

# Ein Meilenstein in der Weiterentwicklung des Internationalen Einheitensystems

Die Generalkonferenz für Mass und Gewicht hat am 16. November 2018 eine grundlegende Revision des Internationalen Einheitensystems SI beschlossen. Neu legt ein Satz von sieben Konstanten mit festgelegten Werten das System vollständig fest und bildet die Definitionsgrundlage für die Einheiten. Durch die Revision wird unter anderem nach über hundertjährigem Einsatz das letzte Artefakt im SI, das Urkilogramm, aus dem Dienst entlassen und durch eine auf Naturkonstanten abgestützte Masseinheit ersetzt.

BEAT JECKELMANN

In beinahe allen Bereichen der modernen Gesellschaft, von Wissenschaft und Technologie über industrielle Fertigung und Handel bis zum täglichen Leben wird das Internationale Einheitensystem (SI) verwendet, um die Ergebnisse von Messungen in eindeutiger und vergleichbarer Form auszudrücken. Mit dem Fortschritt in Wissenschaft und Technik hat sich auch das SI weiterentwickeln und den Bedürfnissen der Nutzer anzupassen. Die im November 2018 beschlossene Revision bedeutet einen Meilenstein in der Weiterentwicklung des SI. Dank der Änderung werden Messresultate künftig noch konsistenter, zuverlässiger und genauer und ermöglichen damit neue wissenschaftliche Entdeckungen und Innovationen.

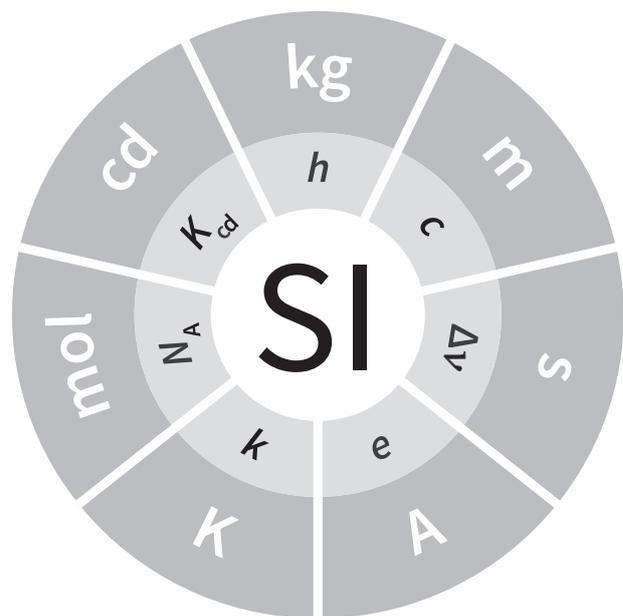
## Was zeichnet ein Einheitensystem aus?

Die Wahl eines Einheitensystems ist nicht ein streng wissenschaftlicher Vorgang. Sie ist von praktischen Erwägungen, der Kenntnis von physikalischen Zusammenhängen, aber auch von historischen Kompatibilitätsbedingungen und Willkür gekennzeichnet. So ist auch das heute weltweit eingeführte SI das Resultat einer langen historischen Entwicklung. Vor allem steigende Ansprüche an die Genauigkeit von Messungen führten immer wieder zu Verbesserungen in den Definitionen der Einheiten [1]. Eine wichtige Randbedingung bei Änderungen ist die Rückwärts-Kompatibilität. Messresultate, wie z.B. die Klimadaten, sollen über lange Zeiträume vergleichbar sein. Dies ist nur möglich, wenn auch die benutzten Einheiten innerhalb der Unsicherheiten zeitlich stabil und vergleichbar sind.

Im SI unterscheidet man Basis- und abgeleitete Einheiten. Die Werte der Basiseinheiten, im Moment sieben an der Zahl, sind willkürlich festgelegt. Die abgeleiteten Einheiten werden entsprechend den algebraischen Beziehungen zwischen den betroffenen Grössen durch Kombinationen von Basiseinheiten definiert.

Die Definitionen der Basiseinheiten, wie sie im Lauf der Zeit verwendet wurden, lassen sich vereinfacht in verschiedene Klassen einteilen:

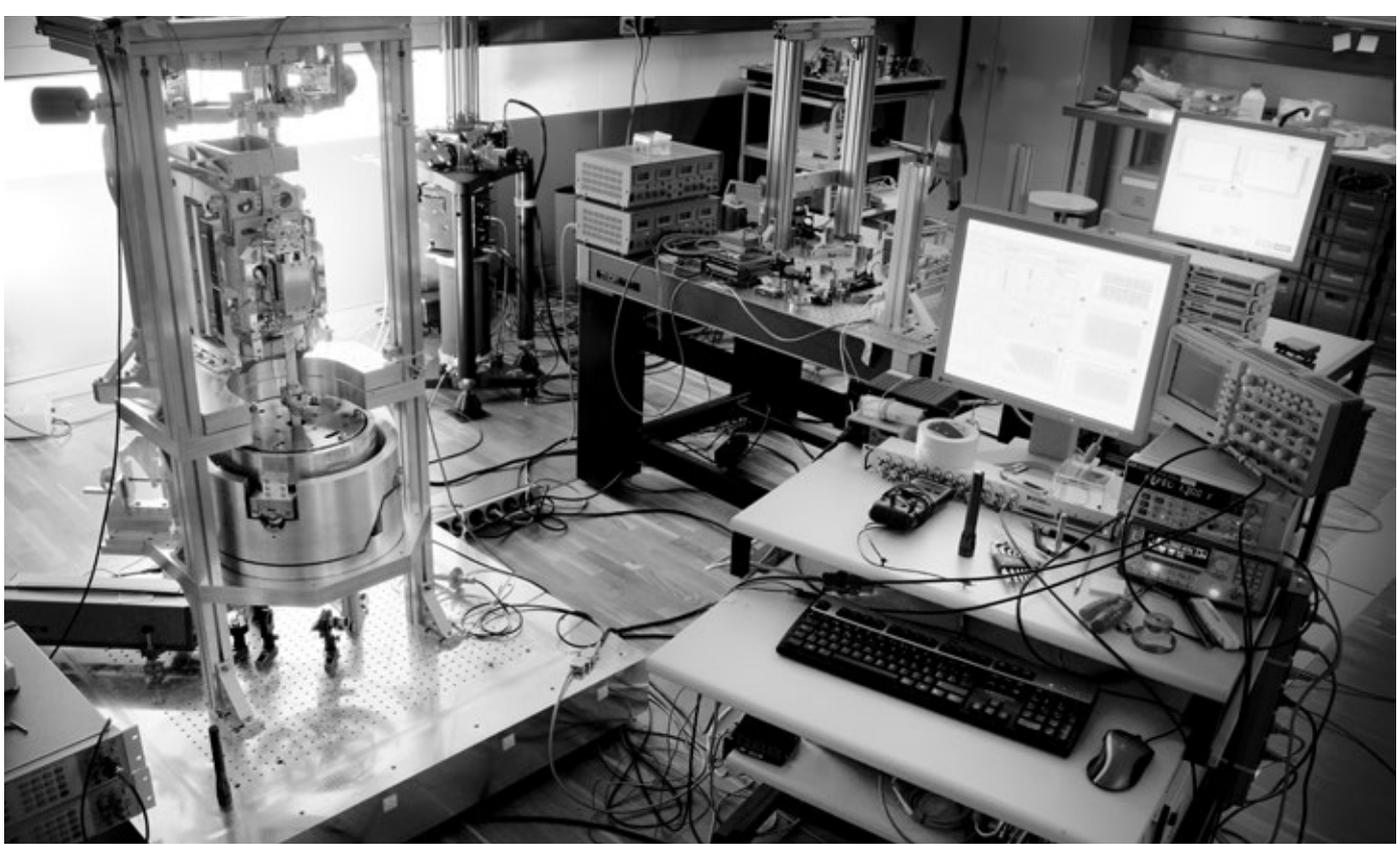
1. Ein geeignetes Artefakt wird als Einheitenrealisierung für die gewünschte Grösse ausgewählt. Bis zur Revision war im SI nur noch das Kilogramm auf diese Weise definiert: Das



1: Das revidierte SI: Der innere Kreis zeigt die 7 definierenden Konstanten. Sie bilden die Bausteine für die Realisierung der Einheiten auf dem äusseren Kreis. Es sind die sieben Basiseinheiten des SI dargestellt. Es können auch alle anderen Einheiten aus Kombinationen der Konstanten abgeleitet werden. Basis- und abgeleitete Einheiten sind gleichwertig.

Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogramm-Prototyps, eines Zylinders aus einer Platin-Iridium-Legierung, der am BIPM in Paris aufbewahrt wird. Diese Definition hat offensichtlich einen lokalen Charakter. Die Einheit ist nur an einem Ort, dem BIPM verfügbar. Die Weitergabe der Einheit geschieht durch Vergleich mit dem Urnormal und die Genauigkeit ist damit durch die Genauigkeit der Vergleichsmethode beschränkt. Da das Urkilogramm ein makroskopischer Körper mit einer instabilen Oberfläche ist, ist die zeitliche Entwicklung der Einheit nicht genau bekannt. Dies ist der grösste Nachteil der Definition.

2. Die Einheitenrealisierung kann auch auf der Basis eines geeigneten physikalischen Zustandes erfolgen. So ist Sekunde über die Periodendauer der Strahlung eines atomaren Übergangs im Cäsiumatom definiert. Für die Realisierung der Temperatureinheit Kelvin stützte man sich vor der Revision auf die Tatsache, dass die thermodynamische Temperatur des Wassers beim Tripelpunkt einen stabilen von Umge-



Die Watt-Waage vergleicht mechanische und elektrische Leistung und kann die Masse mit der Planck-Konstante in Beziehung setzen.

beeinflusst den Wert einnimmt. Der Tripelpunkt ist derjenige Zustand, in dem alle drei Phasen des Wassers fest, flüssig und gasförmig, miteinander im Gleichgewicht sind. Die auf diese Weise abgestützten Einheitenrealisierungen haben einen universellen Charakter. Das heißt, die Einheiten sind überall und zu jeder Zeit realisierbar. Alle Cs-Atome haben dieselben Eigenschaften, die sich in der Zeit nicht ändern. Die Zustände lassen sich jedoch nicht mit genügender Genauigkeit durch eine analytische Modellgleichung beschreiben. Zudem ist die Genauigkeit der Einheitenrealisierung durch die Eigenschaften des gewählten physikalischen Prozesses selbst beschränkt.

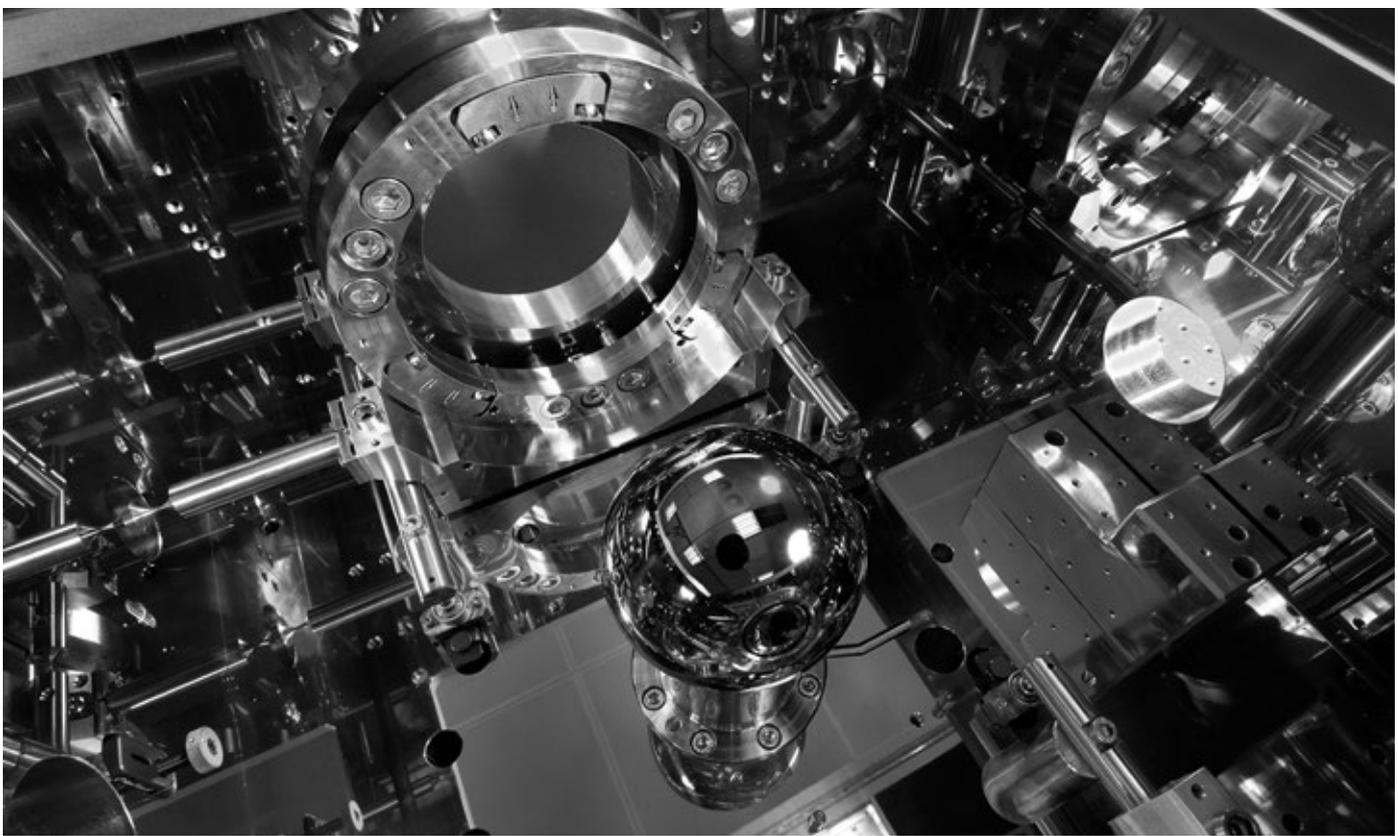
3. Einheiten können schliesslich auch auf Fundamentalkonstanten abgestützt werden. Diese treten auch als Proportionalitätskonstanten bzw. quantitative Verknüpfungspunkte in den physikalischen Theorien auf. Ihr Wert lässt sich nicht beeinflussen und verändert sich weder räumlich noch zeitlich. Konstanten sind somit die «natürlichen» Einheiten und bieten sich in idealer Weise auch als Grundlage für die Festlegung von SI-Einheiten an. Im bisherigen SI sind der Meter und das Ampere Beispiele für diese Einheitenklasse. Die Meterdefinition ordnet der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum einen festen Wert zu. Im Fall der Amperedefinition wird die magnetische Permeabilität des Vakuums festgelegt. Basiseinheiten dieses Typs haben universellen Charakter wie diejenigen des Typs 2. Sie sind jedoch nicht an bestimmte physikalische Zustände gebunden, was eine steige Verbesserung der Realisierung mit dem Fortschritt der Physik erlaubt.

#### Wieso war eine Revision notwendig?

Im bisherigen SI war das Kilogramm die letzte, noch auf einem Artefakt basierte Basiseinheit. Das kg ist dabei definiert als die Masse des Kilogrammprototyps. Kopien dieses Urnormals

werden von vielen nationalen Metrologieinstituten (NMI) auf der ganzen Welt aufbewahrt. Seit 1889 wurden diese Kopien dreimal mit dem internationalen Prototyp verglichen. Eine Reihe von Kopien wurde später produziert und eine Vergleichsmessung mit dem Prototyp fand nur zweimal statt. Für beide Gruppen hat sich herausgestellt, dass die Masse der nationalen Kopien im Vergleich zum internationalen Prototyp im Durchschnitt zugenommen hat [2] (siehe auch Figur 2). Die mittlere relative Veränderung von etwa 50 µg in 100 Jahren ist zwar sehr gering. Weil sich aber die elektrischen Einheiten durch die Amperedefinition auf die Kraft und damit auf das Kilogramm beziehen, induziert eine Drift des Kilogramms eine ähnliche Drift in den elektrischen Einheiten.

Die **Amperedefinition** verbindet elektrische und mechanische Einheiten. Für die Realisierung der elektrischen Einheiten sind komplizierte elektromechanische Experimente notwendig (Watt-Waage, berechenbarer Kondensator,...). In der modernen elektrischen Messtechnik werden jedoch mit den Josephson- und Quanten-Hall-Effekten sehr reproduzierbare Spannungs- und Widerstandswerte realisiert, die nach dem Stand des Wissens nur von Naturkonstanten abhängen [3][4]. Dabei ist die Spannung des Josephsonnormals umgekehrt proportional zur Josephson-Konstanten  $K_J = 2e/h$ . Der quantisierte Hall-Widerstand ist proportional zur von-Klitzing-Konstanten  $R_K = h/e^2$ . Josephson- und Quantennormal sind damit direkt auf die elektrische Elementarladung  $e$  und die Planck-Konstante  $h$  rückführbar.  $K_J$  und  $R_K$  können im bisherigen SI mit einer relativen Unsicherheit um  $10^{-7}$  bestimmt werden. Das ist etwa 100-mal schlechter als die Reproduzierbarkeit der Quanteneffekte im Labor. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass das Internationale Komitee für Mass und Gewicht auf den 1.1.1990 durch Konvention festgelegte Werte  $K_{J-90}$  und  $R_{K-90}$  eingeführt hat:  $K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz V}^{-1}$ ,  $R_{K-90} = 25\,812.807 \text{ } \Omega$ .



Im X-Ray-Crystal-Density-Experiment (XRCD) wird die Masse eines Siliziumatoms mit hoher Genauigkeit gemessen, indem Atome in einem nahezu perfekten Si-Kristall gezählt werden. Quelle PTB

Dieser Schritt hat die weltweite Konsistenz der elektrischen Messungen drastisch verbessert. Auf der anderen Seite führte er jedoch zu einem praktischen Teilsystem im SI, was aus konzeptioneller Sicht unbefriedigend ist.

Auch in der Temperaturmessung stösst die bisherige Definition der Basiseinheit **Kelvin** über die Wasser-Tripelpunktzelle an ihre Grenzen (Typ 2 nach Klassifizierung oben). Die Realisierung ist empfindlich auf Verunreinigungen in der Zelle und die Isotopenzusammensetzung des verwendeten Wassers. Ausserdem ist die Realisierung der Skala ausgehend vom Nullpunkt und vom Tripelpunkt sehr aufwendig.

#### Experimentelle Voraussetzungen für die Revision

Um die identifizierten Schwachstellen zu beheben, waren auf der experimentellen Seite an zwei Fronten umfangreiche experimentelle Arbeiten notwendig: die Verbindung von kg und Planck-Konstante mit einer von den Spezialisten geforderten relativen Unsicherheit von  $\leq 2 \times 10^{-8}$  und die Bestimmung der Boltzmann-Konstanten  $k$  mit einer rel. Unsicherheit  $\leq 10^{-6}$ . Besonders das erste Problem stellte sich als sehr hartnäckig heraus.

Zwei fundamental unterschiedliche Ansätze werden verfolgt. Im X-Ray-Crystal-Density-Experiment (XRCD) wird die Masse eines Siliziumatoms mit hoher Genauigkeit gemessen, indem Atome in einem nahezu perfekten Si-Kristall gezählt werden [5]. Die atomare Masse wiederum kann mit sehr hoher Genauigkeit mit der Planck-Konstanten  $h$  verknüpft werden. Daher bietet das XRCD-Experiment die Möglichkeit, das Kilogramm entweder auf eine atomare Masse oder auf die Planck-Konstante zu beziehen. Ein weiterer experimenteller Ansatz ist die sogenannte «Watt-Waage» (oder nach ihrem Erfinder «Kibble-Waage») [6]. Die Waage vergleicht mechanische und elektrische Leistung. Wenn die elektrische Leistung

mit Quantenstandards gemessen wird, kann die Masse mit der Planck-Konstante [5] in Beziehung gesetzt werden. Natürlich müssen die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Ansätze übereinstimmen.

Für die Bestimmung der Boltzmann-Konstanten gibt es eine ganze Reihe von Methoden [7]. Die genaueste ist das akustische Gasthermometer, bei dem  $k$  über die Schallgeschwindigkeit in einem Gas als Funktion der Temperatur bestimmt wird.

Die Forderungen an die Konsistenz und die Genauigkeit bei der Bestimmung der Planck- resp. Boltzmann-Konstanten und damit die Voraussetzungen für eine Revision des SI wurden im Frühjahr 2017 erreicht.

#### Ein Satz von Konstanten legt das System fest

Wir haben in den vorhergehenden Abschnitten gesehen, wie sich die Definition der Einheiten im SI von einer 1-zu-1-Beziehung zu einem Artefakt (Urkilogramm) über den Bezug zu einem physikalischen System oder Zustand (Tripelpunkt des Wassers für das Kelvin) bis hin zu einer Abstützung auf eine Naturkonstante (Lichtgeschwindigkeit für den Meter) entwickelt. Beim letzten Schritt löst sich die Realisierung der Einheit konzeptuell von der Definition. Eine durch den fixen Wert von Naturkonstanten definierte Einheit kann gemäss den physikalischen Gesetzmässigkeiten nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik realisiert werden. Verbesserungen in der Realisierung sind möglich, ohne dass die Einheit neu definiert werden müsste.

Mit den Fortschritten in den Experimenten wird es nun zum ersten Mal möglich, das ganze SI auf einen Satz von Konstanten mit exakt festgelegten Werten abzustützen. Im SI haben wir die Wahl getroffen, den Wert von sieben Basiseinheiten durch Konvention festzulegen. Aus diesem Grund haben wir auch sieben Konstanten festzulegen.

**Der ausgewählte Satz der Konstanten ist wie folgt (siehe auch Kasten auf Seite 14):**

**$\Delta\nu_{\text{Cs}}$ : Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im  $^{133}\text{Cs}$ -Atom:** Diese Konstante definiert die Sekunde. Die Revision ändert nichts an der praktischen Realisierung der Einheit.

**$c$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:** Mit  $c$  und der über  $\Delta\nu$  realisierten Sekunde kann der Meter realisiert werden. Auch hier ändert die Revision nichts in der Praxis.

**$h$ : Planck-Konstante:** Zusammen mit  $c$  und  $\Delta\nu$  und den geeigneten Experimenten gelingt der Link zu einer makroskopischen Masse und damit zur Realisierung des kg. Dies ist das wichtigste Resultat der Revision.

**$e$ : Elementarladung:** Zusammen mit der Sekunde wird das Ampere damit neu definiert. Das Ampere kann direkt über Einzelelektronenschaltungen realisiert werden. Der Vorteil der Festlegung von  $e$  liegt jedoch hauptsächlich darin, dass bei Fixierung der Planck-Konstante und der Elementarladung die Josephson- und die von Klitzing-Konstante ebenfalls fixiert sind. Damit lassen sich das Volt resp. das Ohm im revidierten SI direkt mithilfe des Josephson- und des Quanten-Halleffekts realisieren. Damit werden die konventionellen Konstanten  $K_{\text{J}-90}$  und  $R_{\text{K}-90}$  überflüssig und das praktische Subsystem ebenfalls.

**$k$ : Boltzmann-Konstante:** Zusammen mit  $\Delta\nu$ ,  $c$ ,  $h$  und einem geeigneten Primärexperiment (z.B. akustisches Gasthermometer) kann das Kelvin realisiert werden. Als Konsequenz ist der Wert des Wassertripelpunkts nicht mehr fixiert und ist neu mit einer Unsicherheit behaftet.

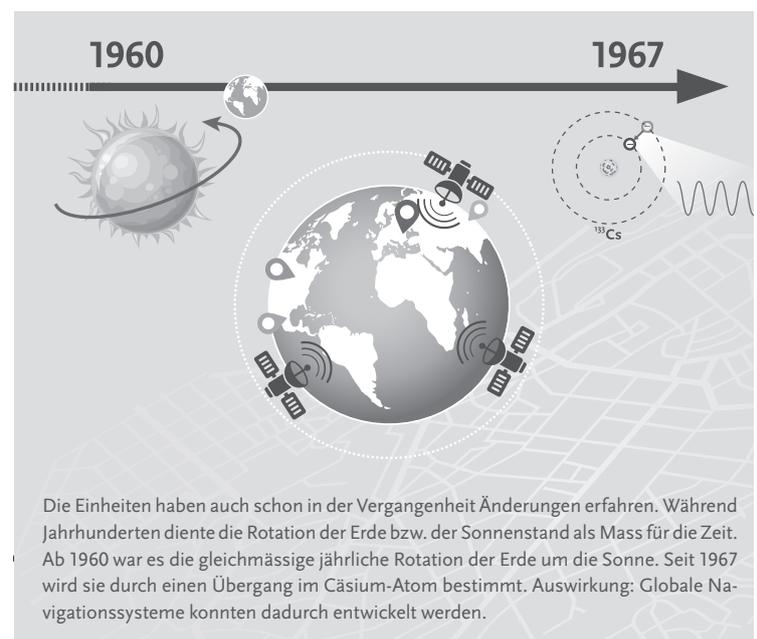
**$N_{\text{A}}$ : Avogadro-Konstante:** Durch diese Festlegung der Avogadro-Konstante wird das Mol definiert als diejenige Stoffmenge, die  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  spezifizierte elementare Teilchen enthält. Der Link zum kg, wie er früher durch die Mol-Definition hergestellt wurde, entfällt. Damit hat die molare Masse des  $^{12}\text{C}$  nicht mehr einen fixen Wert, sondern ist mit einer Unsicherheit behaftet.

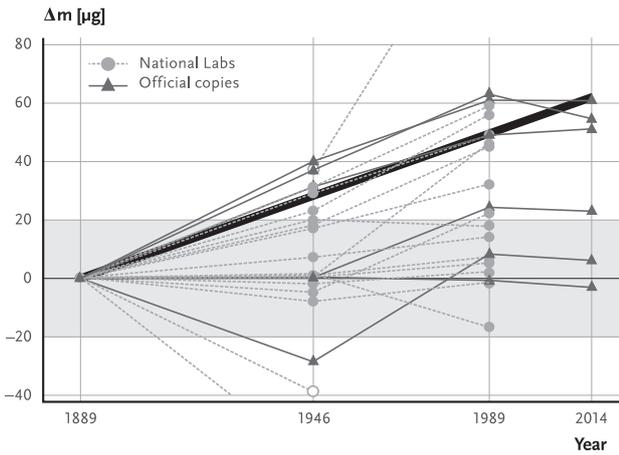
**$K_{\text{cd}}$ : Photometrisches Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von  $540 \times 10^{12}$  Hz.** Mit dieser Festlegung bleibt die Definition der Candela gegenüber früher unverändert.

Das SI ist ein praktisches System und in diesem Sinne ist es nicht verwunderlich, dass die oben aufgeführten Konstanten nicht alle den gleichen Stellenwert haben. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und die Planck-Konstante  $h$  werden in der modernen Physik als wirklich fundamentale Konstanten angesehen. Sie beziehen sich auf allgemeine Eigenschaften von Raum, Zeit und physikalischen Vorgängen, die für jede Art Teilchen und Wechselwirkung gleichermaßen gelten. Die Boltzmann-Konstante  $k$  kann als Umrechnungsfaktor für Temperatur und Energie angesehen werden. Die Grundzustands-Hyperfeinaufspaltungsfrequenz des Cäsium 133-Atoms  $\Delta\nu$  ist die Eigenschaft eines bestimmten Atoms. Sie kann nicht auf einfachere Weise durch fundamentalere Größen ausgedrückt werden. Die Genauigkeit der Realisierung der Einheit Sekunde, die mit dieser Konstante verbunden ist, ist durch die natürliche Linienbreite des atomaren Übergangs begrenzt. Beträchtliche Anstrengungen werden unternommen, um die Zeiteinheit in absehbarer Zukunft durch eine fundamentalere Konstante zu definieren. Die Avogadro-Konstante  $N_{\text{A}}$  und die Lichtausbeute  $K_{\text{cd}}$  werden aus praktischen Gründen gewählt; sie werden von Physikern normalerweise nicht als «grundlegend» angesehen.

Mit den fixierten Konstanten und mit Hilfe der Gesetze der Physik können alle Einheiten im SI realisiert werden. Die Konstanten sind die Bausteine und setzen den Massstab für das gesamte System. Es ist als Konsequenz nicht mehr notwendig, zwischen Basis- und abgeleiteten Einheiten zu unterscheiden. Alle Einheiten des SI sind vom gewählten Satz der sieben Kon-

stanten abgeleitet und somit gleichwertig. Für die Festlegung der Konstanten wurden alle bis Ende Juni 2017 publizierten experimentellen Resultate berücksichtigt. Das Komitee für Data for Science and Technology (CODATA) stellt der wissenschaftlichen und technologischen Gemeinschaft durch ihre Task Group on Fundamental Constants (TGFC) periodisch ein





2: Periodische Verifikation: Vergleich der Nationalen Kopien und der offiziellen Kopien mit dem Urkilogramm. Die Vergleiche fanden bei der Einführung 1889, danach 1946 und 1989 statt. Der Vergleich von 2014 ist keine offizielle «periodic verification», da nur ein Subset der Normale beteiligt war.

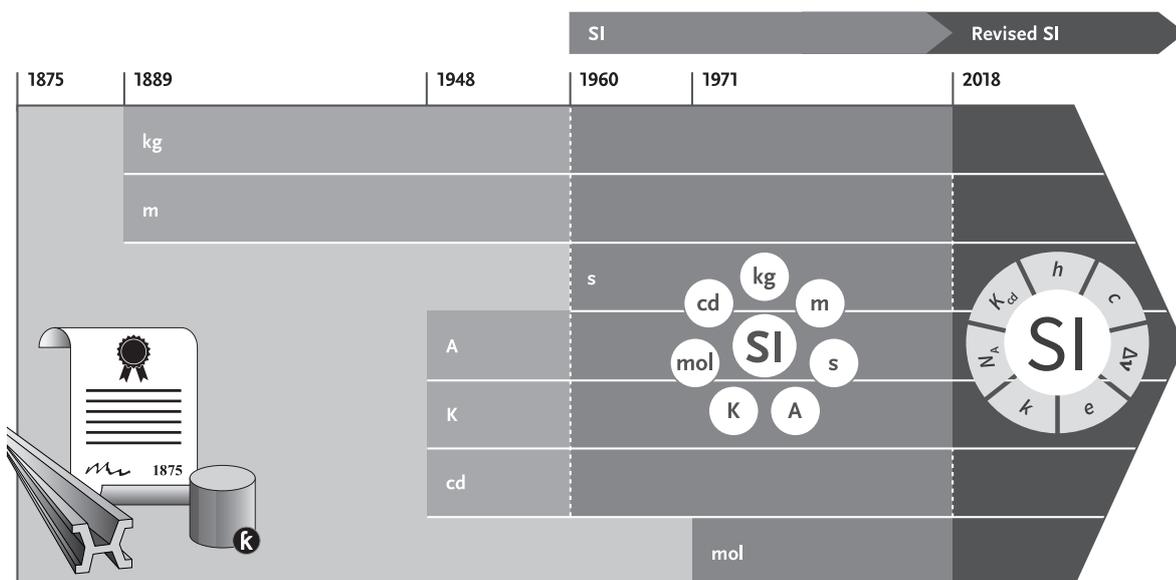
**$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$**

Max Planck war ein bedeutender deutscher Physiker und gilt als Begründer der Quantenphysik. Das kg wird neu mithilfe der Planck-Konstante definiert.

selbstkonsistentes Set international empfohlener Werte der Naturkonstanten und Umrechnungsfaktoren für Physik und Chemie zur Verfügung. Aufgrund dieser Rolle lud die Generalkonferenz für Mass und Gewicht die CODATA Task Group ein, eine spezielle Ausgleichsrechnung durchzuführen, um die Werte der definierenden Konstanten für das revidierte SI festzulegen. Die Ergebnisse dieser Anpassung sind im Kasten auf Seite 14 aufgeführt [8], nämlich die numerischen Werte von  $h$ ,  $e$ ,  $k$  und  $N_A$ , jeweils mit einer ausreichenden Anzahl von Ziffern, um die Konsistenz zwischen dem bisherigen und dem überarbeiteten SI zu gewährleisten. Die nächste periodische CODATA-Anpassung der Fundamentalkonstanten findet Ende 2018 statt. Diese wird ebenfalls aussergewöhnlich sein, da sie zum ersten Mal auf den exakt festgelegten Konstanten des revidierten SI basieren wird.

### Was ändert sich für den Anwender?

Das revidierte SI tritt anlässlich des Welt-Metrologietages 2019 am 20. Mai 2019 in Kraft. Obwohl an diesem Tag die seit Einführung des SI grundlegendste Änderung realisiert wird, wird sie keine unmittelbaren Auswirkungen auf das tägliche Leben haben. Trotz neuer Definition bleiben die Werte der Einheiten Kilogramm, Kelvin und Mol zunächst unverändert. Nur bei den elektrischen Einheiten sind kleine Korrekturen notwendig. Durch die Neudefinition des Ampere werden die durch die konventionellen Werte der Josephson- und von Klitzing-Konstanten festgelegten praktischen Einheiten obsolet. Die «Rückkehr» ins SI bedeutet eine relative Änderung von  $1.07 \times 10^{-7}$  für Spannungsmessungen und  $1.78 \times 10^{-8}$  für Widerstandsmessungen. Diese Korrekturen sind so klein, dass sie nur für wenige Anwender ausserhalb der NMI von Belang sind.



Das metrische System und das SI sind immer wieder an die Entwicklung der Technik und deren Bedürfnisse angepasst worden. Bei jeder Neudefinition ist es entscheidend, dass die langfristige Stabilität des SI gewährleistet bleibt.

### Definition des SI

Das Internationale Einheitensystem, SI ist definiert durch die Festlegung der Werte von 7 Konstanten. Die Zahlenwerte entstammen der Ausgleichsrechnung von CO-DATA im Sommer 2017.

### Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im $^{133}\text{Cs}$ -Atom

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$$

### Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

### Planck-Konstante

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s} \quad (\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1})$$

### Elementarladung

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{C} = \text{A s})$$

### Boltzmann-Konstante

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \quad (\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1})$$

### Avogadro-Konstante

$$N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

### Photometrisches Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$

$$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm W}^{-1}$$

### Fazit

Dank der Revision ist das Internationale Einheitensystem fit für die Zukunft. Es ist so ausgelegt, dass bessere Realisierungen der Einheiten im Lauf der Zeit ermöglicht werden, ohne dass dies explizit vom System vorgegeben wird. Damit steht das SI langfristig auf einer soliden Basis und bleibt weltweit das Fundament für Messungen mit einer Genauigkeit, wie sie von Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft benötigt wird.

### Referenzen

- [1] BIPM, «Measurement units: the SI.» [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/>.
- [2] G. Girard, «International Report: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992),» *Metrologia*, vol. 31, pp. 317–336, 1994.
- [3] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, «The quantum Hall effect as an electrical resistance standard,» *Reports Prog. Phys.*, vol. 64, no. 12, pp. 1603–1655, Dec. 2001.
- [4] B. Jeanneret and S. P. Benz, «Application of the Josephson effect in electrical metrology,» *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 172, no. 1, pp. 181–206, Jun. 2009.
- [5] K. Fujii et al., «Realization of the kilogram by the XRCM method,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A19–A45, 2016.
- [6] I. A. Robinson and S. Schlaminger, «The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A46–A74, 2016.
- [7] J. Fischer et al., «The Boltzmann project,» *Metrologia*, vol. 55, no. 2, pp. R1–R20, 2018.
- [8] D. Newell et al., «The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_{\text{A}}$  for the revision of the SI,» *Metrologia*, vol. 55, no. 1, pp. L13–L16, 2018.