinste relative Unsicherheit für das Ampere beträgt $6 \cdot 10^{-6}$.

Petley, B.W. (1988): The Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement, 2nd ed. Bristol: Adam Hilger Ltd.

Schrader H.-J. (1975): Die Basiseinheiten der Elektrodynamik – Möglichkeiten neuer Definitionen und ihre Konsequenzen. PTB-Mitt. **85**, 29–32

Kibble, B.P.; Robinson, I.A.; Belliss, J.H. (1990): A Realization of the SI Watt by the NPL Moving-coil Balance. Metrologia **27**, 173–192

Olsen, T.P.; Tew Jr., W.L.; Williams, E.R.; Elmquist, R.E.; Sasaki, H. (1991): Monitoring the Mass Standard via the Comparison of Mechanical to Electrical Power. IEEE Trans. Instr. Meas. **40**, 115–120

Melchert, F. (1991): Die SI-Basiseinheit „Ampere". Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung, 25

Kelvin *Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der* 273,16*te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.*

Der Tripelpunkt des Wassers kennzeichnet das heterogene Gleichgewicht zwischen den drei Phasen Eis, flüssiges Wasser und Wasserdampf; der zugehörige Druck ist etwa 0,6 kPa. Der Tripelpunkt des Wassers ($T = 273,16\,\mathrm{K}$) wird in einem besonderen Tripelpunktgefäß (s. **3**.1.6.1) realisiert. Die Reproduzierbarkeit (s. **9**.2.1) beträgt etwa ±0,000 1 K.

Das Kelvin ist nicht nur die Einheit der thermodynamischen Temperatur T „über dem absoluten Nullpunkt der Thermodynamik" (ein durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik physikalisch ausgezeichneter Zustand mit $T = 0\,\mathrm{K}$) eines thermodynamischen Systems, sondern auch die Einheit für die Temperaturdifferenz.

Die thermodynamische Temperaturskala kann experimentell durch das Volumen- oder Druckverhalten idealer Gase dargestellt werden (Gasthermometer). Mit hinreichender Näherung wird sie über die Temperaturmeßverfahren der „Internationalen Temperaturskala" realisiert, in der Gleichgewichtstemperaturen (definierende Fixpunkte) Temperaturwerte zugeordnet sind und in der für bestimmte Temperaturbereiche Normalgeräte einschließlich ihrer Kalibriervorschriften und anzuwendender Interpolationsformeln festgelegt sind. Derzeit gilt die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) (s. **3**.1.2).

Preston-Thomas, H. (1990): The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Metrologia **27**, 3–10
Blanke, W. (1991): Die SI-Einheit „Kelvin". Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung, 29

Mol *Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht, wie Atome in* 0,012 *Kilogramm des Kohlenstoffnuklids* ^{12}C *enthalten sind. Bei Benutzung des Mols müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angebbarer Zusammensetzung sein.*

Bei dieser Definition geht man davon aus, daß man sich auf nicht-gebundene ^{12}C-Atome im Grundzustand bezieht, die sich in Ruhe befinden.

Es besteht eine enge Beziehung zwischen der Einheit Mol und der „vereinheitlichten atomaren Masseneinheit u", die gleich dem zwölften Teil der Masse eines Atoms des Nuklids ^{12}C ist ($\mathrm{u} = 1/12m(^{12}\mathrm{C})$). Die mit den Worten „ebensoviel Teilchen" umschriebene Zahl in der Definition des Mols ist gleich dem Zahlenwert der Avogadrokonstante N_A. Die genaueste Bestimmung der Avogadro-Konstante erfolgte am Silizium (relative Unsicherheit etwa $1 \cdot 10^{-6}$).

Drath, P. (1991): Die SI-Einheit „Mol". Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung, 35

Candela *Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, welche monochromatische Strahlung der Frequenz* $540 \cdot 10^{12}$ *Hertz aussendet, und deren Strahlstärke in dieser Richtung* 1/683 *Watt durch Steradiant beträgt.*

Diese Definition, die auf der 16. Generalkonferenz für Maß und Gewicht im Jahr 1979 angenommen wurde, ersetzt die bisherige, die von einem Schwarzen Strahler ausging. Am Wert der Candela (Sprechweise: Kandéla, Betonung auf der zweiten Silbe) hat sich dadurch nichts geändert. Für die Realisierung werden nun radiometrische Methoden verwendet. Die relative Unsicherheit liegt bei $5 \cdot 10^{-3}$, die Reproduzierbarkeit bei $1 \cdot 10^{-3}$. Als sekundäre Normale dienen Glühlampen geeigneter Bauart.

Bischoff, K.; Metzdorf, J.: (1991): Die SI-Einheit „Candela". Die SI-Basiseinheiten, Definition, Entwicklung, Realisierung, 39

9.1.4.2 Abgeleitete SI-Einheiten

Die abgeleiteten SI-Einheiten werden kohärent, d.h. nur mit dem Zahlenfaktor 1 aus den Basiseinheiten abgeleitet. Dabei werden für die Einheiten die gleichen algebraischen Beziehungen – unter Benutzung der mathematischen Zeichen für Multiplikation und Division – verwendet, die auch für diejeweils zugeordneten Größen gelten. Verschiedene abgeleitete Einheiten haben einen besonderen Namen und ein besonderes Einheitenzeichen erhalten, die ihrerseits dazu verwendet werden können, weitere abgeleitete Einheiten auf einfachere Weise zu bilden, als wenn man von den Basiseinheiten ausgeht. Man kann daher die abgeleiteten Einheiten in drei Gruppen einteilen.

1. Abgeleitete SI-Einheiten, die durch Basiseinheiten ausgedrückt werden (s. Tab. 9.2).

Tab. 9.2 Beispiele für abgeleitete SI-Einheiten, die durch Basiseinheiten ausgedrückt werden

Dimension	SI-Einheit Name	Einheitenzeichen
Fläche	Quadratmeter	m^2
Geschwindigkeit	Meter durch Sekunde	m/s
Wellenzahl	reziprokes Meter	m^{-1}
Dichte	Kilogramm durch Kubikmeter	kg/m^3

2. Abgeleitete SI-Einheiten, die einen besonderen Namen haben (s. Tab. 9.3, S. 11).

3. Abgeleitete SI-Einheiten, die mit Hilfe von besonderen Namen ausgedrückt werden (s. Tab. 9.4, S. 11).

Es bestehen keine Einwendungen gegen die Benutzung bestimmter besonderer Namen oder bestimmter Kombinationen von Einheiten zum Zwecke der leichteren Unterscheidung zwischen Größen gleicher Dimension. (Beispiele: Das Hertz anstatt der reziproken Sekunde für die Frequenz; das Newtonmeter anstatt dem Joule für das Moment einer Kraft). Hierzu gibt es Empfehlungen in der Normung.

Die Werte der Größen mit dem Dimensionsprodukt 1, wie beispielsweise die Brechzahl oder die Permeabilitätszahl, werden als reine Zahl angegeben. Die entsprechende SI-Einheit ist in solchen Fällen das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten und kann durch die Zahl 1 ausgedrückt werden (s.a. 9.1.6).

9.1.4.3 Dezimale Teile und Vielfache von SI-Einheiten

Um die Zahlenwerte bei der Angabe von Größenwerten in einer praktikablen Größenordnung zu halten, haben die Organe der Meterkonvention die in Tab. 9.5, S. 12, zusammengestellten Vorsätze und Vorsatzzeichen zum Bilden dezimaler Vielfache und Teile von SI-Einheiten empfohlen.

Unter den Basiseinheiten des SI enthält als einzige die Einheit der Masse aus historischen Gründen bereits im Namen einen Vorsatz. Die Namen der dezimalen Teile und Vielfachen der Basiseinheit der Masse werden deshalb durch Hinzufügen der Vorsätze vor das Wort „Gramm" gebildet.

Wenn an ein mit einem Vorsatzzeichen versehenes Einheitenzeichen ein Potenzexponent angefügt ist, bedeutet dies, daß das Vielfache oder der Teil der Einheit in die durch den Exponenten ausgedrückte Potenz erhoben ist.

Tab. 9.3 Abgeleitete SI-Einheiten, die einen besonderen Namen haben

Dimension	SI-Einheit Name	Einheiten-zeichen	durch SI-Basiseinheiten ausgedrückt
ebener Winkel	Radiant	rad	$m \cdot m^{-1}$
Raumwinkel	Steradiant	sr	$m^2 \cdot m^{-2}$
Frequenz	Hertz	Hz	s^{-1}
Aktivität (radiokative)	Becquerel	Bq	s^{-1}
Kraft	Newton	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Druck, Spannung	Pascal	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Leistung, Energiestrom	Watt	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Energiedosis	Gray	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
Äquivalentdosis	Sievert	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$
Elektrizitätsmenge, elektrische Ladung	Coulomb	C	$s \cdot A$
elektrische Spannung, elektromotorische Kraft	Volt	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
elektrische Kapazität	Farad	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
elektrischer Leitwert	Siemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
magnetischer Fluß	Weber	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
magnetische Flußdichte, Induktion	Tesla	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Induktivität	Henry	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Celsius-Temperatur[1)]	Grad Celsius	°C	K
Lichtstrom	Lumen	Lm	$cd \cdot m^2 \cdot m^{-2}$
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	$m^{-2} \cdot cd \cdot m^2 \cdot m^{-2}$

[1)]Der Grad Celsius (°C) ist die Einheit für die Angabe von Temperaturen t „über einer durch Konvention festgelegten thermodynamischen Temperatur T_0" oder von Celsius-Temperaturen. Die Temperatur T_0 des „Nullpunktes der thermodynamischen Celsius-Skala" beträgt $T_0 = 273{,}15\,K$. Die Einheit Grad Celsius ist gleich der Einheit Kelvin. Bei der Angabe der Celsius-Temperatur wird der Grad Celsius als besonderer Name für das Kelvin benutzt. Es gilt also die Zahlenwertgleichung $[t] = [T] - 273{,}15$. Auch die Differenz zweier Celsius-Temperaturen kann in der Einheit Grad Celsius angegeben werden.
Die bei der Definition der Celsius-Temperatur benutzte Bezugstemperatur $T_0 = 273{,}15\,K$, entsprechend der Celsius-Temperatur 0 °C, ist innerhalb der heute bestehenden Meßunsicherheit gleich dem Eispunkt. Der Eispunkt ist die Gleichgewichtstemperatur für das heterogene Gleichgewicht zwischen den drei Phasen Eis, luftgesättiges flüssiges Wasser sowie Luft beim Normdruck 101,325 kPa und bei festgelegter Luftzusammensetzung. Die flüssige und die gasförmige Phase sind also hier Mischphasen.

Tab. 9.4 Beispiele für abgeleitete SI-Einheiten, die mit Hilfe von besonderen Namen ausgedrückt werden

Dimension	SI-Einheit Name	Einheiten-zeichen	durch SI-Basiseinheiten ausgedrückt
dynamische Viskosität	Pascalsekunde	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
spezifische Energie	Joule durch Kilogramm	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
elektrische Ladungsdichte	Coulomb durch Kubikmeter	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
Permeabilität	Henry durch Meter	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Energiedosisleistung	Gray durch Sekunde	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$

Tab. 9.5 SI-Vorsätze

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

Beispiele:

$$1\ \mathrm{cm}^3 = (10^{-2}\mathrm{m})^3 = 10^{-6}\mathrm{m}^3$$

$$1\ \mu\mathrm{s}^{-1} = (10^{-6}\mathrm{s})^{-1} = 10^{6}\mathrm{s}^{-1}\,.$$

Empfehlungen über bevorzugt zu verwendende dezimale Teile und Vielfache von SI-Einheiten werden in ISO 1000 „SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units" und DIN 1301 Teil 2 „Einheiten, Allgemein angewendete Teile und Vielfache" gegeben. Bezüglich der Darstellung von Einheitennamen in Systemen mit beschränktem Schriftzeichenvorrat s. ISO 2955 und DIN 66 030 „Darstellung der Einheiten in Systemen mit beschränktem Schriftzeichenvorrat".

9.1.5 Einheiten außerhalb des SI

Es gibt eine Reihe von Einheiten, die zwar zum Internationalen Einheitensystem systemfremd sind, die jedoch eine beträchtliche Rolle spielen und weit verbreitet sind. Damit die Vorteile der Kohärenz der SI-Einheiten nicht verlorengehen, sollte das Bilden von zusammengesetzten Einheiten mit Einheiten außerhalb des SI nur in begrenzten Fällen erfolgen. Die Organe der Meterkonvention geben daher Empfehlungen hierfür. In Tab. 9.6 sind diejenigen Einheiten zusammengestellt, die ohne Einschränkung mitverwendet werden können.

Desgleichen ist es notwendig, einige andere Einheiten außerhalb des Internationalen Einheitensystems zuzulassen, deren Verwendung in speziellen Gebieten zweckmäßig ist. Ihre

Tab. 9.6 Einheiten, die gemeinsam mit dem Internationalen Einheitensystem benutzt werden

Name	Einheiten-zeichen	Beziehung zu den SI-Einheiten
Minute	min	$1\ \mathrm{min} = 60\ \mathrm{s}$
Stunde	h	$1\ \mathrm{h} = 60\ \mathrm{min} = 3600\ \mathrm{s}$
Tag	d	$1\ \mathrm{d} = 24\ \mathrm{h} = 86\,400\ \mathrm{s}$
Grad	°	$1° = (\pi/180)\ \mathrm{rad}$
Minute	′	$1' = (1/60)° = (\pi/10\,800)\ \mathrm{rad}$
Sekunde	″	$1'' = (1/60)' = (\pi/648\,000)\ \mathrm{rad}$
Liter	l, L	$1\ \mathrm{l} = 1\ \mathrm{dm}^3 = 10^{-3}\ \mathrm{m}^3$
Tonne	t	$1\ \mathrm{t} = 10^3\ \mathrm{kg}$

Tab. 9.7 Einheiten, die gemeinsam mit dem Internationalen Einheitensystem benutzt werden und deren Beziehungen zu den SI-Einheiten experimentell ermittelt werden

Name	Einheiten-zeichen	Definition
Elektronvolt	eV	Das Elektronvolt ist gleich der kinetischen Energie, die ein Elektron bei Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 Volt im Vakuum gewinnt: $1\ \mathrm{eV} = 1,602\,177\,33(49) \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$
atomare Masseneinheit	u	Die atomare Masseneinheit ist gleich dem 12ten Teil der Masse eines Atoms des Nuklids ^{12}C: $1\ \mathrm{u} = 1,660\,540\,2(10) \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$
astronomische Einheit[1)]	AE	Die astronomische Einheit der Entfernung ist gleich der Länge des Halbmessers der nichtgestörten Kreisbahn, auf der sich ein Körper von vernachlässigbarer Masse um die Sonne mit einer siderischen (auf das Fixsternsystem bezogenen) Winkelgeschwindigkeit von 0,017 202 098 950 Radiant durch Tag bewegt. In dem System von astronomischen Konstanten (1976) der Internationalen Astronomischen Union gilt die Beziehung: $1\ \mathrm{AE} = 149\,597,870\,61(3) \cdot 10^6\ \mathrm{m}$
Parsec	pc	Das Parsec ist gleich derjenigen Entfernung, von der aus die astronomische Einheit unter einem Winkel von 1″ erscheint: $1\ \mathrm{pc} = 206\,264,8\ \mathrm{AE} = 30\,856,78 \cdot 10^{12}\ \mathrm{m}$

[1)]Die astronomische Einheit hat kein internationales Einheitenzeichen: Es werden Abkürzungen benutzt, z.B. AE im Deutschen, UA im Französischen, AU im Englischen, a.e.Л im Russischen, usw.

zahlenmäßige Beziehung zu den SI-Einheiten kann nur experimentell ermittelt und somit nicht durch einen genauen Wert angegeben werden (s. Tab. 9.7).

Die in Tab. 9.8 zusammengestellten Einheiten sollen nur vorübergehend zusammen mit den SI-Einheiten verwendet werden und ausschließlich im Rahmen der derzeitigen Gewohnheiten (also keine Ausweitung!). Vorübergehend in diesem Sinne heißt so lange, bis die Organe der Meterkonvention erklärt haben, daß sie nicht mehr notwendig sind. Diesen Tatbestand darf man nicht mit rechtlichen Festlegungen verwechseln, die ausschließlich für den Gebrauch von Einheiten im amtlichen und geschäftlichen Verkehr gelten.

Die Dioptrie ist eine Sonderbezeichnung für die Einheit reziprokes Meter bei der Angabe des Brechwertes optischer Systeme ($1\ \mathrm{dptr} = 1\ \mathrm{m}^{-1}$).

9.1.6 Besondere Einheiten für Größen mit dem Dimensionsprodukt 1

Bildet man den Bruch aus zwei Größen A und B, so entsteht hierbei eine neue Größe. Sind hierbei A und B Größen verschiedener Dimension, so nennt man den Bruch einen Größenquotienten (z.B. Dichte, Druck). Sind A und B Größen gleicher Dimension, so nennt man den Bruch ein Größenverhältnis (z.B. Dehnung, Verstärkungsfaktor, Volumengehalt) (s. DIN 1313).

Größenverhältnisse, die auch das Einheitenverhältnis 1 haben, können recht unterschiedlich angegeben werden.

Tab. 9.8 Einheiten, die vorübergehend neben dem Internationalen Einheitensystem beibehalten werden

Name	Einheiten-zeichen	Beziehung zu den SI-Einheiten	Bemerkung
Seemeile		1 Seemeile = 1852 m	Die Seemeile ist eine spezielle Einheit zur Angabe von Entfernungen in der See- und Luftfahrt. Dieser konventionelle Wert wurde von der ersten Außerordentlichen Hydrographischen Konferenz, Monaco 1929, unter dem Namen „Internationale Seemeile" angenommen.
Knoten		1 Seemeile durch Stunde = (1852/3600) m/s	
Ångström[2)]	Å	1 Å = 0,1 nm = 10^{-10} m	
Ar	a	1 a = 1 dam^2 = 10^2 m^2	
Hektar	h	1 ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2	
Barn[2)]	b	1 b = 10^{-28} m^2	Das Barn ist eine spezielle Einheit zur Angabe des Wirkungsquerschnitts in der Kernphysik.
Bar[1)]	bar	1 bar = 0,1 MPa = 10^5 Pa	
Gal[2)]	Gal	1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2	Das Gal ist eine spezielle Einheit zur Angabe der Fallbeschleunigung in der Geodäsie und in der Geophysik.
Curie[2)]	Ci	1 Ci = 3,7 · 10^{10} Bq	Das Curie ist eine spezielle Einheit, die in der Kernphysik zur Angabe der Aktivität von Radionukliden benutzt wird.
Röntgen[2)]	R	1 R = 2,58 10^{-4} C/kg	Das Röntgen ist eine spezielle Einheit zur Angabe der Ionendosis, die von Röntgen. oder γ-Strahlung erzeugt wird.
Rad[2)]	rad	1 rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy	Das Rad ist eine spezielle Einheit zur Angabe der Energiedosis, die von ionisierender Strahlung erzeugt wird. Bei Gefahr einer Verwechslung mit dem Einheitenzeichen für Radiant kann man rd als Einheitenzeichen für Rad benutzen.

[1)]Kann bis zum Jahr 2005 mit SI-Einheiten verwendet werden.
[2)]Soll ab 1996 möglichst nicht mehr verwendet werden.

Beispiele:

$A = 3\,000$ V/V Verstärkungsfaktor

$\varphi = 38\%$ Volumengehalt

$u_r = 5{,}4 \cdot 10^{-6}$ relative Meßunsicherheit

Für die zweckmäßige Bezeichnung von Größenverhältnissen gibt es eine Reihe von Wortzusammensetzungen mit den Wörtern Konstante, Koeffizient, Zahl, Faktor, Grad, Maß, Pegel (hierzu s. DIN 5485).

Größenverhältnisse (wie natürlich auch Größenprodukte mit der Dimension 1) haben auch deshalb eine besondere Bedeutung, weil sie gelegentlich in transzendente Funktionen eingesetzt werden. Da transzendente Funktionen nur für Zahlen definiert sind, müssen die Größenwerte des Größenverhältnisses, die in eine transzendente Funktion eingesetzt werden, das Einheitenverhältnis 1 haben.

Beispiele:

1. $T = 20\,\text{ms}, \quad t = 10\,\text{ms}$

$$\cos 2\pi \frac{t}{T} = \cos 2\pi \, \frac{10\,\text{ms}}{20\,\text{ms}} = \cos \pi = -1$$

2. $U_1 = 1{,}103\,\text{mV}, \quad U_2 = 2{,}236\,\text{V}$

$$\lg U_2/U_1 = \lg \frac{2{,}236\text{V}}{1{,}103\,\text{mV}} = \lg 2{,}027 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{V}} = \lg 2{,}027 \cdot 10^3 \approx 3{,}307\,.$$

Das Einsetzen eines Größenverhältnisses in eine transzendente Funktion liefert zwar eine Zahl, doch kann diese Zahl als Zahlenwert einer Größe mit dem Dimensionsprodukt 1 aufgefaßt werden. Den erzielten Ergebnissen werden häufig einheitenähnliche Namen und Zeichen hinzugefügt, die wie Einheiten verwendet werden können.

Es hat sich eingebürgert – insbesondere in der Nachrichtentechnik und Akustik – daß der natürliche Logarithmus auf solche Größenverhältnisse angewendet wird, die aus den Größenwerten einer Feldgröße (z.B. Schalldruck) gebildet werden. Dies kennzeichnet man mit dem Hinweiszeichen Neper (Np). Man schreibt z.B. $a_1 = 1$ Np, wenn $a_1 = \ln(F_1/F_2) = 1$ ist, wobei F_1 und F_2 die beiden Werte einer Feldgröße sind. Es ist dann $F_1 = 2{,}718 F_2$.

Der Zehnerlogarithmus wird auf solche Größenverhältnisse angewendet, die aus den Größenwerten einer Leistungsgröße (z.B. Leistungsdichte) gebildet werden und kennzeichnet diese mit dem Hinweiszeichen Bel (B). Man schreibt z.B. $a_2 = 1$ B, wenn $a_2 = \lg(P_1/P_2) = 1$ ist, wobei P_1 und P_2 die beiden Werte einer Leistungsgröße sind. Es ist dann $P_1 = 10 P_2$. In der Praxis wird meist der zehnte Teil, das Dezibel (dB) verwendet, s. DIN 5493 Logarithmische Größen und Einheiten, Teil 2 (Sept. 1994) „Logarithmierte Größenverhältnisse; Maße, Pegel in Neper und Dezibel“.

Nimmt man an, daß a_1 und a_2 nicht verschieden definierte Größen sind, dann gilt

$$a = \ln(U_1/U_2)\ \text{Np} = 20 \lg(U_1/U_2)\ \text{dB}\,. \tag{9.4}$$

Daraus ergibt sich

$$1\ \text{dB} = 0{,}115\ \text{Np}\,. \tag{9.5}$$

Logarithmierte Größenverhältnisse werden Pegel genannt, wenn der Nenner des Verhältnisses eine festgelegte Bezugsgröße ist (z.B. $2 \cdot 10^5$ Pa beim Schalldruckpegel). Es hat sich international eingebürgert, diese Bezugswerte in Klammer hinter das Zeichen dB oder Np zu setzen, obwohl dies ein Verstoß gegen die Festlegung ist, daß solche Angaben zur weiteren Kennzeichnung einer Größe am Größensymbol und nicht am Einheitenzeichen erfolgen sollen (Beispiele s. DIN 5493, Beiblatt 1 (Sept. 1994) „Logarithmierte Größenverhältnisse, Pegel; Hinweiszeichen auf Bezugsgrößen und Meßbedingungen").

9.1.7 Das CGS-System

In bestimmten Spezialgebieten der Wissenschaft, insbesondere in der theoretischen Physik, ist teilweise noch das CGS-System in Gebrauch. Das CGS-System ist ein kohärentes Einheitensystem, in dem den drei Basisdimensionen Länge, Masse und Zeit die Basiseinheiten Zentimeter (cm), Gramm (g) und Sekunde (s) zugeordnet sind. Auch im CGS-System gibt es eine Reihe von abgeleiteten Einheiten mit besonderen Namen, die aber nicht zusammen mit SI-Einheiten verwendet werden sollten. Für den Bereich der Mechanik gibt es die in Tab. 9.9 zusammengestellten abgeleiteten CGS-Einheiten mit besonderen Namen.

Tab. 9.9 Abgeleitete CGS-Einheiten mit besonderen Namen für den Bereich der Mechanik

Dimension	abgeleitete Einheit Name	Einheitenzeichen	durch CGS-Basiseinheiten ausgedrückt
Kraft	Dyn	dyn	$\mathrm{cm \cdot g \cdot s^{-2}}$
Energie	Erg	erg	$\mathrm{cm^2 \cdot g \cdot s^{-2}}$
Fallbeschleunigung	Gal	Gal	$\mathrm{cm \cdot s^{-2}}$
dynamische Viskosität	Poise	P	$\mathrm{cm^{-1} \cdot g \cdot s^{-1}}$
kinematische Viskosität	Stokes	St	$\mathrm{cm^2 \cdot s^{-1}}$

Im Bereich der Elektrizität und des Magnetismus wurden mehrere Varianten des CGS-Systems entwickelt (s. 9.1.8).

9.1.8 Größen- und Einheitensysteme in Elektrizität und Magnetismus

Das MKSA-System (als ein Untersystem des SI) mit den vier Basiseinheiten Meter, Kilogramm, Sekunde und Ampere und das CGS-System mit den drei Basiseinheiten Zentimeter, Gramm und Sekunde entsprechen zwei verschiedenen Systemen von Gleichungen im Bereich von Elektrizität und Magnetismus, die aus vier bzw. drei Basisgrößen entwickelt wurden. Diese Systeme werden als vier- bzw. dreidimensionale Gleichungssysteme bezeichnet.

Gleichungensysteme mit vier Basisgrößen In den Gleichungen mit vier Basisgrößen, wofür hier Länge, Zeit, Masse und elektrische Stromstärke gewählt sind, enthält der Satz der Basisgrößen mindestens eine Größe elektrischer Natur. In diesem System treten die Permeabilität μ und die Permittivität ε als dimensionsbehaftete physikalische Größen in den zugehörigen Gleichungen auf. Die magnetische Feldkonstante μ_0 und die elektrische Feldkonstante $\varepsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$ sind:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \mathrm{H/m}\ \text{(genau)} \tag{9.6}$$

und
$$\varepsilon_0 = (4\pi\zeta^2)^{-1} \cdot 10^{11}\ \mathrm{F/m} = (8{,}854\,187\,817\ldots) \cdot 10^{-12}\ \mathrm{F/m} \tag{9.7}$$

wobei $\zeta = (299\,792\,458) \cdot 10^2$ der Zahlenwert der Vakuumlichtgeschwindigkeit c in cm/s ist (s. 9.1.4.1 und Tab. T 9.02 im Anhang).

Wenn vierdimensionale Gleichungen verwendet werden, schreibt man diese Gleichungen im allgemeinen in der rationalen Form (s.u.). Der Gebrauch dieses Systems von Gleichungen und Größen zusammen mit den SI-Einheiten einschließlich der mit den SI-Vorsätzen gebildeten Teile und Vielfachen wird besonders empfohlen.

Gleichungensysteme mit drei Basisgrößen Es sind drei verschiedene Gleichungensysteme mit den Basisgrößen Länge, Zeit und Masse entwickelt worden.

– Das elektrostatische Gleichungensystem, das die elektrische Ladung als eine abgeleitete physikalische Größe mittels des Coulomb-Gesetzes für die Kraft zwischen elektrischen Ladungen definiert, wobei die Permittivität gleich einer Größe der Dimension 1 gesetzt wird (Permittivitätszahl), deren Wert im Vakuum gleich eins ist. Das System der elektrostatischen CGS-Einheiten (E.S.E) ist ein kohärentes Einheitensystem für das dreidimensionale elektrostatische Gleichungensystem.

– Das elektromagnetische Gleichungensystem, das die elektrische Stromstärke als eine abgeleitete Größe mittels des Wechselwirkungsgesetzes für die Kraft zwischen zwei elektrischen Stromelementen definiert, wobei die Permeabilität gleich einer Größe der Dimension 1 gesetzt wird (Permeabilitätszahl), deren Wert im Vakuum gleich eins ist. Das System der elektromagnetischen CGS-Einheiten (E.M.E) ist ein kohärentes Einheitensystem für das dreidimensionale elektromagnetische Gleichungensystem.

– Das symmetrische Gleichungensystem, das die elektrischen Größen (einschließlich der elektrischen Stromstärke) dem elektrostatischen Gleichungensystem und die magnetischen Größen dem elektromagnetischen Gleichungensystem entnimmt.

Dieses System der „gemischten" CGS-Einheiten – Gaußsches System genannt – ist ein kohärentes Einheitensystem für das dreidimensionale oder Gaußsche Gleichungensystem.

Vier abgeleitete magnetische oder Gaußsche CGS-Einheiten haben besondere Namen erhalten. Sie sind in Tab. 9.10 zusammengestellt.

Die Gleichungen dieser dreidimensionalen Systeme werden gewöhnlich in der „nichtrationalen" Form geschrieben, die so genannt wird, weil in diesen Gleichungen oft Faktoren 2π oder 4π bei Situationen ohne Zylinder – oder Kugelsymmetrie auftreten. Die Gleichungen werden aber auch gelegentlich in „rationaler" Form geschrieben, in der diese Faktoren nur in solchen Gleichungen auftreten, in denen man sie von der Geometrie der Situation her erwarten kann.

Wenn dreidimensionale Gleichungen verwendet werden, benutzt man meistens das Gaußsche System in nichtrationaler Form.

Beziehungen zwischen Größen in unterschiedlichen Gleichungensystemen sind ausführlich dargestellt bei U. Stille (1961). S. auch ISO 31/5-1992 „Quantities and units of electricity and magnetism" sowie „Symbole, Einheiten und Nomenklatur in der Physik" (1981), Deutsche Ausgabe von „Symbols, Units and Nomenclature in Physics", SUN-Document U.I.P. 20 (1978) Weinheim: Physik-Verlag.

Tab. 9.10 Abgeleitete CGS-Einheiten im Gaußschen System mit besonderen Namen

Größe	abgeleitete Einheit Name	Einheitenzeichen	durch CGS-Basiseinheiten ausgedrückt
$H^{*1)}$	Oersted	Oe	$cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$
B^*	Gauß	G,Gs	$cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$
Φ^*	Maxwell	Mx	$cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$
F_m^*	Gilbert	Gi	$cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$

1)Der Stern dient der Unterscheidung von entsprechenden Größen im vierdimensionalen System.

9.1.9 Fundamentalkonstanten der Physik (W. Wöger)

Die grundlegenden physikalischen Theorien enthalten Elemente – die Fundamentalkonstanten (auch Naturkonstanten) –, deren Werte als zeitlich und räumlich unveränderlich angenommen und nicht durch Theorien selbst erklärt werden. Quantitative Aussagen der Theorien können nur so genau experimentell überprüft werden, wie diese Elemente bekannt sind. Die Überprüfung der Konsistenz des physikalischen Theoriengebäudes und der Gültigkeitsgrenzen einzelner Theorien setzt daher die experimentelle Bestimmung der Naturkonstanten mit der geringsten meßtechnisch möglichen Unsicherheit voraus.

Nur wenige Fundamentalkonstanten sind Größen der Dimension Eins. Somit hängen die Zahlenwerte der meisten Konstanten von den im Experiment verwendeten Einheiten ab, die aber nur mit einer anzugebenden Unsicherheit die SI-Definition repräsentieren (s. **9**.1.4.1). Die experimentell bestimmte Konstante in SI-Einheiten ist daher mit mindestens dieser Unsicherheit versehen. Kann jedoch eine Fundamentalkonstante oder eine Kombination von Konstanten unabhängig von Ort und Zeit mit hoher Präzision reproduziert werden, so liegt es nahe, sie selbst als Einheit zu benutzen oder sie zur Definition einer Einheit zu benutzen. Nachdem festgestellt wurde, daß die genaue meßtechnische Bestimmung der (Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit c_0 lediglich durch die Unsicherheit bei der Realisierung der Längeneinheit Meter begrenzt war, wurde die Lichtgeschwindigkeit festgelegt und damit eine Längeneinheit eingeführt, die jetzt auf die sehr genau realisierbare Zeiteinheit zurückgeführt war. Damit diese Längeneinheit sich aber nicht signifikant von der bisherigen unterschied, also Kontinuität der Einheiten gewährleistet war, wurde der Wert der Lichtgeschwindigkeit in ihrem bisherigem Unsicherheitsbereich gewählt. Durch den Josephson-Effekt läßt sich das magnetische Flußquant $h/2e$ sehr präzise reproduzieren, womit die Einführung einer sehr gut reproduzierbaren – und wiederum auf die Zeiteinheit zurückgeführten – elektrischen Spannungseinheit für praktische Zwecke möglich wurde. Ähnliches gilt für den von-Klitzing-Effekt (auch: Quanten-Hall-Effekt), bei dem die von Klitzingsche Konstante h/e^2 sehr genau reproduziert wird und zu einer elektrischen Widerstandseinheit für praktische Zwecke führt. In beiden Fällen jedoch ist das Verhältnis der so für praktische Zwecke gewonnenen Einheit zur definierten SI-Einheit nicht in wünschenswertem Maße bekannt. Sollten nun einerseits die Reproduzierbarkeit und andererseits die Kontinuität der SI-Einheiten bewahrt werden, müssen nach wie vor die Werte dieser beiden Fundamentalkonstantenkombinationen in SI-Einheiten so genau wie möglich ermittelt werden. Der hohe Aufwand zur Bestimmung der Fundamentalkonstanten ist nicht nur zur Überprüfung des Theoriengebäudes, sondern auch aus ganz praktischen meßtechnischen Gründen notwendig und gerechtfertigt.

Einen wichtigen Schritt auf dem Wege zur immer besseren Kenntnis der Fundamentalkonstanten bildet neben dem Experiment die Ausgleichsrechnung für die Konstanten nach der Methode der kleinsten Quadrate. Hierbei wird ausgenutzt, daß die meisten Konstanten über die Theorien miteinander verknüpft sind. Davon ausgenommen ist zur Zeit noch die Gravitationskonstante G, da über die Verbindung der Gravitationswechselwirkung zu irgendeiner der anderen fundamentalen Wechselwirkungen (insbesondere zur elektroschwachen) nichts bekannt ist. Liegen jedoch durch die Theorien geforderte Verknüpfungen vor, so kann eine Konstante oder eine Konstantenkombination nicht nur experimentell direkt, sondern auch indirekt aus den Daten anderer Konstanten bestimmt werdne. Die Ausgleichsrechnung bildet aus allen diesen Ergebnissen ein gewichtetes Mittel, wobei die Gewichte durch die experimentellen Unsicherheiten der Eingangsdaten gegeben sind. Ein Meßergebnis hat innerhalb der Ausgleichsrechnung ein um so höheres Gewicht, je kleiner die Unsicherheit der Messung ist. Ist der vorliegende experimentelle Eingangsdatensatz konsistent bezüglich der bekannten Verknüpfungen der Konstanten untereinander, so wird sich der Wert irgendeiner der ausgeglichenen Konstanten nicht signifikant von den experimentellen Werten unterscheiden, die vor der Ausgleichung für diese Konstante vorlagen. Nach aller Erfahrung ist dies kaum je der Fall. Aus der Ausgleichsrechnung erhält man jedoch Hinweise auf diejenigen Gruppen von Experimenten, die vermutlich für die aufgetretenen Inkonsistenzen verantwortlich sind. Sie gibt auf diese Weise Anlaß zu weiterer zielgerichteter Forschung. Inkonsistenzen lassen sich häufig auf die Angaben der experimentellen Unsicherheiten zurückführen, da diese Unsicherheit im Falle der Fundamentalkonstanten nahezu ausschließlich durch wenig bekannte systematische Meßabweichungen verursacht sind.

Auf der Basis der Ergebnisse einer Ausgleichsrechnung kann ein Satz konsistenter Werte der Fundamentalkonstanten zur weltweit einheitlichen Verwendung in Physik und Chemie erzeugt werden. Nach Vorliegen neuer experimenteller Ergebnisse geschieht dies – in der Regel alle 5 bis 10 Jahre – durch die Task Group on Fundamental Constants des Committee on Data and Technology (CODATA) des International Council of Scientific Unions (ICSU). Ein Auszug aus den zuletzt im Jahre 1986 empfohlenen Werten (Cohen u. Taylor (1986) und (1987)) ist in Tab. T 9.02 des Anhangs enthalten. Die Werte eines solchen Satzes sind korreliert. Das bedeutet, daß sich zwar der Wert einer nicht explizit in der Tabelle aufgeführten Kombination von Konstanten aus den Tabellenwerten ihrer Konstituenten ergibt, ihre Unsicherheit aber durch Anwendung des verallgemeinerten Fortpflanzungsgesetztes für Unsicherheiten (s. **9**.3.3.2) errechnet werden muß. Hierzu sind die Diagonal- und Nichtdiagonalelemente (welche die Korrelationen beschreiben) der in der Originalliteratur angegebenen Kovarianz-Matrix zu verwenden.

Literatur zu 9.1

Baehr, H. D. (1974): Physikalische Größen und ihre Einheiten. Düsseldorf: Bertelsmann

Cohen, E.R.; Taylor, B.N. (1986): The 1986 Adjustment of the Fundamental Constants. CODATA Bulletin **63**

Cohen, E.R.; Taylor, B.N. (1987): The 1986 Adjustment of the Fundamental Constants. Rev. Mod. Phys. **59**, 1121–1148

Fleischmann, R. (1973): Einführung in die Physik. Weinheim: Physik-Verlag

German, S.; Drath, P. (1979): Handbuch SI-Einheiten. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg

Kamke, D.; Krämer, K. (1977): Physikalische Grundlagen der Maßeinheiten. Stuttgart: Teubner

Stille, U. (1961): Messen und Rechnen in der Physik. 2. Aufl., Braunschweig: Vieweg

BIPM (1991): Le Système International d'Unités (SI), 6. Ed., Pavillion de Breteuil, F-92310 Sèvres, France

DIN-Taschenbuch 22 (1990): Einheiten und Begriffe für physikalische Größen. Berlin/Köln: Beuth

DIN-Taschenbuch 202 (1994): Formelzeichen, Formelsatz, Mathematische Zeichen und Begriffe. Berlin/Köln: Beuth

ISO-Standards Handbook (1992): Quantities and units (enthält ISO 31 und ISO 1000), Genf

Symbols, Units and Nomenclature and Fundamental Constants in Physics, 1987 Revision: Document I.U.P.A.P.-25 (SUNAMCO 87-1)