



METinfo



2/2018

Zeitschrift für Metrologie / Journal de métrologie / Rivista di metrologia / Journal of Metrology



Messen macht möglich

Ein Meilenstein in der Weiterentwicklung
des Internationalen Einheitensystems

Adieu, «grand K»!

Realisierung

Vom lokalen Menschenmass zum weltweiten Einheitensystem

SI-Perspektiven – Was bleibt zu tun?

Impressum

METinfo

Zeitschrift für Metrologie, Vol. 25, 2/2018
Journal de métrologie, Vol. 25, 2/2018
Rivista di metrologia, Vol. 25, 2/2018
Journal of Metrology, Vol. 25, 2/2018
19.09.2018

Herausgeber/Éditeur/Editore/Publisher

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS
Institut fédéral de métrologie METAS
Istituto federale di metrologia METAS
Federal Institute of Metrology METAS
Lindenweg 50, 3003 Bern-Wabern, Schweiz
Tel. +41 58 387 01 11, Fax +41 58 387 02 10
www.metas.ch

Redaktionsleitung/Rédacteur responsable/

Redattore-capo/Editor-in-Chief

David Lehmann
Tel. +41 58 387 04 89
david.lehmann@metas.ch

Redaktion/Rédaction/Redazione/

Editorial Board

Dr. Gregor Dudle
Dr. Beat Jeckelmann
Jan Laubscher
Dr. Jürg Niederhauser
Céline Pascale
Dr. Ulrich Schneider

Bildnachweis/Photos/Fonte delle immagini/Pictures

Claudio Ratti, David Lehmann, Marina Plattner, Ali Eichenberger
METAS, 3003 Bern-Wabern
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
National Physical Laboratory (NPL)

Hinweis/Remarque/Nota/Note

Die enthaltenen Beiträge müssen nicht notwendigerweise mit der Auffassung des Eidgenössischen Justiz- und Polizeidepartements (EJPD) oder des Eidgenössischen Instituts für Metrologie (METAS) übereinstimmen.

Les contributions publiées ne correspondent pas nécessairement à l'avis du Département fédéral de justice et police (DFJP) ou de l'Institut fédéral de métrologie (METAS).

I contributi pubblicati non corrispondono necessariamente all'opinione del Dipartimento federale di giustizia e polizia (DFGP) o a quella dell'Istituto federale di metrologia (METAS).

The published contributions do not necessarily need to agree in opinion with either the Federal Department of Justice and Police (FDJP) or the Federal Institute of Metrology (METAS).

Copyright

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet, Belegexemplar erwünscht.
Reproduction autorisée avec indication de la source, justificatif souhaité.
Riproduzione con indicazione delle fonti ammessa, auspicato un esemplare.
Reproduction allowed under indication of source, copy of reprint desired.

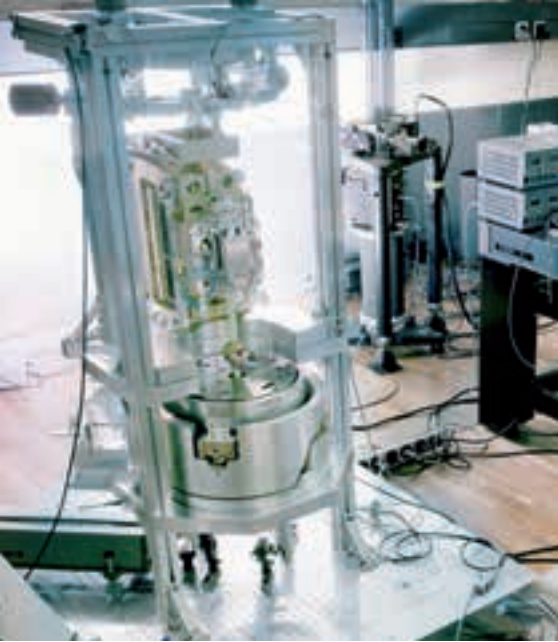
Administration

ISSN 1660-4733
ISSN 1660-6094 (Online-Edition)
24/04 3800 860376853/2



Sieben Konstanten definieren neu die Masseinheiten.
Sette costanti ridefiniscono le unità di misura.
Sept constantes redéfinissent les unités de mesure.
Seven constants redefine the units of measurement.





Die Weiterentwicklung des Internationalen Einheitensystems.
Le développement du Système International d'unités.
 Lo sviluppo del Sistema Internazionale di unità.
The evolution of the International System of Units.

4 SI im Alltag
Messen macht möglich

9 SI-Revision
**Ein Meilenstein in der Weiterentwicklung
 des Internationalen Einheitensystems**

16–19 Infographik/Graphique d'information
**Revision des Internationalen Einheitensystems (SI)
 Révision du Système international d'unités (SI)**

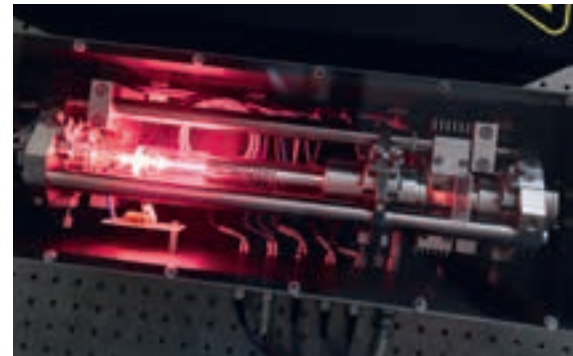
20 Urkilogramm/Prototype international du kilogramme
Adieu, « grand K » !

22 Realisierung
La réalisation du kilogramme
Die Realisierung des Meters
La réalisation de la seconde
La réalisation de l'ampère
Die Realisierung des Kelvin
Die Realisierung des Mols
Die Realisierung der Candela

29 Der Metervertrag
**Vom lokalen Menschenmass zum
 weltweiten Einheitensystem**

34 SI-Perspektiven
Was bleibt zu tun?

39 Veranstaltungen/Manifestation
Weiterbildungskurse Metrologie 2019
Formation continue en métrologie 2019



Wie die Einheiten realisiert werden.
Comment les unités sont réalisées.
 Come vengono realizzate le unità.
How the units are realized.



Was bleibt zu tun?
Que reste-t-il à faire ?
 Che cosa resta da fare?
What remains to be done?

Liebe Leserin, lieber Leser

Einzig durch Messungen ist es möglich, alle Dinge quantitativ miteinander zu vergleichen. Beispielsweise kann man die Grösse oder die Masse eines Objekts bestimmen, eine Diagnose auf der Grundlage von medizinischen Analysen stellen oder den Farbton und die Beleuchtungsstärke einer neuen LED-Lampe mit denjenigen einer herkömmlichen Glühbirne vergleichen.

Das Internationale Einheitensystem – nach der französischen Bezeichnung «Système international d'unités» auch SI genannt – ist das weltweit meist verbreitete Messsystem. Es stellt ein kohärentes System dar, das auf sieben Basiseinheiten (Kilogramm, Meter, Sekunde, Ampere, Kelvin, Mol und Candela) beruht. Dank diesem System ist es in Wissenschaft, Industrie und Verwaltung sowie in der Gesellschaft möglich, die physikalischen Eigenschaften von Objekten und Phänomenen auf dieselbe Weise und mithilfe derselben Einheiten zu messen, um so zum selben Ergebnis zu gelangen.

Um die Stabilität, die Konsistenz und die Universalität der SI-Einheiten langfristig sicherzustellen und so in Zukunft den Weg für Innovationen und noch präziseres Messen frei zu machen, hat die Generalkonferenz für Mass und Gewicht im November 2018 eine umfassende Neudefinition des SI beschlossen.

Die Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol sind anhand von zeitinvarianten physikalischen Konstanten neu definiert worden. Zum ersten Mal basieren alle SI-Einheiten auf physikalischen Konstanten. Bei der Sekunde ist dies bereits seit 1967 der Fall: Ihre Definition beruht auf der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cäsium 133 entspricht.

Seit 1889 wurde das Kilogramm durch die Masse des internationalen Kilogrammprototyps («Urkilogramm») definiert. Seit 130 Jahren grenzt die mutmassliche Beständigkeit dieses materialisierten Urmasses, von dem es genau eines auf der Welt gibt, an ein Wunder.

Wir werden allerdings erst in einigen Jahrzehnten, dank einer neuen, auf einer invarianten Konstante basierten Definition, wissen können, ob dieses Wunder der Stabilität des internationalen Kilogrammprototyps eine Tatsache ist. In der Zwischenzeit werden dank der Überarbeitung des SI noch exaktere Methoden, das Kilogramm anhand der Planck-Konstante zu bestimmen, entwickelt worden sein.

Chère lectrice, cher lecteur,

seules des mesures permettent de comparer toutes choses entre elles de manière quantitative. On peut, par exemple, déterminer la taille ou la masse d'un objet, poser un diagnostic sur la base d'analyses médicales ou comparer la couleur et l'éclairement lumineux émis par une nouvelle ampoule LED avec ceux d'une ampoule traditionnelle.

Le Système international d'unités (SI) est le système de mesure le plus répandu dans le monde. Il représente un système cohérent basé sur sept unités de base (kilogramme, mètre, seconde, ampère, kelvin, mole et candela) qui permet à la science, à l'industrie, à l'administration et à la société de mesurer les propriétés physiques des objets et des phénomènes de la même manière, en utilisant les mêmes unités et en obtenant ainsi le même résultat.

Afin d'assurer la stabilité, la consistance et l'universalité des unités SI sur le long terme et d'ouvrir la porte à des innovations et des mesures encore plus exactes à l'avenir, la Conférence générale des poids et mesures a décidé une redéfinition historique du SI en novembre 2018.

Le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole ont été redéfinis à l'aide de constantes physiques invariantes dans le temps. Pour la première fois, toutes les unités du SI sont basées sur des constantes physiques. Pour la seconde, c'était déjà le cas depuis 1967 avec la période de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

Depuis 1889, le kilogramme était défini par la masse du prototype international du kilogramme. L'invariabilité supposée depuis 130 ans de ce dernier étalon matérialisé, unique au monde, tient un peu du miracle.

Ce n'est pourtant que dans quelques dizaines d'années, grâce à la nouvelle définition basée sur une constante invariante, que nous pourrons savoir si le miracle de la stabilité du kilogramme prototype international en était vraiment un. Entre-temps, de nouvelles méthodes encore plus exactes pour réaliser le kilogramme sur la base de la constante de Planck auront déjà vu le jour grâce au SI révisé.



Cara lettrice, caro lettore

Solo le misurazioni consentono di confrontare tra loro le varie cose in modo quantitativo. Si può, ad esempio, determinare la dimensione o la massa di un oggetto, effettuare una diagnosi in base ad analisi medicali, oppure confrontare il colore e la luminosità emessi da una nuova lampadina a LED con quelli di una lampadina tradizionale.

Il Sistema internazionale di unità (SI) è il sistema di misurazione più diffuso al mondo. Esso rappresenta un sistema coerente basato su sette unità di base (chilogrammo, metro, secondo, ampere, kelvin, mole e candela) che consente alla scienza, all'industria, all'amministrazione e alla società in generale di misurare le proprietà fisiche degli oggetti e dei fenomeni allo stesso modo, utilizzando le stesse unità e ottenendo così un risultato confrontabile.

Per assicurare a lungo termine la stabilità, la consistenza e l'universalità delle unità SI e aprire così la strada ad innovazioni e misurazioni ancora più esatte in futuro, la Conferenza generale dei pesi e delle misure ha deciso nel novembre 2018 una ridefinizione storica del SI.

Il chilogrammo, l'ampere, il kelvin e la mole saranno ridefiniti con l'ausilio di costanti fisiche invariabili nel tempo. Per la prima volta, tutte le unità del SI saranno basate su costanti fisiche. Per il secondo, era già il caso sin dal 1967 con il periodo della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.

Fin dal 1889, il chilogrammo è definito dalla massa del prototipo internazionale del chilogrammo. Per l'ultimo campione materializzato, unico al mondo, l'invariabilità presupposta da 130 anni ha quasi del miracoloso.

Potremo tuttavia sapere solo tra qualche decina di anni, grazie alla nuova definizione basata su una costante invariante, se il miracolo della stabilità del chilogrammo prototipo internazionale era effettivamente tale. Nel frattempo, nuovi metodi ancora più esatti per realizzare il chilogrammo sulla base

Dear Reader,

Measurements offer the only means of making quantitative comparisons between all types of phenomena. For example, it is possible to determine the size or mass of an object, to make a diagnosis on the basis of medical analyses, or to compare the colour and luminance of a new LED light with that of a traditional light bulb.

The International System of Units (SI) is the most commonly used measurement system in the world. It represents a coherent system based on seven basic units (kilogram, metre, second, ampere, kelvin, mole and candela) that allows science, industry, administration and society to measure the physical properties of objects and phenomena in the same way, using the same units and thus obtaining the same result.

In order to ensure the long-term stability, consistency and universality of the SI units and opening the door to innovation and even more precise measurements in the future, the General Conference on Weights and Measures decided on a historical redefinition of the SI system in November 2018.

The kilogram, the ampere, the kelvin and the mole have been newly redefined using time-invariant physical constants. For the first time, all SI units are based on physical constants. In the case of the second, this was already the case since 1967: with the radiation period corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the fundamental state of the caesium 133 atom.

Since 1889, the kilogram was defined by the mass of the International Prototype of the Kilogram (IPK). The supposed invariability of this, the last material reference artefact, over 130 years constitutes somewhat of a miracle.

It is only in a few decades, however, thanks to the new definition based on an invariant constant, that we will be able to know whether the miracle of the stability of the international prototype kilogram was really one. By then, new and more precise

Dr. Philippe Richard
Direktor / Directeur / Direttore / Director

Messen macht möglich

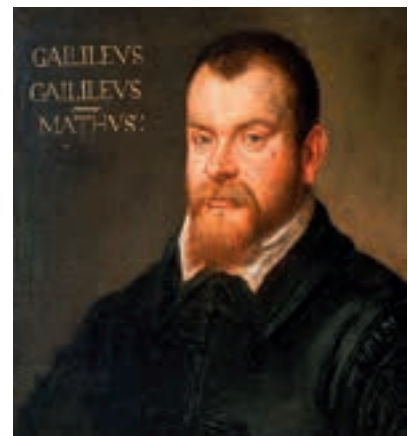
Wer richtig messen kann, weiss mehr. Im Zentrum von sozialen oder technischen Entwicklungen stand immer wieder die Metrologie. Sie bildet heute die Grundlage der Wissenschaften – und in Zukunft, wenn Themen wie Digitalisierung die Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft verändern werden? Die Revision des Internationalen Einheitensystems SI ist Grund genug, der Entwicklung der Metrologie und ihrer Wechselwirkung mit Technik, Wissenschaft und Gesellschaft etwas näher nachzugehen.

GREGOR DUDLE

Menschen messen sich und ihre Umgebung seit jeher, um Ordnung zu schaffen und sich besser orientieren zu können. Grundsätzlich heisst messen vergleichen. Eine unbekannte Grösse wird mit einer vorgegebenen Referenzgrösse verglichen. Dieses einfache Prinzip ist vermutlich so alt wie die Menschheit selber. Bereits im Alten Ägypten wurden Masseinheiten für Länge, Volumen, Gewicht und Zeit festgelegt (Bild 1). Dies war nicht nur für fairen Handel nötig, sondern auch für die Berechnung von Abgaben an den Staat.

Wenn jedoch nicht überall die gleiche Referenzgrösse verwendet wird, könnte sich jemand daraus einen Vorteil erschleichen: Der Käufer erhält weniger als er einzukaufen glaubt, der Staat zieht zu viel oder zu wenig Steuern ein. Mass und Gewicht gehören deshalb oft zu den ersten Elementen, die eine Zivilisation oder ein Staat regelt. Kein Wunder findet sich schon im Alten Testament das Gebot, mit Mass und Gewicht nicht zu schummeln: «Ihr sollt nicht unrecht handeln im Gericht, mit der Elle, mit Gewicht, mit Mass». In England wurden einheitliche Masse für Wein, Bier, Getreide und Stoffe im 13. Jahrhundert in der Magna Carta gefordert. Auch die moderne Schweiz hat sich sehr schnell

2: Galileo Galilei war einer der wichtigsten Begründer der exakten Naturwissenschaften.



Gedanken zu vertrauenswürdigen Messungen im Handel gemacht. Schon 1862 hat der Bundesrat in der damals jungen Schweiz entschieden, eine Eidgenössische Eichstätte einzurichten, um allgemein gültige Referenzmasse vorzugeben und beim Handel unlautere Messungen zu unterbinden. Diese Eidgenössische Eichstätte ist der Vorläufer des heutigen METAS.



1: Am Anfang war die gesetzliche Metrologie: Masseinheiten für Länge, Volumen, Gewicht und Zeit legten bereits die alten Ägypter fest.

3: Mit der Unterzeichnung des Metervertrags 1875 und Herstellung von Urmeter und Urkilogramm wurde eine weltweit verbindliche Basis für das Messen geschaffen.



Seit damals hat sich die Welt gewaltig verändert – und mit ihr die Metrologie. Die hoheitlichen Tätigkeiten, heute zusammengefasst bezeichnet als gesetzliche Metrologie, gibt es aber immer noch. Dass in einem Staat metrologische Bedürfnisse am Anfang hauptsächlich aus der gesetzlichen Metrologie kommen, ist kein Zufall. Eine funktionierende metrologische Infrastruktur ist ein wichtiger Baustein bei der Entwicklung eines Staates.

Metrologie als Grundlage der Wissenschaft

Die Metrologie beschränkt sich aber nicht nur auf Regeln für Staaten. Auch die Wissenschaft benötigt genaue Messungen, ja sie würde ohne diese gar nicht existieren. Galileo Galilei (1564–1641), einem der Väter der exakten Naturwissenschaften, wird der Ausspruch zugeschrieben: «Man muss messen, was messbar ist, und messbar machen, was noch nicht messbar ist.» Zwar hat er diese Aussage nie gemacht, aber mit Sicherheit hat Galilei die Grundidee dahinter vertreten. Nur wenn man etwas messen kann, kann man ein Phänomen auch verstehen. Seine Theorien hat er erfolgreich durch die Kombination von Mathematik und Messungen erarbeitet.

Viele andere bedeutende Physiker vertraten die gleiche Ansicht, allen voran Lord Kelvin (1824–1907): «I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be.» Die Messungen sind heute komplizierter, aufwändiger und vor allem genauer. Das von Galileo und Kelvin propagierte Prinzip hat jedoch nach wie vor Gültigkeit. Damit sich die Naturwissenschaften weiterentwickeln können, braucht es Messungen, mit denen sich Theorien verifizieren und validieren lassen.

Errungenschaft Metervertrag

Solange ein Wissenschaftler alleine arbeitet und seine Resultate nicht mit anderen vergleicht, braucht er sich nicht um die Masseinheiten zu kümmern. Die Fallversuche, die Galileo angeblich in Pisa durchgeführt haben soll, konnte er mit willkürlichen Einheiten für die Zeit und die Distanz durchführen. Einzig

die Stabilität der gewählten Referenzen war für das Experiment wichtig. Sollen hingegen Messresultate vergleichbar sein, sind gemeinsame Referenzmasse unerlässlich. Wie beim Handel stieg somit auch in der Wissenschaft mit zunehmendem Austausch der Bedarf nach gemeinsamen Referenzen. Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert und der Entwicklung von schnelleren Verkehrsmitteln wurde es einfacher, Kontakte über weite Distanzen zu pflegen. Die Entwicklung einer gemeinsamen Grundlage für das Messen wurde deshalb von Seiten der Wirtschaft wie der Wissenschaft vorangetrieben. Die Unterzeichnung des Metervertrags 1875 und Schaffung des Bureau international des poids et mesures (BIPM) beendete das Wirrwarr verschiedener nebeneinander bestehender Einheiten wie Fuss oder Elle. Diese Errungenschaft einer weltweit verbindlichen Basis für das Messen ist Ausdruck der Globalisierung der Wissenschaft und des zunehmenden internationalen Handels.

CIPM MRA

Mit dem Metervertrag wurde eine gemeinsame Basis für Messungen geschaffen, sozusagen eine weltweit akzeptierte Sprache, mit der man Messresultate ausdrücken konnte. In vielen Ländern wurden Nationale Metrologieinstitute (NMI) geschaffen, die dafür sorgen sollten, dass genaues Messen im eigenen Land möglich war. Die Idee vergleichbarer Resultate wurde jedoch nicht unmittelbar mit letzter Konsequenz umgesetzt. Kalibrierungen anderer NMI wurden nicht zwingend als gleichwertig anerkannt. Es brauchte über hundert Jahre bis das Comité international des poids et mesures (CIPM) 1999 das System von gegenseitiger Anerkennung der Nationalen Referenzen und der Kalibrierzertifikate (Mutual Recognition Arrangement MRA) etablieren konnte. Die gegenseitige Anerkennung und die Äquivalenz der Kalibrierzertifikate sind heute gewissermassen schon eine Selbstverständlichkeit. Man vergisst beinahe, dass sie Grundvoraussetzungen sind für die global funktionierende Industrie.

So werden beispielsweise Teile für einen Airbus an den unterschiedlichsten Orten gefertigt. Die dabei verwendeten Messinstrumente sind rückführbar auf verschiedene NMI. Das CIPM MRA stellt sicher, dass alle Kalibrierzertifikate, die von NMI ausgestellt werden, miteinander verglichen werden können und so die einzelnen Teile des Airbus am Schluss zusammenpassen.

4: Elektrizitätszähler einst und heute: Die Systemgrenzen in der gesetzlichen Metrologie müssen nun mehr erfassen als nur das Messmittel.

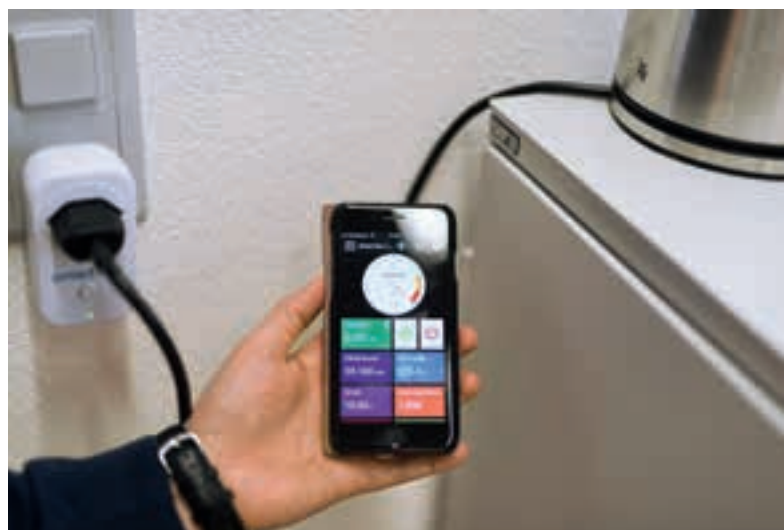


Wissenschaft als Grundlage der Metrologie

Die Metrologie hat bei der Entwicklung der Wissenschaft eine wichtige Rolle gespielt. Dank genauen Messungen erkannten Forscher Gesetzmässigkeiten und konnten diese beschreiben. Umgekehrt gelang es der Metrologie immer wieder, Erkenntnisse der Forschung für ihre Zwecke einzusetzen. Bei einer ganzen Reihe von Physik-Nobelpreisen gibt es eine direkte oder indirekte Verbindung zur Metrologie. Schon 1907 wurde Albert Michelson mit dem Nobelpreis in Physik für optische Präzisionsinstrumente ausgezeichnet. Die von ihm entwickelten Interferenz-Methoden werden heute routinemässig in der Längenmessung eingesetzt. Brian D. Josephson hat 1973 den Preis für die theoretische Voraussage des nach ihm benannten Effekts erhalten.

Der Josephson-Effekt wird heute zur Realisierung des Volts herangezogen. Klaus von Klitzing wurde 1985 für seine Arbeiten zum quantifizierten Hall-Effekt belohnt. Dank diesen Arbeiten können heute elektrische Widerstände mit höchster Präzision gemessen werden. 1989 wurden mit Norman Ramsey, Hans Georg Dehmelt und Wolfgang Paul gleich drei Physiker geehrt, die allesamt Methoden für Spektroskopie entwickelt hatten. Ohne diese Techniken wären die unglaublichen Genauigkeiten der aktuellen Atomuhren und damit den Einsatz globaler Navigationssysteme (GPS) nicht möglich. 2005 schliesslich wurde der Preis Theodor Hänsch zugesprochen. Er hatte mit seinen Arbeiten rund um Frequenzkämmen die Messung von optischen Frequenzen wesentlich vereinfacht.

Die Liste von Errungenschaften in diesem Zusammenhang ist nicht vollständig. Sie veranschaulicht aber, wie es Metrologen immer wieder verstanden haben, wissenschaftliche Erkenntnisse für ihre Disziplin zu nutzen und so die Metrologie weiter zu bringen. Im Laufe der Jahre konnte das mit dem Metervertrag eingeführte Einheitensystem wiederholt angepasst und verbessert werden. Der Urmeter wurde 1960 ersetzt durch eine Definition, die auf einem atomaren Übergang basierte. 1983 musste diese einer Definition weichen, die sich auf die Lichtgeschwindigkeit und somit auf eine Naturkonstante stützt. Mit der neusten Revision des Internationalen Einheitensystems SI sind nun sämtliche Einheiten auf Konstanten abgestützt.

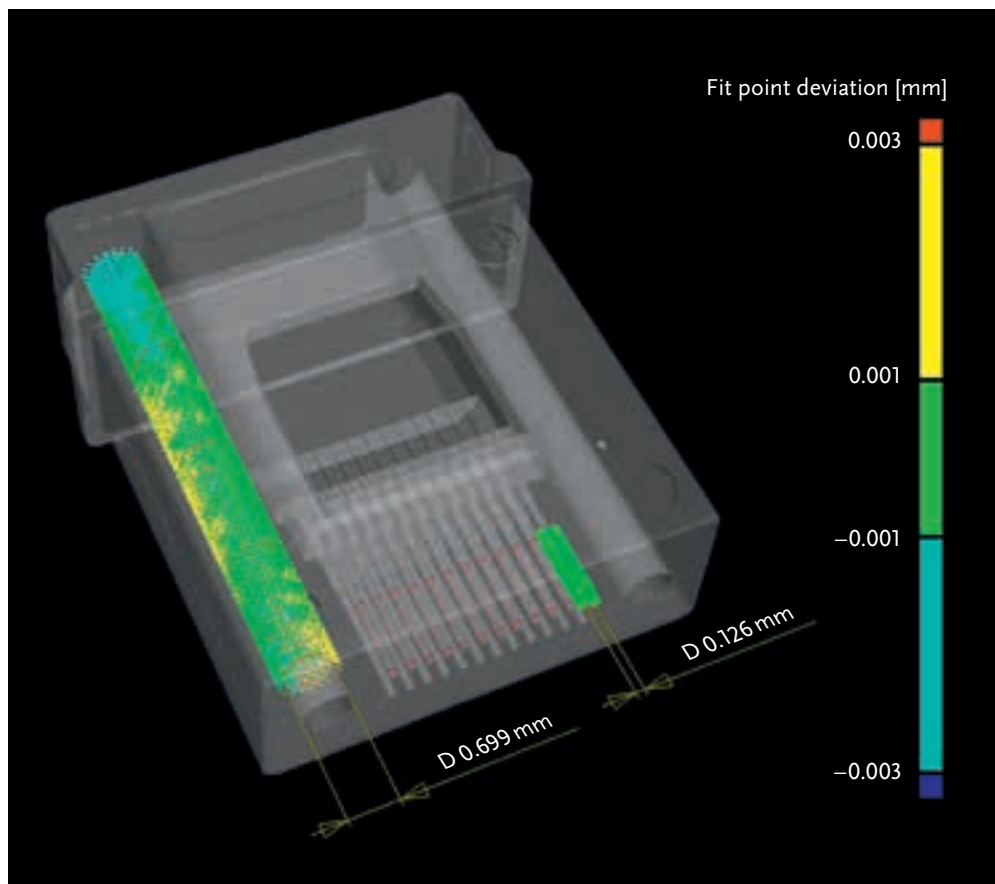


Herausforderungen für die Zukunft

Metrologie hat bei der sozialen, technischen und wissenschaftlichen Entwicklung seit jeher eine zentrale Rolle gespielt. Verkäufer und Käufer brauchen für fairen Handel eine gemeinsame Referenz, ebenso Unternehmen für Kontrollen bei der Herstellung von Produkten und besonders auch die Wissenschaft, um Resultate zu vergleichen.

Die Bedürfnisse von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft waren stets wichtige Treiber für die Entwicklung der Messtechnik. Oberstes Ziel der Metrologie war bislang, in allen Gebieten stabilere Messungen durchführen und immer genauer messen zu können: Nach dem Millimeter wollte man den Mikrometer messen, nach dem Mikrometer den Nanometer. Die Metrologen werden weiterhin alles daran setzen, die Messunsicherheit verkleinern und so die Messmöglichkeiten verbessern zu können. Aus den Entwicklungen in der Technik und der Gesellschaft ergeben sich aber auch Herausforderungen für die Metrologie, die über die traditionellen physikalischen Messungen hinausgehen.

5: Konzepte wie Rückführbarkeit der Messresultate auf SI-Einheiten werden mit der Digitalisierung abstrakter.



Dazu gehört zweifelsohne die Digitalisierung, wohl der wichtigste Umbruch der jüngeren Zeit. Viele Gebiete der Wissenschaft und der Technik sowie der Gesellschaft haben mit der Digitalisierung bereits grundlegende Änderungen erfahren. Dieser Trend macht auch vor der Metrologie nicht Halt. Die Digitalisierung wird die Metrologie verändern; nicht erst in ferner Zukunft, sondern schon heute. Das zeigt sich deutlich anhand von Elektrizitätszählern: Bis vor kurzem wurde der Verbrauch elektrischer Energie in Haushalten ausschliesslich mit Geräten erhoben, die abgeschlossene Systeme waren. Die Elektrizitätszähler enthielten in einem Gehäuse sowohl Sensor wie auch Zählwerk. Wurde das Gehäuse mit geeigneten Massnahmen vor Manipulationen geschützt, konnte sichergestellt werden, dass die Messresultate nicht verfälscht werden konnten. Die Situation hat sich heute geändert: Der Energieverbrauch wird an einer Stelle gemessen, elektronisch übermittelt und beispielsweise auf einer Internetplattform angezeigt. Nur das Gehäuse vor Manipulationen zu schützen reicht nicht mehr aus. Will man Kunden wie Verkäufer vor unberechtigten Eingriffen in die Datenauswertung bewahren, müssen die gesetzlichen Metrologen die Systemgrenzen weiterziehen als nur um das Gehäuse des E-Zählers.

Aber auch für die technische Metrologie ergeben sich mit der Digitalisierung neue Fragen: Früher waren Längenmessungen im weitesten Sinne immer taktil. Mit der Computertomogra-

phie, wie sie beispielsweise am METAS aufgebaut wurde, werden Dimensionen nicht mehr durch taktile Methoden bestimmt, sondern durch Algorithmen in rekonstruierten 3D-Modellen. Konzepte wie Rückführbarkeit auf SI-Einheiten der Messresultate sind in solchen Fällen abstrakter als etwa bei einer Kalibrierung von Endmassen.

Weiterhin voneinander profitieren

Nicht nur die Metrologie hat sich dem Wandel angepasst, auch das zugrundeliegende System der Einheiten, das SI, wurde immer wieder an neue Anforderungen angepasst. Mit der aktuellen Revision des SI sind Voraussetzungen geschaffen worden, dass das SI bereit ist, zukünftige technische Entwicklungen zu ermöglichen. So sollte die erfolgreiche Wechselwirkung und technischen und sozialen Entwicklungen und der Entwicklung der Metrologie auch in Zukunft bestehen bleiben können.

De l'importance de la métrologie

Mesurer correctement, c'est en savoir plus. Depuis toujours, l'être humain se mesure lui-même, ainsi que son environnement. De façon générale, mesurer c'est comparer. Dans l'Égypte ancienne, des unités de mesure de longueur, de volume, de poids et de temps étaient déjà définies. Elles étaient nécessaires, non seulement à l'équité du commerce, mais aussi au calcul des taxes prélevées par l'état.

La métrologie ne se limite pas à établir des règles pour les états. La science a besoin, elle aussi, de mesures exactes. En effet, des mesures exactes ont permis à des chercheurs d'identifier des lois et de les décrire. Inversement, la métrologie a régulièrement utilisé à ses fins les résultats de la recherche.

C'est pourquoi les milieux économiques et scientifiques ont promu le développement d'une base de mesure commune. La signature de la Convention du Mètre en 1875 et la création du Bureau international des poids et mesures (BIPM) ont mis fin à l'imbroglia causé par l'existence parallèle d'unités différentes. Les besoins de la science, de l'économie et de la société ont été de tout temps les moteurs principaux du développement de la métrologie.

Toutefois, les évolutions technologiques et sociales lancent aussi des défis à la métrologie, défis allant bien au-delà des mesures physiques et chimiques. Il s'agit, par exemple, du défi de la numérisation, l'un des changements les plus importants de notre époque. C'est pourquoi la métrologie et le Système international d'unités (SI), sur lequel elle repose, se sont adaptés aux changements. La révision actuelle du SI crée les conditions favorables aux futurs développements techniques.

La misurazione lo rende possibile

Chi riesce a misurare correttamente, ne sa di più. L'uomo ha sempre misurato sé stesso e il proprio ambiente. Fondamentalmente, misurare significa confrontare. Già nell'Antico Egitto sono state definite unità di misura per lunghezza, volume, peso e tempo. Ciò era necessario non solo per il commercio equo e solidale, ma anche per il calcolo delle tasse dovute allo Stato.

La metrologia non si limita solo a definire regole per gli Stati, anche la scienza ha bisogno di misurazioni accurate. Grazie a misurazioni accurate i ricercatori hanno individuato delle regolarità e le hanno potuto descrivere. Inversamente la metrologia è sempre riuscita a utilizzare i risultati della ricerca per i propri scopi.

Lo sviluppo di una base comune per la misurazione è stato pertanto promosso sia dall'economia che dalla scienza. La firma della Convenzione del metro nel 1875 e la creazione del Bureau international des poids et mesures (BIPM) hanno messo fine alla confusione di unità diverse esistenti l'una accanto all'altra. Le esigenze della scienza, economia e società sono sempre state importanti fattori di sviluppo delle tecniche di misurazione.

Tuttavia anche gli sviluppi tecnologici e sociali pongono sfide per la metrologia, che vanno oltre le tradizionali misurazioni fisiche e chimiche. Ciò include ad esempio la digitalizzazione, uno dei più importanti cambiamenti del nostro tempo. Pertanto, la metrologia e il sistema di unità SI alla sua base si sono adattati ai cambiamenti. Con l'attuale revisione del SI sono state create le condizioni per consentire i futuri sviluppi tecnici.

Measurement makes it possible

If you can measure correctly, your level of knowledge is increased. People have been measuring themselves and their environment since time immemorial. In essence, measuring means making comparisons. Definitions of measurement units for length, volumes, weight and time already existed back in the days of ancient Egypt. These were needed not just for fair trade, but also to calculate taxes payable to the state.

Metrology is not confined to rules for government however, science, too, needs precise measurements. Thanks to precise measurements, researchers were able to recognise and describe fundamental principles. On the other hand, metrology has regularly succeeded in harnessing research findings for its own purposes.

The development of a common basis for measuring was thus spurred on by commerce and science alike. The signing of the Metre Convention in 1875 and the creation of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) brought to an end the confusion of different co-existing units. The needs of science, commerce and society were always important drivers for the development of metrology.

Developments in technology and society pose challenges for metrology extending beyond traditional physical and chemical measurements however. Among these is digitalisation, one of the most important changes of our time. Metrology and its underlying system of units, the SI, has therefore adapted to the change. The current revision of the SI has created the conditions in which future technological developments will flourish.

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:

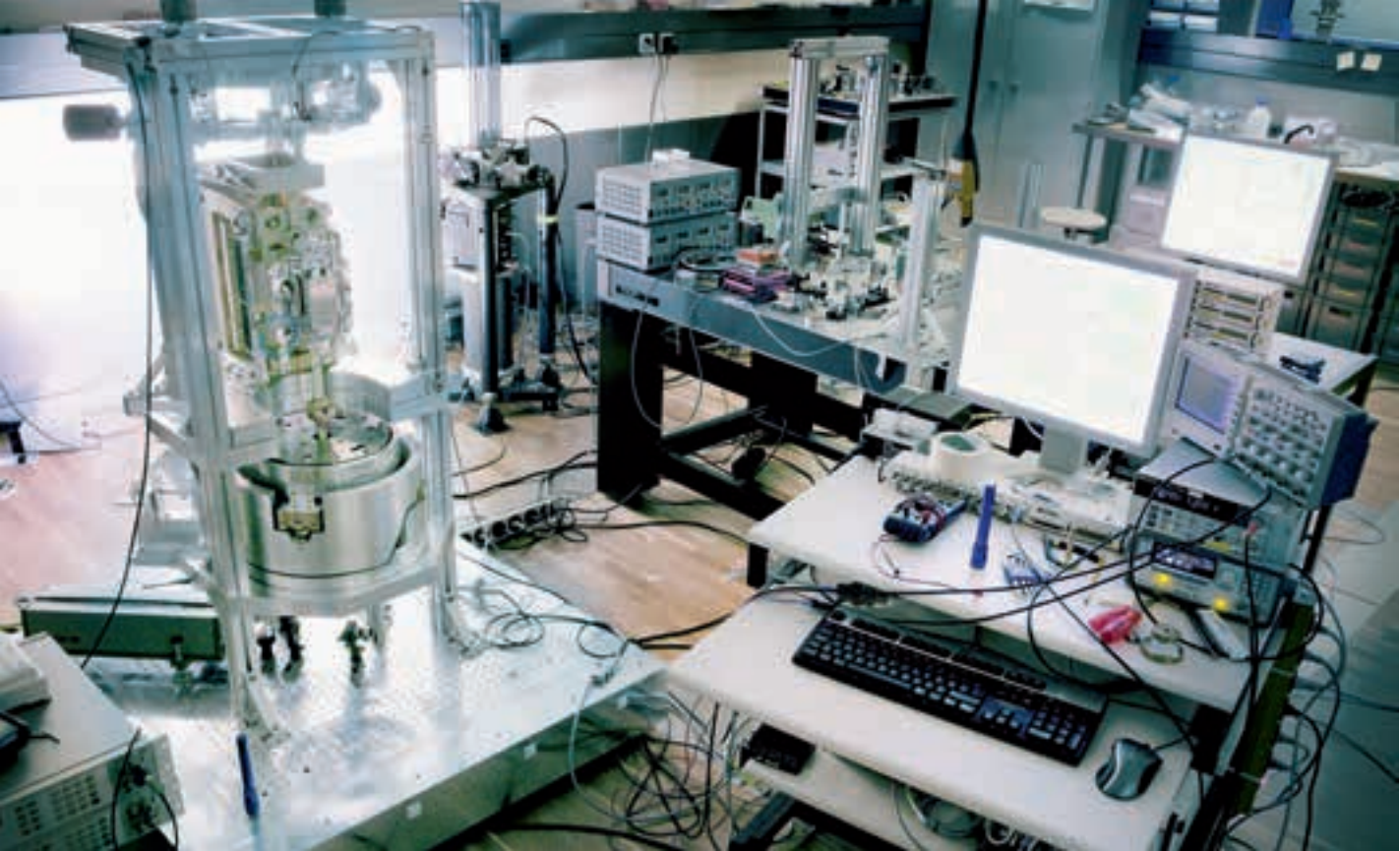
1. Ein geeignetes Artefakt wird als Einheitenrealisierung für die gewünschte Grösse ausgewählt. Bis zur Revision war im SI nur noch das Kilogramm auf diese Weise definiert: Das



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.

bungseinflüssen unabhängigen 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.

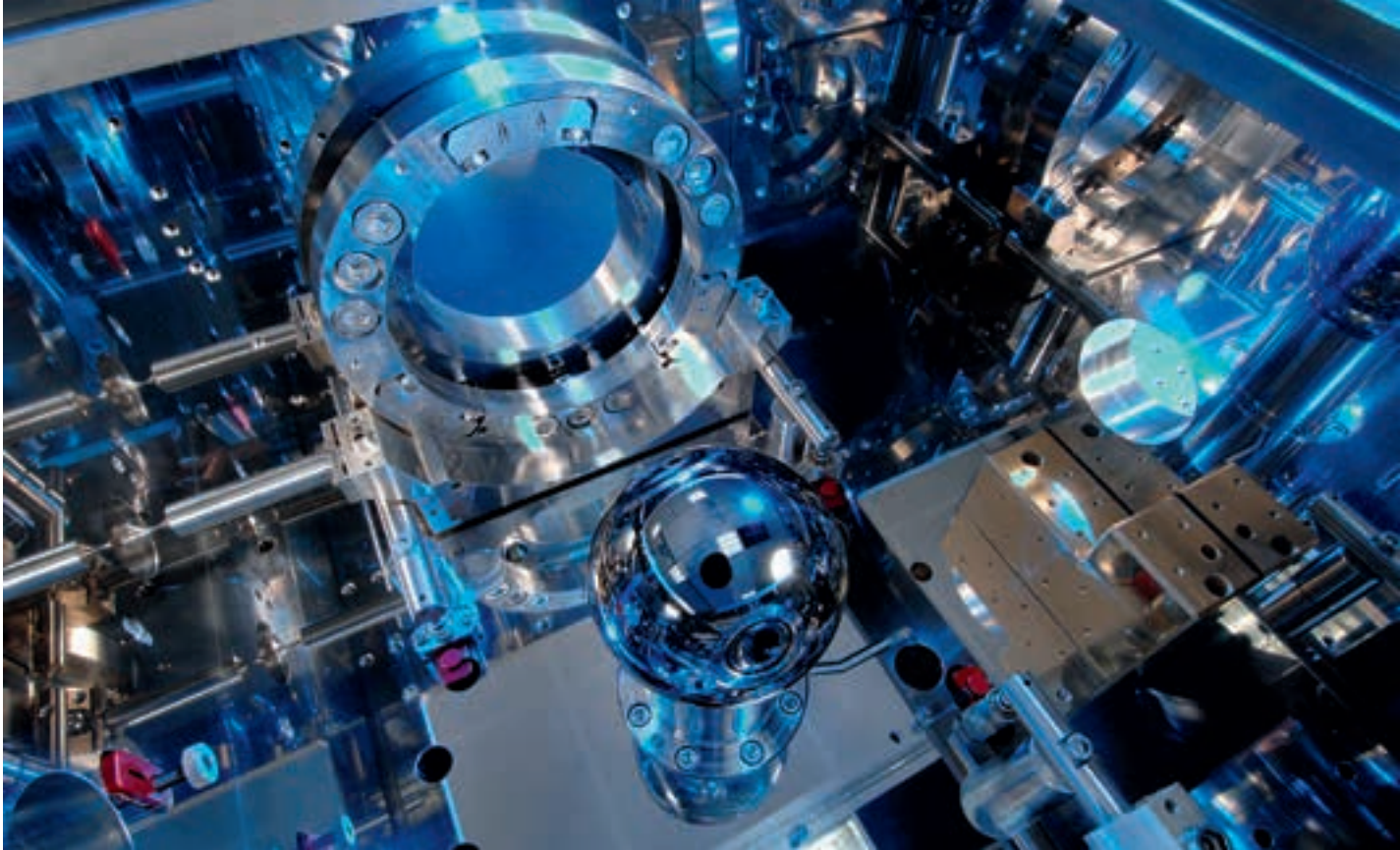
3. Einheiten können schliesslich auch auf Fundamentalkonstanten abgestützt werden. Diese treten auch als Proportionalitätskonstanten bzw. quantitative Verknüpfungspunkte in den physikalischen Theorien auf. Ihr Wert lässt sich nicht beeinflussen und verändert sich weder räumlich noch zeitlich. Konstanten 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}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.

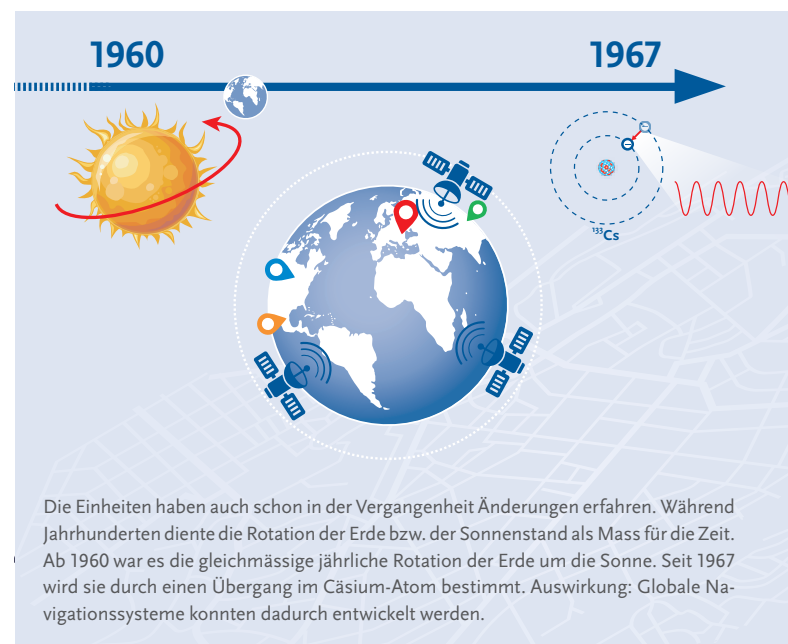
N_{A} : Avogadro-Konstante: Durch diese Festlegung der Avogadro-Konstante wird das Mol definiert als diejenige Stoffmenge, die $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ spezifizierte elementare Teilchen enthält. Der Link zum kg, wie er früher durch die Mol-Definition hergestellt wurde, entfällt. Damit hat die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

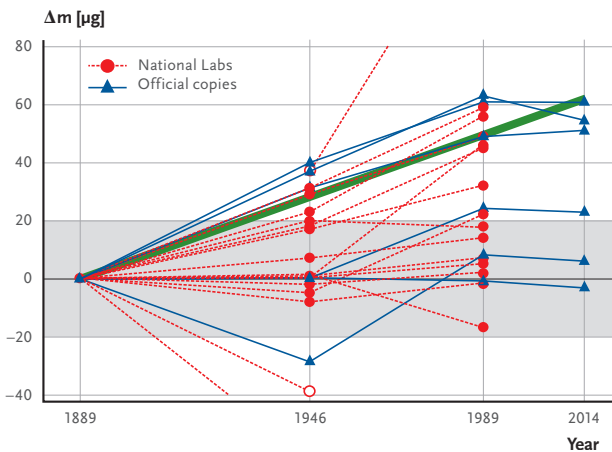
K_{cd} : Photometrisches Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von 540×10^{12} Hz. Mit dieser Festlegung bleibt die Definition der Candela gegenüber früher unverändert.

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_{A} und die Lichtausbeute K_{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.

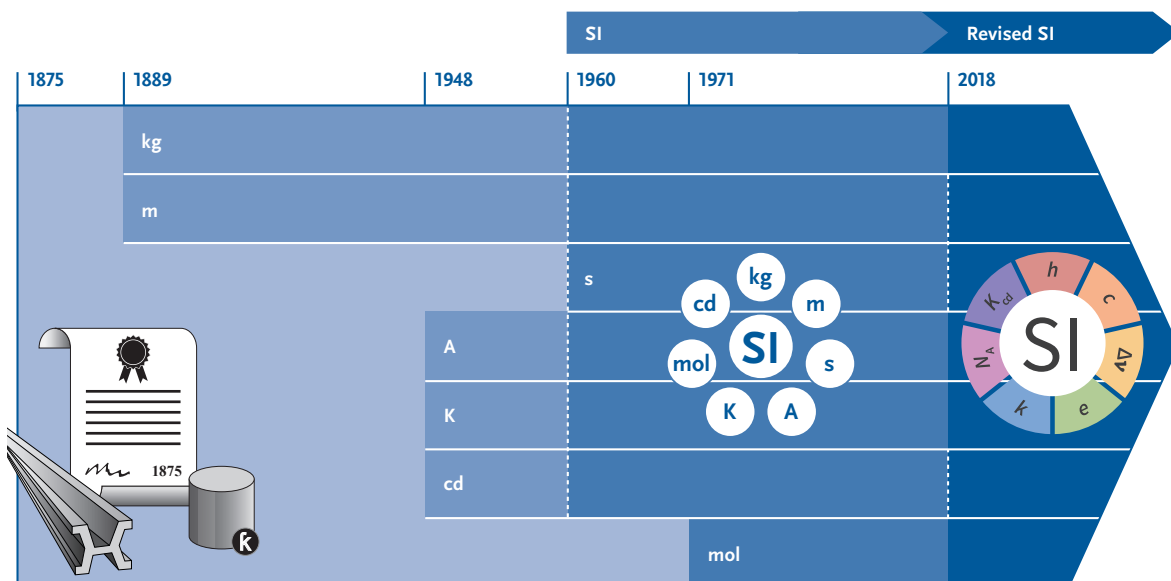
$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$

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 1.07×10^{-7} für Spannungsmessungen und 1.78×10^{-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}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

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

Elementarladung

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

Boltzmann-Konstante

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

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 XRCD method,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A19–A45, 2016.
- [6] I. A. Robinson and S. Schlamminger, «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_{A} for the revision of the SI,» *Metrologia*, vol. 55, no. 1, pp. L13–L16, 2018.

Une étape cruciale dans le développement du Système international d'unités

Le 16 novembre 2018, la Conférence générale des poids et mesures a adopté une révision fondamentale du Système international d'unités (SI). Un ensemble de sept constantes de définition, dont les valeurs sont fixées, redéfinit complètement le système et sert de base à la définition des unités. Cette révision permet de remplacer le dernier artefact du SI, à savoir le prototype international du kilogramme, utilisé depuis plus de cent ans, par une unité de masse basée sur des constantes naturelles. Par ailleurs, le kelvin, l'ampère et la mole sont également redéfinis.

Toutes les unités peuvent être réalisées à l'aide des sept constantes de définition du SI révisé et des lois de la physique. Ces constantes sont des constantes de référence qui fixent la norme pour l'ensemble du système. Par conséquent, il n'est plus nécessaire de faire la distinction entre les unités de base et les unités dérivées. Toutes les unités du SI sont en effet dérivées de l'ensemble des sept constantes et sont donc équivalentes.

Le SI révisé entrera en vigueur le 20 mai 2019 (Journée mondiale de la métrologie 2019). Il s'agira du changement le plus fondamental du SI depuis son introduction, et pourtant, il n'aura pas d'impact immédiat sur la vie quotidienne. Malgré la nouvelle définition du kilogramme, du kelvin et de la mole, les valeurs de ces unités resteront initialement inchangées. Après l'entrée en vigueur du SI révisé, des corrections seront nécessaires uniquement en ce qui concerne les unités électriques. Toutefois, ces corrections seront si petites qu'elles ne concerneront que quelques utilisateurs en dehors des laboratoires nationaux de métrologie.

Grâce à cette révision, le Système international d'unités est prêt pour l'avenir. Il est conçu pour permettre de meilleures réalisations des unités dans le temps sans être explicitement dicté par le système. Ainsi, le SI repose sur une base solide à long terme et reste sur le plan mondial le fondement pour que les mesures soient réalisées avec l'exactitude requise par la société, l'industrie et la science.

Una pietra miliare nell'ulteriore sviluppo del Sistema Internazionale di unità

Il 16 novembre 2018 la Conferenza generale dei pesi e delle misure ha adottato una revisione fondamentale del Sistema Internazionale di Unità (SI). Di recente, un insieme di sette costanti di definizione con valori fissi imposta completamente il sistema e costituisce la base per la definizione delle unità. Dopo più di un centinaio di anni di utilizzo, la revisione libererà dal servizio l'ultimo artefatto del SI, il chilogrammo prototipo, e lo sostituirà con un'unità di massa basata su costanti naturali. Inoltre, anche le definizioni del kelvin, dell'ampere e della mole sono soggette a modifiche.

Nel SI riveduto tutte le unità possono essere realizzate utilizzando le sette costanti di definizione fisse e con l'aiuto delle leggi della fisica. Le costanti sono gli elementi costitutivi e impostano lo standard per l'intero sistema. Di conseguenza, non è più necessario fare distinzione tra unità di base e unità derivate. Tutte le unità del SI sono derivate dall'insieme scelto di sette costanti e sono, quindi, equivalenti.

Il SI riveduto entrerà in vigore il 20 maggio 2019, la Giornata mondiale della metrologia 2019. Anche se in quel giorno sarà implementato il cambiamento più fondamentale dall'introduzione del SI, ciò non avrà alcun impatto immediato sulla vita quotidiana. Nonostante la nuova definizione, i valori delle unità chilogrammo, kelvin e mole rimangono inizialmente invariati. Solo per le unità elettriche saranno necessarie piccole correzioni. Tuttavia, queste correzioni sono così piccole da essere rilevanti solo per alcuni utenti al di fuori degli istituti nazionali di metrologia.

Grazie alla revisione, il Sistema Internazionale di Unità è pronto per il futuro. Esso è stato progettato per consentire migliori realizzazioni delle unità nel tempo, senza che esse siano esplicitamente dettate dal sistema. Quindi, il SI è su una solida base a lungo termine e rimane il fondamento in tutto il mondo per misurazioni con l'accuratezza richiesta da società, industria e scienza.

A milestone in the evolution of the International System of Units

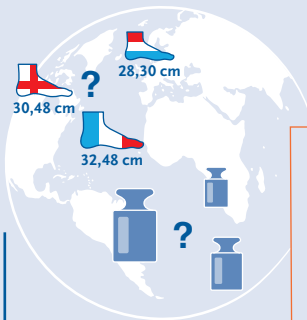
On 16 November 2018, the General Conference on Weights and Measures adopted a fundamental revision of the International System of Units (SI). Newly, a set of seven defining constants with fixed values completely sets the system and forms the basis for the definition of the units. After more than one hundred years of use, the revision will release the last artifact in the SI, the prototype kilogram, from service and replace it with a mass unit based on natural constants. In addition, also the definitions of the kelvin, ampere and mol are subject to change.

Using the seven fixed defining constants and with the help of the laws of physics all units can be realized in the revised SI. The constants are the building blocks and set the standard for the entire system. Consequently, it is no longer necessary to distinguish between base and derived units. All units of the SI are derived from the chosen set of seven constants and are, thus, equivalent.

The revised SI will enter into force on 20th May 2019, the World Metrology Day 2019. Although, on this day the most fundamental change since the introduction of SI will be implemented, it will not have any immediate impact on daily life. Despite the new definition, the values of the units kilogram, kelvin and mole remain initially unchanged. Only with the electrical units, small corrections will be necessary. However, these corrections are so small that they are only relevant to a few users outside the National Metrology Institutes.

Thanks to the revision, the International System of Units is fit for the future. It is designed to allow better realizations of the units over time without being explicitly dictated by the system. Thus, the SI is on a solid basis in the long term and remains the foundation worldwide for measurements with the accuracy required by society, industry and science.

Revision des Internationalen Einheitensystems (SI)



Gemessen wird seit Urzeiten

Jedoch fehlen einheitliche Definitionen der Masseinheiten, was überregionalen Handel sowie Technik und Forschung erschwert.

LÄNGE: m

1889 legt die 1. Generalkonferenz für Mass und Gewicht den Urmeter als Einheit für die Länge fest. Der Urmeter ist von der Länge des Meridianbogens durch Paris abgeleitet, wie er zur Zeit der französischen Revolution vermessen wurde.



Pol - Äquator = 10 Mio Meter

MASSE: kg

1889 legt die 1. Generalkonferenz für Mass und Gewicht das Urkilogramm, genannt IPK, als Einheit für die Masse fest. Das kg entspricht der Masse von 1 dm³ Wasser bei grösster Dichte.

BIPM Paris



1889

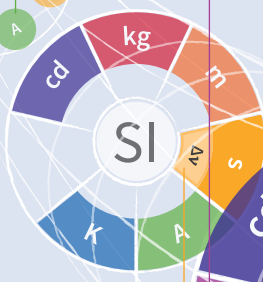
Die **Candela** ist die Einheit der Lichtstärke.

Das **Kelvin** ist die Einheit der (thermodynamischen) Temperatur.

Das **Ampere** ist die Einheit der Stromstärke.

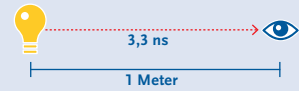
Das **Mol** ist die Einheit der Stoffmenge und dient der Mengenangabe bei chemischen Reaktionen.

1960
Einführung des SI



LÄNGE: m \leftrightarrow **c**

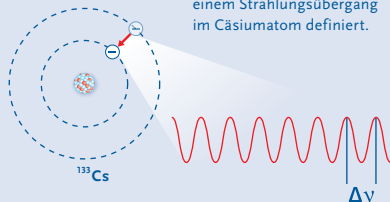
Seit 1983 basiert die Einheit Meter auf der Lichtgeschwindigkeit.



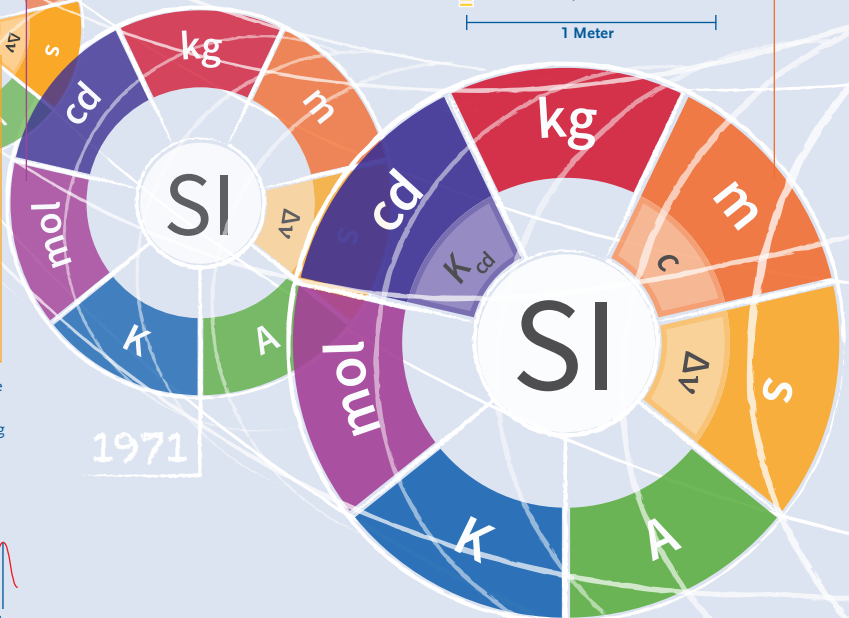
1967

ZEIT: s \leftrightarrow $\Delta\nu$

Seit 1967 wird die Sekunde durch die Frequenz von einem Strahlungsübergang im Cäsiumatom definiert.



1971



1983

STETIGE WEITERENTWICKLUNG

Die Anzahl der verwendeten Einheiten und die Definitionen wurden immer wieder geändert und den praktischen Bedürfnissen angepasst. Das Internationale Einheitensystem (SI) ist heute weltweit verbindlich eingeführt. Es geht auf das metrische System und den Metervertrag von 1875 zurück. Den heute verwendeten Namen hat es seit 1960.

DIE MASSEINHEITEN DES SI WERDEN NEU MIT KONSTANTEN DEFINIERT

Seit der im November 2018 beschlossenen Revision bilden 7 Konstanten die Basis des Systems und die Definitionsgrundlage aller darin verwendeten Einheiten. Dies gilt auch für die Einheit der Masse, die bis jetzt noch durch das Urkilogramm in Paris definiert wurde. In Zukunft wird das kg mit den Naturkonstanten h , c und $\Delta\nu$ und geeigneten Experimenten (Wattwaage oder Avogadroprojekt) realisiert.

Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands im ^{133}Cs -Atom
 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$

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

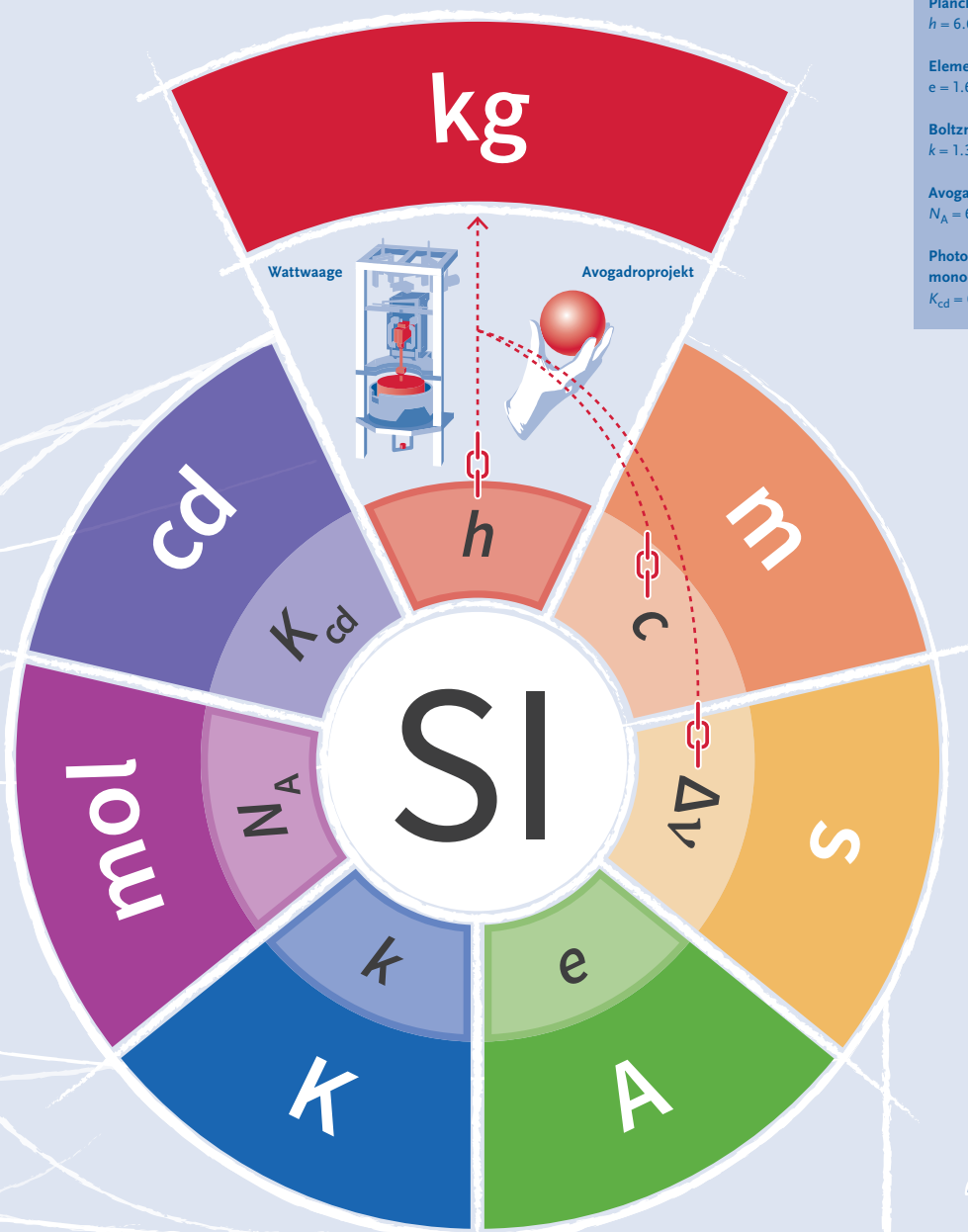
Planck-Konstante
 $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$ ($\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)

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

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

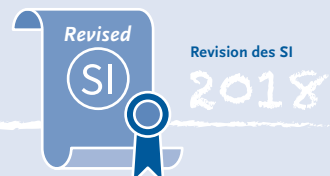
Avogadro-Konstante
 $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$

Photometrisches Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$
 $K_{\text{cd}} = 683\text{ lm W}^{-1}$

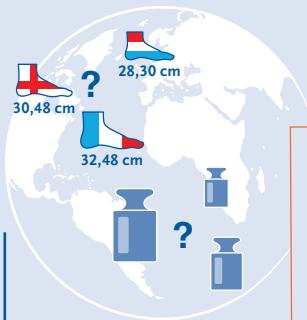


www.metas.ch

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS
 Illustration: Nadja Stadelmann



Révision du Système international d'unités (SI)



L'être humain effectue des mesures depuis la nuit des temps. Mais les unités de mesure ne sont pas définies de manière uniformisée, ce qui complique le commerce suprarégional, la technologie ou encore la recherche.

LONGUEUR: m

En 1889, la 1^{re} Conférence générale des poids et mesures (CGPM) définit le prototype du mètre comme unité de longueur. Le prototype du mètre dérive de la longueur de l'arc du méridien traversant Paris, tel que mesuré à l'époque de la Révolution française.



Pôle - Equateur = 10 Mio mètre

MASSE: kg

En 1889, la 1^{re} Conférence générale des poids et mesures (CGPM) définit le prototype du kilogramme, nommé IPK, comme unité de masse. Le kg équivaut à la masse d'1 dm³ d'eau au maximum de sa densité.

BIPM Paris



1889

La **candela** est l'unité qui mesure l'intensité lumineuse.

Le **kelvin** est l'unité de température (thermodynamique).

L'**ampère** est l'intensité du courant électrique.

La **mole** est l'unité de quantité de matière servant à désigner les quantités dans les réactions chimiques.

1960
Introduction du SI

LONGUEUR: m \leftrightarrow c

Depuis 1983, l'unité du mètre se base sur la vitesse de la lumière.



1967



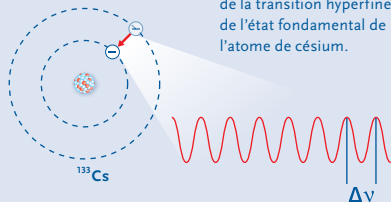
1971



1983

TEMPS: s \leftrightarrow Δv

Depuis 1967, la seconde est définie par la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium.



EN CONSTANTE ÉVOLUTION

Le nombre d'unités de mesure utilisées et leur définition ont été régulièrement modifiées et adaptées aux besoins de la pratique. Le Système international d'unités (SI) est aujourd'hui contraignant dans le monde entier. Il repose sur le système métrique et la Convention du Mètre de 1875. Il porte son nom actuel depuis 1960.

LES UNITÉS DE MESURE DU SI SONT REDÉFINIES AVEC DES CONSTANTES

Avec la révision décidée en novembre 2018, ce sont désormais 7 constantes qui constituent le fondement du système et la base de définition de toutes les unités utilisées. C'est le cas également pour l'unité de masse qui est encore à l'heure actuelle définie en fonction du prototype international du kilogramme à Paris. À l'avenir, le kg sera défini à l'aide des constantes de la nature h , c et $\Delta\nu$ ainsi que des expériences appropriées (Balance du Watt ou projet Avogadro).

Fréquence de la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome ^{133}Cs
 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$

Vitesse de la lumière dans le vide
 $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$

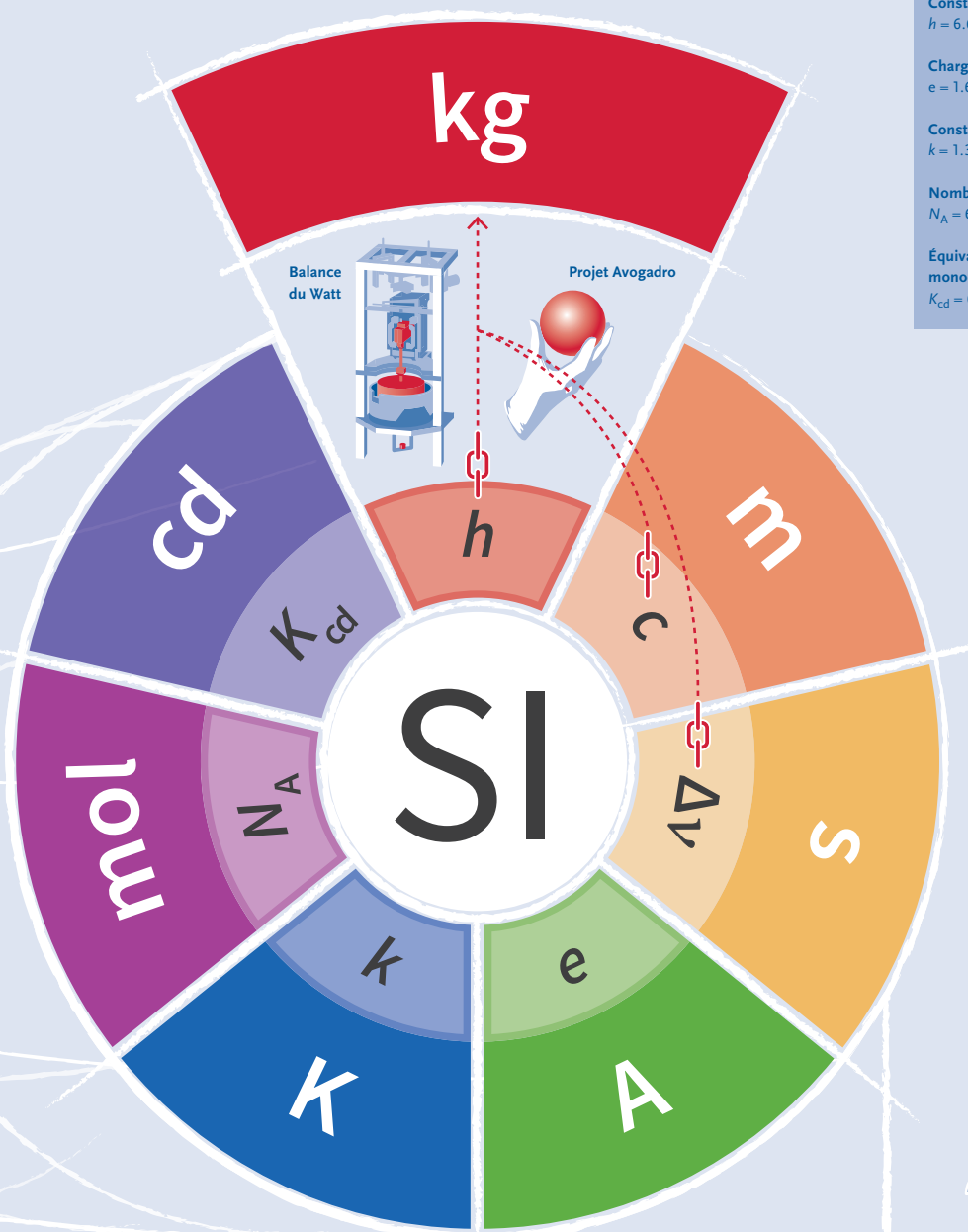
Constante de Planck
 $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$ ($\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$)

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

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

Nombre d'Avogadro
 $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$

Équivalent photométrique d'un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$
 $K_{\text{cd}} = 683\text{ lm W}^{-1}$



www.metas.ch

Institut fédéral de métrologie METAS

Illustration: Nadja Stadelmann



Adieu, «grand K» !

1: Ein Zylinder aus Platin und Iridium definierte über ein Jahrhundert die Einheit der Masse: der Internationale Prototyp des Kilogramms (IPK), auch «Le Grand K» genannt. Die Masse des IPK war per Definition exakt ein Kilogramm. Er wurde 1879 vom Londoner Goldschmied Johnson Matthey gegossen (Platin 90% und Iridium 10%) und poliert. Seitdem wird er unter drei Glasglocken in einem dreifach gesicherten Tresor in Sèvres in der Nähe von Paris aufbewahrt. | *Durant plus d'un siècle, l'unité de masse était définie par un cylindre de platine iridié : le prototype international du kilogramme (IPK), appelé également «Le grand K».* La masse d'IPK était par définition exactement un kilogramme. Il fut coulé et poli en 1879 par l'orfèvre londonien Johnson Matthey (90% de platine et 10% d'iridium). Depuis, il est conservé sous trois cloches de verre dans un coffre-fort situé à Sèvres, à proximité de Paris.

2: Duplikate des IPK wurden hergestellt und per Los an die am Metervertrag beteiligten Ländern verteilt. Die Schweiz erhielt 1889 die Kopie Nr. 38, die seither im METAS unter zwei Glasglocken aufbewahrt wird. Dieses «Schweizer Urkilogramm» war (und ist bis die Neudefinition am 20.05.2019 in Kraft sein wird) für alle Waagen in der Schweiz massgebend. | *Des répliques d'IPK furent réalisées et remises par tirage au sort aux pays signataires de la Convention du Mètre. La Suisse reçut en 1889 la copie no 38 qui est conservée depuis à METAS. Ce «prototype suisse du kilogramme» était la référence pour toutes les balances de Suisse (et le restera jusqu'à l'entrée en vigueur de la nouvelle définition le 20 mai 2019).*



3: Die Genauigkeit jeder Messung einer Masse, hängt davon ab, wie eng die verwendete Referenzmasse mit dem IPK verknüpft werden kann. Metrologen aus aller Welt brachten ihre Kopien 1949, 1989 und 2014 nach Paris, um sie direkt mit dem IPK zu vergleichen. | *La précision de chaque mesure de masse dépend du nombre de comparaisons intermédiaires qui la relie à l'IPK. Des métrologues du monde entier apportèrent leur copie à Paris en 1949, 1989 et 2014 afin de les comparer directement à l'IPK.*

4: Jeder Vergleich führt zu einer Erhöhung der Messunsicherheit. Dadurch erhöht sich die Unsicherheit, je weiter man sich auf der Massenskala vom Kilogramm entfernt. | *Chaque comparaison entraîne une augmentation de l'incertitude. Par conséquent tout «éloignement» du kilogramme dans l'échelle de masse, conduit à une augmentation de l'incertitude.*



5: Problematischer ist jedoch die Tatsache, dass sich die Masse jedes einzelnen Referenzmasses im Laufe der Zeit ändern kann. Das müsste auch für den IPK gelten, dieser bleibt jedoch per Definition genau ein Kilogramm. | *Toutefois, un problème majeur provient du fait que la masse de chaque référence est susceptible de varier dans le temps. En principe, ceci devrait également être valable pour IPK. Et pourtant, sa masse reste, par définition exactement un kilogramme.*



6: Störend ist die Abhängigkeit von einem Referenzmass, das nur an einer Stelle vorhanden ist. Es könnte beschädigt oder gestohlen werden. Dagegen ist eine Definition mit Bezug auf Naturkonstanten überall anwendbar und kann jederzeit realisiert werden. | *Un autre aspect dérangent est la dépendance vis-à-vis d'une masse de référence qui n'existe qu'en un seul endroit. Elle pourrait en effet être endommagée, ou même volée. En revanche, une définition fondée sur des constantes de la nature est utilisable partout et peut être réalisée en tout temps.*

7: Damit ein Kilogramm ein Kilogramm bleibt, schufen Metrologen mithilfe der Watt-Waage und des Avogadro-Projekts eine Verbindung vom IPK zur Planck-Konstante h . Seine Wichtigkeit ist in diesem Wert verewigt. | *Afin qu'un kilogramme reste un kilogramme, les métrologues ont établi, à l'aide de la balance du watt et du projet Avogadro, un lien entre la constante de Planck h et IPK. Son importance est alors pérennisée au travers de h .*



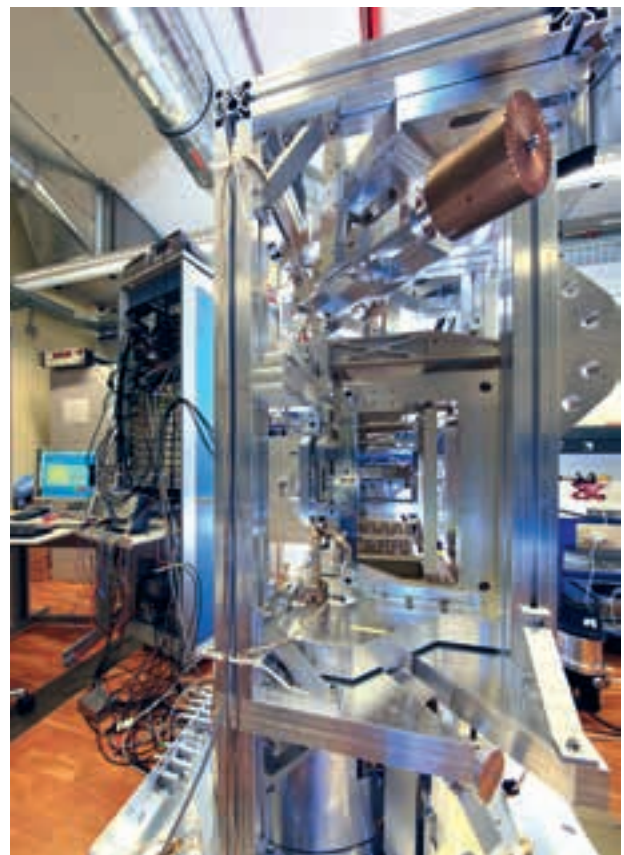
La réalisation du kilogramme

Dans le SI révisé, la définition du kilogramme devient:

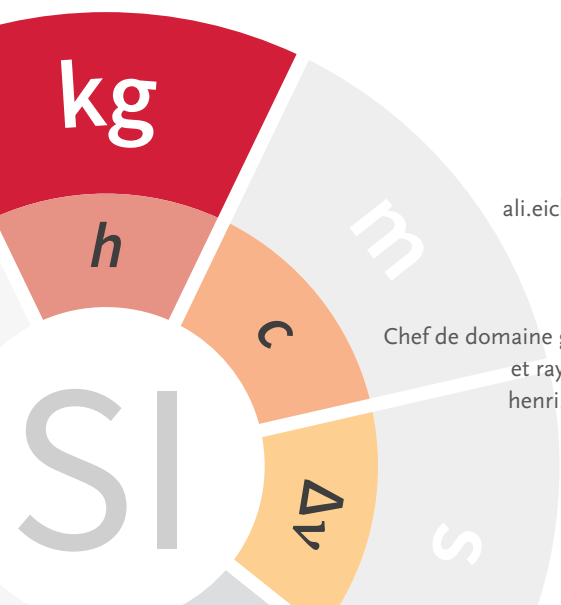
Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Aujourd'hui, il existe deux possibilités de réalisation directe de la nouvelle unité de masse basée sur la constante de Planck. La première est un instrument appelé balance du watt, ou balance de Kibble, qui effectue une comparaison des puissances électrique et mécanique virtuelles. La seconde approche fait intervenir une sphère monocristalline de silicium. Pour le moment, aucune de ces expériences n'a atteint le niveau requis pour procéder à une réalisation directe. Pendant une période transitoire d'une durée indéterminée, la nouvelle unité de masse sera réalisée par l'intermédiaire d'une comparaison circulaire d'un ensemble de masses entre les différents laboratoires possédant une possibilité de réalisation du kg selon la nouvelle définition.

METAS poursuit la mise au point d'une balance du watt depuis plusieurs années. La version 2 (voir photo 1) est en phase d'optimisation pour participer à la comparaison circulaire qui sera mise en place dans le courant de l'année 2019. La balance de METAS est le résultat d'une collaboration avec METTLER-TOLEDO, le CERN et l'EPFL. La comparaison entre puissances électrique et mécanique virtuelles s'effectue par l'intermédiaire de deux phases de mesure. La première, dite statique, résulte de l'équilibre du poids de la masse de test avec la force électromagnétique produite par un courant circulant dans une bobine plongée dans un champ magnétique. La seconde, dite, dynamique permet un étalonnage du circuit électromagnétique en mesurant la tension induite aux bornes de la bobine lors d'un déplacement vertical de celle-ci.



1: Balance du watt de METAS



Contact:
Dr. Ali Eichenberger
ali.eichenberger@metas.ch
+41 58 387 05 51

Dr. Henri Baumann
Chef de domaine grandeurs mécanique
et rayonnements ionisants
henri.baumann@metas.ch
+41 58 387 05 51



Die Realisierung des Meters

Im revidierten SI erhält die Definition der Einheit Meter eine neue Formulierung:

Der Meter (Symbol m) ist die SI Einheit der Länge. Er wird definiert durch die Konstante der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 299 792 458 festgelegt, wenn sie in der Einheit m s^{-1} angegeben wird und die Sekunde durch $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ definiert ist.

Mit dieser neuen Formulierung wird noch deutlicher betont, dass durch die Meterdefinition der Lichtgeschwindigkeit ein exakter Wert, in der Einheit m/s , zugeordnet wird. Inhaltlich bleibt die neue Definition zur heute gültigen von 1983 unverändert. Davor basierte die Definition der Einheit Meter auf der Wellenlänge der Krypton 86 Strahlung. Diese wurde 1960 eingeführt, um den Meter-Prototyp aus Platin-Iridium aus dem Jahr 1889 abzulösen.

Die praktische Umsetzung dieser Definition für eine Längenmessung geschieht entweder über eine Laufzeitmessung des Lichtes über die zu messende Wegstrecke (so funktionieren optische Distanzmessgeräte), oder für genauere Messungen mithilfe der Interferometrie. Dabei werden Wellenlängen eines Laserlichtstrahls auf einer abgefahrenen Wegstrecke entlang einer Massverkörperung abgezählt und interpoliert. Dies ermöglicht einen ausserordentlich grossen Messbereich von mehreren Dutzend Metern bis zu Bruchteilen von Nanometern. Über die Beziehung $\lambda = c/\nu$ kann über die festgelegte Lichtgeschwindigkeit c die Wellenlänge λ einer monochromatischen elektromagnetischen Welle im Vakuum in Bezug zu deren Frequenz ν gebracht werden. Letztere ergibt sich aus der Definition der Sekunde.

Die sogenannte «mise en pratique» listet optische Frequenzen einer grossen Zahl von Absorptionslinien auf und beschreibt Verfahren und Parameter, um Laser auf diese Frequenzen zu stabilisieren. Am METAS wird der Meter seit knapp 30 Jahren durch Helium-Neon-Laser realisiert, deren optische Frequenz auf einen Hyperfeinstrukturübergang des Iodmoleküls $^{127}\text{I}_2$

stabilisiert wird. Damit wird eine relative Messunsicherheit von $2.5 \cdot 10^{-11}$ erreicht, was einer Länge von 1 mm bezogen auf den Erdumfang entspricht.

Um die Realisierungen der Einheit Meter am METAS zu validieren, werden die iodstabilisierten Laser regelmässig untereinander und auch international verglichen. Seit der Erfindung des optischen Frequenzkamms 1998 gibt es eine elegante und relativ einfache Möglichkeit, optische Frequenzen direkt in Bezug zur Definition und Realisierung der Sekunde zu bringen. So können heute die iodstabilisierten Laser der Meter-Basis über eine Glasfaser und einen zwischengeschalteten Diodenlaser direkt mit dem faseroptischen Femtosekunden-Frequenzkamm des Labors Photonik, Zeit und Frequenz verglichen und damit auf die Zeit-Basis des METAS zurückgeführt werden.



Kontakt:
Dr. Felix Meli
Laborleiter Länge, Nano- und Mikrotechnik
felix.meli@metas.ch
+41 58 387 03 46

La réalisation de la seconde

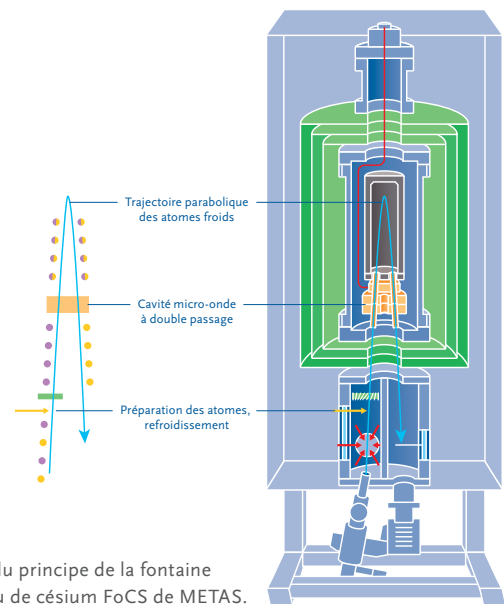
Dans le SI révisé, la définition de la seconde devient:

La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1} .

D'un point de vue historique, la seconde a tout d'abord été définie par l'observation de la rotation de la Terre autour de son axe la mesure de la durée du jour solaire moyen. Une journée comptant 86 400 secondes, il était ainsi possible d'en déduire la valeur de la seconde. Une telle réalisation n'était cependant pas satisfaisante du fait de l'instabilité naturelle de la vitesse de rotation de la Terre. Les progrès réalisés en physique atomique ont permis d'envisager une toute nouvelle approche, se basant cette fois-ci sur la mesure de fréquences de transitions atomiques très stables. Cette approche a donné naissance à une nouvelle définition de la seconde, entrée en vigueur en 1967. Cette définition est toujours utilisée, et l'introduction de la nouvelle révision du Système international d'unités (SI) aura pour unique conséquence que la fréquence de la transition $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Hz permettra d'exprimer la seconde au travers des formules suivantes :

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

La seconde est l'unité dont dépendent directement le mètre, le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la candela. Sa réalisation se fait aujourd'hui à l'aide de fontaines à jets de césium, comme la fontaine à jet de césium continu FoCs de METAS[1]. Dans un tel étalon primaire, les atomes sont tout d'abord refroidis à des températures de l'ordre de quelques micro kelvin, à l'aide de faisceaux lasers. Ils sont ensuite lancés sur une trajectoire parabolique, comme le schéma de la figure 1 le montre. Tout au long de leur trajectoire, les atomes vont ainsi pouvoir passer deux fois à travers une cavité micro-onde. Une telle méthode, dite interrogation de Ramsey, permet une mesure très exacte de la fréquence de la transition. De telles fontaines permettent d'atteindre des incertitudes relatives de l'ordre de quelques 10^{-15} à 10^{-16} sur la détermination de la



1: Schéma du principe de la fontaine à jet continu de césium FoCS de METAS.

fréquence de transition. Il existe de par le monde une vingtaine de fontaines contribuant à l'ajustage du Temps Atomique International (TAI). La réalisation de TAI, ainsi que du Temps Universel Coordonné (UTC) qui en découle, se fait à travers la comparaison à distance d'un grand nombre d'horloges atomiques plus simples que les fontaines, et possédant une très bonne stabilité, mais étant moins exactes. Le résultat de ces comparaisons fournit une réalisation de la seconde très stable, mais dont la vraie valeur est ensuite ajustée grâce aux contributions des fontaines.

Référence

- [1] A. Jallageas, L. Devenoges, M. Petersen, J. Morel, L.G. Bernier, D. Schenker, P. Thomann and T. Südmeyer, «First uncertainty evaluation of the FoCS-2 primary frequency standard». Metrologia, 55, (3), 366–385.



Contact:
Dr. Jacques Morel
Chef du laboratoire photonique, temps et fréquence
jacques.morel@metas.ch
+41 58 387 03 50

La réalisation de l'ampère

Dans le SI révisé, la définition de l'ampère devient:

L'ampère, symbole A, est l'unité SI du courant électrique. Il est défini en prenant la valeur numérique fixe de la charge élémentaire e à $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$, exprimée dans l'unité C, qui est égale à As , où la seconde est définie en terme de $\Delta\nu_{Cs}$.

À METAS, depuis le début des années 1990, les unités électriques ne sont pas réalisées grâce à l'ampère, mais grâce à deux effets quantiques: l'effet Hall quantique et l'effet Josephson [1–2], qui permettent d'obtenir de bien meilleures incertitudes de mesure pour la résistance et la tension électrique.

L'effet Hall quantique se produit à température cryogénique dans un gaz d'électron bidimensionnel (cf. fig. 1). La résistance de Hall est quantifiée et donnée par : $R_H(i) = h/ie^2$ ou h est la constante de Planck, e la charge élémentaire et i l'indice du plateau (cf. fig. 1). La résistance de Hall est une grandeur universelle qui ne dépend d'aucun paramètre de l'échantillon tel que le matériel utilisé pour la croissance du gaz bidimensionnel, l'indice du plateau, la largeur, la mobilité ou la température [1].

L'effet Josephson est observé dans des jonctions à effet tunnel, formées de deux électrodes supraconductrices séparées par une mince couche d'isolant [2]. Une fois refroidie à température cryogénique et soumise à une radiation électromagnétique de fréquence f , la tension aux bornes de la jonction est quantifiée et donnée par : $V_n = n h/2e f$. La tension de Josephson V_n est également une valeur universelle, liée à la quantification du flux magnétique et à l'invariance de jauge [2]. Actuellement, la valeur de la constante de von Klitzing $R_K = h/e^2$ et la valeur de la constante de Josephson $K_J = 2e/h$ sont fixées depuis 1990 à des valeurs conventionnelles R_{K-90} et K_{J-90} , dépourvues d'incertitude.

En 2019, la redéfinition du SI va donner une valeur fixe, sans incertitude à la charge élémentaire e et à la constante de Planck h (cf. 2). Cette nouvelle définition va conduire à des valeurs numériques différentes de R_{K-90} et K_{J-90} . Néanmoins, la différence sera faible, imperceptible pour la plupart des utilisateurs du SI. En effet, l'écart relatif sur K_J sera de -0.107 ppm et de 0.018 ppm sur R_K .

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

$$h = 6.626\,070\,150 \times 10^{-34} \text{ Js (exacte)}$$

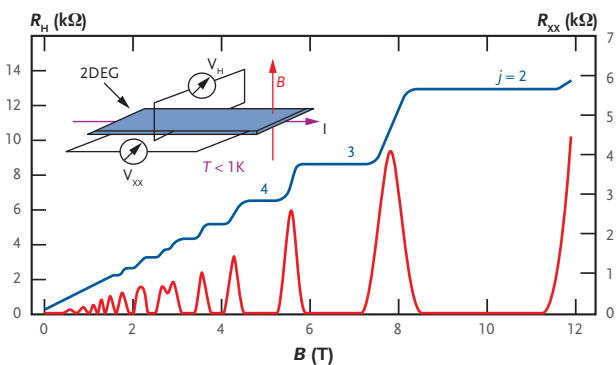
$$K_J = 483\,597.848\,416\,984 \text{ GHz/V}$$

$$R_K = 25\,812.807\,459\,304\,5 \, \Omega$$

2: Valeurs exactes données à la charge élémentaire et à la constante de Planck ainsi que les valeurs calculées à 15 digits pour les constantes de von Klitzing et de Josephson.

Références

- [1] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, The quantum Hall effect as an electrical resistance standard, Rep. Prog. Phys. 64, pp. 1603–1655, 2001.
- [2] B. Jeanneret and S. P. Benz, Application of the Josephson Effect in Electrical Metrology, Eur. Phys. J. Special Topics 172, pp. 181–206, 2009.



1: Observation de l'effet Hall quantique dans un gaz bidimensionnel d'électrons refroidi à $T < 1K$. Pour certaines valeurs du champ d'induction B , la résistance de Hall R_H est quantifiée en unité de h/e^2 , et la résistance longitudinale R_{xx} s'annule.



Contact:
Dr. Blaise Jeanneret
blaise.jeanneret@metas.ch, +41 58 387 03 03

Die Realisierung des Kelvin

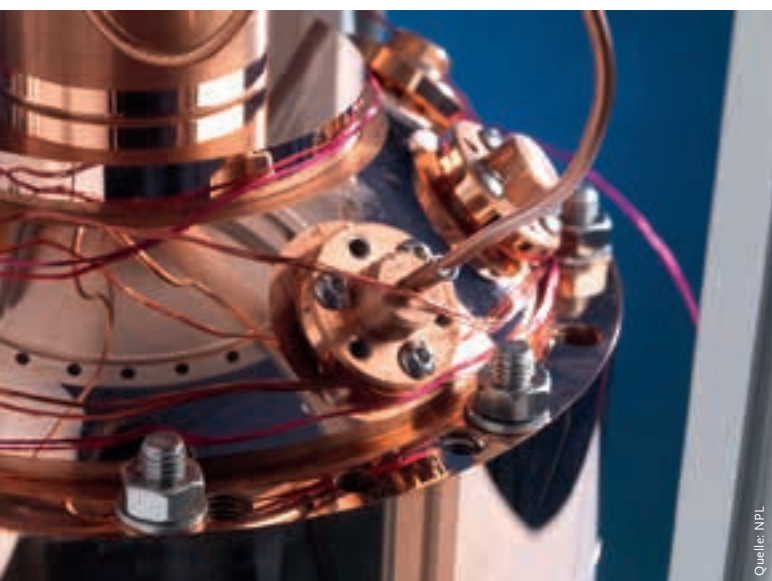
Im revidierten SI ist die Temperatureinheit Kelvin wie folgt definiert:

Das Kelvin (Symbol K) ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es wird definiert durch die Boltzmann-Konstante k . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 1.380649×10^{-23} festgelegt, wenn sie in der Einheit J K^{-1} bzw. $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ definiert sind.

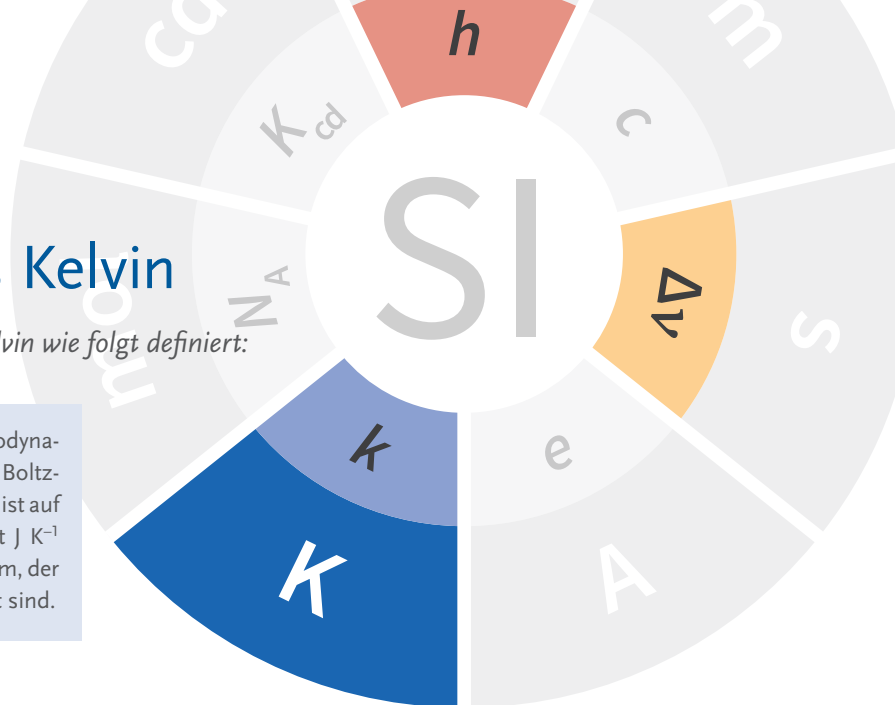
Die neue Kelvin-Definition besagt, dass 1 Kelvin einem Bereich der thermodynamischen Temperatur T entspricht, der eine Änderung der thermischen Energie kT um 1.380649×10^{-23} J bewirkt.

Das Kelvin wurde 1948 als Basiseinheit in das metrische System aufgenommen. Von diesem Zeitpunkt bis zur aktuellen Revision war die thermodynamische Temperaturskala durch zwei Fixpunkte definiert; einerseits durch den naturgesetzlich vorgegebenen absoluten Nullpunkt und andererseits durch den Tripelpunkt des Wassers, dem der Wert 273.16 K zugeordnet wurde. Der Tripelpunkt des Wassers ist der Zustand, in dem alle drei Phasen des Wassers, fest, flüssig und gasförmig, miteinander im Gleichgewicht sind. Das neu definierte Kelvin ist jetzt direkt von der Energieeinheit Joule abgeleitet, indem der Boltzmann-Konstanten und damit dem Proportionalitätsfaktor zwischen thermodynamischer Temperatur und thermischer Energie ein fixer Wert zugeordnet wird. Der Ursprung dieser Definition ist die statistische Mechanik, wo die thermodynamische Temperatur in einem System als ein Mass für die mittlere thermische Energie pro Freiheitsgrad steht.

Die Celsius-Skala behält auch im revidierten SI ihre Gültigkeit. Diese ist definiert durch $T - 273.15$ K. Die Einheit Celsius, Symbol $^{\circ}\text{C}$, ist per Definition gleich gross wie das Kelvin.



Quelle: NPL



Der Wert der Boltzmann-Konstanten ist so gewählt, dass die Temperatur des Tripelpunkts T_{TPW} zum Zeitpunkt der Revision bei 273.16 K bleibt. Gegenüber früher hat jedoch T_{TPW} eine relative Standard-Unsicherheit von 3.7×10^{-7} (= ca. 0.1 mK). Dabei handelt es sich um die Unsicherheit, mit der k vor der Revision experimentell bestimmt werden konnte.

Für die Realisierung der Temperatur-Einheit können verschiedene primäre Methoden eingesetzt werden. Im Raumtemperaturbereich ist die genaueste Methode die sog. Akustische Gas-Thermometrie. Diese Methode beruht auf der Beziehung der Schallgeschwindigkeit u in einem idealen Gas und der thermodynamischen Temperatur T über $u^2 = \gamma kT/m$. Dabei ist γ das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und konstantem Volumen und m die mittlere molare Masse des Gases. Im Experiment wird die Schallgeschwindigkeit in einem Kugelresonator bestimmt (siehe Bild).

Die Realisierung der Temperaturskala über einen grossen Temperaturbereich mit primären Methoden ist (immer) noch sehr aufwendig. In der Praxis wird man deshalb auch in Zukunft die sog. «praktische» Temperaturskala, im Moment die Internationale Temperaturskala ITS-90, anwenden. In dieser Skala sind eine ganze Reihe von hochstabilen Temperaturfixpunkten festgelegt. Das sind in der Regel Tau- oder Schmelzpunkte von Metallen, deren Temperaturen mit primären Methoden ermittelt und danach definitionsgemäss fixiert werden. Zwischen den Fixpunkten werden die Temperaturen mit Hilfe von in der Definition der Skala ebenfalls festgelegten Thermometertypen interpoliert. Im Bereich zwischen -38.8344 $^{\circ}\text{C}$ und 29.7646 $^{\circ}\text{C}$ beispielsweise sind der Tripelpunkt des Quecksilbers und des Wassers sowie der Schmelzpunkt des Galliums als Fixpunkte und das Platinwiderstandsthermometer als Interpolationsinstrument vorgeschrieben.

Das METAS ist in den Experimenten zur Bestimmung der absoluten thermodynamischen Temperatur nicht aktiv. Die nationale Temperaturskala in der Schweiz beruht auf der aktuell gültigen praktischen Temperaturskala (zurzeit ITS-90).

Die Realisierung des Mols

Im revidierten SI ist das Mol wie folgt definiert:

Das Mol (Symbol mol) ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält exakt $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ Einzelteilchen. Diese Zahl wird Avogadro-Zahl genannt und entspricht der Avogadro-Konstante N_A , wenn diese in der Einheit mol^{-1} angegeben wird.

Die Stoffmenge (Symbol n) eines Systems ist ein Mass für die Anzahl an bestimmten Einzelteilchen. Einzelteilchen können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen, andere Partikel oder Entitäten oder Gruppen von Partikeln oder Entitäten sein.



Die neue Definition ersetzt diejenige von 1971, wo ein Mol der Stoffmenge eines Systems entspricht, welches aus ebenso vielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0.012 Kilogramm des ^{12}C enthalten sind. Der neue Wortlaut, mit der Definition der Einheit über die Avogadro Zahl und anschliessende Definition der Grösse Stoffmenge, wird durch die anfänglich sehr skeptisch eingestellten chemischen Gesellschaften unterstützt und kann einfach vermittelt werden.

Die Definition des Mols setzt kein bestimmtes Experiment für die Realisierung voraus [1]. Vielmehr kann jede Methode, welche die Anzahl Mol rückführbar auf die sieben Referenzkonstanten bestimmt, angewandt werden. Die momentan genaueste Realisierung des Mols resultierte aus dem Experiment zur Bestimmung der Avogadro-Konstante und beinhaltete die Bestimmung der Anzahl ^{28}Si in einem mit ^{28}Si angereicherten Silizium-Einkristall mittels volumetrischer und Röntgen-interferometrischer Messungen. In diesem Experiment konnte das Mol mit einer relativen Unsicherheit unter 2×10^{-8} realisiert werden.

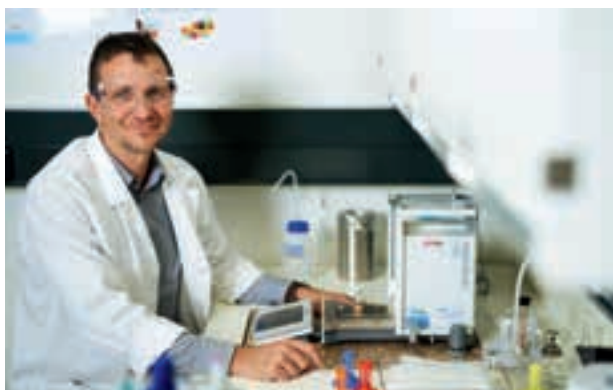
In der Praxis verlangen alle chemischen Messungen die Realisierung abgeleiteter Einheiten der Stoffmenge, wie beispielsweise die Stoffmengenkonzentration (mol/m^3), der Stoffmen-

gehalt (mol/kg) oder der Stoffmengenanteil (mol/mol). Hierzu werden an den nationalen Metrologieinstituten primäre Methoden verwendet. Als primär gelten Methoden, welche die höchsten metrologischen Eigenschaften aufweisen, d.h. ihre Anwendung ist vollständig beschrieben und verstanden, ein vollständiges Messunsicherheitsbudget in SI-Einheiten kann erstellt werden und sie beziehen sich nicht auf eine Referenz derselben Grösse.

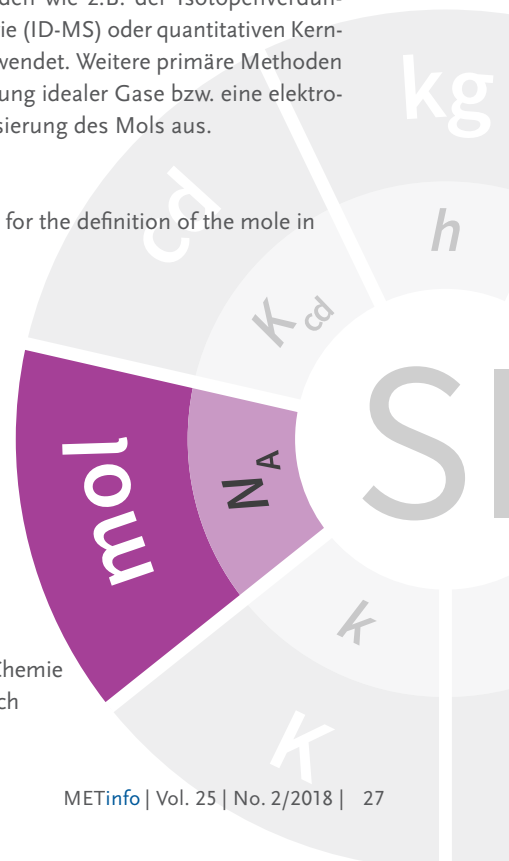
Die am häufigsten verwendete primäre Methode zur Realisierung des Mols ist die Gravimetrie, da die Masse einer Probe relativ einfach und genau bestimmt werden kann. Bei der Verwendung hochreiner Substanzen kann das Mol mit relativen Unsicherheiten unter 1×10^{-4} realisiert werden. Diese zertifizierten Substanzen werden anschliessend für die Rückführung primärer Vergleichsmethoden wie z.B. der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (ID-MS) oder quantitativen Kernspinresonanz (qNMR) verwendet. Weitere primäre Methoden nutzen die Zustandsgleichung idealer Gase bzw. eine elektrolytische Reaktion zur Realisierung des Mols aus.

Referenz

[1] Draft mise en pratique for the definition of the mole in the SI, www.bipm.org.



Kontakt:
Dr. Hanspeter Andres
Bereichsleiter Analytische Chemie
hanspeter.andres@metas.ch
+41 583 87 09 46



Die Realisierung der Candela

Im revidierten SI ist die Candela wie folgt definiert:

Die Candela (Symbol cd) ist die SI Einheit für die Lichtstärke in einer bestimmten Raumrichtung. Sie wird definiert durch die Konstante K_{cd} , dem photometrischen Strahlungsäquivalents einer monochromatischen Strahlung von $540 \cdot 10^{12}$ Hz. Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 683 festgelegt, wenn sie in der Einheit $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ bzw. $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ oder $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch h , c und $\Delta\nu_{CS}$ definiert sind.

Die neue Definition ist inhaltlich äquivalent zur bisherigen Definition. Im Wesentlichen beschreibt das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} den Zusammenhang zwischen den photometrischen Messgrößen (Lichtstrom, Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, und Leuchtdichte) zu den entsprechenden radiometrischen Messgrößen (Strahlungsfluss, Strahlstärke, Bestrahlungsstärke und Strahldichte).

In diesem Sinn basiert die bisherige Definition, die 1979 eingeführt wurde, bereits nicht mehr auf einem Artefakt oder einer präzisen Anleitung zur Einheitenrealisierung. Der Vorteil der aktuellen und auch der neuen Definition ist, dass sie losgelöst von einer vorgeschriebenen Technologie realisiert werden kann und daher universell ist. Eine Eigenheit bleibt hingegen bestehen: Die Candela ist für eine monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz definiert, dies entspricht rein-grünem Licht der Wellenlänge von ungefähr 555 nm. In der Beleuchtungstechnik wird aber in der Praxis hauptsächlich weisses Licht verwendet. Umso wichtiger ist daher die «mise-en-pratique» der Einheit, welche beschreibt, wie polychromatisches Licht (z.B. weisses Licht einer LED-Lampe) quantifiziert wird [1]. Zu diesem Zweck wird die normierte spektrale Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges $V(\lambda)$ verwendet, welche die Hellempfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge λ beschreibt. Beim METAS wird die Candela mittels einer Gruppe von Lichtstärkenormalampen dargestellt, das sind spezielle Glühlampen, welche Licht mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 2855.5 K (CIE Normlichtart A) ausstrahlen. Durch Messen der

Beleuchtungsstärke in einem definierten Abstand mittels kalibrierten Beleuchtungsstärkemessern (Luxmetern) kann die Lichtstärke dieser Normalampen bestimmt werden.

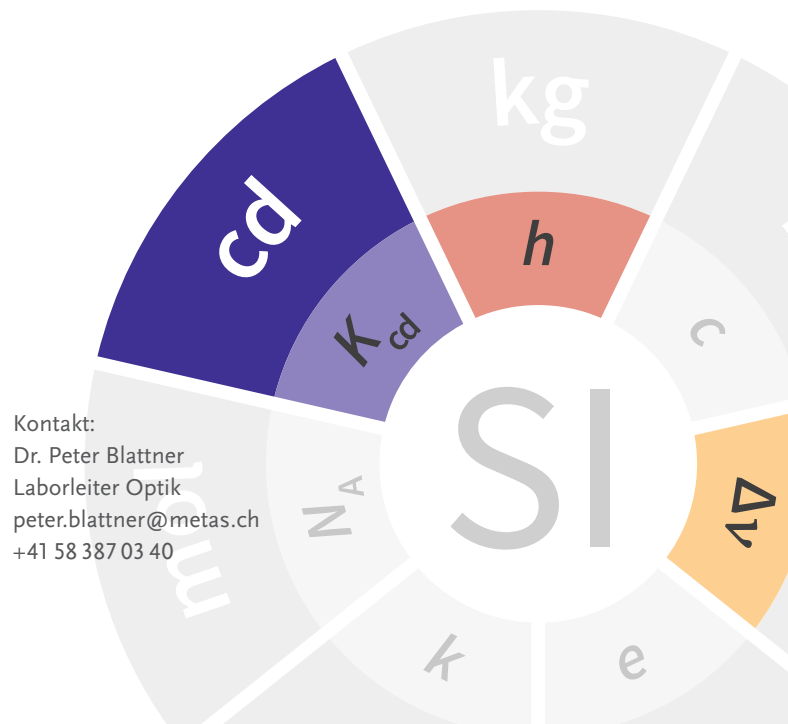
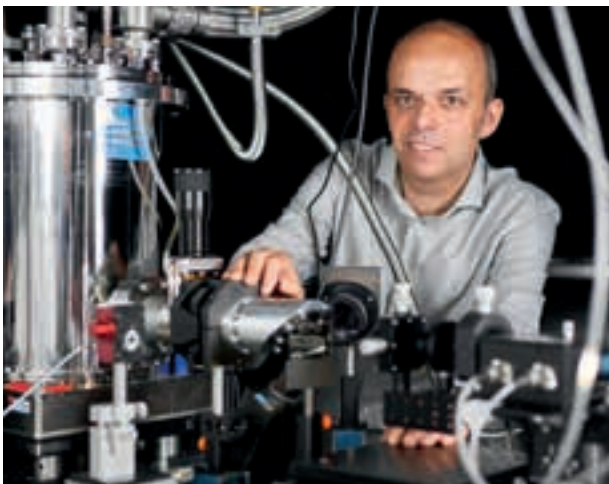
Die Luxmeter bestehen aus Siliziumdetektoren mit nahezu 100 % Quantenausbeute, einer Präzisionsblende und einem temperaturstabilisierten Farbfilter für die Anpassung an $V(\lambda)$. Sie sind ihrerseits an die Primärrealisierung der optischen Strahlungseinheit angeschlossen: ein kryogenes Absolutradiometer, das Strahlungsleistung mit elektrischer Heizleistung vergleicht. Bedingt durch die Änderung der praktischen Realisierung der elektrischen Messgrößen ergibt sich eine kleine Anpassung bei der Messung der elektrischen Leistung und somit auch der optischen Leistung mit dem kryogenen Absolutradiometer. Die relative Änderung durch das revidierte SI beträgt ungefähr 2×10^{-7} , d.h. sie ist in der Praxis für die Candela-Realisierung vernachlässigbar.

$K_{cd} = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ (exakt)

Exakter Wert des photometrischen Strahlungsäquivalents für die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz

Referenz

- [1] Draft mise en pratique for the definition of the candela in the SI, www.bipm.org.



Kontakt:
 Dr. Peter Blattner
 Laborleiter Optik
 peter.blattner@metas.ch
 +41 58 387 03 40

Vom lokalen Menschenmass zum weltweiten Einheitensystem

1875 wurde der Metervertrag unterzeichnet – ein Meilenstein in der Entwicklung der Metrologie und in der internationalen Zusammenarbeit. Der Metervertrag ist einer der ersten internationalen Staatsverträge. Er bildet die Grundlage für die Schaffung des Internationalen Einheitensystems (SI), die heute weltweit verbindliche Basis für das Messen. Vor allem konnte dank dem Metervertrag auch eine international abgestimmte messtechnische Infrastruktur geschaffen werden.

JÜRGEN NIEDERHAUSER

Ein Kilogramm ist überall ein Kilogramm – für uns ist dies heute eine geradezu banale Feststellung eines Sachverhalts. Genauso wie es für uns selbstverständlich ist, dass eine Firma für die Herstellung ihrer Produkte Bestandteile von unterschiedlichsten Zulieferfirmen aus verschiedensten Ländern bestellt und diese in den Dimensionen und mit der Genauigkeit erhält, wie sie bestellt wurden. Möglich ist das, weil alle sich auf eine weltweit verbindliche Basis für das Messen beziehen: das Internationale Einheitensystem (SI). Das war in früheren Zeiten überhaupt nicht der Fall, da gab es unzählige Masseinheiten und Einheitensysteme, die nebeneinander in Gebrauch waren.

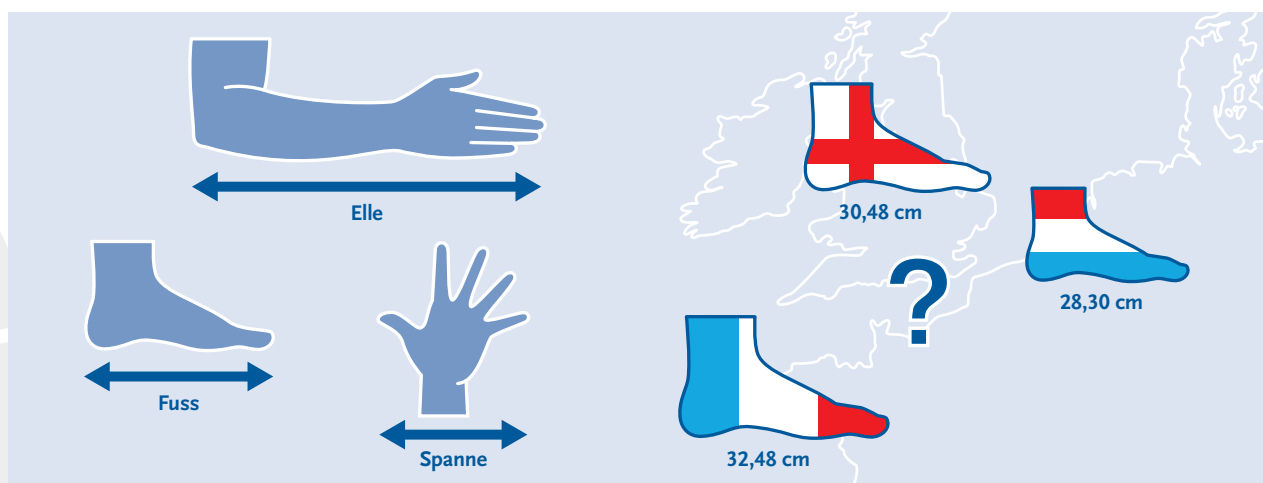
Der menschliche Körper als Referenz

Gemessen haben die Menschen seit jeher. Um Mass zu nehmen, benutzte man unter anderem Vergleichsgrößen, die sich von Gefässen (Fass, Sack...) ableiteten. Vor allem haben die Menschen gerne auch sich als Mass genommen und auf den menschlichen Körper als Vergleichsmassstab zurückgegriffen. Entsprechend gab es viele vom Körper abgeleitete Masseinheiten, wie zum Beispiel *Spanne* (eine Handbreite bei gespreizten Fingern), *Inch*, *Yard*, *Elle*, *Fuss*. Messen war zunächst eine lokale Angelegenheit. Das gilt auch für das Festlegen von Masseinheiten. Für die vom menschlichen Körper abgeleiteten Re-

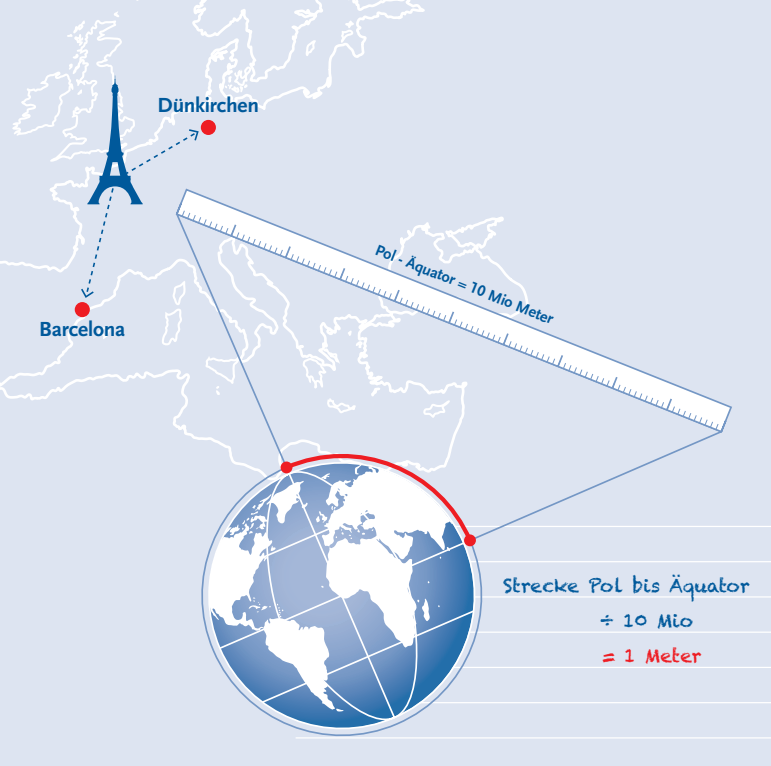
ferenzmasse wurde meistens an einem Herrscher eines Ortes oder einer Region Mass genommen. Menschen können sich untereinander vom Körperbau her beträchtlich unterscheiden. So gab es mit der Zeit eine Vielfalt von Masseinheiten, die nebeneinander existierten. Sie variierten von Fürstentum zu Fürstentum und oft gar von Stadt zu Stadt. Trotz gleichlautender Bezeichnung konnte eine Masseinheit je nach Region ein unterschiedlich grosses Mass der betreffenden Messgröße bezeichnen. Die Längeneinheit «Fuss» war zum Beispiel vielerorts verbreitet, aber sie war längst nicht über gleich lang. Noch im 19. Jahrhundert existierte auf dem Gebiet des heutigen Deutschland der «Fuss» in Hunderten von orts- oder landesspezifischen Abmessungen. Allein auf dem Gebiet Frankreichs soll in der Zeit vor der Französischen Revolution mit Tausenden von unterschiedlichen Massen und Gewichten gemessen worden sein.

Bezug auf die Erde

Mit den Fortschritten in Wissenschaft und Technik und auch der Ausdehnung der Handelsbeziehungen sah man im 18. Jahrhundert die Vielfalt der Masseinheiten zunehmend als Hindernis an, das es zu überwinden gelte. Erreicht werden sollte das mit einem System einheitlicher Masse und Gewichte. Das war nicht zuletzt ein Anliegen der französischen Revolutionsregierung, insbesondere sollte ein einheitliches Längenmass für die ganze Menschheit entwickelt werden. Ab 1790



1: Die vom Körper abgeleiteten Masseinheiten variierten von Fürstentum zu Fürstentum trotz gleichlautender Bezeichnung.



2: Als Referenz für die Einheit der Länge sollte nicht mehr der Körper eines Menschen dienen, sondern die Erde selbst.

befasste sich die französische Akademie der Wissenschaften im Auftrag der Revolutionsregierung mit der Entwicklung eines einheitlichen Masssystems. Geplant wurde ein auf dem Dezimalsystem basierendes System einheitlicher Masse und Gewichte: das metrische System. Als Referenz für die Einheit der Länge sollte nicht mehr der Körper eines Menschen dienen und auch nicht etwas, das sich auf eine bestimmte Nation bezog, sondern die Erde selbst. So wurde die neue Längeneinheit Meter definiert als der zehnmillionste Teil eines Viertels des Umfangs der Erde auf einem Längengrad, das heißt, der Strecke vom Nordpol bis zum Äquator. 1792 begannen zwei Astronomen damit, einen Teil dieses Viertelkreises, nämlich die Strecke Dünkirchen-Paris-Barcelona so genau wie möglich zu vermessen, um aufgrund der Resultate dieser Messungen die neue Einheit Meter bestimmen zu können. Unter schwierigsten Umständen mitten in den chaotischen Zeiten der Französischen Revolution mit ihren kriegerischen Wirren führten sie während sieben Jahren ihre Messungen durch. Gestützt auf die Auswertung ihrer Messungen konnte 1799 ein Referenzmass für die neue Einheit Meter erstellt werden: der Mètre des Archives.

Bedürfnisse der industriellen Revolution

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts verbreitete sich das metrische System allmählich in den Nachbarstaaten Frankreichs. Teilweise blieben neben den metrischen Massen auch noch viele der alten Masse zugelassen. Dies nicht zuletzt, weil vielfach die Festlegung der Masse in dieser Zeit ein Thema politischer Auseinandersetzungen war (vgl. Kasten Schweizer Fuss). Die wegen der unterschiedlichen Masseinheiten erforderlichen Umrechnungen verkomplizierten Handel, Kommunikation und Verkehr auf überregionaler und vor allem internationaler Ebene. Mit der zunehmenden Industrialisierung und der damit verbundenen Ausweitung des internationalen Handels wurden die nebeneinander existierenden, historisch gewachsenen, unterschiedlichen Masseinheiten immer stärker als handels- und entwicklungshemmende Vielfalt wahrgenommen. Entsprechend wurde die Harmonisierung und Vereinheitlichung von

Masssystemen zu einem wesentlichen wirtschaftspolitischen Anliegen. Das führte in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dazu, dass bei allen, zum Teil heftigen, politischen Auseinandersetzungen zwischen den miteinander rivalisierenden Nationalstaaten diese sich gleichzeitig darum bemühten, auf internationaler Ebene eine Vereinheitlichung der Masseinheiten anzustreben und zu fördern.

Der Internationale Metervertrag

Der entscheidende Schritt dazu erfolgte am 20. Mai 1875, als in Paris Vertreter von 17 Staaten den internationalen Metervertrag unterzeichneten. Der Metervertrag ist einer der ersten internationalen völkerrechtlichen Staatsverträge, was ebenfalls auf die Bedeutung der Festlegung einheitlicher Einheiten hinweist. Zu den 17 Gründerstaaten gehörten Argentinien, Belgien, Brasilien, Dänemark, das Deutsche Reich, Frankreich, Italien, Österreich, Peru, Portugal, Russland, Schweden (und Norwegen, damals noch ein Staat in Personalunion), die Schweiz, Spanien, Türkei, Venezuela sowie die USA. Heute sind 60 Staaten Vertragspartner des Metervertrags, weitere 42 sind assoziierte Mitgliedstaaten.

Mit dem Metervertrag wurde das Bureau international des poids et mesures (BIPM) eingerichtet, ein gemeinsames und gemeinschaftlich finanziertes Büro der vertragsschliessenden Staaten. Der Metervertrag ermöglichte es vor allem auch, eine international abgestimmte messtechnische Infrastruktur zu schaffen: Auf internationaler Ebene die Organe des Metervertrags (vgl. Kasten), insbesondere das BIPM. Ihm entsprechen auf Ebene der Staaten die nationalen Metrologieinstitute, die an der Spitze der Messgenauigkeit ihres Landes stehen – in der Schweiz das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS). Mit der Zusammenarbeit zwischen den nationalen Metrologieinstituten und den Organen des internationalen Metervertrags kann sichergestellt werden, dass die Referenzmasse in einem Staat international anerkannt sind und in der erforderlichen Genauigkeit zur Verfügung stehen. 1889 wurden für die Einheit der Masse, das Kilogramm, und die Einheit der Länge, den Meter, Referenzmasse hergestellt. Das Referenzmass Nr. 1 wurde jeweils als massgebender Prototyp der betreffenden Einheit im BIPM aufbewahrt (sogenanntes Urkilogramm und Urmeter). Die weiteren Kopien der Referenzmasse wurden als nationale Kopien der internationalen Prototypen per Los an die Vertragsstaaten verteilt. Die Schweiz erhielt die Kopie Nr. 2 des Urmeters und die Kopie Nr. 38 des Urkilogramms.



3: Das Referenzmass Nr. 1 (Urmeter bzw. Urkilogramm) wurde jeweils im BIPM aufbewahrt. Die weiteren Kopien wurden per Los an die Vertragsstaaten verteilt. Die Schweiz erhielt die Kopie Nr. 2 des Urmeters.



Quelle: Christian Chamourat

4: Zusammen mit dem Metervertrag wurde das Bureau international des poids et mesures (BIPM) als «Hüter der Einheiten» gegründet. Es hat seinen Sitz im «Pavillon de Breteuil» in Sèvres bei Paris.

Stetige Weiterentwicklung

Der Zweck des Metervertrags wird in der Präambel kurz umrissen: «Désirant assurer l'unification internationale et le perfectionnement du système métrique, ont résolu de conclure une convention à cet effet ...» Schon aus dieser Einleitung wird ersichtlich, dass es nicht nur darum gehen kann, ein international einheitliches Einheitensystem einmal festzulegen. Vielmehr muss dieses Einheitensystem entsprechend dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt immer wieder den neuesten Anforderungen angepasst werden. Das gilt für die Definition einzelner Einheiten wie auch für das Einheitensystem. So konnte beispielsweise 1960 die Definition des Meters durch den Urmeter ersetzt werden. Statt durch ein Referenzmass wurde der Meter mit Bezug auf ein physikalisches Phänomen, eine Wellenlänge, definiert. Das erlaubte es, die Einheit Meter mit höherer Genauigkeit realisieren zu können. Noch höhere Genauigkeit ermöglichte die Definition der Einheit Meter mit Bezug auf eine Naturkonstante, die Lichtgeschwindigkeit, die 1983 in Kraft trat.

1960 wurde auf der 11. Conférence générale des poids et mesures ein erweitertes metrisches System, das Système international d'unités (SI) eingeführt. Das SI ist die heute weltweit verbindliche Basis für das Messen. Mit der Revision von 2018 soll unser Einheitensystem so angepasst werden, dass es auch in Zukunft den Ansprüchen neuer technologischer Gebiete gerecht werden kann.



5: Das Siegel des BIPM stellt eine Allegorie der Wissenschaft dar, die den neuen Meterstandard mit seiner Dezimalteilung hält. Das griechische Motto $\mu\epsilon\tau\rho\omega\ \chi\rho\omega$ bedeutet «die Massnahme (oder den Meter) nutzen».

Der Metervertrag

Die Organe des Metervertrags sind die Hüter unseres Einheitensystems

Conférence générale des poids et mesures (CGPM)

Die CGPM ist das oberste Organ des Metervertrags. In ihr sind alle Mitgliedstaaten vertreten. Sie tritt in der Regel alle vier Jahre zusammen. Sie beschliesst unter anderem über die Definition der Einheiten oder andere Änderungen des Internationalen Einheitensystems. Die 26. CGPM fand vom 13. bis 16. November in Versailles statt.

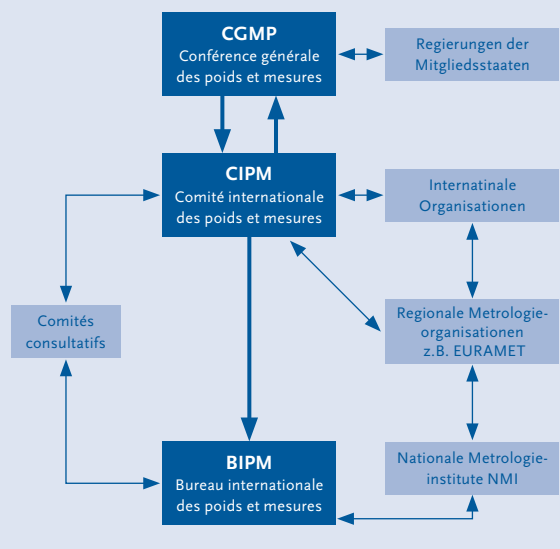
Comité international des poids et mesures (CIPM)

Das CIPM ist das Exekutivorgan des Metervertrags, gewissermassen der Verwaltungsrat. Es besteht aus 18 Mitgliedern, so dass nicht jeder Mitgliedsstaat über einen Vertreter im CIPM verfügt. Eine hohe Bedeutung kommt den Comités consultatifs des CIPM zu. Diese sind jeweils für bestimmte Fachgebiete zuständig, zum Beispiel *Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM)* oder *Comité consultatif des unités (CCU)*. In den Comités consultatifs wird die eigentliche wissenschaftliche und koordinierende Arbeit der internationalen Zusammenarbeit in der Metrologie gemacht.

Bureau international des poids et mesures (BIPM)

Das BIPM ist die Geschäftsstelle und Forschungsinstitution des Metervertrags. Es nimmt organisatorische, Koordinations- und Forschungsaufgaben wahr. Das BIPM hat seinen Sitz in Sèvres bei Paris.

Eine wesentliche Rolle spielen auch die regionalen Metrologieorganisationen, welche die verschiedenen Regionen der Welt abdecken. Eine dieser Organisationen ist EURAMET, die Vereinigung der nationalen Metrologieinstitute Europas. In ihr nimmt das METAS eine aktive und gestaltende Rolle ein und wirkt sowohl in den technischen Komitees wie auch in den Leitungsgremien mit.



Vom Schweizer Fuss zum Meter: Zur Vereinheitlichung der Masseinheiten in der Schweiz

Die Vereinheitlichung der Masseinheiten war im 19. Jahrhundert auch innerhalb der Schweiz ein wichtiges politisches Anliegen. So gab es im ersten Drittel dieses Jahrhunderts Auseinandersetzungen darüber, ob das neue metrische (französische) System allgemein übernommen werden sollte. Während sich die einen dafür einsetzten, das moderne Einheitensystem möglichst schnell und umfassend einzuführen, wollten die anderen die altbekannten Masseinheiten, wie den Fuss, weiterhin benutzen können und wehrten sich deshalb gegen das metrische System.

1835 schlossen zwölf Kantone ein «Konkordat über eine gemeinsame schweizerische Mass- und Gewichtsordnung» ab. Darin einigten sie sich darauf, die landesüblichen Bezeichnungen der Masse beizubehalten, wobei aber diese Masseinheiten in einem einfachen Verhältnis zum metrischen System stehen sollten: «Die Basis der Masseinheiten ist der schweizerische Fuss, welcher genau drei Zehnteilen des französischen Meters entspricht.»

Der Schweizer Fuss (= 3/10 Meter), wurde in zehn Zoll geteilt, der Zoll in zehn Linien, die Linie in zehn Strich. Mit diesem Masssystem war es einerseits möglich, direkt an das metrische Masssystem angeschlossen zu sein und dieses verwenden zu können. Andererseits konnten die traditionellen Bezeichnungen von Masseinheiten weiter benutzt werden.

Der Schweizer Fuss ist ein gelungener schweizerischer Kompromiss, der jahrzehntelang funktionierte. 1848 übernahm der neugegründete Schweizerische Bundesstaat das Masssystem dieses kantonalen Konkordats für die ganze Schweiz. 1868 wurde neben diesem bestehenden System das metrische System eingeführt. Nach der Unterzeichnung des internationalen Metervertrags 1875 wurde das metrische System als allgemeingültig erklärt.



Urmass des Schweizer Fusses aus dem Jahre 1854. Der Eisenmassstab mit Matrize wurde von Hr. Oeri, Mechaniker in Zürich, hergestellt. Dieses Urmass diente bis 1875 als Referenzmass.

Des mesures locales à taille humaine à un système d'unités mondial

L'être humain mesure depuis toujours. Toutefois, les mesures se sont faites à l'échelle locale pendant des siècles. Il en était de même pour la définition des unités de mesure. Ce phénomène a entraîné l'existence en parallèle d'une multitude d'unités de mesure. Elles variaient d'une principauté à l'autre, voire même souvent d'une ville à l'autre. Malgré un nom similaire, une unité de mesure, par exemple le pied, pouvait correspondre, selon la région, à une mesure différente du mesurande concerné. Des milliers de poids et mesures différents auraient été en usage sur le seul territoire français avant la Révolution française.

Avec les progrès scientifiques et techniques ainsi que l'extension des relations commerciales, la multiplicité des unités de mesure est de plus en plus apparue comme un obstacle qu'il fallait surmonter. L'introduction du système métrique en France à la fin du XVIII^e siècle a été un pas dans la bonne direction.

Au XIX^e siècle, l'industrialisation croissante et l'expansion du commerce international en résultant ont placé l'harmonisation des systèmes de mesure et leur uniformisation au centre des préoccupations de la politique économique. C'est pourquoi les états ont mis de côté les rivalités et les conflits politiques, violents pour certains, et se sont efforcés de viser l'uniformisation des unités de mesure.

La Convention du Mètre, signée en 1875, constitue une étape cruciale dans le développement de la métrologie et dans la collaboration internationale. La Convention du Mètre est l'un des premiers traités internationaux. Elle a jeté les bases nécessaires à la création du Système international d'unités (SI), qui constitue aujourd'hui la base métrologique faisant foi dans le monde entier. La Convention du Mètre a surtout permis de créer également une infrastructure métrologique harmonisée à l'échelle internationale, allant des organes de la Convention du Mètre, notamment le Bureau international des poids et mesures (BIPM), aux instituts de métrologie nationaux des différents États.

Dall'unità locale «a misura d'uomo» al Sistema internazionale di unità

Da sempre l'essere umano è abituato a misurare, ma per molti secoli la misurazione è stata una pratica circoscritta localmente. Questo vale anche per la definizione dell'unità di misura. Nel corso del tempo si sono prodotte e sono andate coesistendo una molteplicità di grandezze. In passato le unità di misura variavano da principato a principato e spesso anche da città a città. Malgrado avesse la stessa denominazione, una grandezza come il «piede» poteva corrispondere a una dimensione diversa a seconda della regione. All'epoca della rivoluzione francese nel solo territorio della Francia si utilizzavano migliaia di misure e pesi diversi.

Grazie ai progressi compiuti nel campo della scienza e della tecnica e all'espansione delle relazioni commerciali, la presenza di molteplici unità di misura iniziò a costituire un ostacolo che si riteneva di dover superare. Un passo in tal senso si compì quando in Francia, alla fine del XVIII^e secolo, venne introdotto il Sistema Metrico Decimale.

Nel XIX^e secolo, a causa della crescente industrializzazione e della conseguente espansione del commercio internazionale, l'armonizzazione e l'unificazione dei sistemi di misurazione divenne una questione politico-economica d'importanza fondamentale. Per questo gli stati decisero di mettere da parte rivalità e contrasti politici, talvolta molto accesi, a favore di un'unificazione dei sistemi di misura.

Nel 1875 venne sottoscritto il Trattato del metro, una pietra miliare sul cammino evolutivo della metrologia e della collaborazione internazionale. Il Trattato del metro è uno dei primi trattati internazionali e costituisce il fondamento su cui si basa la creazione del Sistema internazionale di unità di misura (SI), l'attuale sistema di misurazione obbligatorio in tutto il mondo. Il Trattato del metro ha permesso anche e soprattutto di creare un'infrastruttura metrologica armonizzata a livello internazionale: dagli organi del Trattato, tra cui il Bureau international des poids et mesures (BIPM), agli istituti nazionali di metrologia dei singoli stati.

From local body-based measurements to a worldwide system of units

Human beings have been making measurements since time immemorial. For many centuries, however, measuring things was a local matter. This also applied to the determination of units of measure. Over the course of time, this resulted in a multiplicity of coexisting measurement units. They differed from principality to principality and often even from town to town. Although bearing the same name, a unit of measure, such as a «foot», could signify a different amount of the measured variable in question, depending on the region. It is said that in France alone, thousands of different weights and measures were in use before the French Revolution.

With progress in science and technology and the expansion of trading relationships, the diversity of measurement units was increasingly seen as an obstacle to be overcome. One step on this path was the introduction of the metric system in France at the end of the 18th century.

As a result of increasing industrialisation and the associated expansion of international trade in the 19th century, the harmonisation and standardisation of measurement systems became an important economic policy concern. So, despite their rivalries and, in some cases, serious political disputes, countries endeavoured to standardise their measurement units.

1875 saw the signing of the Metre Convention – a milestone in the development of metrology and international collaboration. The Metre Convention is one of the first international treaties. It laid the groundwork for the creation of the International System of Units (SI), the globally binding basis for measurement today. Above all, the Metre Convention has also facilitated the establishment of an internationally harmonised metrology infrastructure: from the organs of the Metre Convention, one of which is the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), to the national metrology institutes of the individual countries.

Was bleibt zu tun?

Das revidierte Internationale Einheitensystem stellt sicher, dass bis in absehbare Zukunft Messungen im Einklang mit dem technologischen Fortschritt mit genügender Genauigkeit und Zuverlässigkeit durchgeführt werden können. Auf der Basis des SI gilt es die vielfältigen Herausforderungen an die Metrologie anzugehen. Diese berühren fast alle Aspekte des modernen Lebens.

BEAT JECKELMANN

Die Metrologie, die Wissenschaft des Messens, ist ein unverzichtbares Werkzeug sowohl für die wissenschaftliche Forschung und Entwicklung als auch für die technologische Innovation. Sie untermauert die industrielle Konkurrenzfähigkeit und unterstützt die Entwicklung von neuen, verbesserten Produkten und Prozessen. Durch exzellente wissenschaftliche Forschung trägt die Metrologie zu den grossen Fortschritten in der Wissenschaft bei. Der globale Handel und die Regulierung hängen wesentlich von international anerkannten Messungen und Normalen ab. Das Herz der benötigten metrologischen Infrastruktur bilden das Internationale Einheitensystem

(SI) und die internationale Übereinkunft zwischen den nationalen Metrologieinstituten zur gegenseitigen Anerkennung von nationalen Normalen und Kalibrierungen (CIPM-MRA).

Die rasanten technologischen Fortschritte und die wissensbasierte Gesellschaft verlangen nach noch genaueren und zuverlässigeren Messungen. Was wir nicht messen können, verstehen wir nicht richtig und können wir nicht zuverlässig kontrollieren, herstellen oder verarbeiten. Fortschritte in der Metrologie haben deshalb eine starke Auswirkung auf unsere Fähigkeit, unsere Umwelt zu verstehen und zu formen. >>>

Ein adäquates Einheitensystem ist die Grundvoraussetzung für die Erfüllung der anstehenden Aufgaben. Darüber hinaus benötigen die grossen gesellschaftlichen Herausforderungen wie die nachhaltige Energieversorgung, die Umwelt und die Gesundheit neue und zuverlässige Messtechnologien mit weltweit anerkannter Rückführbarkeit. Die fortlaufende Weiterentwicklung in der Metrologie ist essentiell, um die aktuellen und künftigen Bedürfnisse der Industrie, der Regulierung und der Politik zu decken. Anhand von sechs Beispielen soll aufgezeigt werden, was die Metrologie zu leisten vermag.

Ein adäquates Einheitensystem ist die Grundvoraussetzung für die Erfüllung der anstehenden Aufgaben. Darüber hinaus benötigen die grossen gesellschaftlichen Herausforderungen wie die nachhaltige Energieversorgung, die Umwelt und die Gesundheit neue und zuverlässige Messtechnologien mit weltweit anerkannter Rückführbarkeit. Die fortlaufende Weiterentwicklung in der Metrologie ist essentiell, um die aktuellen und künftigen Bedürfnisse der Industrie, der Regulierung und der Politik zu decken. Anhand von sechs Beispielen soll aufgezeigt werden, was die Metrologie zu leisten vermag.

Grundlagenforschung

Fortschritte in der Messtechnik und in der Messgenauigkeit spielen bei Entdeckungen an den Grenzen von Wissenschaft und Technik oftmals die entscheidende Rolle. So können die Grenzen der Gültigkeit von physikalischen Gesetzen mit Hilfe von genauen Messungen getestet werden. Die Stabilität von Atomuhren ist heute derart gut, dass z.B. die allgemeine Gravitationstheorie geprüft werden kann. Die Theorie besagt, dass eine Uhr in einem Gravitationsfeld von einem fernen Beobachter aus gesehen langsamer tickt als ausserhalb des Feldes. Auf der Erdoberfläche beträgt die relative Änderung in der Frequenz eines Frequenznormals ca. 10^{-16} pro Meter Höhenunterschied. Eine solche Änderung kann mit modernen Atomuhren mit grosser Genauigkeit überprüft werden. Ein Traum der Physiker ist eine grosse vereinheitlichte Theorie, die alle Grundkräfte der Natur vereinigt. Diese Theorien sagen in der Regel ein Versagen der untergeordneten separaten Modelle unter bestimmten Bedingungen vor. So sieht die String-Theorie eine Änderung der Feinstrukturkonstante über lange Zeiträume vor. Diese Konstante beschreibt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung. Auch hier muss die Theorie mit den genauen Messungen der Atomuhren übereinstimmen. Die neusten Experimente ermitteln eine relative Änderung der Konstanten von weniger als 10^{-16} pro Jahr, ein Wert, mit dem sich alle neuen Theorien testen lassen.





« Darüber hinaus benötigen die grossen gesellschaftlichen Herausforderungen wie die nachhaltige Energieversorgung, die Umwelt und die Gesundheit neue und zuverlässige Messtechnologien mit weltweit anerkannter Rückführbarkeit. »»

Gesundheit an erster Stelle

Das Spektrum des Messbaren ist riesig. Dabei ist uns die Messung physikalischer Grössen gut vertraut. Immer mehr rückt das Prinzip der vergleichbaren Messungen aber auch in Gebieten in den Fokus, wo dies traditionellerweise nicht der Fall war. Ein prominentes Beispiel ist das Gesundheitswesen. Bedingt durch den demographischen Wandel und die hohen und weiterhin stark steigenden Kosten ist die Sicherstellung der Gesundheitsvorsorge eine der grössten Herausforderungen in den nächsten Jahrzehnten. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass das Thema sowohl auf politischer Ebene als auch in vielen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen weit vorne auf den Prioritätenlisten steht. Ein Trend in der Metrologie für die Gesundheit ist es, nicht nur Normale und die Rückführung zum SI sicherzustellen, sondern auch zur Entwicklung von verbesserten Messmethoden beizutragen. Das Ziel ist dabei nicht eine höchstmögliche Genauigkeit, sondern die Verbesserung der Qualität und Vergleichbarkeit von diagnostischen Resultaten und therapeutischen Ergebnissen. Nach Technologien geordnet und analysiert sind folgende Themenfelder mit Anforderungen an die Metrologie wichtig:

- Es findet ein Übergang zu einer personalisierten Medizin und patientennaher Diagnostik bzw. Point of Care Testing (POCT) statt. Damit steigen die Anforderungen an die Vergleichbarkeit und die Qualität der Patientendaten.
- Die Diagnostik chronischer Krankheiten, Krebs, neurodegenerativer und kardiovaskulärer Erkrankungen verbessert sich, sowohl durch verbesserte bildgebende als auch durch molekulare (z.B. genetische) Verfahren.
- Anerkannte Referenzmaterialien und Referenzmethoden sind notwendig, um die Vergleichbarkeit der Messresultate sicherzustellen. Biomarker und Messungen auf molekularer und zellulärer Ebene gewinnen an Bedeutung.

- Ein Übergang von einer rein qualitativen Bildanalyse zu einer rückführbaren Quantifizierung der Bilder würde die Diagnose stark verbessern. Daneben ist eine zuverlässige Metrologie für die Minimierung der Nebeneffekte notwendig.
- In der Strahlentherapie geht es einerseits um die zuverlässige Bestimmung der applizierten Dosis, andererseits zunehmend um die Quantifizierung der biologischen Wirkung.

Sichere Lebensmittel

Wir leben im Zeitalter des globalen Handels und sind uns gewohnt, Lebensmittel aus allen Ecken der Erde zu konsumieren. Für die ganze Nahrungskette und die Trinkwasserversorgung sind zur Einschätzung der Risiken, zur Qualitätskontrolle, zur Bestimmung von chemischen und mikrobiologischen Verunreinigungen und von genmanipulierten Organismen rückführbare Messungen notwendig. Standardisierte Messmethoden und Referenzmaterialien für die Lebensmittelsicherheit müssen laufend neu entwickelt und verbessert werden. Ein wichtiger Aspekt ist auch der Nachweis der Authentizität von Lebensmitteln. Landwirtschaftliche Produkte mit einer definierten Ursprungsbezeichnung erzielen einen erheblichen Mehrwert (AOC, IGP, Swissness). Für inländische Produzenten ist der Schutz der Authentizität daher von grösster Bedeutung. Neben dem geographischen Ursprung kann auch der biologische Ursprung den Wert eines Produktes stark beeinflussen, da zahlreiche ausländische Produkte aufgrund von Zollpräferenzen einen stark reduzierten Zollsatz geniessen. Um den geographischen oder biologischen Ursprung zu bestimmen, werden Isotopen-Analysemethoden oder biologische Verfahren wie die DNA-Analyse eingesetzt. Für zuverlässige Resultate braucht es zusätzlich geeignete Referenzmaterialien und eine umfangreiche Datenbank mit authentischen Proben.



« Die Stabilität von Atomuhren ist heute derart gut, dass z.B. die allgemeine Gravitationstheorie geprüft werden kann. »

Umwelt unter strenger Beobachtung

Eine intakte Umwelt ist zentral für die Gesundheit und das Wohlbefinden. Gesetzliche Vorschriften auf nationaler und europäischer Ebene sollen sicherstellen, dass die natürlichen Ressourcen sorgfältig und nachhaltig genutzt und die nachteiligen Effekte von Produktion und Konsum auf einem vertretbaren Niveau bleiben. Die wohl grösste Herausforderung ist der Klimawandel. Dabei ist es essentiell, dass die politischen Massnahmen zur Reduktion anthropogener Effekte auf das Klima auf solider Wissenschaft und zuverlässigen Klimamodellen basieren. Eine holistische Sichtweise basierend auf vergleichbaren Daten, die die Atmosphäre, die Ozeane und das Land als auch die solare und terrestrische Strahlung umfassen, ist unabdingbar für zuverlässige Klimaberechnungen. Die Metrologie hat eine wichtige Rolle zu spielen, damit Klimaänderungen verfolgt, verstanden und vorausgesagt werden können.

Die Metrologie hat sich traditionellerweise auf die Verbesserung der Einheitenrealisierung fokussiert. Im Umweltbereich sind weitergehende Aktivitäten erforderlich, um die Metrologie-Bedürfnisse der Schlüsselorganisationen wie der World Meteorological Organisation (WMO) nach rückführbaren Umweltmessungen mit zuverlässiger Messunsicherheit zu befriedigen. Gefragt sind bessere Vergleichbarkeit, kleinere Messunsicherheit und eine grössere Anzahl von stabilen Standards und Referenzmaterialien, um den Zielen dieser Organisationen und der globalen Nachfrage nach hoher Datenqualität gerecht zu werden.

Die Metrologie ist auch gefragt, wenn es um den Schutz der Bevölkerung vor potentiell schädlicher nichtionisierender Strahlung geht. Im Umweltbereich sind z.B. Themenfelder mit Anforderungen an die Metrologie wichtig:

Umweltbeobachtung:

Die Überwachung des Umweltzustandes erfolgt heute kontinuierlich und grenzüberschreitend, die erfassten Daten müssen verlässlich sein, damit politische Minderungsmaßnahmen akzeptiert werden.

Klimawandel und Meteorologie:

Essentielle Klimavariablen müssen zeitlich und örtlich vergleichbar gemessen werden; damit der Klimawandel verlässlich prognostiziert werden kann.

Emissionskontrolle und -minderung:

Grosse Emittenten werden heute kontinuierlich überwacht; verlässliche Inventare bilden die Basis für den internationalen Emissionshandel; Emissionen neuer Stoffe wie gentechnisch veränderte Organismen (GVO) und Nanomaterialien müssen minimiert werden. Mikroplastik findet sich inzwischen fast überall in der Umwelt.

Die Risiken, die von diesen Partikeln aufgrund der Aufnahme in Biota und der Anreicherung in der Nahrungskette ausgehen, sind noch nicht bekannt. Zuverlässige und rückführbare

Methoden zur Charakterisierung von Mikroplastik in Umweltmatrizen sind zu entwickeln. Im Bereich der nichtionisierenden Strahlung (Elektrosmog, Licht, Laser, Schall) gilt es, rückführbare und robuste Messmethodiken zu entwickeln, damit die Einhaltung von Grenzwerten zuverlässig überprüft werden kann.

Der Energiewandel

Die Energiestrategie 2050 des Bundes sieht einen schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie unter Beibehaltung der Klimaziele, d.h. einer 20%-Reduktion des CO₂-Ausstosses bis 2020 gegenüber 1990, vor. Auch die EU hat die sichere, saubere und effiziente Energieversorgung als eine der grossen Herausforderungen formuliert und z.B. das 20-20-20-Ziel gesetzt (20% Verbesserung der Effizienz, 20% Reduktion der CO₂-Emissionen und 20% Anteil der erneuerbaren Energien bis 2020). Diese Ziele bedingen einen grundlegenden Umbau des gesamten Energiesystems mit weitgehenden Auswirkungen auf die Art und Weise, wie wir Energie gewinnen und umwandeln, wie Energie transportiert und gehandelt und schliesslich wie die Energie verwendet wird.

Für den Umbau des Energiesystems sind intensive Forschungsbemühungen notwendig, sei dies bei der Entwicklung von effizienten kohlenstoffarmen Energie-Technologien, der Entwicklung von neuen und erneuerbaren Energie-Quellen, der Verbesserung der Effizienz, Zuverlässigkeit und Sicherheit von Energieverteilssystemen sowie der Reduktion des Energieverbrauchs. Die Metrologie kann z.B. bei Energiespeicherung und -transport wichtige Beiträge leisten:

Die dezentrale und zeitlich fluktuierende Energieeinspeisung verlangt eine bessere Überwachung der elektrischen Netze. Metrologie ist notwendig für das Management der Energieflüsse und deren Verrechnung. Für den Verbraucherschutz muss die Qualität der fossilen Brennstoffe überprüft werden. Neue Technologien für die Energiespeicherung, wie z.B. chemische Speichermaterialien sind zu charakterisieren.

Die Fabrik der Zukunft

Die Metrologie spielt eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung qualitativ hochstehender, hoch-technologischer und innovativer Produkte. Oft sind Entwicklungsschritte nur möglich, wenn die unterstützenden Messfähigkeiten existieren. Das gilt nicht nur für die neuen Technologien wie Mikro- und Nanoelektronik, Photonik, Nanotechnologie, Biotechnologie, neue Materialien und Produktionstechniken, sondern auch in traditionellen industriellen Bereichen.

Die Neu- und Weiterentwicklung ist in allen Phasen der Produktentwicklung auf eine unterstützende, an die jeweiligen Entwicklungsstufen bezüglich Auflösung, Geschwindigkeit, Robustheit, Vergleichbarkeit, Messunsicherheit und Kosten angepasste Messtechnik angewiesen. Dies gilt insbesondere

« Es ist die Aufgabe des METAS und aller anderen NMI, die metrologischen Grundlagen zu schaffen damit die Messungen mit der erforderlichen Genauigkeit erfolgen können. »



auch für die Produktentwicklung im Rahmen neuer Technologien. Diese sind oft nur dank neuer oder verbesserter metrologischer Werkzeuge möglich, welche quer über alle Fachbereiche zu entwickeln sind. Die Industrie 4.0 wird die Planung, Dokumentation, Produktion, die Produkte und Dienstleistungen mit Hilfe von Sensoren und virtuellen Netzwerken in einer voll digitalisierten Umgebung integrieren.

Die Mikro- und Nanotechnologien sind ein schnell wachsendes Gebiet mit vielen neuartigen Anwendungsmöglichkeiten. Aktuelle Herausforderungen umfassen Fabrikationstechniken im Mikro- und Nanobereich, die Charakterisierung von nanostrukturierten Materialien, die Entwicklung von Nanoelektronik, Nanophotonik, Nanomagnetics (z.B. molekulare Elektronik), Nanosensoren und Computer. Die Herausforderungen für die Metrologie sind die Erweiterungen der Messbereiche bis in die kleinsten Dimensionen und die Erfassung neuartiger Messgrössen.

Die Rolle des nationalen Metrologieinstituts

Die aufgeführten Beispiele sollen aufzeigen, dass zuverlässige und vergleichbare Messungen in allen Bereichen des Lebens eine Rolle spielen. Es ist die Aufgabe des METAS und aller anderen NMI, die Grundlagen zu schaffen, dass in so unterschiedlichen Gebieten wie der physikalischen Grundlagenforschung und der Lebensmittelsicherheit die Messgrössen und die Referenzgrössen richtig definiert und die Messungen mit der erforderlichen Genauigkeit erfolgen können.

Que reste-t-il à accomplir ?

Les rapides progrès technologiques réclament des mesures toujours plus exactes et fiables. Impossible de bien comprendre ce que nous ne pouvons pas mesurer. C'est pourquoi les progrès métrologiques ont une incidence notable sur notre capacité à comprendre notre environnement et à le façonner.

Le développement constant réalisé en métrologie permet de mieux relever les défis sociaux actuels et à venir, ainsi que de répondre aux besoins de l'industrie et de la politique.

Dans le domaine de la santé, la métrologie peut, au moyen de matériaux de référence reconnus et de nouvelles méthodes de mesure, contribuer à améliorer la qualité et la comparabilité de résultats diagnostiques et thérapeutiques.

Le contrôle de la qualité des denrées alimentaires et de l'eau potable dépend de mesures traçables. Il est essentiel pour la politique climatique que les mesures politiques de réduction des effets anthropiques sur le climat reposent sur des connaissances scientifiques solides et sur des modèles climatiques fiables. Il est donc indispensable d'avoir une approche holistique fondée sur des données comparables.

Il est nécessaire de revoir en profondeur le système énergétique afin de pouvoir atteindre les objectifs de lutte contre le changement climatique. Cette restructuration aura des répercussions sur notre façon de produire de l'énergie, de la transformer, de la commercialiser et de la consommer. La métrologie apportera aussi des solutions dans cette optique. En outre, la métrologie doit encore relever des défis liés au développement de nouvelles technologies, que ce soit à travers l'extension des plages de mesure aux plus petites dimensions ou la saisie des mesurandes d'un nouveau genre.

C'est le rôle de METAS et de tous les autres INM de créer les bases qui permettent, dans des domaines aussi variés, de définir correctement les grandeurs de référence ainsi que d'effectuer les mesures avec l'exactitude requise.

Cosa resta da fare?

I rapidissimi progressi tecnologici rendono necessarie misurazioni ancora più precise e affidabili. Ciò che non riusciamo a misurare sfugge alla nostra comprensione. Per questo i progressi in campo metrologico hanno un forte impatto sulla nostra capacità di capire e dare forma all'ambiente che ci circonda.

L'incessante evoluzione della metrologia contribuisce a vincere le sfide sociali presenti e future e a soddisfare le esigenze del mondo dell'industria e della politica.

In ambito sanitario la metrologia, con l'aiuto di materiali di riferimento riconosciuti e nuovi metodi di misurazione, può aiutare a migliorare la qualità e la comparabilità dei risultati diagnostici e degli esiti terapeutici.

Il controllo qualità effettuato su alimenti e acqua potabile è legato alla necessità di misurazioni tracciabili. Per la politica climatica è essenziale che le misure volte a ridurre gli effetti antropogeni sul clima si fondino su basi scientifiche solide e modelli climatici affidabili. A tal fine è imprescindibile avere una prospettiva olistica basata su dati comparabili.

Per conseguire gli obiettivi in campo climatico è necessaria una trasformazione radicale del sistema energetico e delle conseguenti modalità in cui l'energia viene ricavata, trasformata, commercializzata e consumata. Anche in questo ambito la metrologia sarà in grado di offrire soluzioni. A ciò si aggiungono le sfide che la metrologia deve affrontare nello sviluppo di nuove tecnologie, estendendo i campi di misura alle più piccole dimensioni o registrando grandezze di misurazione del tutto nuove.

Il ruolo del METAS e di tutti gli altri istituti metrologici (NMI) è quello di creare i presupposti affinché in territori così diversi le grandezze di riferimento siano definite in modo corretto e le misurazioni possano avvenire con la precisione richiesta.

What remains to be done?

The rapid pace of technological progress calls for ever more precise and reliable measurements. What we are unable to measure, we are unable to understand correctly. Advances in metrology thus have a great impact on our ability to understand and shape our environment.

The ongoing development of metrology is helping to master current and future social challenges and to meet the needs of industry and policymakers.

In the health sector, metrology can contribute to improving the quality and comparability of diagnostic results and therapeutic outcomes thanks to recognised reference materials and new measurement methods.

The quality control of foodstuffs and drinking water is dependent on traceable measurements. With regard to climate policy, it is vital that the political measures aimed at reducing anthropogenic impacts on the climate are based on sound science and reliable climate models. This makes it absolutely essential to follow a holistic approach based on comparable data.

If the climate goals are to be achieved, a fundamental restructuring of the energy system is necessary, with implications for the way in which we generate, transform, trade and consume energy. Here, too, metrology will be able to provide solutions. Moreover, metrology continues to face challenges in the development of new technologies, whether through the expansion of measurement ranges into the very smallest dimensions or through the recording of new types of measured quantities.

The role of METAS and all other NMIs is to establish the foundations for the correct definition of reference values in such widely differing areas, enabling measurements to be performed with the requisite degree of accuracy.

Weiterbildungskurse Metrologie 2019

Formation continue en métrologie 2019

Längenmesstechnik Endmasse, Lehren und Handmessmittel

Der Kurs ermöglicht den Teilnehmerinnen und Teilnehmern, die allgemeinen Grundlagen der Längenmesstechnik in Theorie und Praxis kennen zu lernen und dimensionelle Messungen korrekt durchzuführen, auszuwerten und zu dokumentieren.

Daten:	22.–23. Januar 2019
Anmeldetermine:	14. Dezember 2018
Preis:	CHF 1 600.00
Kurssprache:	Deutsch
Veranstaltungsort:	METAS, Bern-Wabern

Grundlagen der Messunsicherheit

Der Kurs ermöglicht den Teilnehmerinnen und Teilnehmern, ihren Messprozess selbstständig zu analysieren und ein fundiertes und normenkonformes Messunsicherheitsbudget zu erstellen. Die Theorie wird anhand eines physikalischen Experiments in die Praxis umgesetzt.

Daten:	8.–9. April 2019 3.–4. September 2019
Anmeldetermine:	8. März 2019, 2. August 2019
Preis:	CHF 1 600.00
Kurssprache:	Deutsch
Veranstaltungsort:	METAS, Bern-Wabern

VNA Tools training course

VNA Tools is a free software developed by METAS for measurements with the Vector Network Analyzer (VNA). The software facilitates the tasks of evaluating measurement uncertainty in compliance with the ISO-GUM and vindicating metrological traceability. The software is available for download at www.metas.ch/vnatools. The three day course provides a practical and hands-on lesson with this superior and versatile software.

Dates:	May 14 to 16, 2019 (VNA expert day on May 17, 2019) November 5 to 7, 2019 (VNA expert day on November 8, 2019)
Registration deadline:	April 15, 2019, October 7, 2019
Place:	METAS, Bern-Wabern

It is still possible to register for the course after the registration deadlines until we have reached the maximal number of 16 participants.

Cost:	CHF 2 800.00
Language:	English
Place:	METAS, Bern-Wabern

Grundlagen der Metrologie

Der Kurs gibt eine Einführung in die Metrologie und vermittelt Grundlagenwissen zur Umsetzung der wichtigsten technischen Normenforderungen der ISO 17025. Er bildet die Grundlage für die fachspezifischen Metrologiekurse am METAS.

Daten:	21. Mai 2019
Anmeldetermine:	19. April 2019
Preis:	CHF 600.00
Kurssprache:	Deutsch
Veranstaltungsort:	METAS, Bern-Wabern

Principes de base en incertitude de mesure

Les participants sont capables d'analyser de manière indépendante leur processus de mesure et de réaliser un budget d'incertitude de mesure correct et conforme aux normes. La théorie est mise en pratique au travers d'une expérience physique.

Date:	25–26 septembre 2019
Délai d'inscription:	23 août 2019
Coût:	CHF 1 600.00
Langue du cours:	Français
Lieu:	METAS, Bern-Wabern

Weitere Metrologiekurse

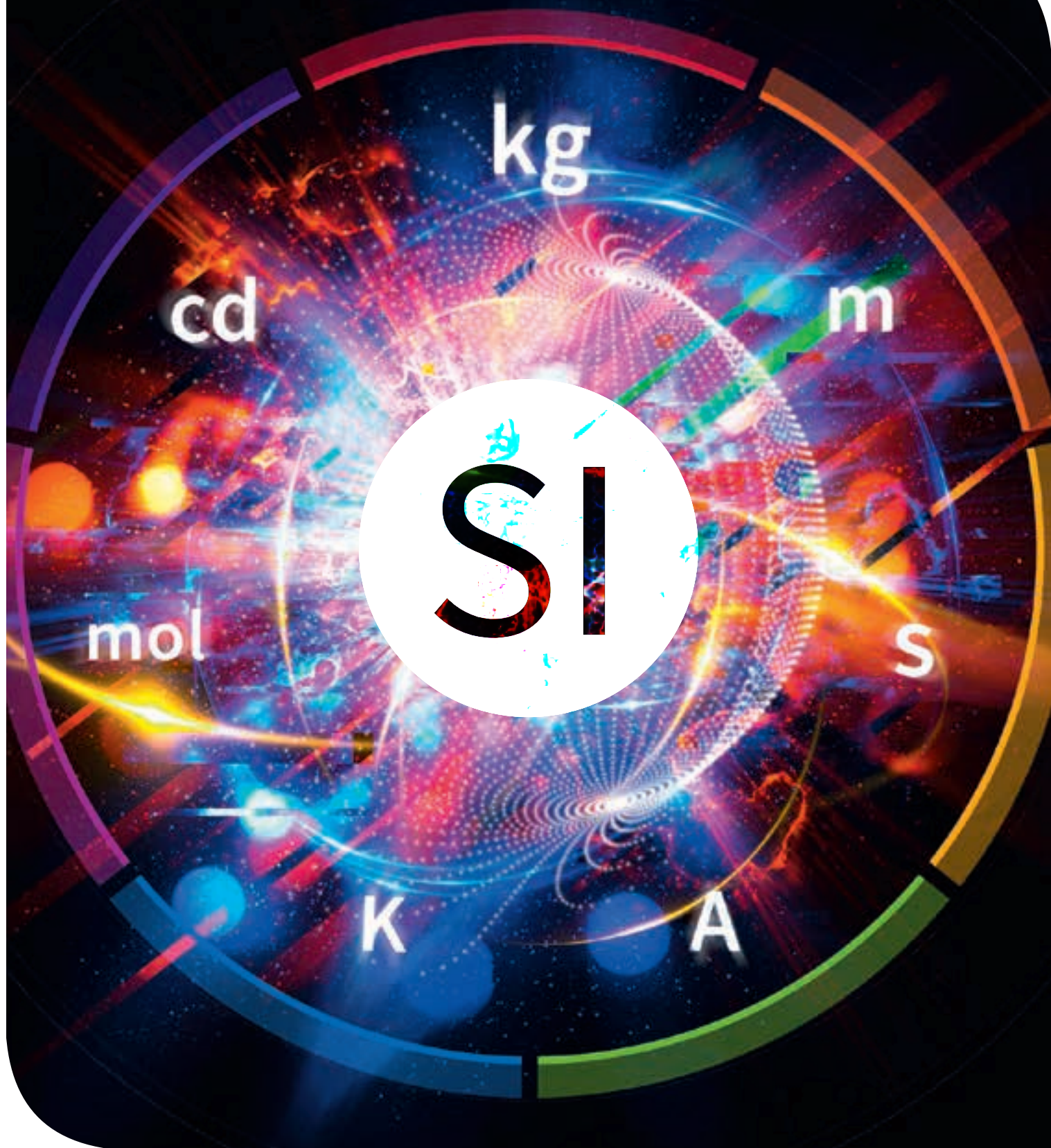
Für die folgenden Kurse stehen (noch) keine Kursdaten fest, jedoch bitten wir Sie, sich bei Interesse gleichwohl zu melden, da wir die Kurse nicht zuletzt auch aufgrund der Nachfrage anbieten. Sie werden bei der Ausschreibung der Kurse umgehend informiert.

- **Faseroptik, OTDR**
Für Mitarbeitende von Kalibrierlaboratorien im Bereich der Faseroptik-Messtechnik. Sie lernen die theoretischen Grundlagen der optischen Rückstreuungsmessgeräte (OTDR) kennen und sind in der Lage, OTDR-Kalibrierungen normengerecht durchzuführen, auszuwerten und zu dokumentieren.
- **Grundlagen der Druckmesstechnik, Masse und Kraft**
Spezifische Themen aus dem Bereich der Druckmesstechnik in Theorie und Praxis, mit Schwerpunkten nach allfälliger Absprache.

Weitere Informationen und Hinweise zur Anmeldung finden Sie auf unserer Internetseite (www.metas.ch/kurs). Für zusätzliche Informationen zum Kursangebot wenden Sie sich an: sekretariat@metas.ch oder Telefon 058 387 01 11

World Metrology Day

www.worldmetrologyday.org



Bureau
International des
Poids et
Mesures



Constant evolution

The International System of Units

20 May 2018

