

**Themenschwerpunkt**  
Das Internationale  
Einheitensystem (SI)



Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft

Amts- und Mitteilungsblatt der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin

Sonderdruck aus

117. Jahrgang, Heft 2, Juni 2007

## Inhalt

---

### Das Internationale Einheitensystem (SI)

• 8. Ausgabe der SI-Broschüre, Vorbemerkung	3
• Vorwort zur 8. Ausgabe	4
• Einleitung	6
• SI-Einheiten	12
• Dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten	22
• Einheiten außerhalb des SI	23
• Schreibweise der Namen und Zeichen der Einheiten und Darstellung von Größenwerten	30
• Anhang	35
• Liste der Abkürzungen	37

---

### Zum Titelbild:

Diese Ausgabe der PTB-Mitteilungen ist die deutsche Übersetzung der BIPM-Broschüre *Le Système international d'unités / The International System of Units (8<sup>e</sup> edition, 2006)*. Diese ist als pdf-Dokument erhältlich unter [www.bipm.fr](http://www.bipm.fr)

Die hier vorliegende deutsche Übersetzung finden Sie als pdf-Dokument unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de) (Rubrik „Publikationen“).

## Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „**Amtliche Bekanntmachungen**“ unter anderem die **aktuellen Geräte-Prüfungen** und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

### Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,  
27568 Bremerhaven  
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)  
E-Mail: [info@nw-verlag.de](mailto:info@nw-verlag.de)

### Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),  
Braunschweig und Berlin  
Postanschrift:  
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig  
Lieferanschrift:  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

### Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB  
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)  
Gisela Link  
Telefon: (05 31) 592-82 02  
Telefax: (05 31) 592-30 08  
E-Mail: [gisela.link@ptb.de](mailto:gisela.link@ptb.de)

### Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens  
Telefon: (04 71) 9 45 44-61  
Telefax: (04 71) 9 45 44-88  
E-Mail: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)

### Anzeigenservice

Karin Drewes  
Telefon: (04 71) 9 45 44-21  
Telefax: (04 71) 9 45 44-77  
E-Mail: [info@nw-verlag.de](mailto:info@nw-verlag.de)

### Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 50,50 Euro, das Einzelheft 15 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2007

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

## 8. Ausgabe der SI-Broschüre

### Vorbemerkung

Jeder Gegenstand braucht eine adäquate Sprache ihn zu beschreiben. Die Gegenstände der Physik sind grundlegende Phänomene der Natur, die wir zu verstehen versuchen, indem wir ihre Wirkungen messen – die Phänomene werden quantifiziert. Die physikalische Grammatik, eben dies zu tun, ist ein System physikalischer Einheiten. Prinzipiell könnten beliebig viele „Grammatiken“ entworfen werden (und sie existierten auch in der Vergangenheit), allerdings mit der Folge mehr oder minder großer Sprachbarrieren, wenn nicht einer allgemeinen Sprachverwirrung. Ein großer Erfolg einer Sprachvereinheitlichung ist daher das seit vielen Jahrzehnten nahezu weltweit akzeptierte Internationale Einheitensystem SI (Le Système internationale d'unités).

Dieses SI-System, das gegenwärtig auf sieben Basiseinheiten und zahlreichen „abgeleiteten Einheiten“ fußt, ist ein Kind der Meterkonvention, also eines internationalen Vertrages, der bereits im Jahr 1875 von 17 Staaten unterzeichnet wurde. (Mittlerweile hat sich die Anzahl der Vertragspartner auf 51 erhöht.) Das SI-System wurde im Jahr 1960 von der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) verabschiedet und kann als ein Gradmesser des Erfolges der Meterkonvention verstanden werden, ist es doch Ziel und Aufgabe dieser Konvention, alle Maße und Gewichte international zu vereinheitlichen.

Die Definitionen der physikalischen Einheiten sind dabei keineswegs „in Stein gemeißelt“, sondern richten sich auch nach praktischen Gesichtspunkten aus und sind damit vielmehr ein Ausdruck des messtechnisch Möglichen. So war die Längeneinheit Meter vor 1960 noch als die Länge des „Ur-Meters“, des internationalen Prototyps aus einer Platin-Iridium-Legierung, festgelegt, wurde dann als ein bestimmtes Vielfaches der Wellenlänge einer Spektrallinie des Atoms Krypton-86 definiert, um schließlich im Jahr 1983 seine bis heute gültige Form zu erhalten: Das Meter als die Strecke, die das Licht im Vakuum in einem gewissen Bruchteil einer Sekunde zurücklegt. Die physikalische Einheit Meter ist damit auf eine Naturkonstante – hier die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum – zurückgeführt.

Auf ein ähnlich festes Fundament wie die Einheit Meter können sich gegenwärtig nur Sekunde, Volt und Ohm abstützen. Für die übrigen SI-Einheiten ist eine solche Rückführung auf fundamentale Konstanten dagegen noch eine große Herausforderung. Das Kilogramm und das Mol sind die Kandidaten, bei denen eine Neudefinition in unmittelbarer Reichweite zu liegen scheint. Und auch das Kelvin und das Ampere versuchen ganz aktuell den Sockel der Naturkonstanten zu erklimmen. Gelingen die entsprechenden Experimente in den Nationalen Metrologieninstituten, dann wird das messtechnisch Machbare in den Definitionen der Einheiten und also im SI-System seinen Ausdruck finden. In diesem Sinne „lebt“ das SI-System und die vorliegende Broschüre gibt eine Momentaufnahme dieses Entwicklungsprozesses wieder.

Herausgeber dieser Broschüre ist das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in Sèvres bei Paris. Seine Ursprungssprache ist Französisch. Gleichzeitig wird dieses Dokument auch in englischer Sprache veröffentlicht. Für die hier vorliegende deutsche Übersetzung, die lediglich auf einige sehr spezialisierte Anhänge des Originals verzichtet, ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) verantwortlich. Mein herzlicher Dank geht daher an Frau Cecile Charvieux vom Sprachendienst der PTB für die Übersetzung aus dem französischen Original und an die Herren Dr. Bernd Siebert und Dr. Michael Gläser für die inhaltliche Betreuung und Kommentierung.

Prof. Dr. Ernst O. Göbel, Präsident der PTB und Präsident des CIPM

Anmerkungen des Übersetzers sind grau unterlegt. Sie dienen der Erläuterung.

**Verbindlich ist der französische Text.**

Die *Comptes Rendus* (CR) sind die offiziellen Protokolle der Verhandlungen der alle vier Jahre tagenden Generalkonferenz (CGPM).

Die *Procès-verbaux* (PV) sind die offiziellen Protokolle der Verhandlungen des jährlich tagenden Internationalen Komitees (CIPM).

Beide Protokolle werden seit längerem auch ins Englische übersetzt. Zitate im vorliegenden Dokument geben die Seiten für den französischen Text an und die für den englischen Text, falls er vorliegt, werden in Klammern dahinter gesetzt.

Dieser Anhang 1 wird hier nicht gedruckt, weil er sehr lang ist und nur für wenige Leser interessant sein dürfte.

Dieser Anhang 2 wird hier nicht gedruckt, weil er nur Experten betrifft, die die angesprochene Webseite sicherlich kennen.

## Vorwort zur 8. Ausgabe

Wir freuen uns, die 8. Ausgabe dieser Veröffentlichung, die allgemein „SI-Broschüre“ genannt wird und die das Internationale Einheitensystem (SI) definiert und beschreibt, vorstellen zu dürfen. Diese Broschüre wird als Papierversion veröffentlicht und elektronische Versionen in französischer und englischer Sprache sind auf der Website des BIPM verfügbar, [www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure/](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/).

Seit 1970 hat das Bureau International des Poids et Mesures, das BIPM, schon sieben Auflagen dieses Dokuments veröffentlicht. Hauptziel dieser Publikation ist es, das SI zu definieren und zu verbreiten. Seit seiner Annahme durch die 9. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) im Jahre 1948 wird das SI weltweit als Sprache von Wissenschaft und Technik bevorzugt verwendet.

Das SI „lebt“ und es ist selbstverständlich, dass es sich ständig weiter entwickelt und die heutige beste Messpraxis widerspiegelt. Diese 8. Ausgabe enthält daher einige Veränderungen gegenüber der letzten Ausgabe. Wie früher enthält sie die Definitionen aller Basiseinheiten sowie die Resolutionen und Empfehlungen der Generalkonferenz und des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht (CIPM), die sich auf das Internationale Einheitensystem beziehen. Die offiziellen Texte zu diesen Entscheidungen findet man in den Bänden der *Berichte* (*Comptes rendus*, (CR)) der Generalkonferenz und der *Protokolle* (*Procès-verbaux*, (PV)) des Internationalen Komitees; viele davon sind auch in *Metrologia* veröffentlicht worden. Um die praktische Anwendung des SI zu erleichtern, werden diese Entscheidungen im Text erläutert. Das erste Kapitel enthält außerdem eine allgemeine Einführung in die Entwicklung der unterschiedlichen Einheitensysteme und insbesondere des SI. Die Definitionen und Darstellungen aller Einheiten werden auch hinsichtlich der allgemeinen Relativitätstheorie betrachtet. Zum ersten Mal beinhaltet diese Broschüre auch eine kurze Diskussion zu den Einheiten, die biologischen Größen beigeordnet sind.

Im Anhang 1 sind alle Entscheidungen (Resolutionen, Empfehlungen, Erklärungen), die seit 1889 von der Generalkonferenz und dem Internationalen Komitee in Bezug auf die Maßeinheiten und das Internationale Einheitensystem je erlassen worden sind, in chronologischer Reihenfolge wiedergegeben.

Anhang 2 liegt nur in elektronischer Form vor, er kann von der BIPM-Webseite, [www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure/appendix2/](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix2/), heruntergeladen werden. Er gibt einen Überblick über die praktische Darstellung einiger wichtiger Einheiten, die mit den Definitionen im Haupttext konsistent sind. Dies ist für die metrologische Laborarbeit nützlich, um die Einheiten darzustellen und Maßverkörperungen und Messgeräte höchster Qualität zu kalibrieren. Dieser Anhang wird regelmäßig aktualisiert, um den Fortschritten Rechnung zu tragen, die im Bereich der experimentellen Technik zur Darstellung der Einheiten erzielt werden.

Anhang 3 stellt die Einheiten vor, die zur Messung der aktinischen Effekte in belebter Materie verwendet werden.

Das *Beratende Komitee der Einheiten* des CIPM, das CCU, hat den Entwurf für das vorliegende Dokument erstellt; das CCU und das CIPM haben beide der Endfassung zugestimmt. Diese 8. Ausgabe ist eine Revision der 7. Ausgabe (1998). Sie berücksichtigt die Entscheidungen der Generalkonferenz und des Internationalen Komitees seit der Veröffentlichung der 7. Ausgabe.

In vielen Ländern und bei zahlreichen Organisationen und wissenschaftlichen Vereinigungen wird dieses Dokument seit über 35 Jahren als Nachschlagewerk benutzt. Um dessen Inhalt einer größeren Anzahl von Nutzern zugänglich zu machen, hat das Internationale Komitee 1985 beschlossen, eine englische Fassung des Textes der 5. Ausgabe zu veröffentlichen; die späteren Fassungen sind ebenfalls zweisprachig vorhanden. Für die erste englische Fassung hat sich das BIPM bemüht, eine zuverlässige Übersetzung des Originaltextes in enger Zusammenarbeit mit dem National Physical Laboratory (Teddington, Vereinigtes Königreich) und dem National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, USA) – das damals noch National Bureau of Standards hieß – zur Verfügung zu stellen. Die französische und die englische Fassung der vorliegenden Ausgabe wurden vom CCU in enger Zusammenarbeit mit dem BIPM erstellt.

Die 22. Generalkonferenz beschloss im Jahr 2003, einer Entscheidung des Internationalen Komitees aus dem Jahr 1997 folgend: „Das Symbol für das Dezimalzeichen soll entweder der Punkt auf der Linie oder das Komma auf der Linie sein“. Dieser Entscheidung folgend und entsprechend dem Gebrauch in den jeweiligen zwei Sprachen wird in der französischen Fassung das Komma auf der Zeile als Dezimalzeichen benutzt, während die englische Fassung den Punkt auf der Zeile enthält. Diese Praxis hat keinerlei Einfluss auf die Übersetzung des Dezimalzeichen in andere Sprachen. Es wird außerdem darauf hingewiesen, dass es im Englischen kleine Unterschiede in der Rechtschreibung mancher Wörter (z.B. „metre“ und „meter“, „litre“ und „liter“) gibt. Der veröffentlichte englische Text folgt den Regeln der ISO-Norm 31, Quantities and Units (*Größen und Einheiten*).

Der Leser wird darauf hingewiesen, dass der französische Wortlaut den offiziellen Text darstellt. Dieser muss auch für ein Originalzitat oder bei Zweifeln bezüglich der Auslegung des Textes verwendet werden.

In der hier vorliegenden Fassung wird das Komma als Dezimalzeichen benutzt.

März 2006



E. Göbel  
Vorsitzender des CIPM



I. M. Mills  
Vorsitzender des CCU



A. J. Wallard  
Leiter des BIPM

## 1 Einleitung

### 1.1 Größen und Einheiten

Die Begriffe **Größe** und **Einheit** werden im Internationalen Wörterbuch der grundlegenden und allgemeinen Begriffe der Metrologie (VIM) definiert.

Die Größe Geschwindigkeit  $v$  kann mittels der Größen Länge  $x$  und Zeit  $t$  durch die Gleichung

$$v = dx/dt$$

ausgedrückt werden.

In den meisten Größen- und Einheitensystemen werden die Länge  $x$  und die Zeit  $t$  als Basisgrößen betrachtet, für die das Meter  $m$  und die Sekunde  $s$  als Basiseinheiten gewählt werden können. Die Geschwindigkeit  $v$  gilt dann als abgeleitete Größe mit der abgeleiteten Einheit Meter pro Sekunde,  $m/s$ .

In der Elektrochemie z.B. wird die elektrische Beweglichkeit eines Ions  $u$  definiert als Proportionalkonstante zwischen Driftgeschwindigkeit  $v$  und elektrischer Feldstärke  $E$ ,

$$u = v/E.$$

Die abgeleitete Einheit der elektrischen Beweglichkeit ist daher gegeben durch

$$(m/s)/(V/m) = m^2 V^{-1} s^{-1},$$

also in Einheiten, die einfach mit den gewählten Basiseinheiten verknüpft sind. ( $V$  bezeichnet die abgeleitete SI-Einheit Volt).

Der Wert einer Größe wird generell als Produkt von Zahlenwert und Einheit ausgedrückt. Die Einheit ist dabei nur ein spezielles Beispiel der betreffenden Größe und wird als Bezug genutzt. Der Zahlenwert ist das Verhältnis zwischen dem Wert der betreffenden Größe und der Einheit. Für eine bestimmte Größe kann man mehrere verschiedene Einheiten verwenden. Zum Beispiel kann die Geschwindigkeit  $v$  eines Teilchens als  $v = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}$  ausgedrückt werden, wobei die Einheiten Meter pro Sekunde und Kilometer pro Stunde alternative Einheiten sind, die denselben Wert der Größe „Geschwindigkeit“ ausdrücken. Wegen der Bedeutung eines klar definierten Systems einfach zugänglicher und weltweit anerkannter Einheiten für die große Anzahl an Messungen, die die heutige komplexe Gesellschaft erfordert, sollten die Einheiten aber so gewählt werden, dass sie für jedermann leicht verfügbar, konstant in Raum und Zeit und mit großer Genauigkeit leicht handhabbar sind.

Um ein Einheitensystem wie das internationale Einheitensystem (SI) zu erstellen, ist es zunächst notwendig, ein Größensystem und einen Satz von Gleichungen zur Definition der Beziehungen zwischen diesen Größen zu erstellen. Dies ist erforderlich, siehe unten, da die Gleichungen, die die Größen verknüpfen, die Gleichungen festlegen, die die Einheiten verknüpfen. Es ist zweckmäßig, Definitionen für eine begrenzte Anzahl von Einheiten als *Basiseinheiten* auszuwählen und die Einheiten aller anderen Größen anschließend durch Produkte von Potenzen der Basiseinheiten als *abgeleitete Einheiten* auszudrücken. In ähnlicher Weise werden die entsprechenden Größen als *Basisgrößen* und *abgeleitete Größen* beschrieben, und die Gleichungen, die die abgeleiteten Größen in Basisgrößen liefern, werden verwendet, um die abgeleiteten Einheiten mit Hilfe der Basiseinheiten auszudrücken (siehe **Abschnitt 1.4 unten**). **Es ist daher logisch, erst die Größen und Gleichungen zu bestimmen, die die Größen miteinander verknüpfen, und danach die Einheiten zu wählen.**

Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Einteilung der Größen in Basis- und abgeleitete Größen lediglich eine Konvention und nicht wesentlich für das Verständnis der zugrunde liegenden Physik. Was jedoch die Einheiten angeht, ist es wichtig, dass jede Basiseinheit besonders sorgfältig definiert wird, um die oben im ersten Absatz aufgeführten Bedingungen zu erfüllen, da sie die Grundlage des gesamten Einheitensystems darstellen. Die Definitionen der abgeleiteten Einheiten mittels der Basiseinheiten ergeben sich aus den Gleichungen, die die abgeleiteten Größen mittels der Basisgrößen definieren. Daher ist die Erstellung eines Einheitensystems, welches Gegenstand dieser Broschüre ist, eng mit den algebraischen Gleichungen verknüpft, die die entsprechenden Größen miteinander verbinden.

Die Zahl der für Wissenschaft und Technik wichtigen abgeleiteten Größen kann beliebig erweitert werden. Mit der Entwicklung neuer wissenschaftlicher Gebiete werden neue Größen von den Forschern geschaffen, um die Eigenschaften des Gebiets darzustellen. Den neuen Größen folgen neue Gleichungen, die sie mit bekannten Größen und dann mit Basisgrößen verknüpfen. Daher kann man die abgeleiteten Einheiten für diese neuen Größen als Produkt von Potenzen der zuvor gewählten Basiseinheiten definieren.

## 1.2 Das Internationale Einheitensystem (SI) und das entsprechende Größensystem

Gegenstand dieser Broschüre ist es, die Informationen zu geben, die notwendig sind, um das Internationale Einheitensystem zu definieren und anzuwenden, das weltweit als SI (Französisch: *Système International d'Unités*) bekannt ist. Das SI wurde von der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) erstellt und definiert (siehe unter Abschnitt 1.8 „Geschichtliches“).

Das mit dem SI zu verwendende Größensystem und die diese Größen verknüpfenden Gleichungen entsprechen physikalischen Größen und Gleichungen, die allen Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern vertraut sind. Sie stehen in allen Handbüchern und in zahlreichen Veröffentlichungen. Jede dieser Quellen enthält aber nur eine Auswahl der sehr vielen möglichen Größen und Gleichungen. Eine Vielzahl von Größen, ihre empfohlenen Namen und Zeichen sowie die Gleichungen, mit denen sie untereinander verknüpft sind, finden sich in den internationalen Normen ISO 31 und IEC 60027, die vom 12. Technischen Ausschuss der Internationalen Vereinigung der Standardisierungsgremien (ISO/TC 12) und vom 25. Technischen Ausschuss der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC/TC 25) erarbeitet wurden. Derzeit überarbeiten diese zwei Gremien gemeinsam die Normen ISO 31 und IEC 60027. Die harmonisierte Norm wird ISO/IEC 80000, *Größen und Einheiten* heißen; in ihr wird vorgeschlagen, Größen und Gleichungen, die mit dem SI verwendet werden, „Internationales Größensystem“ zu nennen.

Die im SI verwendeten Basisgrößen sind Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke. Per Konvention werden die Basisgrößen als voneinander unabhängig betrachtet. Die entsprechenden, von der CGPM ausgewählten Basiseinheiten des SI sind das Meter, das Kilogramm, die Sekunde, das Ampere, das Kelvin, das Mol und die Candela. Diese Basiseinheiten werden im Abschnitt 2.1.1 definiert. Die vom SI abgeleiteten Einheiten werden dann anhand der Produkte von Potenzen der Basiseinheiten nach den algebraischen Verhältnissen gebildet, die die entsprechenden abgeleiteten Größen mittels der Basisgrößen definieren (siehe Abschnitt 1.4 unten).

In seltenen Fällen kann man zwischen mehreren Formen der Beziehungen zwischen den Größen wählen. Ein besonders wichtiges Beispiel betrifft die Definition der elektromagnetischen Größen. In diesem Fall basieren die mit dem SI verwendeten rationalisierten elektromagnetischen Gleichungen auf vier Größen: Länge, Masse, Zeit und elektrischer Strom. In diesen Gleichungen haben die elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$  (Permittivität des Vakuums) und die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  (Permeabilität des Vakuums) Dimensionen und Werte, die der Gleichung  $\epsilon_0\mu_0 = 1/c_0^2$  entsprechen, wobei  $c_0$  die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum darstellt. Das Coulombsche Gesetz für die elektrostatische Kraft zwischen zwei Teilchen mit den Ladungen  $q_1$  und  $q_2$  im Abstand  $r$  lautet<sup>(\*)</sup>:

$$F = \frac{q_1 q_2 r}{4\pi \epsilon_0 r^3}$$

und die entsprechende Gleichung für die magnetischen Kraft zwischen zwei dünnen, elektrische Ströme führenden Drahtelementen,  $i_1 d\mathbf{l}_1$  and  $i_2 d\mathbf{l}_2$ , lautet:

$$d^2F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_1 d\mathbf{l}_1 \times (i_2 d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{r})}{r^3}$$

wobei  $d^2F$  das zweite Differential der Kraft  $F$  ist. Diese Gleichungen, auf denen das SI beruht, unterscheiden sich von den in den Systemen CGS-UES, CGS-UEM und Gauß-CGS verwendeten Gleichungen, in denen  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$  dimensionslose Größen mit dem Wert 1 sind und die Rationalisierungsfaktoren  $4\pi$  nicht berücksichtigt werden.

Der Name *Système International d'Unités* und das Akronym SI wurden 1960 von der 11. CGPM festgelegt.

Beispiele für Größengleichungen, die zusammen mit dem SI verwendet werden, sind die Newtonsche Gleichung zur Trägheit, die die Kraft  $F$  mit der Masse  $m$  und der Beschleunigung  $a$  eines Teilchens verbindet:  $F = ma$ , und die Gleichung, die die kinetische Energie  $T$  eines sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegenden Teilchens ergibt:  $T = mv^2/2$ .

<sup>(\*)</sup> Vektoren werden durch Zeichen in Fettschrift dargestellt.



Größenzeichen werden immer kursiv geschrieben, während die Dimensionszeichen in römischer Schrift serifenlos und großgeschrieben werden.

Für manche Größen ist es möglich, unterschiedliche Zeichen zu verwenden, wie dies für die Länge oder den elektrischen Strom angegeben ist. Bei den für die Größen angegebenen Zeichen handelt es sich nur um Empfehlungen. Aber der Gebrauch der in dieser Broschüre für die Einheiten angegebenen Zeichen sowie ihr Stil und ihre Form sind verbindlich festgelegt (siehe Abschnitt 5).

Die Dimensionszeichen und Exponenten werden nach normalen Regeln der Algebra behandelt. Die Dimension für Fläche schreibt man z.B. als  $L^2$ , die für Geschwindigkeit  $LT^{-1}$ , die für Kraft  $LMT^{-2}$  und die für Energie  $L^2MT^{-2}$ .

Der Brechungsindex eines Mediums ist z.B. definiert als das Verhältnis zwischen den Geschwindigkeiten des Lichts im Vakuum und in diesem Medium; er ist daher das Verhältnis von zwei Größen gleicher Art und deshalb eine dimensionslose Größe. Andere Beispiele für dimensionslose Größen sind: der ebene Winkel, der Massenanteil, die relative Permittivität, die relative Permeabilität und die Finesse eines Fabry-Pérot-Resonators.

### 1.3 Dimension der Größen

Per Konvention sind physikalische Größen in einem System von Dimensionen organisiert. Jede der sieben Basisgrößen des SI hat ihre eigene Dimension, die symbolisch durch einen einzigen Großbuchstaben in aufrechter (nicht kursiver) Grundschrift ohne Serife, dargestellt werden. Die für die Basisgrößen verwendeten Zeichen und die Zeichen, die verwendet werden, um ihre Dimension anzuzeigen, sind wie folgt:

Basisgrößen und Dimensionen, die im SI verwendet werden

Basisgröße	Zeichen der Größe	Zeichen der Dimension
Länge	$l, x, r, \text{etc.}$	<b>L</b>
Masse	$m$	<b>M</b>
Zeit, Dauer	$t$	<b>T</b>
Elektrischer Strom	$I, i$	<b>I</b>
Thermodynamische Temperatur	$T$	<b>Θ</b>
Stoffmenge	$n$	<b>N</b>
Lichtstärke	$I_v$	<b>J</b>

Alle anderen Größen sind abgeleitete Größen. Sie können durch die Basisgrößen mittels physikalischer Gleichungen ausgedrückt werden. Ihre Dimensionen werden als Produkt von Potenzen der Dimensionen der Basisgrößen anhand der Gleichungen dargestellt, die die abgeleiteten Größen mit den Basisgrößen verknüpfen. Generell wird die Dimension einer Größe  $Q$  als Produkt von Dimensionen dargestellt,

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta,$$

wobei die Exponenten  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta$  und  $\eta$  Dimensionsexponenten heißen und im Allgemeinen kleine, positive oder negative ganze Zahlen oder gleich Null sind. Die in der Dimension einer abgeleiteten Größe enthaltene Information über die Beziehung dieser Größe zu den Basisgrößen ist dieselbe wie die in der als Produkt von Potenzen der SI-Basiseinheiten dargestellten SI-Einheit für die abgeleitete Größe.

Es gibt einige abgeleitete Größen  $Q$ , in deren definierender Gleichung alle Dimensionsexponenten im Ausdruck für die Dimension von  $Q$  gleich null sind. Dies gilt insbesondere für eine Größe, die als das Verhältnis von zwei Größen gleicher Art definiert ist. Diese Größen werden als *dimensionslose* Größen oder Größen der *Dimension eins* beschrieben. Die kohärente abgeleitete Einheit solcher Größen ist immer die Zahl eins, 1, da dies das Verhältnis zwischen zwei identischen Einheiten für zwei Größen gleicher Art ist.

Es gibt aber auch Größen, die gar nicht mittels der sieben SI-Basisgrößen beschrieben werden können, sondern durch eine Anzahl gegeben sind. Beispiele sind die Anzahl von Molekülen, die Entartung im Bereich der Quantenmechanik (die Anzahl unabhängiger Zustände gleicher Energie) und die Zustandssumme in der statistischen Thermodynamik (die Anzahl zugänglicher thermischer Zustände). Diese Größen werden üblicherweise auch als Größen ohne Dimension oder mit der Dimension 1 betrachtet und haben daher als Einheit die Zahl eins, 1.

### 1.4 Kohärente Einheiten,

#### abgeleitete Einheiten mit besonderen Namen und SI-Vorsätze

Die abgeleiteten Einheiten werden als das Produkt von Potenzen der Basiseinheiten definiert. Wenn das Produkt der Potenzen keinen anderen numerischen Faktor als die 1 enthält, werden die abgeleiteten Einheiten *kohärente abgeleitete Einheiten* genannt. Die Basiseinheiten und die kohärenten abgeleiteten Einheiten des SI bilden eine kohärente Menge, die man als Satz der *kohärenten SI-Einheiten* bezeichnen kann. „Kohärent“ bedeutet, dass Zahlenwertgleichungen mit kohärenten Einheiten genau dieselbe Form wie die entsprechenden Größengleichungen haben. Es sind daher keine Umrechnungsfaktoren zwischen den Einheiten notwendig, wenn ausschließlich kohärente Einheiten verwendet werden.

Der Ausdruck der kohärenten Einheit einer abgeleiteten Größe kann anhand des dimensionalen Produkts der Größe errechnet werden, indem das Zeichen jeder Dimension durch das Zeichen für die entsprechende Basiseinheit ersetzt wird.

Zur Vereinfachung haben manche abgeleiteten kohärenten SI-Einheiten besondere Namen erhalten (siehe Abschnitt 2.2.2). Es wird nachdrücklich darauf hingewiesen, dass jede physikalische Größe auch dann nur *eine* kohärente SI-Einheit hat, wenn diese Einheit mittels besonderer Namen oder Zeichen unterschiedlich ausgedrückt werden kann. Umgekehrt gilt dies nicht, da in manchen Fällen dieselbe SI-Einheit verwendet werden kann, um die Werte mehrerer verschiedener Größen auszudrücken (siehe Text nach Tabelle 4).

Die Generalkonferenz hat außerdem eine Reihe von Vorsätzen für die Bildung von dezimalen Vielfachen und Teilen der kohärenten SI-Einheiten festgelegt (siehe Tabelle 5 in Abschnitt 3.1, Liste der Vorsatznamen und deren Zeichen). Diese Vorsätze sind hilfreich, um die Werte von Größen auszudrücken, die viel größer oder viel kleiner als die kohärente Einheit sind. Nach der Empfehlung 1 (1969) des CIPM werden diese Vorsätze als *SI-Vorsätze* bezeichnet. (Diese Vorsätze werden manchmal auch, wie im Abschnitt 4 unten beschrieben, mit Nicht-SI-Einheiten verwendet). Wenn aber eine SI-Einheit mit Vorsatz verwendet wird, dann ist die resultierende abgeleitete Einheit nicht mehr kohärent, denn der Vorsatz führt einen von 1 verschiedenen numerischen Faktor in den Ausdruck der von den Basiseinheiten abgeleiteten Einheit ein.

Als historisch begründete Ausnahme enthält der Name des Kilogramms, der Basiseinheit der Masse, den Vorsatz „Kilo-“; es wird jedoch trotzdem als SI-Basiseinheit betrachtet. Die Vielfachen und Teile des Kilogramms werden gebildet, indem Vorsatznamen an den Namen der Einheit „Gramm“ und Vorsatzzeichen an das Einheitszeichen „g“ angehängt werden (siehe Abschnitt 3.2). So wird  $10^{-6}$  kg „Milligramm“, mg, geschrieben und nicht „Mikrokilogramm“,  $\mu$ kg.

Alle kohärenten Einheiten und die mit SI-Vorsätzen gebildeten Vielfachen und Teile dieser Einheiten können als *vollständiger Satz der SI-Einheiten* oder einfach als *SI-Einheiten* oder *Einheiten des SI* bezeichnet werden. Es muss allerdings beachtet werden, dass die dezimalen Vielfachen und Teile der SI-Einheiten keinen kohärenten Satz bilden.

### 1.5 SI-Einheiten im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie

Die Definitionen der SI-Basiseinheiten wurden in einem Kontext angenommen, der relativistische Effekte nicht beachtet. Wenn man diese beachtet, ist klar, dass diese Definitionen nur innerhalb eines räumlich begrenzten Gebiets gelten, in dem sich die sie realisierenden Standards bewegen. Die SI-Basiseinheiten werden mit lokalen Experimenten dargestellt, bei denen nur die Effekte der speziellen Relativitätstheorie zu berücksichtigen sind. Die Konstanten der Physik sind lokale Größen, deren Wert in *Eigen-Einheiten* (siehe Anmerkung) ausgedrückt wird.

Die physikalischen Realisierungen der Definition einer Einheit werden üblicherweise lokal verglichen. Im Falle der Frequenznormale ist es allerdings möglich, solche Vergleiche über Entfernungen mittels elektromagnetischer Signale durchzuführen. Um die Ergebnisse zu interpretieren, muss man die allgemeine Relativitätstheorie anwenden, da diese unter anderem eine relative Frequenzverschiebung zwischen Frequenznormalen von ca.  $1 \times 10^{-16}$  pro Meter Höhendifferenz auf der Erdoberfläche voraussagt. Einflüsse dieser Größenordnung können beim Vergleich der besten Frequenznormale nicht vernachlässigt werden.

### 1.6 Einheiten der Größen, die biologische Effekte beschreiben

Oft ist es schwierig, die Einheiten der Größen, die biologische Effekte beschreiben, auf SI-Einheiten zu beziehen, weil sie üblicherweise Gewichtungsfaktoren beinhalten, die man nicht genau kennen oder bestimmen kann und die gleichzeitig von Energie und Frequenz abhängen können. Diese Einheiten sind keine SI-Einheiten; sie werden in diesem Abschnitt nur kurz beschrieben.

Die spezielle Kombination der Basiseinheiten  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$  für eine Energie hat z.B. den besonderen Namen „Joule“ erhalten, Zeichen J, wobei per Definition gilt:  $J = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ .

Es ist sinnvoll und üblich, die Länge einer chemischen Verbindung in Nanometer, nm, statt durch Meter, m, aber die Entfernung zwischen London und Paris in Kilometer, km, und nicht in Meter, m, auszudrücken.

Das Meter pro Sekunde, Zeichen m/s, ist die kohärente SI-Einheit der Geschwindigkeit. Das Kilometer pro Sekunde, km/s, das Zentimeter pro Sekunde, cm/s und das Millimeter pro Sekunde, mm/s, sind ebenfalls SI-Einheiten, allerdings keine kohärenten.

Die Thematik der „unités propres“ (\*) wird behandelt in der von der 21. Generalkonferenz der International Astronomical Union (IAU) 1991 angenommenen Resolution A4 und im Bericht der Arbeitsgruppe des CCDS über die Anwendung der allgemeinen Relativitätstheorie in der Metrologie (Metrologia, 34, (1997), S. 261–290).

(\*) Dieser französische Ausdruck (englisch „proper units“) ist im Deutschen nicht üblich. Gemeint ist damit, dass die Einheiten nur im System des Beobachters gelten.

Optische Strahlung kann chemische Veränderungen in belebter oder unbelebter Materie verursachen: Strahlung, die solche Veränderungen verursachen kann, wird als *aktinische Strahlung* bezeichnet. Die Messergebnisse gewisser photochemischer oder photobiologischer Größen können in SI-Einheiten ausgedrückt werden. Diese Frage wird im Anhang kurz behandelt.

Schall verursacht kleine Luftdruckschwankungen, die dem normalen atmosphärischen Druck überlagert sind und die vom menschlichen Ohr erfasst werden. Die Empfindlichkeit des Ohrs hängt von der Schallfrequenz ab, aber sie ist weder eine einfache Funktion der Druckschwankungen noch der Frequenz. Daher werden in der Akustik frequenzgewichtete Größen verwendet, um näherungsweise darzustellen, wie Schall wahrgenommen wird. Solche gewichteten Größen werden beispielsweise in Studien zum Schutz vor Hörschäden verwendet. Die Effekte von Ultraschallwellen führen zu ähnlichen Bedenken in medizinischer Diagnose und Therapie.

Der französische Ausdruck für Energiedosis ist *dose absorbée* und der englische ist *absorbed dose*

Ionisierende Strahlung deponiert Energie in bestrahlter Materie. Das Verhältnis von übertragener Energie und Masse nennt man *Energiedosis*. Hohe Dosen ionisierender Strahlung töten Zellen. Dies wird in der Radiotherapie genutzt. Geeignete biologische Gewichtungsfunktionen werden verwendet, um die therapeutische Wirkung unterschiedlicher Behandlungen zu vergleichen. Niedrige, nicht-letale Dosen können lebende Organismen schädigen und z.B. Krebs verursachen. Daher basieren die Regelungen zum Strahlenschutz auf geeigneten Konversionsfunktionen zur Risikogewichtung für niedrige Dosen.

Es gibt einen Satz von Einheiten, die man benutzt, um die biologische Aktivität gewisser Stoffe zu quantifizieren, die in der medizinischen Diagnostik und Therapie verwendet werden. Diese können allerdings noch nicht mit SI-Einheiten definiert werden, da der Mechanismus der speziellen biologischen Wirkung, die diese Stoffe medizinisch nützlich macht, noch nicht ausreichend gut verstanden ist, um mittels physikalisch-chemischer Parameter quantifiziert werden zu können. Wegen ihrer Bedeutung für die menschliche Gesundheit und Sicherheit hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Verantwortung übernommen, WHO *Internationale Einheiten* (IU) für die biologische Aktivität dieser Substanzen zu definieren.

### 1.7 Gesetzliche Regelungen zu Einheiten

Auf nationaler Ebene schreiben die Staaten in Gesetzen die Verwendung der Einheiten vor, und zwar entweder allgemein oder nur für bestimmte Bereiche, wie den Handel, das Gesundheitswesen, die öffentliche Sicherheit und das Ausbildungswesen. In den meisten Ländern beruhen diese Gesetze auf der Anwendung des Internationalen Einheitensystems.

Die 1955 gegründete Internationale Organisation für das Gesetzliche Messwesen (OIML) befasst sich mit der internationalen Angleichung dieser Gesetzgebung.

### 1.8 Anmerkung zur Geschichte

In den vorangegangenen Punkten dieses Abschnitts wurde kurz dargestellt, wie ein Einheitensystem, insbesondere das SI, aufgebaut ist. Im Folgenden soll nun ein kurzer Überblick über die geschichtliche Entwicklung des SI gegeben werden.

Im Jahr 1948 beauftragte die 9. CGPM (1948, Resolution 6 ; CR, S. 64) das Internationale Komitee für Maß und Gewicht (CIPM),

- die Schaffung eines vollständigen Satzes von Regeln für Einheiten im Messwesen zu untersuchen
- die darüber in Kreisen der Wissenschaft, der Technik und der Lehre aller Länder herrschenden Vorstellungen durch eine offizielle Umfrage in Erfahrung zu bringen und
- Empfehlungen zur Einführung eines *praktischen Einheitensystems* vorzubereiten, das geeignet ist, von allen Unterzeichnerstaaten der Meterkonvention angenommen zu werden.

Dieselbe Generalkonferenz legte in der Resolution 7 (CR, S. 70) allgemeine Regeln zur Schreibweise von Einheitenzeichen fest und stellte eine Liste einiger kohärenter abgeleiteter Einheiten auf, die besondere Namen erhielten.

Die 10. CGPM (1954, Resolution 6 ; CR, S. 80) und die 14. CGPM (1971, Resolution 3 ; CR, S. 78 und *Metrologia*, 8, (1972), S. 36) nahmen als Basiseinheiten dieses „praktischen Einheitensystems“ die Einheiten der folgenden sieben Größen an: Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke.

Die 11. CGPM (1960, Resolution 12 ; CR, S. 87) nahm den Namen *Internationales Einheitensystem* (*Système International d'Unités*), mit dem internationalen Akronym SI, für dieses praktische Einheitensystem an, erstellte Regeln für die SI-Vorsätze, die abgeleiteten Einheiten, frühere zusätzliche Einheiten und andere Angaben; sie etablierte damit eine umfassende Regelung für Einheiten im Messwesen. Im Laufe der darauf folgenden Sitzungen ergänzten und änderten die Generalkonferenz und das Internationale Komitee die ursprüngliche Struktur des SI nach Bedarf, um dem Fortschritt der Wissenschaft und den Bedürfnissen der Anwender Rechnung zu tragen.

Man kann die wichtigsten Meilensteine, die zu diesen grundsätzlichen Entscheidungen der Generalkonferenz führten, wie folgt zusammenfassen:

- Die Schaffung des dezimalen metrischen Systems zur Zeit der französischen Revolution (1789) und die am 22. Juni 1799 daraus folgende Hinterlegung zweier Normale aus Platin (das Meter und das Kilogramm) beim Archiv der Republik in Paris können als der erste Schritt in Richtung des SI, wie wir es heute kennen, betrachtet werden.
- 1832 setzte sich Gauß nachhaltig für die Anwendung des metrischen Systems mit Bezug auf die in der Astronomie definierte Sekunde als kohärentes Einheitensystem für die Naturwissenschaften ein. Gauß war der erste, der *absolute* Messungen des irdischen Magnetfelds durchführte, wobei er ein dezimales System verwendete, das auf den drei *mechanischen Einheiten* Millimeter, Gramm und Sekunde für die Größen Länge, Masse und Zeit basiert. Im Anschluss daran erweiterten Gauß und Weber diese Messungen und bezogen weitere elektrische Phänomene mit ein.
- In den 1860er Jahren wurden diese Anwendungen im Fachgebiet Elektrizität und Magnetismus unter der aktiven Führung durch Maxwell und Thomson von der **British Association for the Advancement of Science (BAAS)** weiter entwickelt. Sie legten die Regeln für die Entwicklung eines aus *Basiseinheiten* und *abgeleiteten* Einheiten bestehenden *kohärenten Einheitensystems* fest. 1874 führte die BAAS das *CGS System* ein, ein kohärentes, dreidimensionales Einheitensystem basierend auf den drei mechanischen Einheiten Zentimeter, Gramm und Sekunde, und unter Anwendung von Vorsätzen von Mikro- bis Mega-, um die dezimalen Teile und Vielfache auszudrücken. Die danach erfolgende Entwicklung der Physik als experimentelle Wissenschaft fußte größtenteils auf diesem System.
- Die kohärente Ergänzung des CGS-Systems für die Bereiche Elektrizität und Magnetismus führte dazu, dass praxisferne Größeneinheiten gewählt wurden. Die BAAS und der Internationale Elektrizitätskongress – der Vorgänger der Internationalen Elektrotechnikkommission (IEC) – befürworteten in den 1880er Jahren ein gegenseitig kohärentes System *praktischer Einheiten*. Unter ihnen befanden sich das Ohm für den elektrische Widerstand, das Volt für die elektromotorische Kraft und das Ampere für die elektrische Stromstärke.
- Nach der Unterzeichnung der Meterkonvention am 20. Mai 1875, die das *Bureau international des poids et mesures* (BIPM) und das Internationale Komitee sowie die Generalkonferenz schuf, wurden neue internationale Meter- und Kilogrammprototypen hergestellt, die 1889 von der 1. CGPM für verbindlich erklärt wurden. Mit der astronomisch definierten Sekunde als Zeiteinheit bildeten diese Einheiten ein dreidimensionales System mechanischer Einheiten ähnlich dem CGS-System, allerdings mit dem Meter, dem Kilogramm und der Sekunde (MKS-System) als Basiseinheiten.
- 1901 zeigte Giorgi, dass es möglich ist, die mechanischen Einheiten des MKS-Systems mit dem praktischen System elektrischer Einheiten zu kombinieren, um ein einziges, kohärentes, vierdimensionales System zu erhalten, indem man diesen drei Basiseinheiten eine vierte, elektrische Einheit, wie das

Ampere oder das Ohm, hinzufügt und indem man die auf dem Gebiet des Elektromagnetismus verwendeten Gleichungen rationalisiert (siehe Gleichungen in Abschnitt 1.2.). Giorgis Vorschlag ebnete den Weg für andere Erweiterungen.

- Nachdem die Meterkonvention 1921 von der 6. CGPM überarbeitet und somit die Aufgabengebiete und Verantwortungen des Bureau International auf andere Bereiche der Physik erweitert worden waren und nach der daraus folgenden Schaffung des Beratenden Komitees für Elektrizität (CCE) durch die 7. CGPM im Jahre 1927 wurde Giorgis Vorschlag ausführlich von der IEC, der International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) und anderen internationalen Organisationen diskutiert. Diese Diskussionen führten dazu, dass das CCE 1939 die Annahme eines auf dem Meter, dem Kilogramm, der Sekunde und dem Ampere basierenden vierdimensionalen Systems (MKSA-Systems) vorschlug; dieser Vorschlag wurde 1946 vom Internationalen Komitee angenommen.
- Nach einer internationalen Untersuchung, die von 1948 an vom BIPM durchgeführt wurde, stimmte die 10. CGPM 1954 der Einführung des *Amperes*, des *Kelvins* und der *Candela* als Basiseinheiten jeweils für die Stromstärke, die thermodynamische Temperatur und die Lichtstärke zu. Die 11. CGPM gab 1960 diesem System den Namen *Système International d'Unités* (SI). Anlässlich der 14. CGPM im Jahre 1971 wurde lange zwischen Physikern und Chemikern diskutiert und dann dem SI das *Mol* als Basiseinheit für die Stoffmenge hinzugefügt. Seitdem beruht das SI auf sieben Basiseinheiten.

## 2 SI-Einheiten

### 2.1 SI-Basiseinheiten

Die offiziellen Definitionen aller SI-Basiseinheiten werden von der Generalkonferenz angenommen. Die beiden ersten dieser Definitionen wurden 1889 und die neueste 1983 angenommen. Die Definitionen werden dem technischen Fortschritt folgend in unregelmäßigen Abständen aktualisiert.

#### 2.1.1 Definitionen

Die derzeit gültigen Definitionen der Basiseinheiten wurden den *Comptes Rendus* (CR) der jeweiligen Generalkonferenz entnommen, die sie angenommen hat. Sie sind im Folgenden mit Einzug und in Fettschrift ohne Serife abgedruckt. Die Entscheidungen, die von erläuternder Natur sind und nicht Teil der den *Comptes Rendus*, der Generalkonferenz oder den *Procès-verbaux* (PV) des Internationalen Komitees entnommenen Definitionen, sind auch mit Einzug abgedruckt, aber in Standardschrift ohne Serife. Der zusätzliche Text liefert geschichtliche Informationen und Erläuterungen, ist aber kein Bestandteil der Definitionen.

Es ist wichtig, klar zwischen der Definition einer Einheit und ihrer Darstellung zu unterscheiden. Die Definition jeder einzelnen SI-Basiseinheit wird sorgfältig aufgesetzt, so dass sie eindeutig ist und eine verlässliche theoretische Grundlage darstellt, die genaueste und reproduzierbarste Messungen ermöglicht. Die Darstellung der Definition einer Einheit ist ein Verfahren, bei dem die Definition der Einheit verwendet werden kann, um den Wert einer Größe gleicher Art wie die Einheit und diesem Wert beigeordnete Messunsicherheit zu bestimmen. Eine Beschreibung von Verfahren zur praktischen Darstellung der Definitionen einiger wichtiger Einheiten findet man unter

[www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure/appendix2/](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix2/)  
auf der Webseite des BIPM; um die englische Version zu erhalten, ist hinter org/ „fr“ durch „en“ zu ersetzen.

Eine kohärente abgeleitete SI-Einheit ist nur eindeutig, wenn sie mittels der SI-Basiseinheiten definiert wird. Beispielsweise ist die kohärente abgeleitete SI-Einheit des elektrischen Widerstands, das Ohm, Zeichen  $\Omega$ , eindeutig durch die Beziehung  $\Omega = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$  definiert, die sich aus der Definition der Größe „elektrischer Widerstand“ ergibt. Aber jede Methode, die konsistent mit den physikalischen Gesetzen ist, könnte benutzt werden, um jedwede SI-Einheit darzustellen.

Zum Beispiel kann die Einheit „Ohm“ mit großer Genauigkeit mithilfe des Quanten-Hall-Effekts und des vom Internationalen Komitee empfohlenen Werts der von Klitzing-Konstante dargestellt werden.

Ferner ist es wichtig zu wissen, dass, obwohl die sieben Basisgrößen – Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke – durch Übereinkommen als voneinander unabhängig betrachtet werden, die Basiseinheiten – das Meter, das Kilogramm, die Sekunde, das Ampere, das Kelvin, das Mol und die Candela – nicht alle voneinander unabhängig sind. Die Definition des Meter bezieht sich auf die Sekunde, in die Definition des Ampere gehen das Meter, das Kilogramm und die Sekunde ein, in der Definition des Mol wird das Kilogramm verwendet und die Definition der Candela beinhaltet das Meter, das Kilogramm und die Sekunde.

### 2.1.1.1 Einheit der Länge (Meter)

Die Meterdefinition von 1889, die auf dem internationalen Platin-Iridium-Prototyp beruhte, wurde bei der 11. CGPM (1960) durch eine Definition ersetzt, die auf der Wellenlänge einer Krypton-86-Strahlung beruht. Diese Änderung wurde angenommen, um die Genauigkeit zu verbessern, mit der das Meter dargestellt werden konnte; zur Darstellung wurden ein Interferometer und ein verschiebbares Mikroskop benutzt, um den optischen Wegunterschied durch Zählen der Interferenzringe zu messen. Die 17. CGPM (1983, Resolution 1 ; CR, S. 97 und Metrologia, 20, (1984), S. 25) ersetzte 1983 diese Definition durch die heute noch gültige:

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

Es folgt, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum genau gleich 299 792 458 Meter durch Sekunde,  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s, ist.

Das internationale Prototyp des Urmeters, das 1889 von der 1. CGPM (CR, S. 34–38) für verbindlich erklärt wurde, wird immer noch beim BIPM unter den 1889 festgelegten Bedingungen aufbewahrt.

### 2.1.1.2 Einheit der Masse (Kilogramm)

Das internationale Prototyp des Kilogramms, ein zu diesem Zweck aus Platin-Iridium gefertigter Gegenstand, wird im BIPM unter den Bedingungen aufbewahrt, die 1889 von der 1. CGPM (CR, S. 34–38) festgelegt wurden, als sie dieses Prototyp für verbindlich erklärte:

Dieses Prototyp wird von nun an als die Einheit der Masse angesehen werden.

Zur Beendigung der Mehrdeutigkeit hinsichtlich der Bedeutung des Wortes „Gewicht“ im alltäglichen Sprachgebrauch erklärte die 3. CGPM (1901 ; CR, S. 70):

**Das Kilogramm ist die Einheit der Masse; es ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.**

Die vollständige Erklärung kann in Anhang 2 des Originals eingesehen werden; [www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure/appendix2/](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix2/)

Es folgt, dass die Masse des internationalen Kilogrammprototyps immer genau 1 Kilogramm,  $m(\mathcal{K}) = 1$  kg, ist. Aufgrund der unvermeidbaren Ansammlung von Verunreinigungen auf Oberflächen erfährt das internationale Prototyp eine entfernbare Oberflächenverunreinigung von ca. 1  $\mu\text{g}$  Masse pro Jahr. Aus diesem Grund hat das Internationale Komitee erklärt, dass, bis umfassendere Informationen vorliegen, die Bezugsmasse des internationalen Prototyps diejenige ist, die unmittelbar nach der Reinigung mittels eines speziellen Verfahrens vorliegt (PV, 57, (1989), S. 15–16 (104–105) und PV, 58, (1990), S. 10–12 (95–97)). Die so definierte Bezugsmasse wird verwendet, um die nationalen Platin-Iridium-Normale zu kalibrieren (Metrologia, 31, (1994), S. 317–336).

Zur Darstellung des Ohm mittels des Quanten-Hall-Effekts siehe PV, 56, S. 45 und Metrologia 26, (1989), S. 70. Die Erklärung zur Benutzung der von Klitzing-Konstante ist in PV, 68, S. 34 (101) zu finden.

Das Zeichen  $c_0$  (oder manchmal nur  $c$ ) ist das konventionelle Zeichen der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Das Zeichen  $m(\mathcal{K})$  wird verwendet, um die Masse des internationalen Kilogrammprototyps,  $\mathcal{K}$ , zu bezeichnen.

### 2.1.1.3 Einheit der Zeit (Sekunde)

Die Sekunde, die Einheit der Zeit, wurde ursprünglich als der 1/86 400ste Teil des mittleren Sonnentags definiert. Eine exakte Definition des „mittleren Sonnentags“ blieb den Astronomen überlassen. Die Beobachtungen ergaben jedoch, dass diese Definition wegen Unregelmäßigkeiten der Erdrotation nicht zufriedenstellend war. Um die Einheit der Zeit genauer zu definieren, nahm die 11. CGPM (1960, Resolution 9 ; CR, S. 86) eine von der Internationalen Astronomischen Union gegebene Definition an, die auf dem tropischen Jahr 1900 beruhte. Experimentelle Untersuchungen hatten jedoch bereits ergeben, dass ein auf einem Übergang zwischen zwei Energieniveaus eines Atoms oder Moleküls beruhendes atomares Zeitnormal mit einer viel höheren Genauigkeit realisierbar und reproduzierbar war. Weil eine sehr genaue Definition der Zeiteinheit des Internationalen Einheitensystems für die Anforderungen in Wissenschaft und Technik unerlässlich wurde, ersetzte die 13. CGPM (1967/68, Resolution 1 ; CR, S. 103 und Metrologia, 4, (1968), S. 43) die Definition der Sekunde durch folgende:

**Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung.**

Das Zeichen  $\nu(\text{hfs Cs})$  wird verwendet, um die Frequenz des hyperfeinen Übergangs des Cäsiumatoms im Grundzustand anzugeben.

Daraus folgt, dass die Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms genau gleich 9 192 631 770 Hertz,

$$\nu(\text{hfs Cs}) = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz, ist.}$$

Auf seiner Sitzung im Jahre 1997 hat das Internationale Komitee bestätigt, dass

diese Definition sich auf ein Cäsiumatom im Ruhezustand, bei einer Temperatur von 0 K, bezieht.

Diese Anmerkung soll klarstellen, dass die Definition der SI-Sekunde auf einem Cäsiumatom basiert, das nicht von der Schwarzkörperstrahlung gestört wird, d.h. in einer Umgebung, deren thermodynamische Temperatur konstant 0 K ist. Die Frequenzen aller primären Frequenznormale müssen also korrigiert werden, um der auf die Umgebungsstrahlung zurückzuführenden Verschiebung Rechnung zu tragen, wie das Beratende Komitee für Zeit und Frequenzen 1999 festgelegt hat.

### 2.1.1.4 Einheit der elektrischen Stromstärke (Ampere)

Elektrische Einheiten, genannt „internationale Einheiten“, für die Stromstärke und für den Widerstand waren vom Internationalen Elektrizitätskongress 1893 in Chicago eingeführt und die Definitionen für das „internationale“ Ampere und das „internationale“ Ohm durch die Internationale Konferenz von London 1908 bestätigt worden.

Obwohl bei der 8. CGPM (1933) bereits die einhellige Meinung herrschte, diese „internationalen“ durch so genannten „absolute“ Einheiten zu ersetzen, wurde die offizielle Entscheidung, die „internationalen Einheiten“ abzuschaffen, erst von der 9. CGPM (1948) getroffen, die das Ampere als Einheit der elektrischen Stromstärke annahm und der vom Internationalen Komitee (1946, Resolution 2 ; PV, 20, S. 129–137) vorgeschlagenen Definition folgte:

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

Daraus folgt, dass die magnetische Konstante  $\mu_0$ , die auch unter dem Namen „Permeabilität im Vakuum“ bekannt ist, genau gleich  $4\pi \times 10^{-7}$  Henry durch Meter ist,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ .

Der Ausdruck „MKS-Einheit der Kraft“, der im Originaltext von 1946 steht, wurde hier ersetzt durch den von der 9. CGPM (1948, Resolution 7 ; CR, S. 70) für diese Einheit angenommenen Namen „Newton“.

### 2.1.1.5 Einheit der thermodynamischen Temperatur (Kelvin)

Die Definition der Einheit der thermodynamischen Temperatur wurde im Wesentlichen durch die 10. CGPM (1954, Resolution 3 ; CR, 79) angegeben, die den Tripelpunkt des Wassers als den fundamentalen Fixpunkt auswählte und ihm die Temperatur 273,16 K zuordnete. Die 13. CGPM (1967/68, Resolution 3 ; CR, S. 104 und Metrologia, 4, (1968), S. 43) nahm den Namen Kelvin, Zeichen K, anstelle des „Grad Kelvin“, Zeichen °K, an und formulierte die Definition der Einheit der thermodynamischen Temperatur wie folgt (1967/68, Resolution 4 ; CR, S. 104 und Metrologia, 4, (1968), S. 43):

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

Es folgt, dass die thermodynamische Temperatur des Tripelpunktes des Wassers genau gleich 273,16 Kelvin,  $T_{\text{tpw}} = 273,16 \text{ K}$ , ist. Auf seiner Sitzung im Jahre 2005 hat das Internationale Komitee bestätigt:

Diese Definition bezieht sich auf ein Wasser, dessen Isotopenzusammensetzung exakt durch folgende Stoffmengenverhältnisse definiert ist:  
0,000 155 76 Mol  $^2\text{H}$  pro Mol  $^1\text{H}$ , 0,000 379 9 Mol  $^{17}\text{O}$  pro Mol  $^{16}\text{O}$  und 0,002 005 2 Mol  $^{18}\text{O}$  pro Mol  $^{16}\text{O}$ .

Aufgrund der üblichen Definitionen der Temperaturenskalen blieb es allgemeine Praxis, die thermodynamische Temperatur, Zeichen  $T$ , im Verhältnis zu ihrer Differenz zur Bezugstemperatur  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ , dem Gefrierpunkt des Wassers, auszudrücken. Diese Temperaturdifferenz wird Celsius-Temperatur, Zeichen  $t$ , genannt und wird durch folgende Größengleichung definiert:

$$t = T - T_0.$$

Die Einheit der Celsius-Temperatur ist der Grad Celsius, Zeichen °C, per definitionem gleich der Kelvin-Einheit. Eine Temperaturdifferenz oder ein Temperaturintervall können sowohl in Kelvin als auch in Grad Celsius ausgedrückt werden (13. CGPM, 1967/68, oben genannte Resolution 3), da der numerische Wert der Temperaturdifferenz derselbe ist. Der in Grad Celsius ausgedrückte numerische Wert der Celsius-Temperatur ist mit dem numerischen Wert der in Kelvin ausgedrückten thermodynamischen Temperatur wie folgt verbunden:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15.$$

Das Kelvin und der Grad Celsius sind auch die Einheiten der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90), die 1989 vom Internationalen Komitee in seiner Empfehlung 5 (CI-1989 ; PV, 57, S. 26 (115) und Metrologia, 27, (1990), S. 13) angenommen wurde.

### 2.1.1.6 Einheit der Stoffmenge (Mol)

Seit der Entdeckung der grundlegenden Gesetze der Chemie sind zur Angabe der Menge der verschiedenen Elemente oder Verbindungen Einheiten der Stoffmenge benutzt worden, die beispielsweise Namen wie „Grammatom“ und „Gramm-Molekül“ trugen. Diese Einheiten waren unmittelbar mit den „Atomgewichten“ oder „Molekülgewichten“ verknüpft, die in Wirklichkeit relative Massen waren. Die „Atomgewichte“ wurden früher auf das Atomgewicht des chemischen Elementes Sauerstoff (vereinbarter Wert: 16) bezogen. Während jedoch die Physiker die Isotope im Massenspektrographen trennten und einem der Sauerstoffisotope den Wert 16 zuordneten, ordneten die Chemiker denselben Wert dem (leicht veränderlichen) Gemisch der Isotope 16, 17 und 18 zu, das für sie das natürlich vorkommende Element Sauerstoff war. Eine Vereinbarung zwischen der Internationalen Union für reine und angewandte Physik (International Union of Pure and Applied Physics – IUPAP) und der Internationalen Union für reine und angewandte Chemie (International Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC) beendete 1959/60 diese Dualität. Seitdem haben sich Physiker und Chemiker geeinigt, dem „Atomgewicht“ des Kohlenstoffisotops  $^{12}\text{C}$ , oder um korrekter zu sein, der relativen Atommasse  $A_r(^{12}\text{C})$ , den Wert 12 zuzuordnen. Die so vereinheitlichte Skala gibt die Werte der „relativen Atommassen“ und „relativen

Das Zeichen  $T_{\text{tpw}}$  wird verwendet, um die thermodynamische Temperatur des Tripelpunktes des Wassers zu bezeichnen.



Molekülmassen“ an, die jeweils auch unter dem Namen „Atomgewichte“ und „Molekülgewichte“ bekannt sind.

Die Größe, die von den Chemikern benutzt wird, um die Menge von Elementen oder chemischen Verbindungen auszudrücken, wird nun „Stoffmenge“ genannt. Definitionsgemäß ist die Stoffmenge proportional zur Anzahl an elementaren Einheiten einer Probe, wobei die Proportionalitätskonstante eine universale Konstante ist, die für alle Proben gleich ist. Die Einheit der Stoffmenge wird Mol genannt, Zeichen mol, und das Mol wird definiert, indem die Masse des Kohlenstoff-12 festgelegt wird, die ein Mol der Atome Kohlenstoff-12 darstellt. Einer internationalen Vereinbarung zufolge wurde diese Masse bei 0,012 kg, d.h. 12 g, festgelegt.

Den Vorschlägen der IUPAP, der IUCAP und der ISO folgend hat das Internationale Komitee eine Definition des Mol 1967 festgelegt und 1969 bestätigt, die schließlich von der 14. CGPM (1971, Resolution 3 ; CR, S. 78 und Metrologia, 8, (1972), S. 36) angenommen wurde:

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

Daraus folgt, dass die molare Masse des  $^{12}\text{C}$  genau gleich 0,012 Kilogramm durch Mol ist,  $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$ .

1980 hat das Internationale Komitee dem Bericht des CCU (1980) zugestimmt, der aussagt:

Bei der Definition des Mols wird davon ausgegangen, dass es sich um ungebundene Kohlenstoff-12-Atome handelt, die sich in Ruhe und im Grundzustand befinden.

Die Definition des Mols erlaubt es auch, den Wert der universellen Konstante, die die Anzahl an Teilchen mit der Stoffmenge einer Probe verknüpft, zu bestimmen. Diese Konstante wird Avogadro-Konstante genannt, Zeichen  $N_A$  oder  $L$ . Wenn  $N(X)$  die Anzahl der Teilchen X einer gegebenen Probe bezeichnet, und wenn  $n(X)$  die Stoffmenge der Teilchen X derselben Probe bezeichnet, gilt folgende Gleichung:

$$n(X) = N(X)/N_A.$$

Es ist zu beachten, dass  $N(X)$  dimensionslos ist; daher hat  $n(X)$  die SI-Einheit Mol und die Avogadro-Konstante hat die kohärente SI-Einheit reziprokes Mol.

Im Namen „Stoffmenge“ könnte der Begriff „Stoff“ einfach durch andere, den betreffenden Stoff beschreibende Wörter ersetzt werden. So könnte man beispielsweise von „Wasserstoffchloridmenge HCl“ oder von „Benzolmenge  $\text{C}_6\text{H}_6$ “ sprechen. Wichtig ist, das betreffende Element immer anzugeben (wie der zweite Satz in der Definition des Mol betont); am besten ist es, die empirische chemische Formel des betreffenden Materials zu benennen. Obwohl das Wort „Menge“ im Wörterbuch viel allgemeiner definiert wird, kann diese Abkürzung des vollständigen Ausdrucks „Stoffmenge“ der Kürze halber manchmal gebraucht werden. Dies gilt auch für abgeleitete Größen wie die „Stoffmengenkonzentration“, die man auch einfach „Mengenkonzentration“ nennen kann. Jedoch im Bereich der klinischen Chemie wird der Begriff „Stoffmengenkonzentration“ generell mit „Stoffkonzentration“ abgekürzt.

### 2.1.1.7 Einheit der Lichtstärke (Candela)

Die auf Flammen- oder Glühdrahtnormalen beruhenden Einheiten der Lichtstärke, die in verschiedenen Ländern bis 1948 in Gebrauch waren, wurden zunächst durch die „Neue Kerze“ ersetzt, die auf der Leuchtdichte des Planckschen Strahlers (Schwarzen Körpers) bei der Temperatur des erstarrenden Platins beruht. Diese Entscheidung, die schon vor 1937 von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) und dem Internationalen Komitee für Maß und Gewicht vorbe-

Die molare Masse eines Atoms oder Moleküls X wird durch  $M(X)$  oder  $M_X$  bezeichnet; es ist die Masse pro Mol X.

Wenn die Definition des Mols zitiert wird, ist diese Anmerkung anzufügen.

Das empfohlene Zeichen für die relative Atommasse (Atomgewicht) ist  $A_r(X)$ , wobei X das Atom (Einzelteilchen) bezeichnet und angegeben werden muss. Das empfohlene Zeichen für die relative molare Masse (Molekülgewicht) ist  $M_r(X)$ , wobei X das Molekül (Einzelteilchen) bezeichnet und angegeben werden muss.

reitet worden war, wurde 1946 vom CIPM getroffen und 1948 von der 9. CGPM ratifiziert, die für diese Einheit einen neuen internationalen Namen, die Candela, Zeichen: cd, annahm; 1967 änderte die 13. CGPM (Resolution 5 ; CR, S. 104 und Metrologia, 4, (1968), S. 43–44) den Wortlaut der Definition von 1946 ab.

Aufgrund der experimentellen Schwierigkeiten, die mit der Realisierung des Planckschen Strahlers bei hohen Temperaturen verbunden waren, und der neuen Möglichkeiten, die die Radiometrie, d.h. die Messung der optischen Strahlungsleistung, bot, nahm die 16. CGPM (1979, Resolution 3 ; CR, S. 100 und Metrologia, 16, (1980), S. 56) 1979 eine neue Definition der Candela an:

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

Candela (lat.: Kerze) wird auf der zweiten Silbe betont

Daraus folgt, dass die spektrale Lichtausbeute einer monochromatischen Strahlung der Frequenz  $540 \times 10^{12}$  Hertz genau gleich 683 Lumen durch Watt ist:  $K = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd sr/W}^{(4)}$ .

### 2.1.2 Zeichen der sieben Basiseinheiten

Die SI-Basiseinheiten sind in der Tabelle 1 zusammengetragen, die die Basisgrößen mit den Namen und Zeichen der sieben Basiseinheiten verknüpft (10. CGPM (1954, Resolution 6 ; CR, S. 80) ; 11. CGPM (1960, Resolution 12 ; CR, S. 87) ; 13. CGPM (1967/68, Resolution 3 ; CR, S. 104 und Metrologia, 4, (1968), S. 43) ; 14. CGPM (1971, Resolution 3 ; CR, S. 78 und Metrologia, 8, (1972), S. 36).

**Tabelle 1:**  
SI-Basiseinheiten

Basisgröße		SI-Basiseinheit	
Name	Zeichen	Name	Zeichen
Länge	<i>l, x, r, etc.</i>	Meter	m
Masse	<i>m</i>	Kilogramm	kg
Zeit, Dauer	<i>t</i>	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	<i>I, i</i>	Ampere	A
thermodynamische Temperatur	<i>T</i>	Kelvin	K
Stoffmenge	<i>n</i>	Mol	mol
Lichtstärke	<i>I<sub>v</sub></i>	Candela	cd

Als Größenzeichen sind griechische oder lateinische *kursiv* gesetzte Buchstaben üblich; dabei handelt es sich nur um Empfehlungen. Die Einheitenzeichen hingegen sind verpflichtend festgelegt, siehe Abschnitt 5.

<sup>(4)</sup> Um wichtiges Hintergrundwissen zu bewahren, wurde der folgende Absatz in der deutschen Fassung aufgenommen. Er trifft keinerlei Festlegungen und ist unverbindlich. Aber er enthält Information, die helfen können, um den vorigen Absatz zu verstehen.

Durch die beiden angegebenen Werte schließt diese Definition vollständig an frühere Definitionen an. So wird die Größe der Einheit Candela durch das Verhältnis zur Dichte der Strahlungsleistung im Raumwinkel hergestellt, und die angegebene Frequenz bewirkt eine gleichmäßige Behandlung für photopische und skotopische Bewertung. D.h. die spektrale Lichtausbeute einer monochromatischen Strahlung ist nur bei der Frequenz  $540 \times 10^{12}$  Hertz unabhängig vom Adaptionsgrad und wird dort zu 683 Lumen durch Watt festgelegt. Der Wert beim Maximum photopischer Bewertung ist  $K_m = 683,0016 \text{ lm/W}$ ; das entspricht gerundet  $K_m = 683 \text{ cd sr/W}$ . Der entsprechende Wert beim Maximum skotopischer Bewertung ist  $K'_m = 1700,06 \text{ lm/W}$ , der auf  $K'_m = 1700 \text{ cd sr/W}$  gerundet wird.

## 2.2 Abgeleitete SI-Einheiten

Abgeleitete Einheiten sind Potenzprodukte der Basiseinheiten. Kohärente abgeleitete Einheiten sind Potenzprodukte der Basiseinheiten, bei denen es keinen anderen numerischen Faktor als 1 gibt. Die Basiseinheiten und die kohärenten abgeleiteten Einheiten des SI bilden eine Menge von kohärenten Einheiten, die als vollständiger Satz von kohärenten SI-Einheiten (siehe Abschnitt 1.4) bezeichnet wird.

### 2.2.1 Abgeleitete Einheiten, die durch Basiseinheiten ausgedrückt werden

Die im wissenschaftlichen Bereich verwendeten Größen sind schier unzählbar, daher ist es nicht möglich, eine vollständige Liste der Größen und abgeleiteten Einheiten zu erstellen. Tabelle 2 stellt einige Beispiele abgeleiteter Größen zusammen, deren kohärente abgeleiteten Einheiten direkt durch die Basiseinheiten ausgedrückt werden.

**Tabelle 2:**

Beispiele für kohärente abgeleitete und durch die Basiseinheiten ausgedrückte SI-Einheiten

Abgeleitete Größe		Kohärente abgeleitete SI-Einheit <sup>(a)</sup>	
Name	Zeichen	Name	Zeichen
Fläche	$A$	Quadratmeter	$\text{m}^2$
Volumen	$V$	Kubikmeter	$\text{m}^3$
Geschwindigkeit	$v$	Meter durch Sekunde	$\text{m/s}$
Beschleunigung	$a$	Meter durch Quadratsekunde	$\text{m/s}^2$
Wellenzahl	$\sigma, \tilde{\nu}$	Meter hoch minus eins	$\text{m}^{-1}$
Dichte; <sup>(*)</sup>	$\rho$	Kilogramm durch Kubikmeter	$\text{kg/m}^3$
flächenbezogene Masse	$\rho_A$	Kilogramm durch Quadratmeter	$\text{kg/m}^2$
spezifisches Volumen	$v$	Kubikmeter durch Kilogramm	$\text{m}^3/\text{kg}$
Stromdichte	$j$	Ampere durch Quadratmeter	$\text{A/m}^2$
magnetische Feldstärke	$H$	Ampere durch Meter	$\text{A/m}$
Stoffmengenkonzentration <sup>(a)</sup>	$c$	Mol durch Kubikmeter	$\text{mol/m}^3$
Massenkonzentration <sup>(*)</sup>	$\rho, \gamma$	Kilogramm durch Kubikmeter	$\text{kg/m}^3$
Leuchtdichte	$L_v$	Candela durch Quadratmeter	$\text{cd/m}^2$
Brechungsindex <sup>(b)</sup>	$n$	eins	1
relative Permeabilität <sup>(b)</sup>	$\mu_r$	eins	1

<sup>(\*)</sup> Der Ausdruck Dichte ist üblich, gemeint ist damit die volumenbezogene Masse. Andererseits spricht man aber von längen- oder flächenbezogener Masse.

<sup>(\*)</sup> Die Massenkonzentration wird im Deutschen auch Partialdichte (eines Stoffes) genannt, sie ist von der Dichte des Stoffes der Mischphase zu unterscheiden.

(a) Im Bereich der klinischen Chemie wird diese Größe auch Stoffkonzentration genannt.

(b) Es handelt sich dabei um Größen ohne Dimension oder Größen der Dimension eins.

Das Zeichen „1“ für die Einheit (die Zahl „1“) wird üblicherweise nicht genannt, wenn Werte dimensionsloser Größen angegeben werden.

### 2.2.2 Einheiten mit besonderen Namen und Zeichen; Einheiten, die besondere Namen und Zeichen beinhalten

Zur Vereinfachung haben bestimmte kohärente abgeleitete Einheiten einen besonderen Namen und ein besonderes Zeichen erhalten. Davon gibt es 22. Sie werden in Tabelle 3 aufgeführt. Diese besonderen Namen und Zeichen können selber mit den Namen und Zeichen anderer Basis- oder abgeleiteter Einheiten benutzt werden, um die Einheiten anderer abgeleiteter Größen auszudrücken. Einige Beispiele sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die besonderen Namen und Zeichen erlauben es, Kombinationen von oft verwendeten Basiseinheiten in einer komprimierten Form auszudrücken, aber sie dienen oft auch dazu, den Leser an die Art der betreffenden Größe zu erinnern. Die SI-Vorsätze können mit besonderen Namen oder besonderen Zeichen benutzt werden; die sich dann ergebende Einheit ist aber nicht mehr kohärent.

Die letzten vier Einheitennamen und -zeichen am Ende der Tabelle 3 sind ein Sonderfall: Sie wurden von der 15. CGPM (1975, Resolutionen 8 und 9 ; CR, S. 105 und Metrologia, **11**, (1975), S. 180), der 16. CGPM (1979, Resolution 5 ; CR, S. 100 und Metrologia, **16**, (1980), S. 56) und der 21. CGPM (1999, Resolution 12 ; CR, S. 145 (334–335) und Metrologia, **37**, (2000), S. 95) angenommen, insbesondere um Messfehler im Zusammenhang mit der menschlichen Gesundheit zu vermeiden.

In der jeweils letzten Spalte der Tabellen 3 und 4 sieht man, wie die entsprechenden SI-Einheiten mit Hilfe der SI-Basiseinheiten ausgedrückt werden. In dieser Spalte sind Faktoren wie  $m^0$ ,  $kg^0$  usw., die als Faktor 1 betrachtet werden, nicht ausdrücklich ausgeführt.

**Tabelle 3:**

Kohärente abgeleitete SI-Einheiten mit besonderen Namen und besonderen Zeichen

Abgeleitete Größe	Kohärente abgeleitete SI-Einheit <sup>(a)</sup>			
	Name	Zeichen	Ausgedrückt in anderen SI- Einheiten	SI-Basiseinheiten
ebener Winkel	Radian <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
räumlicher Winkel	Steradian <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Frequenz	Hertz <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
Kraft	Newton	N	m kg s <sup>-2</sup>	
Druck, Spannung	Pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
Leistung, Energiestrom	Watt	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
elektrische Ladung, Elektrizitätsmenge	Coulomb	C	s A	
elektrische Spannung, elektromotorische Kraft	Volt	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
elektrische Kapazität	Farad	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
elektrischer Leitwert	Siemens	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
magnetischer Fluss	Weber	Wb	V s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
magnetische Flussdichte	Tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
Induktivität	Henry	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
Celsius-Temperatur	Grad Celsius <sup>(e)</sup>	°C	K	
Lichtstrom	Lumen	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
Aktivität eines Radionuklids <sup>(f)</sup>	Becquerel <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>	
Energiedosis, spezifische übertragene Energie, Kerma	Gray	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
Äquivalentdosis, Umgebungsäquivalentdosis, Richtungsäquivalentdosis, Personenäquivalentdosis	Sievert <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
katalytische Aktivität	Katal	kat		s <sup>-1</sup> mol

Die Größe Steradian ( $sr = m^2/m^2$ ) hat große Bedeutung für die praktische Photometrie. In der neuen Darstellung wird die Einheit Lumen lm durch SI-Basiseinheiten nur noch als cd und nicht mehr als  $m^2 m^{-2} cd$  und die Einheit Beleuchtungsstärke Lux lx als  $m^{-2} cd$  und nicht als  $m^2 m^{-2} m^{-2} cd$  dargestellt. In der neuen Darstellung sind die Einheiten Lichtstrom und Lichtstärke sowie die Einheiten Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke nicht mehr unterscheidbar.

Die Größe „spezifische übertragene Energie“ wird für direkt ionisierende Strahlung verwendet. Die Größe „Kerma“ (kinetic energy released in material) wird für indirekt ionisierende Strahlung verwendet.

- (a) Die SI-Vorsätze können mit jedem besonderen Namen und besonderen Zeichen verwendet werden; in diesem Fall ist die daraus entstehende Einheit allerdings keine kohärente Einheit mehr.
- (b) Der Radian und der Steradian sind besondere Namen für die Zahl eins; sie können verwendet werden, um Informationen zur betreffenden Größe zu liefern. In der Praxis werden die Zeichen rad und sr nach Bedarf verwendet, und das Zeichen für die abgeleitete Einheit „eins“ wird üblicherweise nicht erwähnt, wenn Größen ohne Dimension genannt werden.
- (c) Im Bereich der Photometrie werden üblicherweise der Name und das Zeichen des Steradian, sr, beibehalten, um die Einheiten auszudrücken.
- (d) Das Hertz wird ausschließlich für periodische Ereignisse, das Becquerel für Zufallsprozesse, die mit der Messung der Aktivität eines Radionuklids verknüpft sind, verwendet.
- (e) Der Grad Celsius ist der besondere Name des Kelvins und wird nur zum Ausdruck von Celsius-Temperaturen verwendet. Der Grad Celsius und das Kelvin sind gleich groß; sodass der numerische Wert einer Temperaturdifferenz oder eines Temperaturintervalls gleich ist, wenn er in Grad Celsius oder in Kelvin ausgedrückt wird.
- (f) Die Aktivität eines Radionuklids wird manchmal auch fälschlicherweise Radioaktivität genannt.
- (g) Siehe Empfehlung 2 (CI-2002) des CIPM über die Anwendung des Sievert (PV, 70, (2002), S. 102, (205)).

**Tabelle 4:**

Beispiele für kohärente abgeleitete SI-Einheiten, deren Namen und Zeichen mit Hilfe von kohärenten abgeleiteten SI-Einheiten ausgedrückt werden, die besondere Namen und besondere Zeichen haben

Kohärente abgeleitete SI-Einheit			
Abgeleitete Größe	Name	Zeichen	Ausgedrückt in SI-Basiseinheiten
dynamische Viskosität	Pascal Sekunde	Pa s	$\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-1}$
Moment einer Kraft	Newtonmeter	N m	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$
Oberflächenspannung	Newton durch Meter	N/m	$\text{kg s}^{-2}$
Winkelgeschwindigkeit	Radiant durch Sekunde	rad/s	$\text{m m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
Winkelbeschleunigung	Radiant durch Quadratsekunde	rad/s <sup>2</sup>	$\text{m m}^{-1} \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
Wärmestromdichte, Bestrahlungsstärke	Watt durch Quadratmeter	W/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{-3}$
Wärmekapazität, Entropie	Joule durch Kelvin	J/K	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$
spezifische Wärmekapazität, spezifische Entropie	Joule durch Kilogramm-Kelvin	J/(kg K)	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
spezifische Energie	Joule durch Kilogramm	J/kg	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
Wärmeleitfähigkeit	Watt durch Meter Kelvin	W/(m K)	$\text{m kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$
Energiedichte	Joule durch Kubikmeter	J/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$
elektrische Feldstärke	Volt durch Meter	V/m	$\text{m kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$
elektrische Ladungsdichte	Coulomb durch Kubikmeter	C/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-3} \text{s A}$
Oberflächenladungsdichte	Coulomb durch Quadratmeter	C/m <sup>2</sup>	$\text{m}^{-2} \text{s A}$
elektrische Flussdichte, Verschiebung	Coulomb durch Quadratmeter	C/m <sup>2</sup>	$\text{m}^{-2} \text{s A}$
Permittivität	Farad durch Meter	F/m	$\text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
Permeabilität	Henry durch Meter	H/m	$\text{m kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$
molare Energie	Joule durch Mol	J/mol	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{mol}^{-1}$
molare Entropie			
molare Wärmekapazität	Joule durch Mol Kelvin	J/(mol K)	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
Ionendosis (X- und $\gamma$ -Strahlen)	Coulomb durch Kilogramm	C/kg	$\text{kg}^{-1} \text{s A}$
Energiedosisleistung	Gray durch Sekunde	Gy/s	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
Strahlstärke	Watt durch Steradian	W/sr	$\text{m}^4 \text{m}^{-2} \text{kg s}^{-3} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
Strahldichte	Watt durch Steradian-Quadratmeter	W/(m <sup>2</sup> sr)	$\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{kg s}^{-3} = \text{kg s}^{-3}$
katalytische Aktivitätskonzentration	Katal durch Kubikmeter	kat/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{mol}$

Die Werte mehrerer unterschiedlicher Größen können anhand desselben SI-Einheitennamens und -zeichens ausgedrückt werden. Auf diese Weise ist das „Joule durch Kelvin“ sowohl der Name der SI-Einheit für die Größe „Wärmekapazität“ als auch für die Größe „Entropie“. Gleichmaßen ist das Ampere sowohl der Name der SI-Einheit für die Basisgröße „elektrische Stromstärke“ als auch für die abgeleitete Größe „magnetomotorische Kraft (magnetisches Potential)“. Es reicht also nicht aus – und dies muss besonders betont werden – den Namen der Einheit anzugeben, um die gemessene Größe zu spezifizieren. Diese Regel gilt nicht nur für wissenschaftliche und technische Texte, sondern beispielsweise auch für Messgeräte (d.h. es muss auf ihnen nicht nur die Einheit angegeben sein, sondern auch die Messgröße).

Eine abgeleitete Einheit kann oft auf verschiedene Weise ausgedrückt werden, indem Basis- oder abgeleitete Einheiten mit besonderen Namen verwendet werden: Das Joule z.B. kann als Newtonmeter oder als Kilogramm mal Quadratmeter

durch Quadratsekunde geschrieben werden. Diese algebraische Freiheit ist jedoch mit physikalischen Überlegungen zu verbinden; in einem gegebenen Fall können manche Formen hilfreicher sein als andere.

Um die Unterscheidung unterschiedlicher Größen mit gleicher Dimension zu erleichtern, wird ihre Einheit in der Praxis so ausgedrückt, dass vorzugsweise ein besonderer Name oder eine besondere Kombination von Einheitennamen verwendet wird, der an die Definition der Größe erinnert. Die Größe „Drehmoment“ z.B. kann man als Ergebnis des Kreuzprodukts aus Kraft und Abstand betrachten, dann bietet sich Newtonmeter als Einheit an, man kann aber auch an eine winkelbezogene Energie denken und dann besser die Einheit Joule durch Radiant verwenden. Die SI-Einheit der Frequenz wird Hertz genannt (ein Zyklus pro Sekunde), die SI-Einheit der Winkelgeschwindigkeit Radiant durch Sekunde und die SI-Einheit der Aktivität Becquerel (Zerfallsereignisse (oder auch Umwandlungen) pro Sekunde). Selbst wenn es korrekt ist, diese drei Einheiten als reziproke Sekunde zu notieren, dient der Gebrauch unterschiedlicher Namen dazu, die unterschiedliche Art der betreffenden Größen zu betonen. Dass die Einheit Radiant durch Sekunde verwendet wird, um die Winkelgeschwindigkeit auszudrücken, und das Hertz für die Frequenz, zeigt auch, dass der numerische Wert der Frequenz in Hertz mit  $2\pi$  multipliziert werden muss, um den numerischen Wert der entsprechenden Winkelgeschwindigkeit in Radiant durch Sekunde zu erhalten.

Im Bereich der ionisierenden Strahlungen wird die SI-Einheit der Aktivität Becquerel eher Sekunde hoch minus eins genannt, und die SI-Einheiten der Energiedosisleistung und der Äquivalentdosis lieber Gray und Sievert als Joule durch Kilogramm. Die besonderen Namen Becquerel, Gray und Sievert wurden speziell aufgrund der Gefahren für die menschliche Gesundheit eingeführt, die sich ergeben könnten, wenn die Einheiten reziproke Sekunde und Joule durch Kilogramm fälschlicherweise benutzt würden, um die Größen zu identifizieren.

### 2.2.3 Einheiten für dimensionslose Größen, auch Größen der Dimension eins genannt

Manche Größen definieren sich durch das Verhältnis zweier Größen gleicher Art; sie sind also ohne Dimension, oder ihre Dimension kann durch die Zahl eins ausgedrückt werden. Die kohärente SI-Einheit aller Größen ohne Dimension (der Dimension eins) ist die Zahl eins, da die Einheit das Verhältnis zweier gleicher SI-Einheiten ist. Der Wert dieser Größen wird mit Zahlen ausgedrückt, und die Einheit „eins“ wird nicht explizit gezeigt. Als Beispiel für solche Größen kann man den Brechungsindex, die relative Permeabilität oder den Reibungskoeffizienten anführen. Andere Größen sind als relativ komplexes Produkt ohne Dimension von üblichen Größen definiert. Unter den „Kennzahlen“ kann z.B. die Reynoldssche Zahl,  $Re = \rho v l / \eta$ , zitiert werden, wobei  $\rho$  die Volumenmasse,  $\eta$  die dynamische Viskosität,  $v$  die Geschwindigkeit und  $l$  die Länge ist. In jedem dieser Fälle kann als Einheit die Zahl eins betrachtet werden, die eine abgeleitete Einheit der Dimension eins ist.

Eine andere Klasse von Größen der Dimension eins bilden Zahlen, wie z.B. eine Anzahl von Molekülen, die Entartung (Anzahl von Energieniveaus) oder die Teilungsfunktion in der statistischen Thermodynamik (Anzahl zugänglicher thermischer Zustände). Alle diese Zählgrößen werden beschrieben, als hätten sie keine Dimension oder als wären sie von der Dimension eins, und sie haben als Einheit die SI-Einheit 1, obwohl die Einheit der Zählgrößen nicht als durch SI-Basiseinheiten ausgedrückte abgeleitete Größe beschrieben werden kann. Für diese Größen könnte die Einheit 1 als eine weitere Basiseinheit betrachtet werden.

In einigen Fällen wird dieser Einheit jedoch ein besonderer Name gegeben, um die Identifizierung der betreffenden Größen zu vereinfachen. Dies ist der Fall beim Radiant und beim Steradian. Dem Radiant und dem Steradian hat die CGPM einen besonderen Namen für die kohärente abgeleitete Einheit „eins“ gegeben, um die Werte des ebenen bzw. des räumlichen Winkels auszudrücken; deshalb sind sie in Tabelle 3 aufgeführt.

Das CIPM hat die besondere Wichtigkeit der Einheiten im Bereich der Gesundheit erkannt und hat einen detaillierten Text über das Sievert in der 5. Ausgabe der Broschüre über das SI angenommen, Empfehlung 1 (CI-1984), angenommen durch das CIPM (PV, 52, (1984), S. 31 und Metrologia, 21, (1985), S. 90), und Empfehlung 2 (CI-2002), herausgebracht durch das CIPM (PV, 70, (2002), S. 102 (205)) und s. jeweils S. 72 und S. 79 in der französischen und S. 161 und S. 168 in der englischen Version von Anhang 1.

Die Begriffe „dimensionslos“ und „der Dimension eins“ werden im Deutschen beide verwendet. Logisch, konsistent und sprachlich sauber ist aber eher der zweite Begriff, der sich daraus ableitet, dass das Dimensionsprodukt für das Verhältnis zweier Größen gleicher Art den Wert 1 hat, weil alle Dimensionsexponenten den Wert 0 haben.

### 3 Dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten

#### 3.1 SI-Vorsätze

Die SI-Vorsätze beziehen sich ausschließlich auf Potenzen von 10. Sie dürfen nicht benutzt werden, um Potenzen von 2 auszudrücken (z.B. steht ein Kilobit für 1000 bits und nicht für 1024 bits). Die vom IEC angenommenen Vorsätze für binäre Potenzen wurden in der internationalen Norm IEC 60027-2: 2005, 3. Auflage, *Letter symbols to be used in electrical technology – Part 2: Telecommunications and electronics* veröffentlicht. Die Namen und Zeichen der Vorsätze für  $2^{10}$ ,  $2^{20}$ ,  $2^{30}$ ,  $2^{40}$ ,  $2^{50}$  und  $2^{60}$  sind jeweils: Kibi, Ki; Mebi, Mi; Gibi, Gi; Tebi, Ti; Pebi, Pi und Exbi, Ei. So wird z.B. ein Kibibyte  $1 \text{ KiB} = 2^{10} \text{ B} = 1024 \text{ B}$  notiert, wobei B für Byte steht. Obwohl diese Vorsätze nicht Teil des SI sind, müssen sie in der Informatik benutzt werden, um einen unsachgemäßen Gebrauch der SI-Vorsätze zu vermeiden.

Anwendungsbeispiele für SI-Vorsätze:

pm (Pikometer)  
mmol (Millimol)  
GΩ (Gigaohm)  
THz (Terahertz)

nm (Nanometer),  
**aber nicht**  
mμm (Millimikrometer)

Die Anzahl von Bleiatomen in der Probe ist gleich  $N(\text{Pb}) = 5 \times 10^6$ , aber nicht  $N(\text{Pb}) = 5 \text{ M}$ , wobei M für den Vorsatz Megastunde.

Die 11. CGPM (1960, Resolution 12 ; CR, S. 87) hat eine Reihe von Vorsatznamen und -zeichen übernommen, um die Namen und Zeichen der dezimalen Vielfachen und Teile der SI-Einheiten zwischen  $10^{12}$  und  $10^{-12}$  zu bilden. Die Vorsätze für  $10^{-15}$  und  $10^{-18}$  wurden durch die 12. CGPM (1964, Resolution 8 ; CR, S. 94) hinzugefügt, die für  $10^{15}$  und  $10^{18}$  durch die 15. CGPM (1975, Resolution 10 ; CR, S. 106 und *Metrologia*, **11**, (1975), S. 180–181) und die für  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  und  $10^{-24}$  durch die 19. CGPM (1991, Resolution 4 ; CR, S. 97 (185) und *Metrologia*, **29**, (1992), S. 3). Tabelle 5 zeigt alle gültigen Vorsatznamen und Vorsatzzeichen.

**Tabelle 5:**  
SI-Vorsätze

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

Wie die Einheitenzeichen werden auch die Vorsatzzeichen nicht kursiv geschrieben (in aufrechter Grundschrift), unabhängig davon, wie der restliche Text aussieht. Sie werden den Einheitenzeichen ohne Leerzeichen zwischen dem Vorsatz- und dem Einheitenzeichen vorangestellt. Alle Vorsatzzeichen für das Vielfache einer Einheit, außer da (Deka), h (Hekto) und k (Kilo), werden groß- und die für Teile einer Einheit kleingeschrieben. Im Französischen und Englischen werden die Namen der SI-Vorsätze nur am Anfang eines Satzes groß- und sonst immer kleingeschrieben.

Vorsatzzeichen und Einheitenzeichen bilden ein neues, nicht trennbares Einheitenzeichen (das ein Vielfaches oder einen Teil der betreffenden Einheit ergibt), das mit anderen Einheitenzeichen kombiniert werden und positive oder negative Exponenten haben kann, um zusammengesetzte Einheitenzeichen zu bilden.

$$\begin{aligned} \text{Beispiele: } 2,3 \text{ cm}^3 &= 2,3 (\text{cm})^3 &= 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 &= 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \\ 1 \text{ cm}^{-1} &= 1 (\text{cm})^{-1} &= 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} &= 10^2 \text{ m}^{-1} &= 100 \text{ m}^{-1} \\ 1 \text{ V/cm} &= (1 \text{ V})/(10^{-2} \text{ m}) &= 10^2 \text{ V/m} &= 100 \text{ V/m} \\ 5000 \mu\text{s}^{-1} &= 5000 (\mu\text{s})^{-1} &= 5000 (10^{-6} \text{ s})^{-1} &= 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Gleichermaßen werden die Vorsatznamen nicht von den Einheitennamen getrennt, denen sie vorangestellt sind. So werden beispielsweise Millimeter, Mikropascal und Meganewton als ein Wort geschrieben.

Es ist nicht zulässig, zwei oder mehr Vorsatzzeichen zusammenzusetzen. Diese Regel gilt auch für zusammengesetzte Vorsatznamen.

Vorsatzzeichen dürfen nicht allein oder mit der Zahl 1, dem Zeichen für die Einheit eins, verwendet werden. Gleichermaßen dürfen Vorsatznamen nicht mit dem Namen der Einheit eins, d.h. dem Wort „eins“, zusammengesetzt werden.

Die Vorsatznamen und -zeichen werden auch für einige Einheiten außerhalb des SI (siehe Abschnitt 5) verwendet, jedoch nie für Zeiteinheiten (Minute, min; Stunde, h; Tag, d)! Die Astronomen benutzen allerdings auch die Millibogensekunde, bezeichnet mit „mas“, und die Mikrobogensekunde, bezeichnet mit „μas“, als Einheiten beim Messen sehr kleiner Winkel.

### 3.2 Das Kilogramm

Unter den Basiseinheiten des Internationalen Systems ist die Einheit der Masse die einzige, deren Name – aus historischen Gründen – einen Vorsatz beinhaltet. Die Namen und Zeichen der dezimalen Vielfachen und Teile der Einheit der Masse werden durch die Hinzufügung von Vorsatznamen zum Wort „Gramm“ und von Vorsatzzeichen zum Zeichen der Einheit „g“ gebildet (CIPM, 1967, Empfehlung 2 ; PV, 35, S. 29 und Metrologia, 4, (1968), S. 45).

$10^{-6} \text{ kg} = 1 \text{ mg}$ ,  
*aber nicht*  
 $1 \mu\text{kg}$  (Mikrokilogramm).

## 4 Einheiten außerhalb des SI

Das Internationale Einheitensystem, das SI, ist ein Einheitensystem, das von der Generalkonferenz (GCPM) angenommen wurde und das die international anerkannten Bezugseinheiten zur Verfügung stellt, auf deren Grundlage jetzt alle anderen Einheiten definiert sind. Der Gebrauch des SI wird für alle Naturwissenschaften, die Technik, das Ingenieurwesen und den Handel empfohlen. Die SI-Basiseinheiten und die kohärenten abgeleiteten SI-Einheiten einschließlich solcher mit besonderen Namen haben den bedeutenden Vorteil, dass sie einen kohärenten Satz von Einheiten bilden. Daher ist es nicht nötig, Einheiten umzurechnen, wenn in Größengleichungen bestimmte Werte eingesetzt werden. Da das SI das einzige weltweit anerkannte Einheitensystem ist, hat es den offensichtlichen Vorteil, eine Art universeller Sprache darzustellen. Wenn jedermann dieses System nutzt, wird die naturwissenschaftliche und technische Lehre für die nächste Generation deutlich vereinfacht.

Es wird trotzdem nicht übersehen, dass einige Einheiten außerhalb des SI in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft in Veröffentlichungen immer noch verwendet werden und für viele weitere Jahre weiterverwendet werden. Manche Einheiten außerhalb des SI sind aus historischer Sicht in der traditionellen Literatur noch von Bedeutung. Andere Einheiten außerhalb des SI – wie die Einheiten der Zeit und des Winkels – sind so sehr in der menschlichen Geschichte und Kultur verankert, dass sie voraussichtlich auch in Zukunft weiterhin benutzt werden. Außerdem müssen Wissenschaftler die Freiheit haben, manchmal auch Einheiten außerhalb des SI zu nutzen, wenn dies für ihre Arbeit von besonderem Vorteil ist. Hier sei der Gebrauch von Einheiten wie z.B. den Gaußschen CGS-Einheiten für die Theorie des Elektromagnetismus, angewandt auf die Quantenelektrodynamik und die Relativität, erwähnt. Daher ist es hilfreich, eine Liste der meistgenutzten Einheiten außerhalb des SI zu erstellen, wie es in der untenstehenden Tabelle getan wurde. Man sollte sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die Vorteile des SI verloren gehen, wenn man diese Einheiten benutzt.

Die Tatsache, dass hier Einheiten außerhalb des SI aufgelistet werden, soll nicht zu ihrem Gebrauch ermutigen. Aus bereits erläuterten Gründen ist der Gebrauch der SI-Einheiten generell vorzuziehen. Es ist auch anzustreben, eine Vermischung von SI- und Nicht-SI-Einheiten zu vermeiden. Die Kombination von Einheiten außerhalb des SI und SI-Einheiten zu zusammengesetzten Einheiten sollte daher auf ganz bestimmte Fälle beschränkt bleiben, um die Vorteile des SI nicht zu verlieren. Ferner, wenn man eine der Einheiten außerhalb des SI benutzt, die in den Tabellen 7, 8 und 9 aufgelistet sind, ist es üblich und hilfreich, diese mit Hilfe der entsprechenden SI-Einheiten zu definieren.

### 4.1 Nicht-SI-Einheiten, die mit dem SI benutzt werden, und Einheiten, die auf Fundamentalkonstanten beruhen

Das Internationale Komitee (CIPM) hat 2004 die Klassifizierung der Einheiten außerhalb des SI geändert, die in der 7. Ausgabe der Broschüre über das SI veröffentlicht wurde. Tabelle 6 zeigt eine Liste der Einheiten außerhalb des SI, deren Gebrauch zusammen mit dem SI vom CIPM zugelassen ist, da sie im Alltag weit verbreitet sind. Sie können unbegrenzt weiterverwendet werden. Jede dieser Einheiten ist in SI-Einheiten genau definiert. Die Tabellen 7, 8 und 9 enthalten Einheiten, die ausschließlich unter bestimmten Bedingungen verwendet werden. Die Einheiten aus Tabelle 7 sind mit Fundamentalkonstanten verknüpft, deren Werte experimentell bestimmt werden müssen. Die Tabellen 8 und 9 enthalten Einheiten, die einen *festgelegten Wert* besitzen, wenn sie in SI-Einheiten ausge-



drückt werden, und die unter bestimmten Bedingungen verwendet werden, um Bedürfnissen der Wirtschaft, des gesetzlichen Messwesens oder besonderen wissenschaftlichen Interessen zu entsprechen. Diese Einheiten werden wahrscheinlich noch viele Jahre weiterverwendet werden. Viele von ihnen sind auch wichtig zum Verständnis alter wissenschaftlicher Texte. Jede der Tabellen 6, 7, 8 und 9 wird nachfolgend diskutiert.

Tabelle 6 enthält die traditionellen Einheiten der Zeit und des Winkels. Sie enthält aber auch den Hektar, den Liter und die Tonne, die alle weltweit gebräuchlich sind, sich jedoch von den entsprechenden kohärenten SI-Einheiten um Zehnerpotenzen unterscheiden. Die SI-Vorsätze werden mit einigen dieser Einheiten gebraucht, jedoch *nicht* mit den Einheiten der Zeit.

**Tabelle 6:**

Einheiten außerhalb des SI, deren Gebrauch im Zusammenhang mit dem SI zugelassen ist

Größe	Einheitsnamen	Einheitszeichen	Wert in SI-Einheiten
Zeit	Minute	min	1 min = 60 s
	Stunde <sup>(a)</sup>	h	1 h = 60 min = 3600 s
	Tag	d	1 d = 24 h = 86 400 s
Ebener Winkel	Grad <sup>(b) (c)</sup>	°	1° = ( $\pi/180$ ) rad
	Minute	'	1' = (1/60)° = ( $\pi/10\,800$ ) rad
	Sekunde <sup>(d)</sup>	"	1" = (1/60)' = ( $\pi/648\,000$ ) rad
Fläche	Hektar <sup>(e)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
Volumen	Liter <sup>(f)</sup>	L, l	1 L = 1 l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Masse	Tonne <sup>(g)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg

(a) Das Zeichen dieser Einheit steht in der Resolution 7 der 9. CGPM (1948 ; CR, S. 70).

(b) Die Norm ISO 31 empfiehlt, den Grad eher dezimal als mit Hilfe der Minute und der Sekunde zu teilen. Für die Navigation und die Topographie jedoch ist es von Vorteil, die Minute zu nutzen, da eine Breitenminute auf der Erdoberfläche (ungefähr) einer Seemeile entspricht.

(c) Das Gon, das früher auch „Neugrad“ genannt wurde, ist eine andere Einheit für den ebenen Winkel. Sein Wert beträgt ( $\pi/200$ ) rad. Ein rechter Winkel entspricht also 100 Gon. Das Gon ist möglicherweise für die Navigation nützlich. Pol und Äquator sind an der Erdoberfläche ca. 10 000 km voneinander entfernt. Daher entspricht ein Winkel von einem Zentigon im Erdmittelpunkt einem Kilometer auf der Erdoberfläche. Das Gon wird aber selten verwendet.

(d) In der Astronomie werden kleine Winkel in Bogensekunden gemessen (d.h. in Winkelsekunden), in Milli-, Mikro- oder Pikobogensekunden (Zeichen jeweils as oder ", mas,  $\mu$ as und pas). Die Bogensekunde ist ein anderer Name für die Winkelsekunde.

(e) Die Einheit Hektar und ihr Zeichen ha wurden 1879 vom Internationalen Komitee angenommen (PV, (1879), S. 41). Landwirtschaftliche Flächen werden in Hektar angegeben.

(f) Das Liter und sein Zeichen l (kleingeschrieben) wurden 1879 vom Internationalen Komitee angenommen (PV, (1879), S. 41). Das Zeichen L (großgeschrieben) wurde von der 16. Generalkonferenz (1979, Resolution 6 ; CR, S. 101 und Metrologia, **16**, (1980), S. 56–57) als Alternative angenommen, um Verwechslungen zwischen dem Buchstaben l und der Zahl 1 (eins) zu vermeiden.

(g) Die Tonne und ihr Zeichen t wurden 1879 vom Internationalen Komitee (PV, (1879), S. 41) angenommen. In den englischsprachigen Ländern wird diese Einheit üblicherweise als „metrische Tonne“ bezeichnet.

Tabelle 7 enthält Einheiten, deren Werte in SI-Einheiten nur experimentell bestimmt werden können und denen daher eine Unsicherheit beigeordnet ist. Außer der astronomischen Einheit sind alle Einheiten in Tabelle 7 mit Fundamentalkonstanten der Physik verknüpft. Das Internationale Komitee hat der Verwendung der ersten drei Einheiten dieser Tabelle mit dem SI zugestimmt. Diese sind das Elektronvolt (Zeichen eV), das Dalton (Zeichen Da) oder die (vereinheitlichte) atomare Masseneinheit (Zeichen u) und die astronomische Einheit (Zeichen ua). Die Einheiten in Tabelle 7 spielen eine wichtige Rolle in einigen Spezialgebieten, in denen sich Messergebnisse und Berechnungen sehr bequem und zweckmäßig mit diesen Einheiten angeben lassen. Im Falle des Elektronvolts und des Daltons hängen die Werte von der elektrischen Elementarladung  $e$  bzw. der Avogadrokonstanten  $N_A$  ab.

Es gibt viele andere Einheiten dieser Art, denn es gibt viele Fachgebiete, in denen es zweckmäßiger ist, die Ergebnisse experimenteller Beobachtungen oder theoretischer Berechnungen mittels der Fundamentalkonstanten der Natur auszudrücken. Die beiden wichtigsten Einheitensysteme, die auf Fundamentalkonstanten beruhen, sind das System der natürlichen Einheiten, das im Bereich der Hochenergie- und der Teilchenphysik angewendet wird, und das System der atomaren Einheiten, das in der Atomphysik und in der Quantenchemie angewendet wird. Im System der natürlichen Einheiten sind die Basisgrößen der Mechanik die Geschwindigkeit, die Wirkung und die Masse, deren Basiseinheiten jeweils die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$ , die Plancksche Konstante  $h$  geteilt durch  $2\pi$ , die „reduzierte Plancksche Konstante“, Zeichen  $\hbar$ , genannt wird, und die Elektronenmasse  $m_e$ . Im Allgemeinen haben diese Einheiten keinen besonderen Namen und kein besonderes Zeichen erhalten; sie werden einfach natürliche Einheit der Geschwindigkeit, Zeichen  $c_0$ , natürliche Einheit der Wirkung, Zeichen  $\hbar$ , und natürliche Einheit der Masse, Zeichen  $m_e$ , genannt. In diesem System ist die Zeit eine abgeleitete Größe, und die natürliche Einheit der Zeit ist eine abgeleitete Einheit, die gleich der Kombination der Basiseinheiten  $\hbar/m_e c_0^2$  ist. Gleichermaßen wird im System der atomaren Einheiten irgendeine Gruppe von vier der fünf Größen Ladung, Masse, Wirkung, Länge und Energie als Gruppe von Basisgrößen betrachtet. Die Basiseinheiten sind jeweils  $e$  für die elementare elektrische Ladung,  $m_e$  für die Elektronenmasse,  $\hbar$  für die Wirkung,  $a_0$  (oder Bohr) für den Bohrschen Radius und  $E_h$  (oder Hartree) für die Hartree-Energie. In diesem System ist die Zeit ebenfalls eine abgeleitete Größe, und die atomare Einheit der Zeit ist eine abgeleitete Einheit, die gleich  $\hbar/E_h$  ist. Dabei gilt:  $a_0 = (\alpha/4\pi R_\infty)$ , wobei  $\alpha$  die Feinstruktur-Konstante und  $R_\infty$  die Rydberg-Konstante ist, und  $E_h = e^2/(4\pi\epsilon_0 a_0) = 2R_\infty h c_0 = \alpha^2 m_e c_0^2$ , wobei  $\epsilon_0$  die elektrische Konstante (Permittivität des Vakuums) ist, die im SI einen festen Wert hat.

Zur Information sind diese zehn natürlichen und atomaren Einheiten sowie ihre Werte in SI-Einheiten in Tabelle 7 wiedergegeben. Da die Größensysteme, auf denen diese Einheiten basieren, sich so grundsätzlich von denen des SI unterscheiden, werden sie üblicherweise nicht mit dem SI verwendet, und das Internationale Komitee hat ihrer Anwendung mit dem SI nicht offiziell zugestimmt. Zum Zweck eines besseren Verständnisses sollte das Endergebnis einer Messung oder einer Berechnung, das jeweils in natürlichen oder atomaren Einheiten angegeben ist, immer auch in entsprechenden SI-Einheiten ausgedrückt werden. Die natürlichen und atomaren Einheiten werden ausschließlich in den speziellen Fachgebieten Teilchenphysik, Atomphysik und Quantenchemie verwendet. Die beigeordneten Standardunsicherheiten stehen in Klammern nach jedem Zahlenwert; zur Erläuterung siehe Abschnitt 5.3.5.

**Tabelle 7:**

Einheiten außerhalb des SI, deren Wert in SI-Einheiten experimentell ermittelt wird

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Wert in SI-Einheiten <sup>(a)</sup>
<b>Einheiten, die mit dem SI verwendet werden</b>			
Energie	Elektronvolt <sup>(b)</sup>	eV	1 eV = 1,602 176 53 (14) × 10 <sup>-19</sup> J
Masse	Dalton, <sup>(c)</sup> (vereinheitlichte) atomare Masseneinheit <sup>(d)</sup>	Da u	1 Da = 1,660 538 86 (28) × 10 <sup>-27</sup> kg 1 u = 1 Da
Länge	astronomische Einheit <sup>(d)</sup>	ua	1 ua = 1,495 978 706 91 (6) × 10 <sup>11</sup> m
<b>Natürliche Einheiten</b>			
Geschwindigkeit	natürliche Einheit der Geschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum)	$c_0$	299 792 458 m/s (exakt festgelegt)
Wirkung	natürliche Einheit der Wirkung (reduzierte Planckkonstante)	$\hbar$	1,054 571 68 (18) × 10 <sup>-34</sup> J s
Masse	natürliche Einheit der Masse (Ruhemasse des Elektrons)	$m_e$	9,109 3826 (16) × 10 <sup>-31</sup> kg
Zeit	natürliche Einheit der Zeit	$\hbar/m_e c_0^2$	1,288 088 6677 (86) × 10 <sup>-21</sup> s
<b>Atomare Einheiten</b>			
Ladung	atomare Einheit der Ladung (elektrische Elementarladung)	$e$	1,602 176 53 (14) × 10 <sup>-19</sup> C
Masse	atomare Einheit der Masse <sup>(d)</sup> (Ruhemasse des Elektrons)	$m_e$	9,109 3826 (16) × 10 <sup>-31</sup> kg
Wirkung	atomare Einheit der Wirkung (reduzierte Planckkonstante)	$\hbar$	1,054 571 68 (18) × 10 <sup>-34</sup> J s
Länge	atomare Einheit der Länge Bohr (Bohrscher Radius)	$a_0$	0,529 177 2108 (18) × 10 <sup>-10</sup> m
Energie	atomare Einheit der Energie, Hartree (Hartree-Energie)	$E_h$	4,359 744 17 (75) × 10 <sup>-18</sup> J
Zeit	atomare Einheit der Zeit	$\hbar/E_h$	2,418 884 326 505 (16) × 10 <sup>-17</sup> s

(a) Die Werte in SI-Einheiten aller Einheiten dieser Tabelle, außer der astronomischen Einheit, sind der 2002 von CODATA empfohlenen Liste der Werte der Fundamentalkonstanten der Physik entnommen, die von *P. J. Mohr* und *B. N. Taylor*, *Rev. Mod. Phys.*, **77**, (2005), S. 1–107 veröffentlicht wurde. Die Standardunsicherheit über die letzten zwei Zahlen ist in Klammern angegeben (siehe Abschnitt 5.3.5).

(b) Das Elektronvolt ist die kinetische Energie, die ein Elektron nach Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 V im Vakuum erhält; das Elektronvolt wird oft mit SI-Vorsätzen kombiniert.

(c) Das Dalton (Da) und die atomare Masseneinheit (u) sind andere Bezeichnungen (und Zeichen) für ein und dieselbe Einheit, die gleich 1/12 der Masse des freien <sup>12</sup>C-Atoms in seinem Ruhe- und Grundzustand ist. Das Dalton wird oft mit SI-Vorsätzen kombiniert, z.B. um die Masse großer Moleküle in Kilodalton, kDa, oder Megadalton, Mda, und den Wert kleiner Atommassen- oder Molekülmassendifferenzen in Nanodalton, nDa, oder sogar Pikodalton, pDa auszudrücken.

(d) Die astronomische Einheit entspricht ca. der durchschnittlichen Entfernung zwischen der Sonne und der Erde. Es handelt sich um den Radius einer nicht-gestörten Newtonschen Umlaufbahn eines Partikels infinitesimaler Masse, der sich mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 0,017 202 098 95 Radiant pro Tag (auch Gaußsche Konstante genannt) um die Sonne dreht. Der Wert der astronomischen Einheit wird in den IERS Conventions 2003 (*D. D. McCarthy* und *G. Petit* eds., IERS Technical Note **32**, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, (2004), S. 12) angegeben. Der Wert der astronomischen Einheit in Metern stammt von den JPL ephemerides DE403 (*E. M. Standish*: Report of the IAU WGAS Sub-Group on Numerical Standards. Highlights of Astronomy, *Appenzeller* ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, (1995), S. 180–184).

<sup>(d)</sup> Das in Klammern gesetzte Wort „vereinheitlicht“ wird im Deutschen kaum verwendet. „Atomare Masseneinheit“ und „atomare Einheit der Masse“ sind nicht zu verwechseln, wenn man die Einheitenzeichen u oder  $m_e$  angibt.

Die Tabellen 8 und 9 enthalten Einheiten außerhalb des SI, die aus unterschiedlichen Gründen von besonderen Interessengruppen verwendet werden. Aus schon erwähnten Gründen ist der Gebrauch der SI-Einheiten vorzuziehen. Aber Autoren, die einen besonderen Vorteil in der Nutzung dieser Einheiten außerhalb des SI sehen, sollen die Freiheit haben sie zu benutzen, wenn sie ihnen für ihren Zweck als besonders geeignet erscheinen. Da die SI-Einheiten allerdings die internationale Grundlage bilden, nach der alle anderen Einheiten definiert sind, sollten diejenigen, die Einheiten aus den Tabellen 8 und 9 verwenden, immer auch deren Definition in SI-Einheiten angeben.

Tabelle 8 enthält auch die Einheiten logarithmierter Größenverhältnisse, das Neper, das Bel und das Dezibel. Dies sind Einheiten ohne Dimension bzw. der Dimension 1. Sie unterscheiden sich in ihrer Art etwas von den anderen Einheiten ohne Dimension, und manche Wissenschaftler meinen, dass sie nicht einmal Einheiten genannt werden dürften. Sie werden gebraucht, um Information über logarithmierte Größenverhältnisse zu vermitteln. Das Neper,  $N_p$ , gibt den Wert des Neperschen (natürlichen) Logarithmus eines Größenverhältnisses an, also bezogen auf die Basis  $e$ ,  $\ln = \log_e$ . Das Bel und das Dezibel,  $B$  und  $dB$ ,  $1 \text{ dB} = (1/10) B$ , geben den Wert des dekadischen Logarithmus eines Größenverhältnisses an, also bezogen auf die Basis 10,  $\lg = \log_{10}$ . Die Art und Weise, nach der diese Einheiten interpretiert werden, wird in den Anmerkungen (g) und (h) der Tabelle 8 beschrieben. Die numerischen Werte dieser Einheiten sind nur selten erforderlich. Der Gebrauch der Einheiten Neper, Bel und Dezibel mit dem SI wurde vom Internationalen Komitee zugelassen, aber sie werden nicht als SI-Einheiten betrachtet.

Die SI-Vorsätze werden mit zwei der in Tabelle 8 aufgeführten Einheiten verwendet, nämlich mit dem Bar (z.B. Millibar, mbar) und dem Bel, insbesondere für das Dezibel, dB. Das Dezibel ist explizit in der Tabelle aufgeführt, weil das Bel selten ohne diesen Vorsatz gebraucht wird.

**Tabelle 8:**  
Andere Einheiten außerhalb des SI

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Wert in SI-Einheiten <sup>(a)</sup>
Druck	Bar <sup>(a)</sup>	bar	1 Bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 10 <sup>5</sup> Pa
	Millimeter-Quecksilbersäule <sup>(b)</sup>	mmHg	1 mmHg = 133,322 Pa
Länge	Ångström <sup>(c)</sup>	Å	1 Å = 0,1 nm = 100 pm = 10 <sup>-10</sup> m
Entfernung	Seemeile <sup>(d)</sup>	M	1 M = 1852 m
Fläche	Barn <sup>(e)</sup>	b	1 b = 100 fm <sup>2</sup> = (10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
Geschwindigkeit	Knoten <sup>(f)</sup>	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
Logarithmus eines Größenverhältnisses	Neper <sup>(g,i)</sup>	Np	[s. Notiz <sup>(j)</sup> zum numerischen Wert des Nepers, des Bels und des Dezibels]
	Bel <sup>(h,i)</sup>	B	
	Dezibel <sup>(h,i)</sup>	dB	

- (a) Das Bar und sein Zeichen sind in der Resolution 7 der 9. CGPM (1948 ; CR, 70) enthalten. Seit 1982 werden alle thermodynamischen Daten für den Normaldruck von einem Bar tabellarisiert. Vor 1982 war der Normaldruck gleich der normalen Atmosphäre, gleich 1,013 25 Bar oder 101 325 Pa.
- (b) Das Millimeter-Quecksilbersäule ist in manchen Ländern die gesetzliche Einheit für die Blutdruckmessung.
- (c) Das Ångström ist im Bereich der Kristallographie mit Röntgenstrahlen und in der Strukturchemie noch weit verbreitet, da die Länge der chemischen Verbindungen im Bereich zwischen 1 und 3 Ångström liegt. Das Ångström wurde allerdings weder vom Internationalen Komitee (CIPM) noch von der Generalkonferenz (CGPM) zugelassen.
- (d) Die Seemeile ist eine spezielle Einheit, die in der Wasser- und Luftnavigation benutzt wird, um die Entfernung auszudrücken. Dieser Wert wurde 1929 bei der *Ersten Außerordentlichen Internationalen Hydrographischen Konferenz* in Monaco durch Übereinkommen unter der Bezeichnung „internationale Seemeile“ angenommen. Es gibt kein vereinbartes Zeichen auf internationaler Ebene, aber die Zeichen M, NM, Nm und nmi werden gebraucht; lediglich das Zeichen M ist in Tabelle 8 angegeben. Ursprünglich war diese Einheit gewählt worden, und wird noch heute gebraucht, weil eine Seemeile an der Erdoberfläche ungefähr einer Bogenminute im Erdmittelpunkt entspricht, was praktisch ist, wenn die Breite und Länge in Grad und Bogenminuten gemessen werden.
- (e) Das Barn ist eine Einheit der Fläche, die in der Kernphysik verwendet wird, um den Wert eines Wirkungsquerschnitts anzugeben.
- (f) Der Knoten entspricht einer Seemeile pro Stunde. Es gibt kein vereinbartes Zeichen auf internationaler Ebene, aber das Zeichen kn ist gebräuchlich.
- (g) Die Gleichung  $L_A = n \text{ Np}$  (wobei n eine Zahl ist) wird verstanden als  $\ln(A_2/A_1) = n$ . Daher, wenn  $L_A = 1 \text{ Np}$ , dann  $A_2/A_1 = e$ . Das Zeichen A wird hier verwendet, um die Amplitude eines Sinussignals auszudrücken, und  $L_A$  wird dann Neperscher Logarithmus des Amplitudenverhältnisses oder Nepersche Amplitudenniveaudifferenz genannt.
- (h) Die Gleichung  $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$  (wobei m eine Zahl ist) wird verstanden als  $\lg(X/X_0) = m/10$ . Daher, wenn  $L_X = 1 \text{ B}$ , dann  $X/X_0 = 10$ , und wenn  $L_X = 1 \text{ dB}$ , dann  $X/X_0 = 10^{1/10}$ . Wenn X ein quadratisch gemittelttes Signal oder eine Größe der Art Leistung bezeichnet, wird  $L_X$  Pegel bezogen auf  $X_0$  genannt.  
Dies ist insbesondere in der Akustik üblich.
- (i) Wenn man diese Einheiten verwendet, ist es wichtig, genau anzugeben, welche Größenart man betrachtet und welchen Bezugswert man verwendet. Diese Einheiten sind keine SI-Einheiten, ihr Gebrauch im Zusammenhang mit dem SI wurde jedoch vom Internationalen Komitee zugelassen.
- (j) Meistens ist es nicht notwendig, den numerischen Wert des Nepers, des Bels und des Dezibels (genauso wenig wie das Verhältnis von Bel und Dezibel zum Neper) anzugeben. Die Werte hängen davon ab, wie die zu logarithmierenden Größenverhältnisse definiert sind.

Tabelle 9 unterscheidet sich von Tabelle 8 lediglich dadurch, dass die in Tabelle 9 erwähnten Einheiten mit den alten Einheiten des CGS-Systems (Zentimeter, Gramm, Sekunde) verknüpft sind, einschließlich der elektrischen Einheiten des CGS. Im Bereich der Mechanik beruhte das CGS-Einheitensystem auf drei Größen und deren entsprechenden Basiseinheiten: dem Zentimeter, dem Gramm und der Sekunde. Die elektrischen CGS-Einheiten wurden noch ausschließlich von diesen drei Basiseinheiten mit Definitionsgleichungen abgeleitet, die sich von den im SI gebrauchten unterscheiden. Da dies auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden kann, sind mehrere unterschiedliche Systeme entstanden: das elektrostatische, das elektromagnetische und das Gaußsche CGS-Einheitensystem. Es wurde nie daran gezweifelt, dass insbesondere das Gaußsche CGS-System in bestimmten Gebieten der Physik, wie der klassischen und relativistischen Elektrodynamik (9. CGPM, 1948, Resolution 6), von Vorteil ist. Tabelle 9 zeigt die Verhältnisse zwischen den CGS-Einheiten und dem SI und listet die CGS-Einheiten auf, die einen besonderen Namen erhalten haben. Wie schon für die Einheiten aus Tabelle 8 werden die SI-Vorsätze mit mehreren dieser Einheiten verwendet (z.B. Millidyne, mdyn; Milligauß, mG usw.).

ESU steht für „Electrostatic Unit“ und EMU für „Electromagnetic Unit“. Im Französischen benutzt man entsprechend UES für „Unité électrostatique“ und UEM für „Unité électrostatique“.

**Tabelle 9:**

Einheiten außerhalb des SI, die im CGS und im Gaußschen CGS-Einheitensystem verwendet werden.

Größe	Name der Einheit	Zeichen der Einheit	Wert in SI-Einheiten
Energie	Erg <sup>(a)</sup>	erg	1 erg = 10 <sup>-7</sup> J
Kraft	Dyn <sup>(a)</sup>	dyn	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N
dynamische Viskosität	Poise <sup>(a)</sup>	P	1 P = 1 dyn s cm <sup>-2</sup> = 0,1 Pa s
kinematische Viskosität	Stokes	St	1 St = 1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Leuchtdichte	Stilb <sup>(a)</sup>	sb	1 sb = 1 cd cm <sup>-2</sup> = 10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
Beleuchtungsstärke	Phot	ph	1 ph = 1 cd sr cm <sup>-2</sup> = 10 <sup>4</sup> lx
Beschleunigung	Gal <sup>(b)</sup>	Gal	1 Gal = 1 cm s <sup>-2</sup> = 10 <sup>-2</sup> m s <sup>-2</sup>
magnetischer Fluss	Maxwell <sup>(c)</sup>	Mx	1 Mx = 1 G cm <sup>2</sup> = 10 <sup>-8</sup> Wb
magnetische Flussdichte	Gauß <sup>(c)</sup>	G <sup>(+)</sup>	1 G = 1 Mx/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>-4</sup> T
magnetische Feldstärke	Ørsted <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe $\hat{=}$ (10 <sup>3</sup> /4 $\pi$ ) A m <sup>-1</sup>

(a) Diese Einheit und ihr Zeichen sind in der Resolution 7 der 9. CGPM (1948 ; CR, S. 70) enthalten.

(b) Das Gal ist eine Einheit, die im Bereich der Geodäsie und Geophysik verwendet wird, um die auf die Schwerkraft zurückzuführende Beschleunigung auszudrücken.

(c) Diese Einheiten sind Teil des dreidimensionalen „elektromagnetischen“ CGS-Systems, das auf Gleichungen für nicht rationalisierte Größen beruht. Sie müssen daher sorgfältig mit den entsprechenden SI-Einheiten verglichen werden, die auf rationalisierten, elektromagnetischen Vierdimensionen- und Viergrößengleichungen beruhen. Das magnetische Feld  $\Phi$  und die magnetische Flussdichte  $B$  sind durch ähnliche Gleichungen im CGS-System und im SI definiert. Dies erlaubt, die entsprechenden Einheiten in der Tabelle miteinander zu verknüpfen. Das nicht-rationalisierte magnetische Feld  $H$  (nicht-rationalisiert) jedoch ist gleich  $4\pi \times H$  (rationalisiert). Das Äquivalenzzeichen  $\hat{=}$  wird verwendet, um anzugeben, dass, wenn  $H$  (nicht rationalisiert) = 1 Oe, dann  $H$  (rationalisiert) = (10<sup>3</sup>/4 $\pi$ ) A m<sup>-1</sup>.

(+) Im Deutschen wird auch Gs als Zeichen der Einheit Gauß verwendet, die im Französischen und im Englischen „gauss“ geschrieben wird.

Statt „nicht empfohlen“ sollte man vielleicht deutlicher sagen „von deren Gebrauch abgeraten wird“

## 4.2 Andere Einheiten außerhalb des SI, deren Gebrauch nicht empfohlen wird

Es gibt viele weitere Einheiten außerhalb des SI; es sind zu viele, um sie hier anzuführen. Sie sind entweder historisch interessant oder werden in speziellen Bereichen (wie das Barrel für Rohöl) oder in manchen Ländern (wie das Zoll, der Fuß oder das Yard) immer noch gebraucht. Das Internationale Komitee sieht keinen Grund, diese Einheiten in modernen wissenschaftlichen und technischen Abhandlungen weiter zu verwenden. Es ist jedoch wichtig, das Verhältnis zwischen diesen Einheiten und den entsprechenden SI-Einheiten zu kennen, und dies wird noch für viele weitere Jahre gelten. Das Internationale Komitee hat deshalb beschlossen, eine Liste der Umrechnungsfaktoren dieser Einheiten in SI-Einheiten zusammenzustellen und sie elektronisch zur Verfügung zu stellen: [www.bipm.org/en/si/si\\_brochure/chapter4/conversion\\_factors.html](http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/chapter4/conversion_factors.html)

## 5 Schreibweise der Namen und Zeichen der Einheiten und Darstellung von Größenwerten

Allgemeine Prinzipien zur Schreibweise von Einheitenzeichen und Zahlen wurden erstmals von der 9. CGPM (1948, Resolution 7) vorgeschlagen. Sie wurden dann von der ISO und der IEC und anderen internationalen Organisationen angenommen und umgesetzt. Daraus ist ein allgemeiner Konsens darüber entstanden, wie die Zeichen und Namen der Einheiten – einschließlich der Zeichen und Namen der Vorsätze –, sowie die Zeichen und Werte der Größen ausgedrückt werden sollen. Die Einhaltung dieser Regeln und Vereinbarungen zum Stil verbessert die Lesbarkeit der wissenschaftlichen und technischen Artikel. Die wichtigsten werden in diesem Kapitel vorgestellt

### 5.1 Einheitenzeichen

Die Einheitenzeichen werden nicht kursiv (in aufrechter Grundschrift) geschrieben, unabhängig davon, wie der restliche Text aussieht. Die Einheitenzeichen werden kleingeschrieben, es sei denn, dass der Name der Einheit von einem Eigennamen abgeleitet wurde. In diesem Fall wird der erste Buchstabe des Zeichens großgeschrieben.

L oder l, Liter

nm,  
**jedoch nicht**  
mµm

Das Zeichen für das Liter ist eine Ausnahme. Die 16. Generalkonferenz (1979, Resolution 6) hat den Gebrauch des Buchstaben L (großgeschrieben) oder l (kleingeschrieben) als Zeichen für das Liter angenommen, um eine Verwechslung zwischen der Zahl 1 (eins) und dem Buchstaben l zu vermeiden.

Wenn ein Vielfach- oder Teilungsvorsatz verwendet wird, ist dieser ein Bestandteil der Einheit und steht vor dem Einheitenzeichen, ohne Leerzeichen zwischen dem Zeichen des Vorsatzes und dem Zeichen der Einheit. Ein Vorsatz wird nie ohne Einheit verwendet, und es werden niemals zusammengesetzte Vorsätze (Komposita) gebildet.

Dies ist 75 cm lang,  
**jedoch nicht** 75 cm. lang

Coulomb durch Kilogramm,  
**jedoch nicht**  
Coulomb durch kg

Einheitenzeichen sind keine Abkürzungen, sondern individuelle, nicht weiter auftrennbare mathematische Objekte; im französischen und im englischen Text wird dafür das Wort Entitäten (entité, entity) verwendet. Sie dürfen daher, außer am Ende eines Satzes, nicht mit einem Punkt versehen werden. Sie sind unveränderlich und man kann weder einen Plural bilden noch sie mit Einheitenamen in einem Ausdruck vermischen, da Einheitenamen keine mathematischen Objekte sind.

Für Newtonmeter:

N m oder N · m

Für Meter durch Sekunde:

m/s oder  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  oder  $\text{m s}^{-1}$ ,

ms, Millisekunde,

m s, Meter mal Sekunde,

m kg/(s<sup>3</sup> A) oder  $\text{m kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$ ,

**jedoch weder** m kg/s<sup>3</sup>A  
**noch** m kg/s<sup>3</sup> A

Produkte und Quotienten der Einheitenzeichen werden nach den üblichen Regeln der Algebra gebildet. Die Multiplikation muss durch ein Leerzeichen oder einen zentrierten Malpunkt in mittlerer Höhe (·) gekennzeichnet werden, um zu vermeiden, dass manche Vorsätze fälschlicherweise als Einheitenzeichen interpretiert werden. Die Division wird durch einen waagerechten (—) oder schrägen (/) Strich oder durch negative Exponenten gekennzeichnet. Wenn mehrere Einheitenzeichen kombiniert werden, muss man auf die Eindeutigkeit achten, z.B. dadurch, dass eckige bzw. runde Klammern oder negative Exponenten benutzt werden. Es darf nicht mehr als ein Teilungsschrägstrich in einem Ausdruck verwendet werden, ohne durch Klammern die Eindeutigkeit zu gewährleisten.

Es ist nicht zulässig, für die Einheitenzeichen und -namen Abkürzungen wie sek (für s oder Sekunde), quad. mm (für mm<sup>2</sup> oder Quadratmillimeter), cc (für cm<sup>3</sup> oder Kubikzentimeter) oder mps (für m/s oder Meter durch Sekunde) zu benutzen. Der korrekte Gebrauch der Zeichen für SI-Einheiten ist verpflichtend. Dies gilt im Allgemeinen auch für die Zeichen der Einheiten, die in den vorangegangenen Kapiteln dieser Broschüre erwähnt wurden. Nur so können Mehrdeutigkeiten und Missverständnisse bezüglich der Werte von Größen vermieden werden.

## 5.2 Einheitenennamen

Die Namen der Einheiten werden in (aufrechter, nicht kursiver) Grundschrift geschrieben und wie gewöhnliche Substantive behandelt. Auf Französisch und auf Englisch werden die Einheitenennamen kleingeschrieben, außer wenn sie am Anfang eines Satzes oder in einem großgeschriebenen Titel stehen; dies gilt auch für die Einheiten, deren Zeichen mit einem großgeschriebenen Buchstaben beginnen. Im Deutschen werden Einheitenennamen wie Eigennamen großgeschrieben.

Obwohl die Werte der Größen meist durch Zahlen und Einheitenzeichen ausgedrückt werden, sollte der Name der Einheit ausgeschreiben werden, falls dieser aus irgendeinem Grund geeigneter ist als deren Zeichen.

Der Name eines Vielfach- oder Teilungsvorsatzes wird dem Namen einer Einheit ohne Leerzeichen oder Bindestrich vorangestellt. Das so entstandene Kompositum bildet dann ein einziges Wort (siehe Abschnitt 3.1).

Auf Französisch und Englisch jedoch muss, wenn der Name einer abgeleiteten Einheit durch Multiplikation einzelner Einheitenennamen gebildet ist, ein Leerzeichen oder ein Bindestrich benutzt werden, um die Einheitenennamen voneinander zu trennen.<sup>(4)</sup>

Auf Französisch und Englisch werden die Potenzen „carré“ und „squared“ oder „cube“ und „cubed“ in Einheitenennamen *nach* dem Namen der Einheit als getrenntes Wort hinzugefügt. Auf englisch ist es auch möglich, für die Flächen- oder Volumeneinheiten die Wörter „square“ oder „cubic“ *vor* den Namen der Einheit zu setzen. Im Deutschen werden „Quadrat“ und „Kubik“ wie Vorsilben behandelt.

## 5.3 Stilistische Regeln und Vereinbarungen zur Angabe von Größenwerten

### 5.3.1 Wert und Zahlenwert einer Größe und Rechnen mit Größen

Der Wert einer Größe wird als Produkt einer Zahl und einer Einheit angegeben; die Zahl, mit der die Einheit multipliziert wird, ist der Zahlenwert der mittels dieser Einheit angegebenen Größe. Der Zahlenwert einer Größe hängt somit von der Wahl der Einheit ab. Somit ist der Wert einer bestimmten Größe unabhängig von der gewählten Einheit; der numerische Wert allerdings variiert je nach gewählter Einheit.

Die Größenzeichen werden üblicherweise durch einen einzigen kursiv gestellten Buchstaben in Schrägschrift dargestellt, sie können aber durch weitere Information als hoch- oder tiefgestellten Zeichen oder in Klammern spezifiziert werden. So ist *C* das empfohlene Zeichen für die Wärmekapazität, *C<sub>m</sub>* für die molare Wärmekapazität, *C<sub>m,p</sub>* für die molare Wärmekapazität bei konstantem Druck und *C<sub>m,V</sub>* für die molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen<sup>(4)</sup>.

Die empfohlenen Namen und Zeichen für die Größen sind in vielen Nachschlagewerken wie der Norm ISO 31 *Größen und Einheiten*, dem „Roten Buch“ der IUPAP SUNAMCO, *Symbols, Units and Nomenclature in Physics* und dem „Grünen Buch“ der IUAPC, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* aufgeführt. Die Größenzeichen sind allerdings nur Empfehlungen, während der Gebrauch der richtigen Einheitenzeichen verbindlich vorgeschrieben ist. Unter bestimmten Umständen möchten Autoren für eine gegebene Größe lieber das Zeichen ihrer Wahl verwenden, z.B. um Verwechslungen vorzubeugen, die entstünden, wenn man dasselbe Zeichen für zwei unterschiedliche Größen verwendete. In diesem Fall muss aber die Bedeutung des Zeichens deutlich erklärt werden. Weder der Name einer Größe noch das dafür verwendete Zeichen bedingen die Verwendung einer bestimmten Einheit.

Name	Zeichen
Joule	J
Hertz	Hz
Meter	m
Sekunde	s
Ampere	A
Watt	W

2,6 m/s oder  
2,6 Meter durch Sekunde

Milligramm,  
**jedoch nicht** Milli-Gramm  
Kilopascal  
**jedoch nicht** Kilo-Pascal

<sup>(4)</sup> Im Deutschen schreibt man das Produkt von Einheiten als ein Wort, das den Artikel des Multiplikators bekommt: die Pascalsekunde, das Newtonmeter.

Meter durch Quadratsekunde,  
Quadratzentimeter, Kubikmillimeter,  
Ampere durch Quadratmeter,  
Kilogramm durch Kubikmeter

Der Wert der Geschwindigkeit eines Teilchens  $v = dx/dt$  kann in unterschiedlichen Einheiten angegeben werden:  
 $v = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}$ ,  
wobei 25 und 90 die Zahlenwerte ein und derselben Geschwindigkeit sind, ausgedrückt in der Einheit Meter durch Sekunde oder der Einheit Kilometer durch Stunde.

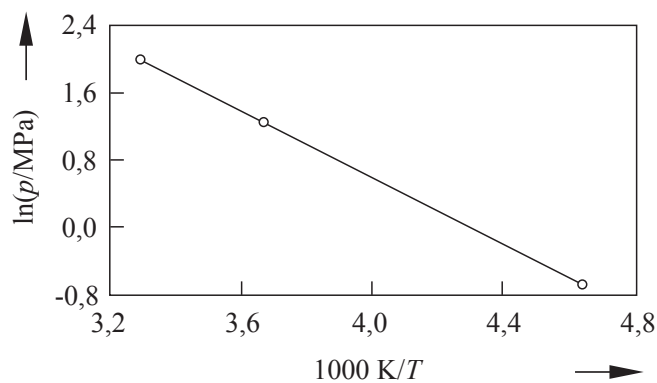
<sup>(4)</sup> Die tiefgestellten Zeichen *p* und *V* werden kursiv gesetzt, weil sie Größen bezeichnen.



Einheitenzeichen werden, wie oben erläutert, wie mathematische Objekte behandelt. Wenn der Wert einer Größe als Produkt von Zahlenwert und Einheit ausgedrückt wird, können der Zahlenwert und die Einheit nach den üblichen algebraischen Regeln behandelt werden. Dieses Vorgehen nennt man Rechnen mit Größen. Beispielsweise kann die Gleichung  $T = 293 \text{ K}$  auch  $T/\text{K} = 293$  geschrieben werden. Oft ist es praktischer, den Quotienten einer Größe und einer Einheit an den Spaltenanfang einer Tabelle zu setzen, weil man dann nur einfache Zahlen in die Tabelle eintragen muss. Eine Tabelle des Dampfdrucks als Funktion der Temperatur und des natürlichen Logarithmus des Zahlenwerts des in Megapascal ausgedrückten Dampfdrucks als Funktion der reziproken Temperatur könnte man wie folgt formatieren:

$T/\text{K}$	$10^3 \text{ K}/T$	$p/\text{MPa}$	$\ln(p/\text{MPa})$
216,55	4,6179	0,5180	-0,6578
273,15	3,6610	3,4853	1,2486
304,19	3,2874	7,3815	1,9990

Die Achsen einer Grafik können auf dieselbe Weise beschriftet werden, damit die Achsenwerte nur Zahlen sind, wie die untenstehende Abbildung zeigt.



Algebraisch gleichwertige Formen, wie  $\text{kK}/T$  oder  $10^3 (T/\text{K})^{-1}$ , können anstelle von  $10^3 \text{ K}/T$  verwendet werden.

Die maximale elektrische Spannung wird wie folgt angegeben:

$$U_{\max} = 1000 \text{ V},$$

**jedoch nicht**  $U = 1000 \text{ V}_{\max}$ .

Der relative Massenanteil von Kupfer in der Siliziumprobe wird wie folgt ausgedrückt:

$$w(\text{Cu}) = 1,3 \times 10^{-6},$$

**jedoch nicht**  $1,3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$ .

$$m = 12,3 \text{ g},$$

wobei  $m$  hier das Größenzeichen für die „Masse“ ist,

**aber**

$$\varphi = 30^\circ 22' 8'',$$

wobei  $\varphi$  hier das Größenzeichen für den „ebenen Winkel“ ist.

$$t = 30,2 \text{ }^\circ\text{C},$$

**jedoch weder**  $t = 30,2^\circ\text{C}$

**noch**  $t = 30,2 \text{ }^\circ\text{C}$

ein  $10 \text{ k}\Omega$ -Widerstand

ein  $35 \text{ Millimeter}$ -Film

### 5.3.2 Größen- und Einheitenzeichen

So wie das Größenzeichen nicht die Wahl einer bestimmten Einheit bedingt, darf das Einheitenzeichen nicht verwendet werden, um spezifische Informationen über die betreffende Größe zu geben, und es darf niemals die einzige Informationsquelle über die Größe sein. Die Einheiten dürfen nie dazu dienen, Zusatzinformationen über die Art der Größe zu geben; jede Zusatzinformation muss dem Größenzeichen und nicht dem Einheitenzeichen beigefügt sein.

### 5.3.3 Angabe des Werts einer Größe

Der Zahlenwert steht immer vor der Einheit, und zwischen der Zahl und der Einheit ist immer ein Leerzeichen einzufügen. Da der Wert einer Größe das Produkt einer Zahl mit einer Einheit ist, wird das Leerzeichen als Multiplikationszeichen betrachtet (ebenso wie das Leerzeichen zwischen den Einheiten). Die einzigen Ausnahmen zu dieser Regel sind das Einheitenzeichen für den Grad, die Minute und die Sekunde des ebenen Winkels, jeweils  $^\circ$ ,  $'$  und  $''$ , die den Zahlen ohne Leerzeichen nachgestellt werden.

Diese Regel bedeutet auch, dass ein Leerzeichen vor dem Zeichen  $^\circ\text{C}$  für den Grad Celsius steht, um den Wert der Celsius-Temperatur  $t$  auszudrücken.

Selbst wenn der Wert einer Größe als Adjektiv verwendet wird, muss ein Leerzeichen zwischen dem numerischen Wert und dem Einheitenzeichen vorhanden sein. Wenn der Name der Einheit ausgeschrieben wird, gelten die üblichen Grammatikregeln.

In einem Ausdruck wird immer nur eine einzige Einheit gebraucht. Die Werte der Größen Zeit und ebener Winkel, die in Einheiten außerhalb des SI ausgedrückt werden, sind jedoch Ausnahmen zu dieser Regel. Es wird empfohlen, den Grad des ebenen Winkels dezimal zu teilen. So wird man eher 22,20° als 22° 12' schreiben – außer in Fachgebieten wie z.B. Navigation, Kartographie und Astronomie sowie bei der Messung sehr kleiner Winkel.

*jedoch nicht*  $l = 10,234 \text{ m},$   
 $l = 10 \text{ m } 23,4 \text{ cm}$

### 5.3.4 Angabe von Zahlenwerten und Dezimalzeichen

Das Zeichen, das benutzt wird, um den ganzzahligen vom gebrochenen Teil einer Zahl zu trennen, heißt *Dezimalzeichen*. Gemäß der 22. Generalkonferenz (2003, Resolution 10) soll das Dezimalzeichen „der Punkt auf der Zeile oder das Komma auf der Zeile“ sein. Das geeignete Dezimalzeichen ist dasjenige, das im allgemeinen Gebrauch geläufig ist; dies ist in Deutschland das Komma.

Wenn die Zahl zwischen +1 und –1 liegt, steht immer eine Null vor dem Dezimalzeichen.

*jedoch nicht* –0,234,  
 –,234  
*jedoch nicht* 43 279,168 29,  
 43.279,168.29

Gemäß der 9. Generalkonferenz (1948, Resolution 7) und der 22. Generalkonferenz (2003, Resolution 10) können Zahlen, die aus vielen Ziffern bestehen, in Dreiergruppen unterteilt werden, die jeweils durch ein Leerzeichen getrennt werden, um eine bessere Lesbarkeit zu gewährleisten. Diese Dreiergruppen dürfen nicht durch Punkte oder Kommata getrennt werden. Wenn jedoch nur vier Ziffern vor oder nach dem Dezimaltrennzeichen stehen, ist es nicht üblich, eine einzelne Ziffer durch ein Leerzeichen zu isolieren. Ziffern so zu gruppieren ist letztlich eine persönliche Geschmacksfrage, aber in speziellen Anwendungen wie der Industriezeichnung, bei Finanzdokumenten oder elektronisch lesbaren Belegen wird nicht so verfahren.

*oder* 3279,1683  
 3 279,168 3

In einer Tabelle darf innerhalb einer Spalte nur ein Format zur Darstellung von Zahlen verwendet werden.

### 5.3.5 Angabe der dem Wert einer Größe beigeordneten Messunsicherheit<sup>(+)</sup>

Die dem besten Schätzwert  $x$  einer Größe  $X$  beigeordnete Unsicherheit  $u(x)$  muss gemäß dem *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen* (Hrsg.: DIN, Beuth-Verlag, Ref.Nr. DIN V ENV 13005:1999-06, englische Abkürzung: GUM, Hrsg.: ISO, 1995) ermittelt und angegeben werden. Die Standardunsicherheit lässt sich sehr bequem wie folgt angeben:

$$m_n = 1,674\ 927\ 28\ (29) \times 10^{-27} \text{ kg},$$

wobei  $m_n$  das Zeichen für den Schätzwert der Größe (hier die Masse des Neutrons) und die Zahl in Klammern der numerische Wert der Standardunsicherheit ist – bezogen auf die zwei letzten Ziffern des angegebenen Schätzwertes. Dies ist äquivalent zu  $u(m_n) = 0,000\ 000\ 29 \times 10^{-27}$ . Wenn man statt der Standardunsicherheit die erweiterte Unsicherheit  $U$  angibt, dann ist der Erweiterungsfaktor  $k$  anzugeben und es gilt  $U = k u(x)$ .

### 5.3.6 Multiplikation oder Division von Größenzeichen, Größenwerten und Zahlen

Um die Größenzeichen zu multiplizieren oder zu dividieren, sind alle folgenden Notierungen erlaubt:  $ab$ ,  $a b$ ,  $a \cdot b$ ,  $a \times b$ ,  $a/b$ ,  $\frac{a}{b}$ ,  $a b^{-1}$ .

Wenn man Größenwerte multipliziert, darf man entweder ein Multiplikationszeichen,  $\times$ , oder runde bzw. eckige Klammern, aber nicht den (zentrierten) Punkt in mittlerer Höhe verwenden. Wenn man Zahlen multipliziert, darf ausschließlich das Multiplikationszeichen,  $\times$ , verwendet werden.

Wenn man Werte von Größen anhand eines Schrägstrichs dividiert, verwendet man Klammern, um jegliche Mehrdeutigkeit auszuschließen.

Beispiele:

$F = ma$  für Kraft ist gleich  
 Masse mal Beschleunigung.

*oder* (53 m/s)  $\times$  10,2 s  
 (53 m/s)(10,2 s)

*jedoch nicht* 25  $\times$  60,5  
 25  $\cdot$  60,5

(20 m)/(5 s) = 4 m/s

*jedoch nicht* (a/b)/c,  
 a/b/c

<sup>(+)</sup> Der Text dieses Abschnitts wurde nicht wörtlich übersetzt, sondern den im Deutschen üblichen Schreibweisen angepasst.

### 5.3.7 Angabe der Werte von dimensionslosen Größen oder von Größen der Dimension eins

Wie unter Abschnitt 2.2.3 bereits erwähnt, ist die kohärente SI-Einheit der dimensionslosen Größen oder der Größen der Dimension eins die Zahl eins, Zeichen 1. Die Werte dieser Größen werden einfach durch Zahlen ausgedrückt. Das Einheitszeichen 1 oder der Einheitenname „eins“ werden nicht explizit gezeigt, und es gibt weder ein besonderes Zeichen noch einen besonderen Namen für die Einheit eins, außer in einigen untenstehenden Ausnahmefällen. Für die Größe „ebener Winkel“ trägt die Einheit eins den besonderen Namen Radiant, Zeichen rad, und für die Größe „Raumwinkel“ trägt sie den besonderen Namen Steradian, Zeichen sr. Für die Logarithmen von Größenverhältnissen werden die besonderen Namen Neper, Zeichen Np, Bel, Zeichen B, und Dezibel, Zeichen dB (siehe Abschnitt 4.1 und Tabelle 8) verwendet.

Da die SI-Vorsätze weder an das Zeichen 1 noch an den Einheitennamen „eins“ angehängt werden können, werden Zehnerpotenzen verwendet, um besonders große oder kleine Werte von dimensionslosen Größen anzugeben.

In mathematischen Ausdrücken kann das international anerkannte Zeichen % (Prozent) mit dem SI gebraucht werden, um die Zahl 0,01 darzustellen. So kann es benutzt werden, um die Werte der dimensionslosen Größen anzugeben. Wenn es gebraucht wird, muss ein Leerzeichen zwischen der Zahl und dem Zeichen % stehen. Wenn Werte von dimensionslosen Größen auf diese Weise angegeben werden, ist es besser, das Zeichen % und nicht den Namen „Prozent“ zu verwenden.

In einem geschriebenen Text bedeutet das Zeichen % meist „ein Prozent“.

Ausdrücke wie „Prozentsatz der Masse“, „Prozentsatz des Volumens“, „Prozentsatz der Stoffmenge“ dürfen nicht verwendet werden; die Informationen über die betreffende Größe müssen durch den Namen und das Zeichen der Größe vermittelt werden.

Wenn man die Werte dimensionsloser Anteile (z.B. Massenanteil, Volumenanteil, relative Unsicherheit usw.) angibt, ist es manchmal nützlich, das Verhältnis zwischen zwei Einheiten gleicher Art zu verwenden.

Man gebraucht auch den Ausdruck „ppm“ (englisch: parts per million). Er bedeutet den relativen Wert  $10^{-6}$ ,  $1 \times 10^{-6}$ , „Eins pro Million“, oder ein Millionstel. In englischsprachigen Ländern werden auch die Ausdrücke „parts per billion“ und ppt „parts per trillion“ und deren jeweilige Abkürzungen „ppb“ und „ppt“ verwendet. Dabei entspricht „billion“  $10^9$  und „trillion“ entspricht  $10^{12}$ , wohingegen man im Deutschen und vielen anderen Sprachen das Wort Milliarde für  $10^9$  und das Wort Billion für  $10^{12}$  verwendet. Deswegen wird davon abgeraten, diese Ausdrücke oder Abkürzungen zu gebrauchen. In deutschen Texten wird auch „Promille“, Zeichen ‰, für  $10^{-3}$  verwendet; man sollte dafür aber nie die Abkürzung ppt („parts per thousand“) verwenden.

Wenn man aber %, ‰ oder ppm verwendet, ist es notwendig, die (dimensionslose) Größe zu benennen, deren Wert angegeben wird.

$x_B = 0,0025 = 0,25 \%$ ,  
wobei  $x_B$  das Zeichen für die Größe  
„Mengenanteil des Teilchens B“ ist,  
oder „molarer Anteil des Teilchens B“

Der Spiegel reflektiert 95 % der einfallenden Photonen.

$\varphi = 3,6 \%$ ,  
**jedoch nicht**  $\varphi = 3,6 \%$  (V/V),  
wobei  $\varphi$  den Volumenanteil  
bezeichnet

$x_B = 2,5 \times 10^{-3}$   
 $= 2,5 \text{ mmol/mol}$

$u_1(U) = 0,3 \mu\text{V/V}$ ,  
wobei  $u_1(U)$  für die relative Unsicherheit  
der gemessenen Spannung  $U$  steht;  
statt  $u_1$  wird im Deutschen oft der  
Buchstabe  $w$  verwendet, um eine  
relative Unsicherheit anzugeben.

## Anhang

In der Originalversion ist dies An-  
nexe 3 (Appendix 3).

### Einheiten für photochemische und photobiologische Größen

Optische Strahlung kann chemische Veränderungen in bestimmten lebenden oder leblosen Stoffen verursachen. Diese Eigenschaft wird Aktinität genannt, und Strahlung, die solche Veränderungen verursachen kann, ist unter dem Namen „aktinische Strahlungen“ bekannt. Aktinische optische Strahlung hat folgende Grundeigenschaft: auf der Molekülebene interagiert ein Photon mit einem Molekül, wodurch dieses verändert oder in neue Molekülararten zerbrochen wird. Es ist also möglich, spezifische photochemische oder photobiologische Größen durch den Einfluss der optischen Strahlung auf die entsprechenden chemischen oder biologischen Rezeptoren zu definieren.

In der Metrologie ist die einzige photobiologische Größe, die im messtechnischen Sinne gemäß dem SI jemals klar definiert worden ist, die Interaktion des Lichts mit dem menschlichen Auge beim Sehen. Für diese wichtige photobiologische Größe wurde eine SI-Basiseinheit, die Candela, festgelegt. Mehrere andere photometrische Größen, deren Einheiten (wie das Lumen oder Lux, siehe Tabelle 3) von der Candela abgeleitet werden, sind gleichermaßen festgelegt worden.

Die Definitionen der Größen und photometrischen Einheiten findet man im *Vocabulaire international de l'éclairage*, CIE-Veröffentlichung 17.4 (1987), oder im *Vocabulaire électrotechnique international*, IEC-Veröffentlichung 50, Kapitel 845: Beleuchtung.

#### 1 Aktinisches Wirkungsspektrum

Eine optische Strahlung kann anhand ihrer spektralen Leistungsverteilung gekennzeichnet werden. Die Mechanismen, nach denen optische Strahlung vom chemischen oder biologischen System absorbiert wird, sind in der Regel sehr komplex und sind immer von der Wellenlänge (oder Frequenz) abhängig. Für die metrologisch relevanten Anwendungen jedoch kann die Komplexität dieser Absorptionsmechanismen ignoriert werden, und der aktinische Effekt wird einfach durch ein aktinisches Wirkungsspektrum gekennzeichnet, das die photochemische oder photobiologische Reaktion mit der auftretenden Strahlung verknüpft. Dieses aktinische Wirkungsspektrum beschreibt die relative Wirksamkeit einer monochromatischen optischen Strahlung bei einer Wellenlänge  $\lambda$ , wodurch eine gegebene aktinische Reaktion verursacht wird. Es wird durch relative Werte angegeben, die im Maximum auf 1 normiert sind. Im allgemeinen werden die aktinischen Wirkungsspektren von den internationalen Wissenschafts- oder Normungsorganisationen festgelegt und zur Anwendung empfohlen.

Für das Sehen hat die Internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) zwei Wirkungsspektren festgelegt, die vom CIPM angenommen wurden:  $V(\lambda)$  für das photopische Sehen und  $V'(\lambda)$  für das skotopische Sehen. Diese Wirkungsspektren werden bei der Messung photometrischer Größen verwendet und sind implizit Teil der Definition der SI-Einheit für die Photometrie, der Candela. Das photopische Sehen (Tagessehen) findet in den Zäpfchen der Netzhaut des Auges (Retina) statt, die auf höhere Leuchtdichten ( $L > \text{ca. } 10 \text{ cd m}^{-2}$ ) reagieren. Für das skotopische Sehen (Nachtsehen) sind die Stäbchen auf der Netzhaut zuständig, die bei niedrigen Leuchtdichten ( $L < \text{ca. } 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$ ) ansprechen. Bei Leuchtdichten im Bereich zwischen dem photopischen und dem skotopischen Sehen werden sowohl die Zäpfchen als auch die Stäbchen gleichzeitig herangezogen, es handelt sich dann um den Bereich des mesopischen Sehens.

Principes régissant la photométrie,  
*Monographie BIPM*, 1983, 32 pp.

Wirkungsspektren wurden vom der CIE auch für andere aktinische Effekte definiert, wie das Aktionsspektrum des durch die UV-Strahlung bedingten Erythems (Hautrötung). Diese Spektren haben jedoch keinen besonderen Status innerhalb des SI.

#### Anmerkung:

Für die Messpraxis hilft es zu wissen, dass es jeweils drei Normspektralwertfunktionen für den 2-Grad- und den 10-Grad-Beobachter sowie für die „circadiane Bewertung“ (Melatonin-Erzeugung) gibt. Die Farbbewertung durch den 2-Grad-Beobachter wurde vom CIPM im Zuge der Candela-Definition (Bureau International des Poids et Mesures, 10e session 1982; Appendix P2, Principles governing photometry; P92-P98, Document CCPR/82-9) mit veröffentlicht und für die Anwendung vorgeschrieben.

## 2 Messung photochemischer und photobiologischer Größen und ihre entsprechenden Einheiten

Die photometrischen Größen und Einheiten, die derzeit im Bereich des Sehens benutzt werden, sind voll akzeptiert und werden bereits seit sehr langer Zeit verwendet. Sie sind nicht von den im folgenden Text angeführten Regeln betroffen. Für alle anderen photochemischen oder biologischen Größen gelten folgende Regeln für die Definition der zu benutzenden Einheiten.

Eine photochemische oder photobiologische Größe wird auf rein physikalische Art definiert, und zwar als eine Größe, die durch Bewertung des Strahlungseffekts nach seiner Wirkung auf einen selektiven Rezeptor von der entsprechenden radiometrischen Größe abgeleitet wird. Die relative spektrale Empfindlichkeit dieses Rezeptors wird durch das Wirkungsspektrum des untersuchten photochemischen oder photobiologischen Effekts definiert. Die Größe ergibt sich aus dem Integral über den Wellenlängenbereich der spektralen Verteilung der untersuchten radiometrischen Größe, gewichtet durch das passende aktinische Wirkungsspektrum. Der Gebrauch eines Integrals setzt die arithmetische Additivität der aktinischen Größen voraus; in der Praxis ist dieses Gesetz nicht vollkommen erfüllt. Das Wirkungsspektrum wird als Funktion relativer Werte angegeben; es handelt sich um eine Größe ohne Dimension, deren SI-Einheit die Zahl „Eins“ ist. Die entsprechende radiometrische Größe hat ihre eigene radiometrische Einheit. Die Regeln bei SI-Einheiten für abgeleitete Größen besagen, dass die Einheit einer photochemischen oder photobiologischen Größe gerade die der entsprechenden radiometrischen Größe ist. Wenn man also einen Größenswert angibt, ist es unbedingt erforderlich, zu erläutern, ob es sich um eine radiometrische oder um eine aktinische Größe handelt, da die Einheiten dieselben sind. Falls es für einen aktinischen Effekt mehrere Wirkungsspektren gibt, muss das für die Messungen angewendete Wirkungsspektrum klar angegeben werden.

Diese Art, die für die photochemischen und photobiologischen Größen zu verwendenden Einheiten zu definieren, wurde 1977 vom CCPR (Comité consultatif de photométrie et radiométrie) bei seiner 9. Sitzung empfohlen.

Die effektive erythemale Bestrahlung  $E_{\text{er}}$  einer UV-Strahlungsquelle erhält man beispielsweise, indem man die spektrale Bestrahlungsstärke der Strahlung bei jeder Wellenlänge  $\lambda$  bewertet mit dem Wirkungsspektrum – also der Effizienz, mit der diese Strahlung bei dieser Wellenlänge ein Erythem verursachen kann – und indem man über den wirksamen Wellenlängenbereich integriert. Dies kann anhand der folgenden mathematischen Formel ausgedrückt werden:

$$E_{\text{er}} = \int E_{\lambda} s_{\text{er}}(\lambda) d\lambda,$$

wobei  $E_{\lambda}$  die spektrale Bestrahlungsstärke in  $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$  bei einer Wellenlänge  $\lambda$  angibt und  $s_{\text{er}}(\lambda)$  das Wirkungsspektrum des Erythems beschreibt, das im Maximum auf 1 normiert ist. Das Ergebnis dieser Bestimmung ergibt die erythemale Bestrahlungsstärke,  $E_{\text{er}}$ , ausgedrückt in  $\text{W m}^{-2}$ , gemäß den SI-Regeln.

## Liste der Abkürzungen

### 1 Laboratorien, Komitees und Konferenzen\*

BAAS	British Association for the Advancement of Science
BIH	Bureau International de l'Heure
BIPM	International Bureau of Weights and Measures/ Bureau International des Poids et Mesures
CARICOM	Caribbean Community
CCAUV	Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration/Comité Consultatif de l'Acoustique, des Ultrasons et des Vibrations
CCDS*	Consultative Committee for the Definition of the Second/ Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde, siehe CCTF
CCE*	Consultative Committee for Electricity/ Comité Consultatif d'Électricité, see CCEM
CCEM	(früher CCE) Consultative Committee for Electricity and Magnetism/Comité Consultatif d'Électricité et Magnétisme
CCL	Consultative Committee for Length/Comité Consultatif des Longueurs
CCM	Consultative Committee for Mass and Related Quantities/ Comité Consultatif pour la Masse et les Grandeurs Apparentées
CCPR	Consultative Committee for Photometry and Radiometry/ Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie
CCQM	Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry/Comité Consultatif pour la Quantité de Matière : Métrologie en Chimie
CCRI	Consultative Committee for Ionizing Radiation/ Comité Consultatif des Rayonnements Ionisants
CCT	Consultative Committee for Thermometry/ Comité Consultatif de Thermométrie
CCTF	(früher CCDS) Consultative Committee for Time and Frequency/ Comité Consultatif du Temps et des Fréquences
CCU	Consultative Committee for Units/Comité Consultatif des Unités
CGPM	General Conference on Weights and Measures/ Conférence Générale des Poids et Mesures
CIE	International Commission on Illumination/ Commission Internationale de l'Éclairage
CIPM	International Committee for Weights and Measures/ Comité International des Poids et Mesures
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
CR	<i>Comptes rendus</i> of the Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM
IAU	International Astronomical Union
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IEC	International Electrotechnical Commission/ Commission Électrotechnique Internationale
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics

\* Organisationen mit einem Stern existieren nicht mehr oder sind unter einer anderen Abkürzung zu finden

OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
PV	<i>Procès-Verbaux</i> of the Comité International des Poids et Mesures, CIPM
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, UIPPA
WHO	World Health Organization

## 2 Wissenschaftliche Begriffe

CGS	Three-dimensional coherent system of units based on the three mechanical units centimetre, gram and second
EPT-76	Provisional Low Temperature Scale of 1976/ Échelle provisoire de température de 1976
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
MKS	System of units based on the three mechanical units metre, kilogram, and second
MKSA	Four-dimensional system of units based on the metre, kilogram, second, and the ampere
SI	International System of Units/Système International d'Unités
TAI	International Atomic Time/Temps Atomique International
TCG	Geocentric Coordinated Time/Temps-coordonnée Géocentrique
TT	Terrestrial Time
UTC	Coordinated Universal Time
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water