

# Paradigmenwechsel im Internationalen Einheitensystem (SI)

Rainer Scharf\*, Thomas Middelmann\*\*

## Die Bedeutung des Messens

Das Messen ist eine der Grundlagen unserer heutigen Zivilisation. Es ist eine entscheidende Voraussetzung für Handel, Technik und Wissenschaft, die immer präzisere und verlässlichere Messverfahren verlangen. Beim Messen vergleicht man den vorliegenden Zustand einer Messgröße mit einem Referenzzustand, der durch einen Standard oder ein „Normal“ wie das „Urkilogramm“ gegeben ist. Damit verschiedene Messungen miteinander vergleichbar sind, ist eine verbindliche Verabredung über eine geeignete Bezugsgröße erforderlich. Diese Bezugsgrößen sind die Einheiten, in denen gemessen wird. Mit der „verbindlichen Verabredung“ wird der rechtliche Charakter der Einheiten deutlich, denn sie können nur dann ihren Zweck erfüllen, wenn sie stets in gleicher Weise verwendet werden.

Das Ergebnis der Messung einer Messgröße  $Q$  ist das Produkt aus einem Zahlenwert  $\{Q\}$  und einer Maßeinheit  $[Q]$ . Aufgrund geometrischer und physikalischer Gesetzmäßigkeiten bestehen viele Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen physikalischen Größen, sodass wir ihre Maßeinheiten nicht völlig beliebig wählen können. Vielmehr lassen sich zahlreiche Einheiten aus anderen ableiten. So kann die Volumeneinheit Liter nicht unabhängig von der Längeneinheit Meter sein, und die Krafteinheit Newton ( $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$ ) lässt sich nicht unabhängig von Kilogramm, Meter und Sekunde festlegen.

Im Internationalen System der Einheiten SI (franz. „Système international d’unités“) können die Einheiten zur Messung aller bekannten physikalischen Messgrößen aus den sieben Basiseinheiten Meter, Sekunde, Kilogramm, Ampere, Kelvin, Mol und Candela abgeleitet werden. Diese Einheiten, auf denen das SI beruht, bilden keine Basis im mathematischen Sinne eines Orthonormalsystems. Vielmehr stehen die fundamentalen Einheiten Meter, Sekunde, Kilogramm und Ampere neben den praxisorientierten Einheiten Kelvin, Mol und Candela, die man im Prinzip auch durch die fundamentalen Einheiten ausdrücken

könnte. Die Auswahl dieser Basiseinheiten hat vor allem praktische Gründe, da das SI zur Verständigung zwischen unterschiedlichen Gruppen, wie Händlern, Verbrauchern, Ingenieuren und Forschern, dient. So mag die Wahl einer bestimmten Basiseinheit für eine Gruppe nützlich und für eine andere merkwürdig erscheinen. Doch das SI ist hierbei um einen Ausgleich unterschiedlicher Interessen bemüht.

Gegenwärtig definiert man die Basiseinheiten auf unterschiedliche Weise. Als Bezugsgrößen werden teils Artefakte (Kilogramm), idealisierte Messvorschriften (Ampere), Materialeigenschaften (Kelvin, Mol), festgelegte Faktoren (Candela) oder Naturkonstanten (Sekunde, Meter) verwendet. Würde sich eine dieser Größen ändern (wie das etwa beim „Urkilogramm“, dem internationalen Kilogrammprototyp, der Fall zu sein scheint), so müssten sich die durch die Naturkonstanten gegebenen Zusammenhänge scheinbar ebenfalls ändern – mit absurden Konsequenzen.

Deshalb ist es sinnvoller, feststehende Zusammenhänge zwischen verschiedenen (Natur-) Konstanten zur Definition der Bezugsgrößen zu nutzen. Gegenwärtig steht eine grundlegende Revision des SI kurz vor dem Abschluss, die dies leistet. Nachdem die Sekunde, der Meter und auch die Candela bereits über festgelegte (Natur-) Konstanten definiert sind, will man im neuen SI auch das Kilogramm, das Ampere, das Kelvin und das Mol dadurch definieren, dass man sie über solche Konstanten miteinander verbindet.

## Einheiten im Wandel der Zeit

Die Geschichte des Messens reicht weit zurück. Bereits in der frühen Antike nahm man Messungen von Gewicht, Länge und Zeit vor, wobei naheliegende Maßeinheiten verwendet wurden. So hat man Gewichte in Getreidekörnern, Längen in Zoll oder Elle, die Zeit bezogen auf den Tagesgang der Sonne gemessen. In unterschiedlichen Herrschaftsgebieten galten meist unterschiedliche Einheiten. So gab es in deutschen Ländern Dutzende von unterschiedlich langen Ellen, die

\* Dr. Rainer Scharf, Wissenschaftsjournalist, E-Mail: r.scharf@rz-online.de

\*\* Dr. Thomas Middelmann, Fachbereich „Halbleiterphysik und Magnetismus“, E-Mail: thomas.middelmann@ptb.de



Bild 1:  
Symbol für die  
Meterkonvention und  
für das Internationa-  
le Büro für Maß und  
Gewicht (BIPM)

von 40,38 cm Länge in Erfurt bis 79,90 cm in München reichten. Händler, die damit vertraut waren und die Umrechnung beherrschten, konnten dies zu ihrem eigenen Nutzen einsetzen. An diesem Zustand änderte sich bis ins 18. Jahrhundert wenig.

Doch im Zuge der Industrialisierung, mit der Entstehung von Manufakturen und dem sich ausdehnenden Handel führte die Vielzahl unterschiedlicher Längenmaße vermehrt zu Handelshemmnissen.

Eine Lösung dieser Probleme kam 1789 mit der Französischen Revolution, als neben der Verwendung des Dezimalsystems auch die Einführung einheitlicher Maße gefordert wurde. Dies führte zur Geburt von Meter und Kilogramm, die beide zwar auf Artefakte bezogen waren, aber dennoch Anspruch auf eine objektive und im irdischen Rahmen universelle Gültigkeit erheben konnten. So verkörpert der Urmeter den 10-Millionsten Teil der Entfernung vom Nordpol zum Äquator,

gemessen auf dem Meridian durch Paris, während das Urkilogramm der Masse eines Liters oder Kubikdezimeters Wasser bei einer Temperatur von 4 °C entspricht. [1]

Die beiden „revolutionären“ Artefakte – das Urmeter und das Urkilogramm – waren in Frankreich seit 1799 die „Maße der Dinge“ und wurden schließlich 1875, im Rahmen der Meterkonvention, Grundlage einer internationalen Vereinbarung. In ihr schlossen sich 17 Staaten mit dem Ziel zusammen, einheitliche Maße zu etablieren und deren Weiterentwicklung zu sichern. Zu den 17 Gründungsstaaten der Meterkonvention zählten neben Frankreich auch das Deutsche Reich, Russland, das Osmanische Reich und die USA. In den folgenden Jahren kamen weitere Staaten hinzu, wie Großbritannien 1884 und Japan 1885. [2]

Seit dem 27. April 2015 hat die Meterkonvention 57 Mitgliedsstaaten und weitere 40 Staaten und internationale Organisationen als assoziierte Mitglieder. Doch die Verwendung der metrischen Einheiten hat sich noch nicht bei allen Mitgliedsländern durchgesetzt. So werden in den USA Längen, Massen und Temperaturen weiterhin in Meilen, Unzen und Grad Fahrenheit gemessen.

Die Meterkonvention führte zur Einrichtung der drei folgenden Organe:

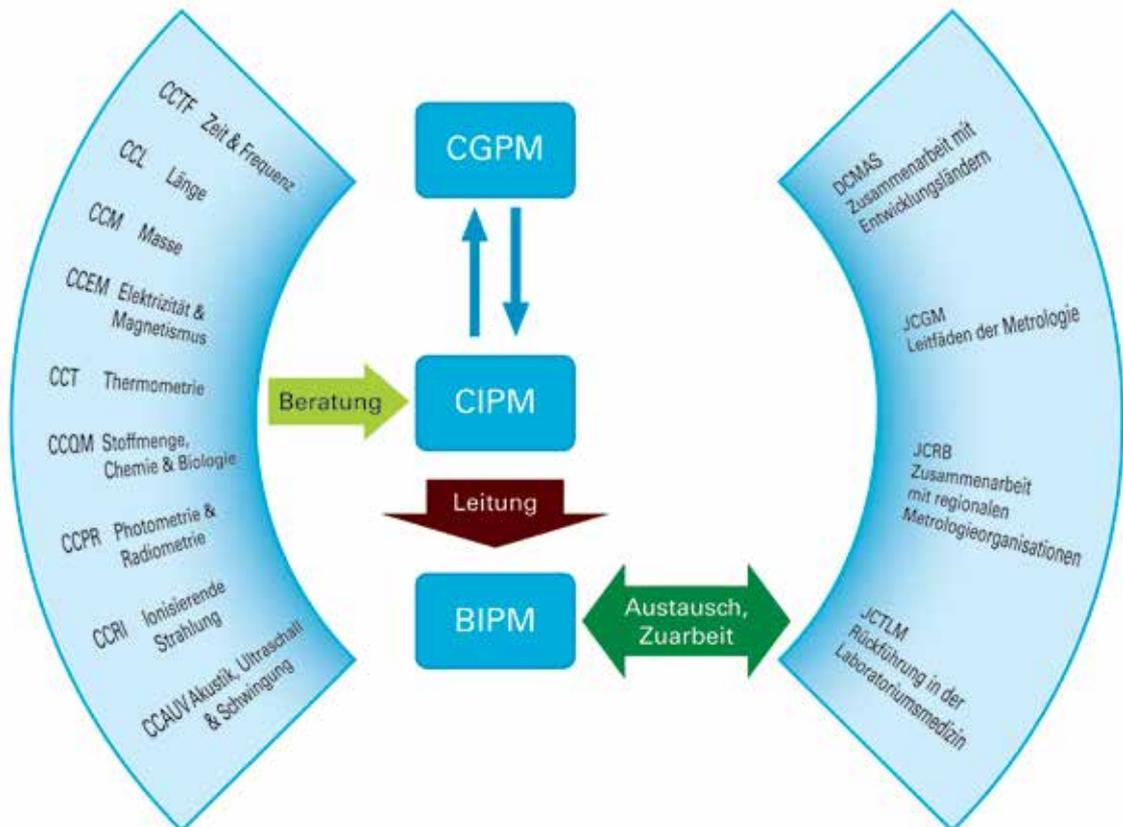


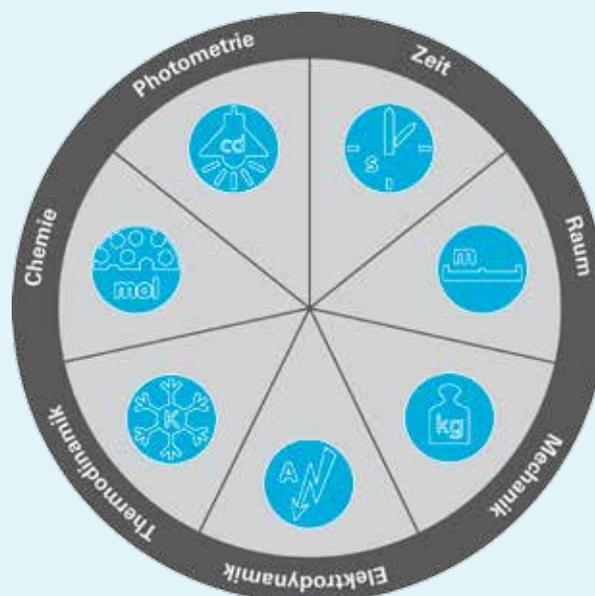
Bild 2:  
Strukturdiagramm  
der durch die  
Meterkonvention  
eingeschichteten Insti-  
tutionen/Organe



## Die Idee des alten und des neuen SI

Das Internationale Einheitensystem SI wurde in der Zeit von 1948 bis 1960 etabliert und 1960 *Système International d'unités*, kurz SI, getauft. Von den Organen der Meterkonvention entwickelt und eingerichtet, baut das SI auf dem Metrischen System auf. Die Grundidee ist, alle SI-Einheiten nur durch Multiplikation oder Division aus wenigen Basiseinheiten (zuerst sechs, heute sieben) zu bilden. Dabei sollen lediglich dezimale Faktoren Verwendung finden, die durch entsprechende Präfixe wie „k“ für „kilo“, also 1000, bezeichnet werden. Die sieben Basiseinheiten sind: die Sekunde (s), der Meter (m), das Kilogramm (kg), das Ampere (A), das Kelvin (K), die Candela (cd) und das Mol (mol). Jede der Basiseinheiten bringt eine weitere „Dimension“, d. h. ein weiteres physikalisch-messtechnisches Gebiet in das Einheitensystem ein.

Im neuen SI definiert man die sieben Basiseinheiten dadurch, dass man sieben „definierende Konstanten“ festlegt, die diese Einheiten enthalten. Statt Artefakte zu verwenden, wie heute noch in der Definition des Kilogramms, „verankern“ diese Konstanten das SI und werden zur neuen Basis. Die dimensional Bezüge der SI-Einheiten untereinander bleiben erhalten und alle Einheiten können durch Multiplikation oder Division der „Basiskonstanten“ mit einem Vorfaktor gebildet werden. Der jeweilige Vorfaktor ergibt sich aus den festgelegten Zahlenwerten der beteiligten Basiskonstanten. Natürlich können weiterhin alle Einheiten auch aus den Basiseinheiten gebildet werden, aber die dahinterstehenden Basiskonstanten sind die tatsächlichen Bezugspunkte.



Erläuterung Bild 2

CGPM: General Conference on Weights and Measures (Conférence Générale des Poids et Mesures)  
 CIPM: International Committee of Weights and Measures (Comité international des poids et mesures)  
 BIPM: International Bureau of Weights and Measures (Bureau International des Poids et Mesures)  
 CCs: Consultative Committees of the CIPM  
 DCMAS: Network on Metrology, Accreditation and Standardization for Developing Countries  
 JCGM: Joint Committee for Guides in Metrology  
 JCRB: Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM  
 JCTLM: Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine

1. Das Internationale Büro für Maß und Gewicht BIPM (franz. *Bureau international des poids et mesures*) ist das internationale Zentrum für Maßeinheiten und befindet sich in Sèvres bei Paris.
2. Die Generalkonferenz für Maß und Gewicht CGPM (franz. *Conférence générale des poids et mesures*), bei der sich Delegierte aller Unterzeichnerstaaten im Abstand von vier bis sechs Jahren im BIPM treffen, ist das oberste Gremium der Meterkonvention.
3. Das Internationale Komitee für Maß und Gewicht CIPM (franz. *Comité international des poids et mesures*) ist ein Verwaltungskomitee, dem das BIPM unterstellt ist und das jährlich im BIPM tagt.

### Messen mit Naturkonstanten

Das Motto der Meterkonvention lautet: „*A tous les temps, à tous les peuples*“, also: „Für alle Zeiten, für alle Völker“. Diesem Leitsatz wurde das metrische System ursprünglich nicht gerecht, da es zur Definition der grundlegenden Maßeinheiten Meter, Kilogramm und Sekunde auf die Größe und die Rotationsperiode der Erde zurückgriff,

die sich stetig verändern. Doch schon 1870 regte der schottische Physiker James Clerk Maxwell (1831–1879) [3] an, zur Definition der Maßeinheiten für Länge, Zeit und Masse die unveränderlichen Eigenschaften der Atome heran-

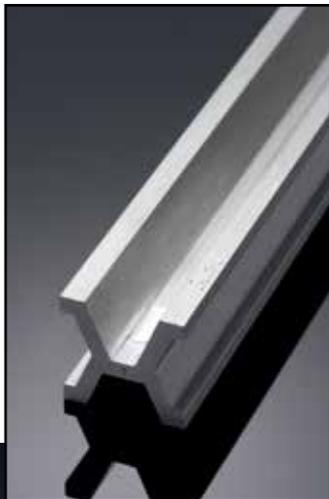
zuziehen. Dazu gehören die Wellenlänge und die Frequenz einer bestimmten Emissionslinie eines Atoms sowie seine Masse.

Diese Idee wurde aufgegriffen, als man sich 1960 vom „Urmeter“, einer Platin-Iridium-Stange mit speziellem Querschnitt, verabschiedete und den Meter definierte als das 1 650 763,73-fache der Wellenlänge der Strahlung, die im Vakuum einem bestimmten Übergang von Atomen des Nuklids Krypton-86 entspricht. In ähnlicher Weise definierte man 1967 die Sekunde als das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cäsium-133 entspricht.

Da das Produkt aus der Frequenz und der Wellenlänge einer monochromatischen elektromagnetischen Welle im Vakuum gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist, sind diese Definitionen des Meters und der Sekunde nicht unabhängig voneinander sondern durch die Naturkonstante  $c$  verbunden. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  bestimmte man, indem man die Zeitspanne maß, die das Licht benötigt, um eine Referenzstrecke zu durchlaufen. Die beschränkte Genauigkeit, mit der man die Referenzstrecke messen konnte, legte jedoch fest, wie genau sich  $c$  bestimmen ließ. Deshalb hat man 1983 das Verfahren umgedreht: Man hat die Lichtgeschwindigkeit auf 299 792 458 m/s festlegt, den besten gemessenen Wert, und man bestimmt die Länge einer Strecke anhand der gemessenen Zeitspanne, die das Licht zum Durchlaufen der Strecke benötigt.

Ist es möglich, Maßeinheiten auch direkt auf Naturkonstanten zurückzuführen? Dieser Frage ging der irische Physiker George Johnstone Stoney (1826–1911) [4] nach, der ein Zeitgenosse Maxwells war. Er erdachte 1874 ein Einheitensystem, das er auf drei Naturkonstanten aufbaute: der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , der Gravitationskonstante  $G$  und der Elementarladung  $e$ . Daraus gewann er die Längeneinheit  $G^{1/2}e/c^2 \approx 10^{-37}$  m, die Zeit-

Bild 4:  
Eine der nationalen Kopien des Urmeters; der Meter-Prototyp #23 wird als Museumsstück in einem Safe der PTB aufbewahrt



einheit  $G^{1/2}e/c^3 \approx 10^{-46}$  s und die Masseneinheit  $e/G^{1/2} \approx 10^{-7}$  g. Offenbar sind Stoneys Längen- und Zeiteinheit viel zu klein, als dass man sie praktisch nutzen könnte.

Eine ähnliche Idee hatte Max Planck [5], nachdem er 1900 das nach ihm benannte Strahlungsgesetz entdeckt hatte, in dem zwei neue Naturkonstanten auftraten: die Planck-Konstante  $h$  und die Boltzmann-Konstante  $k_B$ . Planck gründete sein Einheitensystem auf die vier Konstanten  $c$ ,  $G$ ,  $h$  und  $k_B$ . Daraus erhielt er u. a. die Längeneinheit  $(Gh/c^3)^{1/2} \approx 10^{-35}$  m, die Zeiteinheit  $(Gh/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43}$  s und die Masseneinheit  $(hc/G)^{1/2} \approx 10^{-5}$  g. Die Planck-Länge und die Planck-Zeit sind ebenfalls viel zu klein für eine praktische Nutzung.

Sowohl Plancks als auch Stoneys „natürliche“ Einheiten haben jedoch zwei wesentliche Vorzüge. Zum einen sind sie unveränderlich, soweit die Naturkonstanten wirklich konstant sind. Zum anderen sind sie universell gültig, d. h. auch eine mögliche außerirdische Zivilisation mit hinreichenden physikalischen Kenntnissen könnte sie in derselben Weise definieren.

Dass man indes auch sehr gut reproduzierbare Normale mit großer praktischer Bedeutung direkt auf fundamentale Naturkonstanten zurückführen kann, zeigt sich beim Quanten-Hall-Effekt und beim Josephson-Effekt. Sie sind beide elektronische Quanteneffekte, sodass in ihnen die Elementarladung  $e$  und die Planck-Konstante  $h$  eine Rolle spielen.

Mit dem Quanten-Hall-Effekt, für dessen Entdeckung der deutsche Physiker Klaus von Klitzing 1985 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurde, kann man elektrische Widerstände höchst genau messen. Diesen Effekt beobachtet man in dünnen, stromdurchflossenen Halbleiterschichten, die einem starken Magnetfeld ausgesetzt sind. Dabei tritt senkrecht zur Stromrichtung eine Spannung auf, deren Verhältnis zur Stromstärke man als Hall-Widerstand  $R_H$  bezeichnet. Dieser Widerstand kann nur bestimmte, quantisierte Werte annehmen:  $R_H = R_K/m$ , mit ganzzahligem  $m$  und der von-Klitzing-Konstante  $R_K = h/e^2$ , die 1990 auf den damals besten Messwert  $R_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega$  festgelegt wurde. Durch Vergleich mit diesem Normal kann man elektrische Widerstände messen. Auf diese Weise lässt sich die Einheit Ohm ( $\Omega$ ) direkt auf Naturkonstanten zurückführen.

Mithilfe des Josephson-Effekts, für dessen Vorhersage der britische Physiker Brian Josephson 1973 den Physik-Nobelpreis bekam, lassen sich elektrische Spannungen genau definierter Größe erzeugen. Die dazu benutzten Josephson-Kontakte sind Bauteile aus zwei Supraleitern, die durch eine dünne normalleitende Schicht voneinander getrennt sind. Strahlt man eine Mikrowelle der

Frequenz  $f$  auf solch einen Kontakt ein, so fließt in ihm ein Gleichstrom, der zu einer elektrischen Spannung  $U$  zwischen den beiden Enden des Kontaktes führt. Dabei gilt:  $U = n f / K_J$ , mit ganzzahligem  $n$  und der Josephson-Konstanten  $K_J = 2e/h$ . Diese Konstante hat man 1990 auf den damals besten Messwert  $K_{J-90} = 483\,597,9 \text{ GHz V}^{-1}$  festgelegt. So kann man die Einheit Volt (V) über eine Frequenzmessung auf die Cäsium-Frequenz zurückführen.

Die exakte Festlegung der von-Klitzing-Konstanten und der Josephson-Konstanten auf die 1990 gemessenen Werte  $R_{K-90}$  bzw.  $K_{J-90}$  hat zur Folge, dass dann auch die Naturkonstanten  $h$  und  $e$  festgelegt sind. Doch im gegenwärtig gültigen SI sind diese Naturkonstanten lediglich Messgrößen, deren beste Messwerte sich seit 1990 verändert haben. Deshalb muss man unterscheiden zwischen den festgelegten Konstanten  $R_{K-90}$  und  $K_{J-90}$  einerseits, die außerhalb des jetzigen SI stehen, und den von  $h$  und  $e$  abhängigen Größen  $R_K$  und  $K_J$ .

### Stärken und Schwächen des alten SI

Das noch gültige, alte SI ist bei den Definitionen der Sekunde und des Meters auf der Höhe der Zeit, sodass für diese Basiseinheiten vorerst keine Revision ansteht. Demnach ist die Sekunde die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungsperioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinniveaus des Grundzustands eines ruhenden Cäsium-133-Atoms entspricht, während der Meter die Länge des Weges ist, den das Licht im Vakuum in einem Zeitintervall von  $1/299\,792\,458$  einer Sekunde zurücklegt. Neben dem Meter



Bild 5: Sicher verwahrt: Die PTB besitzt mehrere kg-Prototypen, so die beiden Stücke, die an die Bundesrepublik Deutschland (#52, obere Ebene im Safe) und die DDR (#55, Mitte links) Anfang der 1950er Jahre ausgegeben wurden, sowie einen weiteren Prototypen (#70, Mitte rechts), den die Bundesrepublik 1987 erworben hat. Das Kilogramm mit der Nummer 22 (untere Ebene im Safe) stammt aus dem Jahr 1889, wurde im Krieg beschädigt und ist kein offizieller Prototyp mehr.

SI International  
System of Units

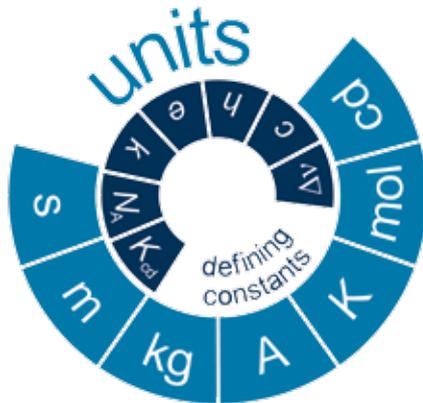


Bild 6:  
Im neuen Einheiten-  
system bestimmen  
die Werte ausge-  
wählter Konstanten  
alle Einheiten –  
sowohl die jetzigen  
Basiseinheiten als  
auch die abgeleite-  
ten Einheiten.

und der  
Sekunde  
wird auch die  
Candela, die Einheit  
der Lichtstärke, ihre jetzige definitorische Basis im  
neuen SI behalten. Bis auf Formulierungsanpas-  
sungen werden diese drei Basiseinheiten letztlich  
unverändert übernommen.

Doch bei den Einheiten Kilogramm, Mol, Kelvin  
und Ampere gibt es Bedarf für eine Neudefinition,  
da die bisherigen SI-Definitionen erhebliche  
Mängel aufweisen. So ist das Kilogramm, die  
Einheit der Masse, gleich der Masse des internati-  
onalen Kilogrammprototyps, eines Zylinders aus  
einer Platin-Iridium-Legierung. Dieses „Ur kilo-  
gramm“ wird seit 1889 in einem Safe beim Interna-  
tionalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in  
Sèvres bei Paris aufbewahrt. Doch das „Ur kilo-  
gramm“ wird, verglichen mit den meisten offiziell-  
en Kopien und Massennormalen, immer leichter.  
Messungen ergaben, dass es zwischen 1950 und  
1990 um etwa 50 Mikrogramm abgenommen  
hatte. Der Grund dafür sind vermutlich Alterungs-  
prozesse oder Masseverluste beim Reinigen des  
Zylinders.

Die Einheit des elektrischen Stroms, das  
Ampere, wird durch eine idealisierte und wirklich-  
keitsferne Messvorschrift definiert. Demnach ist  
das Ampere die Stärke eines konstanten elektri-  
schen Stroms, der, durch zwei parallele, geradli-  
nige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand  
von einem Meter angeordnete Leiter von vernach-  
lässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt  
fließend, zwischen je einem Meter Leiterlänge die  
Kraft  $2 \cdot 10^{-7}$  Newton hervorrufen würde. Abgese-  
hen davon, dass man solch eine Messanordnung  
nur näherungsweise verwirklichen kann, hat diese  
Definition den entscheidenden Nachteil, dass sie  
das Ampere über die Kraft mit dem Kilogramm  
verknüpft.

Die Temperatureinheit, das Kelvin, ist definiert  
als das  $1/273,16$  der absoluten Temperatur des  
Tripelpunkts von Wasser, bei dem Dampf, Flüssig-  
keit und Eis im Gleichgewicht sind. Doch dieser

Tripelpunkt wird von Verunreinigungen und von  
der Isotopenzusammensetzung des Wassers beein-  
flusst. Da die Temperatur keine additive Größe  
ist, sind zusätzliche Definitionen dafür nötig, die  
Temperaturskala über den Tripelpunkt des Wassers  
hinaus auszudehnen. Das neue SI beseitigt diese  
Schwachstellen des alten SI, die vor allem mit den  
problematischen Definitionen von Kilogramm,  
Ampere und Kelvin zusammenhängen.

## Die sieben Konstanten des neuen SI

Den Beschlüssen der Generalkonferenz für Maß  
und Gewicht zufolge soll das SI im Jahr 2018 einer  
grundlegenden Änderung unterzogen werden.  
Dazu sollen die Zahlenwerte von sieben einhei-  
tenbehafteten Konstanten, den „definierenden  
Konstanten“, exakt festgelegt werden. Auf diese  
Weise werden die sieben Basiseinheiten (s, m, kg,  
A, K, cd, mol) nicht mehr direkt sondern indirekt  
definiert. Das lässt sich anschaulich am Beispiel  
der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und des Meters erläu-  
tern. Nachdem die Sekunde über die Frequenz  
des Hyperfeinstrukturübergangs von Cäsium-133  
definiert wird, legt man die Lichtgeschwindigkeit  
jetzt exakt fest:  $c = 299\,792\,458$  m/s. Dann ist  
ein Meter die Länge der Strecke, die das Licht in  
 $1/299\,792\,458$  s zurücklegt. Damit ist die Verein-  
barkeit mit der bisherigen zufriedenstellenden  
Meterdefinition gewährleistet.

Das neue SI wird durch verbindliche Festlegung  
der folgenden sieben Konstanten definiert:

- Die Frequenz  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  des Hyperfeinstruk-  
turübergangs des Grundzustands des Cäsium-  
atoms ist genau  $9\,192\,631\,770$  Hertz (Hz).
- Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c$  ist  
genau  $299\,792\,458$  m s<sup>-1</sup>.
- Die Planck-Konstante  $h$  ist genau  
 $6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34}$  Joulesekunde (Js).
- Die Elementarladung  $e$  ist genau  
 $1,602\,176\,620\,8 \cdot 10^{-19}$  Coulomb (C).
- Die Boltzmann-Konstante  $k_{\text{B}}$  ist genau  
 $1,380\,648\,52 \cdot 10^{-23}$  Joule pro Kelvin (J K<sup>-1</sup>).
- Die Avogadro-Konstante  $N_{\text{A}}$  ist genau  
 $6,022\,140\,857 \cdot 10^{23}$  pro Mol (mol<sup>-1</sup>).
- Das photometrische Strahlungsäquivalent  $K_{\text{cd}}$   
einer monochromatischen Strahlung der Fre-  
quenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hz ist genau  $683$  Lumen pro  
Watt (lm W<sup>-1</sup>).

Die angegebenen Zahlenwerte können sich noch  
ändern, falls es bis zum Zeitpunkt der Festlegung  
verbesserte experimentelle Ergebnisse gibt, die dies  
erforderlich machen. Auf diese Weise will man  
erreichen, dass es beim Übergang vom alten SI auf

das neue SI möglichst keine künstlichen Sprünge bei den Messwerten gibt. Indem man die sieben definierenden Konstanten bei Nennung der verwendeten Einheiten  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ , m, J, C, K, mol, lm und  $\text{W} = \text{J s}^{-1}$  exakt festlegt, werden auch diese Einheiten festgelegt und mit ihnen alle weiteren SI-Einheiten wie das Kilogramm ( $\text{kg} = \text{J m}^{-2} \text{s}^2$ ) oder das Ampere ( $\text{A} = \text{Cs}^{-1}$ ).

Als definierende Konstanten wurden solche Größen gewählt, die sich im bisherigen SI sehr genau messen lassen und eine möglichst geringe relative Messunsicherheit haben, die im Bereich von  $10^{-8}$  liegen sollte. Die Gravitationskonstante findet sich deshalb nicht unter ihnen, da sie nur mit einer relativen Unsicherheit von  $10^{-4}$  bekannt ist. Dadurch unterscheidet sich das neue SI grundlegend von den Einheitensystemen Stoneys und Plancks.

Am genauesten lassen sich Frequenzen messen, sodass man die Definition der Sekunde über die Cäsium-Frequenz beibehalten hat. Zwar ist diese Frequenz keine fundamentale Naturkonstante sondern ein atomarer Parameter, der von äußeren Störungen wie elektrischen und magnetischen Feldern beeinflusst wird. Da man diese Störungen aber gut kontrollieren kann, lässt sich die Cäsium-Frequenz sehr genau reproduzieren, sodass die systematische Unsicherheit heutiger Cäsiumuhren bei  $10^{-16}$  liegt. Optische Atomuhren weisen sogar Stabilitäten von  $10^{-18}$  auf. Doch bisher hat sich noch keiner der entwickelten optischen Frequenzstandards gegenüber den anderen als eindeutig überlegen erwiesen, sodass bis 2018 keine Neudefinition der Sekunde geplant ist.

Die nächsten drei definierenden Konstanten sind tatsächlich fundamentale Naturkonstanten, die sich nicht auf andere Größen zurückführen lassen: die Lichtgeschwindigkeit  $c$ , die Planck-Konstante  $h$  und die Elementarladung  $e$ . Nachdem die Lichtgeschwindigkeit mit einer relativen Unsicherheit von  $10^{-9}$  gemessen wurde, hat man sie schon 1983 auf den Wert festgelegt, der auch dem neuen SI zugrunde liegt. Da die von-Klitzing-Konstante  $R_K = h/e^2$  und die Josephson-Konstante  $K_J = 2e/h$  mit einer relativen Unsicherheit von  $10^{-10}$  bzw.  $10^{-8}$  bekannt sind, ist die Unsicherheit von  $h$  und  $e$  entsprechend klein, sodass man auch diese beiden zu definierenden Konstanten gemacht hat.

Die verbleibenden drei Konstanten sind eigentlich Umrechnungsfaktoren. Die Boltzmann-Konstante  $k_B$  ermöglicht die Umrechnung zwischen der Temperatureinheit Kelvin und der Energieeinheit Joule, wobei der Zahlenwert von  $k_B$  durch die historisch bedingte Wahl der Temperaturskala gegeben ist. Die Avogadro-Konstante  $N_A$  legt die Zahl der Partikel fest, die die Stoffmenge 1 Mol enthalten soll. Das photometrische Strahlungsäquivalent  $K_{\text{cd}}$  ermöglicht die Umrechnung

der in Watt angegebenen Leistung einer grünen monochromatischen Strahlungsquelle von 555 nm Wellenlänge in einen Lichtstrom, gemessen in Lumen (lm), der ein Maß ist für das insgesamt in alle Raumrichtungen abgestrahlte Licht. Der Anschluss an die Basiseinheit Candela (cd) erfolgt dadurch, dass eine Strahlungsquelle, die einen Lichtstrom von  $4\pi$  lm erzeugt, pro Raumwinkeleinheit (Steradian) eine Lichtstärke von  $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/Steradian}$  hat.

Offenbar sind diese drei Basiseinheiten, die durch Umrechnungsfaktoren definiert werden, ein Zugeständnis des neuen SI an praktische Erfordernisse der Industrie, der Technik und der Forschung. So dient die Candela als Bezugseinheit für die Beleuchtungsindustrie. Ebenso gut könnte man die Temperatur auch durch die mittlere Teilchenenergie in Joule, die Stoffmenge durch die Zahl der Teilchen und die Lichtstärke durch die Strahlungsleistung pro Raumwinkeleinheit ausdrücken. Doch dies hieße, sich von gewohnten Maßeinheiten zu verabschieden.

### Die sieben Basiseinheiten im neuen SI

Mit der Festlegung der sieben definierenden Konstanten erfolgt die Definition der sieben Basiseinheiten. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick, wie die Basiseinheiten definiert sind und wie sie aus den Konstanten berechnet werden können [6, 7]. Die Diagramme zeigen, von welchen Konstanten die Basiseinheiten jeweils abhängen.

Nachdem die sieben Basiseinheiten durch Festlegung der Konstanten definiert sind, können auch alle anderen „abgeleiteten“ Einheiten durch Bezug auf diese Konstanten dargestellt werden. Bei einigen Einheiten ist dazu nicht einmal der „Umweg“ über eine Basiseinheit nötig, vielmehr können sie direkt auf eine oder mehrere der festgelegten Konstanten bezogen werden.

Dies gilt z. B. für das Volt, die Einheit der elektrischen Spannung. Es kann über den Josephson-Effekt auf die Cäsium-Frequenz  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  und die Josephson-Konstante  $K_J = 2e/h$  bezogen werden, die wiederum eine Kombination aus Elementarladung  $e$  und Planck-Konstante  $h$  ist. Ähnliches gilt für das Ohm, die Einheit des elektrischen Widerstandes, das über den Quanten-Hall-Effekt auf die von-Klitzing-Konstante  $R_K = h/e^2$  bezogen werden kann, die ebenfalls eine Kombination aus  $e$  und  $h$  ist. Ebenso kann die Einheit der Energie, das Joule, direkt auf  $h$  und  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  bezogen werden, ohne dabei einen „Umweg“ über die Definition der Masseneinheit kg machen zu müssen.

Nur die Basiseinheiten Sekunde und Mol stehen in einem direkten Bezug zu einer einzelnen definierenden Konstante. Alle anderen Basiseinheiten werden durch zwei (m, A), drei (kg, K) oder sogar

Einheit	Definition	Umrechnung	Diagramm
Sekunde (s)	Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids <sup>133</sup> Cs entspricht.	$s = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu_{Cs}$	
Meter (m)	Der Meter ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft.	$m = (c / 299\,792\,458) s$ $= 30,663\,318... c / \Delta\nu_{Cs}$	
Kilogramm (kg)	Das Kilogramm wird dadurch definiert, dass die Planck-Konstante $h = 6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ , mit $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ , wobei m und s durch c und $\Delta\nu_{Cs}$ definiert sind.	$kg = (h / 6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34}) \text{ m}^{-2} \text{ s}$ $= 1,475\,521... \cdot 10^{40} h \Delta\nu_{Cs} / c^2$	
Ampere (A)	Das Ampere wird dadurch definiert, dass die Elementarladung $e = 1,602\,176\,620\,8 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , mit $C = \text{A s}$ , wobei s durch $\Delta\nu_{Cs}$ definiert ist.	$A = e / (1,602\,176\,620\,8 \cdot 10^{-19}) \text{ s}^{-1}$ $= 6,789\,687... \cdot 10^8 \Delta\nu_{Cs} e$	
Kelvin (K)	Das Kelvin wird dadurch definiert, dass die Boltzmann-Konstante $k_B = 1,380\,648\,52 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ , mit $\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , wobei kg, m und s durch h, c und $\Delta\nu_{Cs}$ definiert sind.	$K = (1,380\,648\,52 \cdot 10^{-23} / k_B) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ $= 2,266\,665 \Delta\nu_{Cs} h / k_B$	
Mol (mol)	Das Mol ist die Einheit der Stoffmenge eines Systems, das aus spezifischen Einzelteilchen wie Atomen, Molekülen, Ionen oder Elektronen bestehen kann. Es ist dadurch definiert, dass die Avogadro-Konstante $N_A = 6,022\,140\,857 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .	$\text{mol} = 6,022\,140\,857 \cdot 10^{23} / N_A$	
Candela (cd)	Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ Watt je Raumwinkeleinheit beträgt.	Für Licht mit einer Frequenz von $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ gilt: $\text{cd} = (K_{cd} / 683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$ $= 2,614\,830 \cdot 10^{10} \Delta\nu_{Cs} h \cdot K_{cd}$ mit $K_{cd} = 683 \text{ lm W}^{-1}$	

vier (cd) Konstanten definiert. Damit fällt der im alten SI gegebene Unterschied zwischen Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten im neuen SI fort. So ist die bisher abgeleitete Einheit Coulomb ( $C = A \cdot s$ ) künftig direkt durch eine Naturkonstante definiert:  $C = 1/(1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19}) e$  und somit unmittelbar festgelegt als die Basiseinheit Ampere:

$$A = e/(1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19}) \cdot \Delta\nu_{Cs}/9\,192\,631\,770 = 6,789\,68711\dots \cdot 10^8 \Delta\nu_{Cs} e.$$

## Realisierung der Einheiten kg, mol, A und K

Die Basiseinheiten des neuen SI sind mithilfe der definierenden Konstanten „verankert“ und somit verbindlich festgelegt. Damit ist aber noch nicht geklärt, wie man diese Einheiten „realisiert“, d. h. wie man sie „weitergibt“, um Kalibrierungen durchzuführen und die entsprechenden physikalischen Größen in diesen Einheiten tatsächlich zu messen. Für die Basiseinheiten Sekunde und Meter sowie für die abgeleiteten Einheiten Ohm und Volt gibt es hochpräzise Messverfahren – mithilfe der Cäsium-Atomuhr, der Lichtausbreitung, des Quanten-Hall-Effekts bzw. des Josephson-Effekts, die sie direkt auf die (Natur-)Konstanten  $\Delta\nu_{Cs}$ ,  $c$ ,  $h$  und  $e$  zurückführen. Doch für das Kilogramm, das Mol, das Ampere und das Kelvin mussten Messverfahren von vergleichbarer Präzision erst entwickelt werden.

Zur Realisierung des Kilogramms gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Methoden, sodass eine gegenseitige Kontrolle möglich wird: die „Siliziumkugel“ und die „Watt-Waage“. Die an der PTB in Braunschweig hergestellte Siliziumkugel, die zeitgemäße Form des Urkilogramms, besteht aus einem nahezu perfekt kugelförmig geschliffenen Siliziumeinkristall von etwa 9,4 cm Durchmesser und rund 1 kg Masse. Der Kristall aus hochangereichertem  $^{28}\text{Si}$  ist fast fehlerlos und frei von Fremdatomen. Das Element Silizium wurde vor allem deswegen gewählt, weil die Halbleiterindustrie jahrzehntelange Erfahrung mit der Fertigung von nahezu fehlerfreien Siliziumkristallen hat. Nachdem man den Gitterparameter des Einkristalls und somit die Abstände der Atome mittels Röntgenstrahlbeugung sehr genau vermessen und auch das Kugelvolumen über Messungen im Kugelinterferometer hinreichend genau ermittelt hatte, konnte man die Zahl der in der Kugel enthaltenen Atome ebenfalls sehr genau angeben.

Damit lässt sich die makroskopische Masse der Siliziumkugel, die durch einen Vergleich mit dem Urkilogramm gemessen werden kann, auf atomare Massen und Naturkonstanten wie die Planck-Konstante  $h$  zurückführen. Dadurch wurde es einerseits möglich, die Avogadro-Konstante  $N_A$ , also die Zahl der in einem Mol enthaltenen Atome

zu bestimmen und damit das Mol zu realisieren. Andererseits konnte anhand der Siliziumkugel die Planck-Konstante mit einer relativen Messunsicherheit von  $2 \cdot 10^{-8}$  bestimmt werden.

Da das neue SI den Zahlenwert von  $h$  in der Einheit Joulesekunde verbindlich festlegt, könnte man nun überall dort, wo die technischen Voraussetzungen erfüllt sind, eine Siliziumkugel mit definierter Masse herstellen. Tatsächlich soll dieses neue Massennormal auf andere Weise verbreitet werden, indem nämlich die PTB die von ihr hergestellten Kopien der Siliziumkugel den internationalen Partnern übergibt.

Auch mit der „Watt-Waage“, die man u. a. am *National Institute of Standards and Technology* in den USA aufbaut, lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Kilogramm und der Planck-Konstante herstellen. Dazu wird die Gewichtskraft einer Masse durch die magnetische Kraft kompensiert, die auf eine stromdurchflossene Spule in einem inhomogenen Magnetfeld wirkt. Die magnetische Kraft berechnet man aus der Stromstärke und der Feldinhomogenität. Die Stromstärke wiederum bestimmt man aus dem elektrischen Widerstand der Spule und der anliegenden Spannung, die man sehr genau mithilfe des Quanten-Hall-Effekts und des Josephson-Effekts messen kann.

Die Inhomogenität des Magnetfeldes der Watt-Waage lässt sich dadurch ermitteln, dass man die Spule mit konstanter Geschwindigkeit durch das Magnetfeld bewegt. Die dabei in der Spule induzierte Spannung, die ein Maß für die Feldinhomogenität ist, misst man wieder mit dem Josephson-Effekt. Schließlich muss man noch die Schwerebeschleunigung messen. Da die gemessenen Spannungen und der Widerstand proportional zur Josephson- bzw. zur von-Klitzing-Konstante sind, die die Elementarladung  $e$  und die Planck-Konstante  $h$  enthalten, ergibt sich ein Zusammenhang zwischen  $h$  und der Masse in der Watt-Waage. Verwendet man als Masse eine Kopie des Urkilogramms, so kann man damit direkt die Planck-Konstante  $h$  bestimmen. Legt man den Wert von  $h$  hingegen fest, so lässt sich mithilfe der Watt-Waage das Kilogramm realisieren.

Die Messungen der Planck-Konstante mithilfe der Siliziumkugel und mit der Watt-Waage erreichen inzwischen beide eine relative Unsicherheit von etwa  $2 \cdot 10^{-8}$ . Im Rahmen dieser Unsicherheit stimmen die beiden für  $h$  gemessenen Werte überein. Sie weichen jedoch erheblich von dem Wert  $h_{90} = 4/(R_{K-90} K_{J-90}^2)$  ab, der sich aus den 1990 festgelegten Werten der von-Klitzing-Konstante  $R_{K-90}$  und der Josephson-Konstante  $K_{J-90}$  ergibt. Die beiden Konstanten  $R_{K-90}$  und  $K_{J-90}$  liegen somit außerhalb des neuen SI. Da der Aufbau und die Experimente mit der Watt-Waage sehr kompliziert sind, wird man bei der praktischen Realisierung des Kilogramms wohl der Siliziumkugel

den Vorzug geben, deren Herstellung zwar sehr aufwändig, deren Verwendung als Massennormal hingegen unproblematisch ist. Die Siliziumkugel ist inzwischen als neues Massennormal einsatzbereit und kann im Herbst 2018 das Urkilogramm ablösen [7–10].

Im alten SI wird das Ampere, die Einheit des elektrischen Stroms, durch eine idealisierte Messvorschrift definiert, die nur näherungsweise realisiert werden kann und deswegen unbefriedigend ist. Hingegen gibt es im neuen SI zwei miteinander kompatible Verfahren, das Ampere mit hoher Genauigkeit darzustellen. Das eine Verfahren beruht auf dem Ohmschen Gesetz  $U = R \cdot I$ , das einen Zusammenhang zwischen der an einen Widerstand  $R$  anliegenden Spannung  $U$  und dem fließenden Strom  $I$  herstellt. Somit lässt sich der Strom  $I$  bestimmen, indem man den Widerstand  $R$  mit dem Quanten-Hall-Effekt und die Spannung  $U$  mit dem Josephson-Effekt misst.

Das zweite Verfahren geht direkter vor und beruht darauf, dass im neuen SI das Ampere auf die definierenden Konstanten Elementarladung  $e$  und Cäsium-Frequenz  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  zurückgeführt wird. Dabei wird das Ampere mit einer elektronischen Schaltung realisiert, die den elektrischen Strom misst, indem sie die Elektronen zählt, die in einem Zeitintervall die Schaltung passieren. Solch eine Schaltung besteht aus mehreren hintereinanderliegenden nanostrukturierten „Einzelelektronenpumpen“, die die Elektronen einzeln nach einem vorgegebenen Takt mit GHz-Frequenz transportieren. Dabei erreicht man inzwischen

Stromstärken im Nanoamperebereich. Zwischen diesen Elektronenpumpen sitzen spezielle Einzelelektronentransistoren, mit denen überprüft wird, ob bei jedem Takt tatsächlich genau ein Elektron weitergereicht wurde. Mit vier hintereinandergeschalteten Elektronenpumpen und drei Einzelelektronendetektoren ist es gelungen, unvermeidlich auftretende Fehler sicher zu erkennen, sodass ein Elektronenstrom mit einer relativen Unsicherheit von wenigen  $10^{-8}$  erreicht wurde.

Beide Verfahren zusammen gestatten es, die Konsistenz der Definitionen von Volt, Ohm und Ampere zu überprüfen. Während beim ersten Verfahren das Volt und das Ohm mittels der Josephson-Konstante bzw. der von-Klitzing-Konstante realisiert werden, realisiert das zweite Verfahren das Ampere durch Zählung einzelner Ladungen  $Q = e$ . Daraus ergibt sich das Ohmsche Gesetz auf Quantenbasis:  $K_J R_K Q = (2e/h)(h/e^2)e = 2$ . Dieses „quantenmetrologische Dreieck“ hat man mit einer Unsicherheit von  $9 \cdot 10^{-7}$  experimentell bestätigt.

Zur Realisierung des Kelvin, der Einheit der Temperatur, bestimmt man die Boltzmann-Konstante mit zwei grundsätzlich verschiedenen Messmethoden, wobei eine relative Unsicherheit von etwa  $10^{-6}$  erreicht werden sollte. Bei der akustischen Gasthermometrie misst man die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit in einem Gas, die proportional zu  $(k_B T)^{1/2}$  ist. Die dabei erreichte relative Unsicherheit für  $k_B$  beträgt etwa  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Als Alternative dazu verfolgt man an der PTB die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie, indem man bei konstanter Temperatur die druckabhängige Dichte von Helium anhand seiner Dielektrizitätskonstanten bestimmt. Dazu misst man, wie das Gas die Kapazität eines speziellen Kondensators verändert. Aus dem Druck und der Dichte des Gases kann man anhand der thermischen Zustandsgleichung  $k_B T$  ermitteln [11]. Auf diese Weise hat man am Tripelpunkt des Wassers  $k_B$  mit einer relativen Unsicherheit von zzt.  $4 \cdot 10^{-6}$  bestimmt. Die Forscher in der PTB sind sich sicher, bis zur Neudefinition der Einheiten die erforderliche Unsicherheit von etwa  $2 \cdot 10^{-6}$  zu erzielen

## Ausblick

Im gegenwärtig noch gültigen SI haben zwar bereits einige wenige Konstanten festgelegte Werte (etwa die Lichtgeschwindigkeit sowie die magnetische und die elektrische Feldkonstante). Aber erst im neuen SI wird eine Menge von Naturkonstanten (genauer: ihre festgelegten Werte) einen kohärenten Rahmen für alle Einheiten schaffen. Zur Vorbereitung auf das neue SI werden die definierenden (Natur-)Konstanten so genau wie möglich gemessen. Dabei wird eine relative

Tabelle 1: Relative Unsicherheiten ausgewählter Konstanten im jetzigen und im neuen SI, basierend auf den in CODATA 2014 [12] veröffentlichten Daten

Unsicherheiten der Konstanten/ $10^{-8}$					
Konstante	bisher	neu	Konstante	bisher	neu
$m(K)$	0	1,2	$R$	57	0
$T_{\text{TPW}}$	0	57	$F$	0,62	0
$M(^{12}\text{C})$	0	0,045	$\sigma$	230	0
$\mu_0$	0	0,023	$K_J$	0,62	0
$\varepsilon_0$	0	0,023	$R_K$	0,023	0
$Z_0$	0	0,023	$N_A h$	0,045	0
$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$	0	0	$m_e$	1,2	0,033
$c$	0	0	$m_u$	1,2	0,045
$K_{\text{cd}}$	0	0	$m(^{12}\text{C})$	1,2	0,045
$h$	1,2	0	$\alpha$	0,023	0,023
$e$	0,61	0	$J \leftrightarrow m^{-1}$	1,2	0
$k_B$	57	0	$J \leftrightarrow \text{Hz}$	1,2	0
$N_A$	1,2	0	$J \leftrightarrow \text{K}$	57	0

Messunsicherheit von wenigen  $10^{-8}$  gefordert, die sich erreichen lässt, indem man für die Messungen Quanteneffekte ausnutzt. Dadurch dass man grundsätzlich mehrere unterschiedliche Messverfahren einsetzt und diese miteinander vergleicht (z. B. „Siliziumkugel“ und „Watt-Waage“), verringert man die Gefahr, dass systematische Fehler unentdeckt bleiben.

Das neue SI wird die definierenden Konstanten  $h$ ,  $e$ ,  $k_B$  und  $N_A$  im Jahr 2018 auf die dann besten Messwerte ein für allemal festlegen, sodass sie keine Messunsicherheit mehr haben. Hingegen werden andere, bisher exakt festgelegte Zahlenwerte im neuen SI zu Messgrößen, die mit einer Messunsicherheit behaftet sind. So wird die Masse des Kilogrammprototyps ebenso zu einer Messgröße wie die molare Masse von Kohlenstoff  $M(^{12}\text{C})$  und die Temperatur des Tripelpunkts von Wasser. Auch die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  und, wegen  $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$ , die elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$ , werden dann zu Messgrößen. Deshalb bleibt die Feinstrukturkonstante  $\alpha = e^2/(2 \epsilon_0 c h)$  auch im neuen SI eine Messgröße, mit einer relativen Unsicherheit von  $3,2 \cdot 10^{-10}$ .

Durch Fortschritte in der Messtechnik und neue Messverfahren wird man auch in Zukunft physikalische Größen immer genauer messen können. Da die definierenden Konstanten jedoch verbindlich festgelegt sind, führen genauere Messungen dazu, dass man die Basiseinheiten mit größerer Genauigkeit realisieren kann, ohne dass man die dem neuen SI zu Grunde liegenden Definitionen ändern müsste. So wird man durch die Einführung von optischen Atomuhren anstelle der Cäsiumuhr die Sekunde präziser realisieren können, sodass sich Zeitintervalle genauer messen lassen.

Das neue SI beruht auf universell und zeitlos gültigen Konstanten – und ist dennoch offen für zukünftige Verbesserungen. Damit erfüllt es das einstige Versprechen der Meterkonvention: „Für alle Zeiten, für alle Völker“.

## Literatur

- [1] Bureau international des poids et mesures: „Le Système international d’unités. The International System of Units.“ 8e édition (2006). (9th edition in preparation. Draft dated 11 December 2015: <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/#communication>)
- [2] J. Hoppe-Blank; Vom metrischen System zum Internationalen Einheitensystem: 100 Jahre Meterkonvention, PTB-Bericht PTB-ATWD-5 (1975)
- [3] J. C. Maxwell; The scientific papers. Teil 2 (Hrsg. W. D. Niven), University Press, Cambridge (1890) S. 225
- [4] J. D. Barrow; Das 1×1 des Universums. Neue Erkenntnisse über die Naturkonstanten. Campus Verlag, Frankfurt 2004
- [5] M. Planck; Ann. Physik **1** (1900) 69
- [6] R. Wynands u. E. O. Göbel; Die Zukunft von Kilogramm und Co, Spektrum der Wissenschaft (März 2010) S. 34
- [7] J. Stenger u. J. H. Ullrich; Für alle Zeiten ... und Culturen. Physik Journal **13** (2014) Nr. 11, S. 27
- [8] PTB-Rezept für das neue Kilogramm, PTB-Pressemitteilung (26.03. 2015)\*
- [9] Ein neues Fundament für alle Maße; PTB-Pressemitteilung (26.03. 2015)\*
- [10] Massennormale der PTB für das neue Kilogramm sind einsatzbereit, PTB-Pressemitteilung (23.06. 2016)\*
- [11] Präzisionsmessung der Boltzmann-Konstante, PTB\_News 1.2016, <http://www.ptb.de/cms/presse-aktuelles/zeitschriften-magazine/ptb-news.html> (Letzter Zugriff am 14.07.2016)
- [12] Peter J. Mohr, David B. Newell, Barry N. Taylor; CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014, Preprint at <http://arxiv.org/abs/1507.07956> (Letzter Zugriff am 14.07.2016)

\* Presseinformationen der PTB im Web:  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de) > Presse & Aktuelles > Journalisten > Presseinformationen > Archiv Presseinformationen

# ATEMBERAUBEND.

## Ultrapräzise Positioniersysteme

auch für den Einsatz in Vakuum und Tieftemperatur.



# PI

## MOTION CONTROL

[www.pimicos.com](http://www.pimicos.com)