

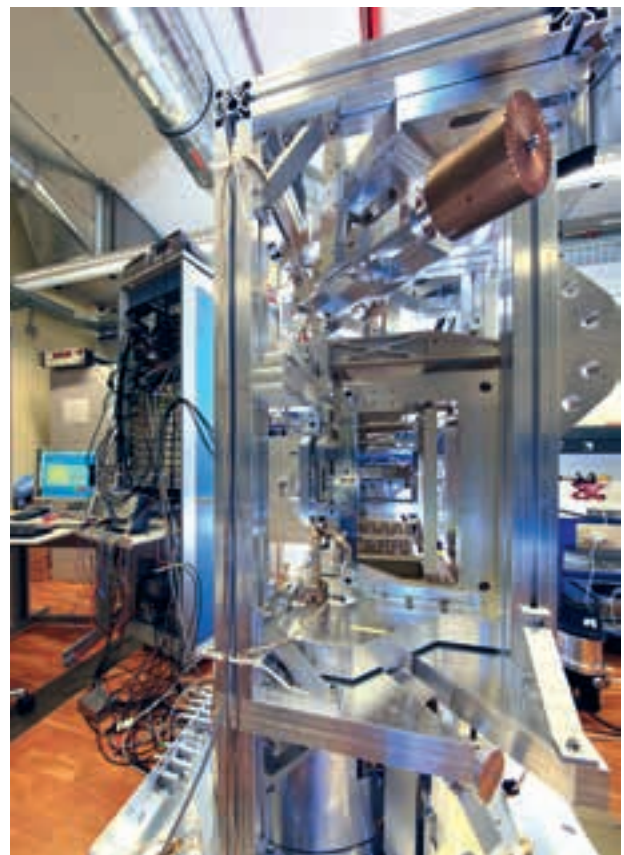
La réalisation du kilogramme

Dans le SI révisé, la définition du kilogramme devient:

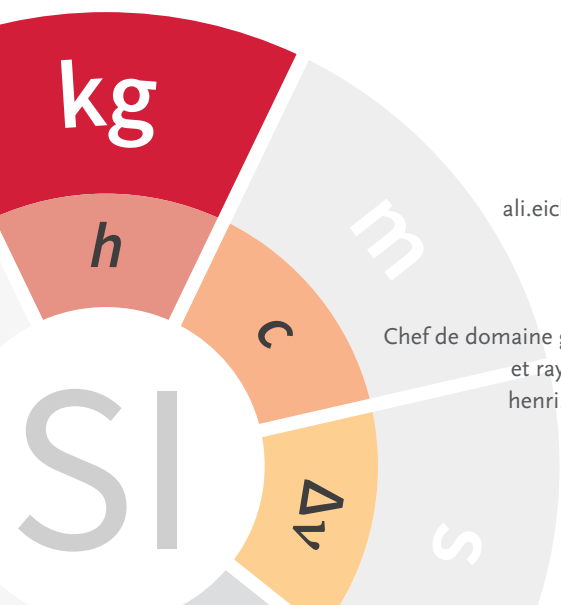
Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction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



1: Iod stabilisierter He-Ne Laser bei 633 nm.



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

La réalisation de la seconde

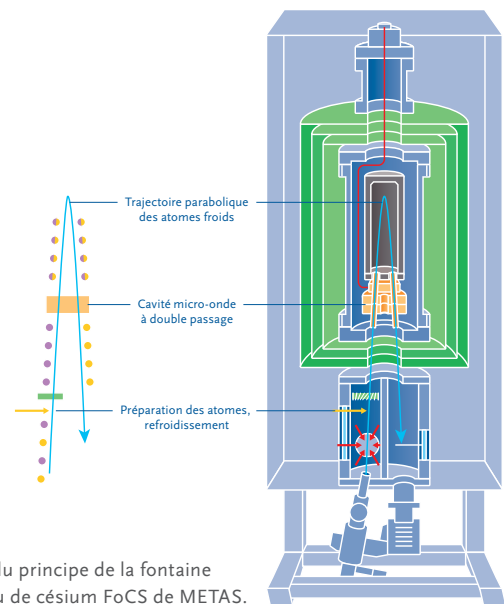
Dans le SI révisé, la définition de la seconde devient:

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 .

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

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

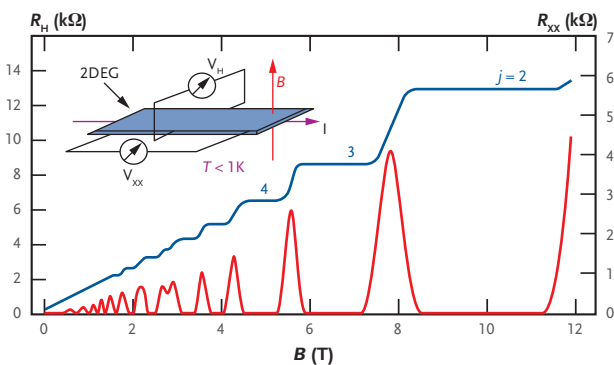
$$K_J = 483\,597.848\,416\,984 \text{ GHz/V}$$

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

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

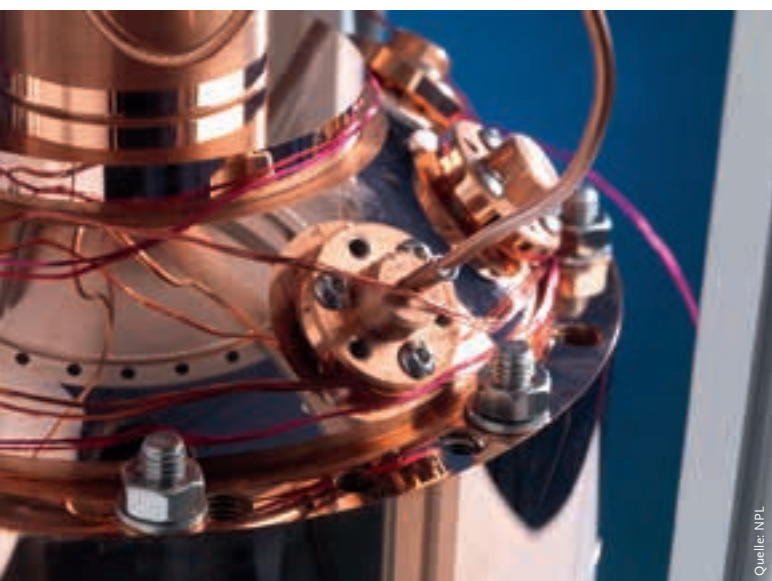
Im revidierten SI ist die Temperatureinheit Kelvin wie folgt definiert:

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.

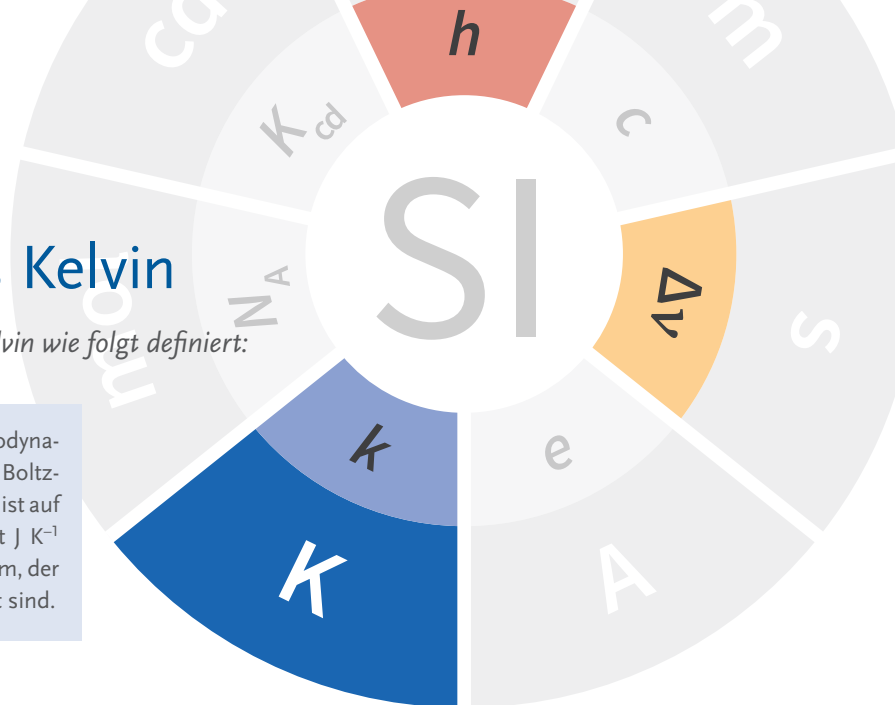
Die neue Kelvin-Definition besagt, dass 1 Kelvin einem Bereich der thermodynamischen Temperatur T entspricht, der eine Änderung der thermischen Energie kT um 1.380649×10^{-23} J bewirkt.

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.

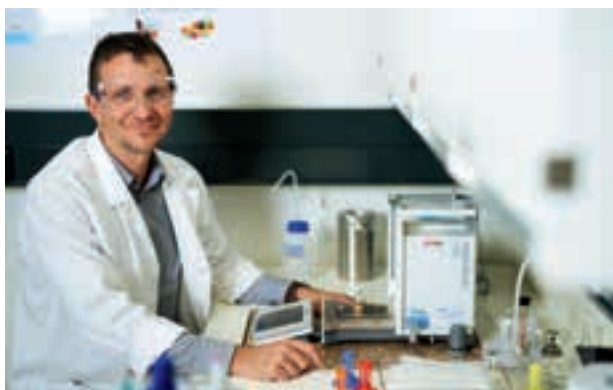
In der Praxis verlangen alle chemischen Messungen die Realisierung abgeleiteter Einheiten der Stoffmenge, wie beispielsweise die Stoffmengenkonzentration (mol/m^3), der Stoffmen-

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.

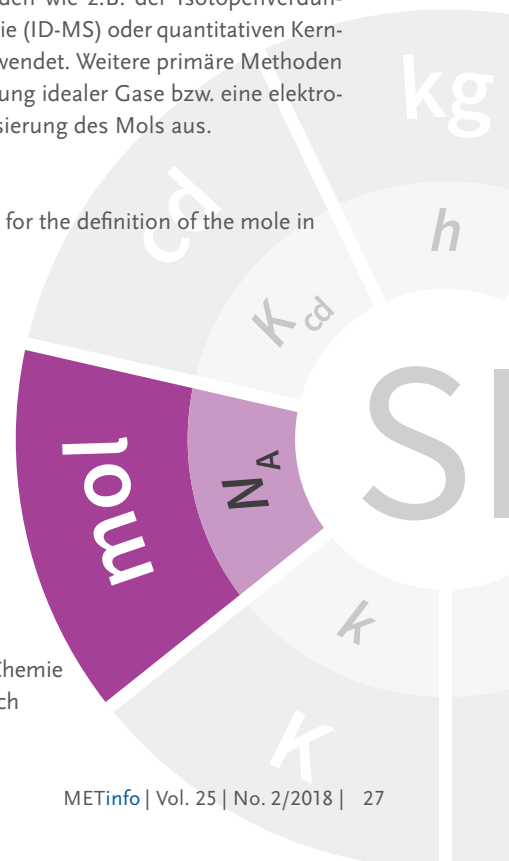
Die am häufigsten verwendete primäre Methode zur Realisierung des Mols ist die Gravimetrie, da die Masse einer Probe relativ einfach und genau bestimmt werden kann. Bei der Verwendung hochreiner Substanzen kann das Mol mit relativen Unsicherheiten unter 1×10^{-4} realisiert werden. Diese zertifizierten 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 Lichtstärkennormallampen 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 Normallampen bestimmt werden.

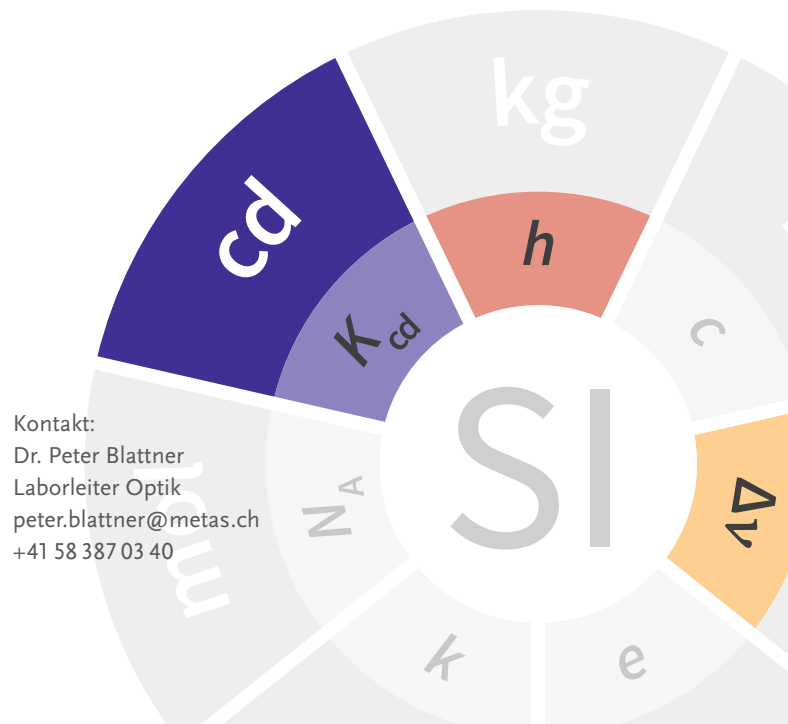
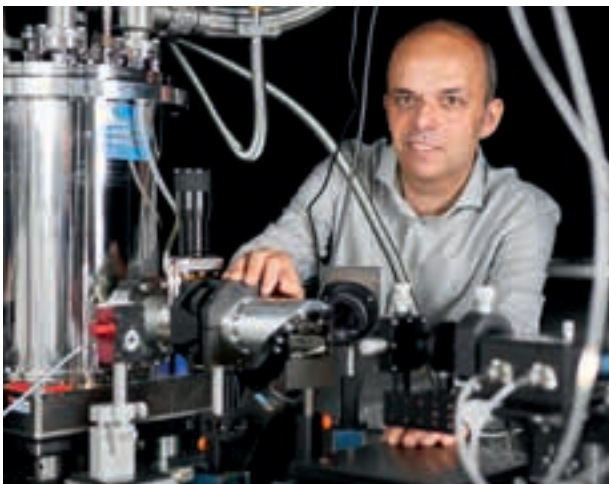
Die Luxmeter bestehen aus Siliziumdetektoren mit nahezu 100 % Quantenausbeute, einer Präzisionsblende und einem temperaturstabilisierten Farbfilter für die Anpassung an $V(\lambda)$. Sie sind ihrerseits an die Primärrealisierung der optischen Strahlungseinheit angeschlossen: ein kryogenes Absolutradiometer, 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