

# Das neue Internationale Einheitensystem (SI)



# Paradigmenwechsel im Internationalen Einheitensystem (SI)

Die globale Revolution fand am 20. Mai 2019 statt, nachdem sie von langer Hand vorbereitet war. Das Bezugssystem, in dem wir „die Welt vermessen“, bekam an diesem Tag die physikalisch bestmögliche Definitionsgrundlage: Naturkonstanten wie die Lichtgeschwindigkeit, die Ladung des Elektrons oder das Planck'sche Wirkungsquantum legen seitdem alle physikalischen Einheiten – von Meter bis Kilogramm, von Ampere bis Kelvin – fest. Damit hat das Internationale Einheitensystem (Système International d'unités, kurz: SI), das von nahezu 100 Staaten der Welt mitgetragen wird, eine grundlegende Auffrischung erfahren, sodass es allen wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts gelassen entgegensehen kann.

## Die Idee

Die Sekunde und der Meter hatten schon seit Jahrzehnten einen Zustand erreicht, den die anderen Einheiten noch anpeilten: Beide Einheiten beziehen sich auf unveränderliche Eigenschaften der physikalischen Welt. So beruht die Sekunde auf einer definierten Zahl von Schwingungen in der Elektronenhülle des Cäsiumatoms (diese Definition gilt seit 1967), und der Meter macht sich zunutze, dass die konstante Geschwindigkeit des Lichts ein fundamentales Merkmal der Natur ist (diese Definition gilt seit 1983). Der entscheidende Vorteil, Naturkonstanten als Definitionsgrundlage zu nehmen, liegt darin begründet, dass sie so sind, wie sie heißen – sie sind konstant. Ist dagegen der Meter als Urmeter verkörpert, etwa in Form eines Platin-Iridium-Stabes von x-förmigem Querschnitt, ist Konstanz prinzipiell unerreichbar. Schon jedes leichte Schwanken der Temperatur änderte den Meter, von irgendwelchen Beschädigungen des Objekts ganz zu schweigen. Änderungen in der Größenordnung von Mikrometern waren, auch bei sorgfältigstem Umgang, für einen Urmeter an der Tagesordnung. Für eine hochtechnisierte Welt, in der längst der Nanometer Einzug gehalten hat, waren solche Änderungen freilich gigantisch und mussten unbedingt vermieden werden. Die Lösung des Problems heißt: Man nehme kein Artefakt, um die Einheit zu definieren, sondern eine Naturkonstante. Diesen Wandel, hin zu maßgebenden (!) Naturkonstanten, haben nun nicht nur der Meter und die Sekunde, sondern alle Einheiten vollzogen. Im Herbst des Jahres 2018 verabschiedeten die Staaten, die sich am Internationalen Einheitensystem beteiligen, auf einer Weltkonferenz in Versailles in Frankreich den Umbau des SI und kündigten damit die Revolution an, die – ganz symbolträchtig – am Weltmetrologietag des Folgejahres (eben am 20. Mai 2019) stattfinden sollte.

## Das Ereignis

Alle vier Jahre kommt die metrologische Welt zu einem „globalen Familientreffen“ zusammen: Die Mitgliedsstaaten und die assoziierten Staaten der Meterkonvention (eines Staatenvertrags, der bis ins Jahr 1875 zurückreicht) entsenden politische und wissenschaftliche Abgeordnete zur Generalkonferenz für Maße und Gewichte (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) in Paris, um die metrologischen Leitplanken für die kommenden Jahre aufzustellen. Alle Änderungen am Internationalen Einheitensystem müssen dabei nicht nur wissenschaftlich fundiert, sie müssen auch wissenschaftspolitisch konsensfähig sein. Denn die Einheiten, in denen wir messen wollen, sind ja nicht nur Elemente eines kleinen Wissenschaftszirkels, sondern sie sind vielmehr wesentliches Werkzeug jedes Handelns und Wirtschaftens. Jede Änderung im und am Einheitensystem hat sofort Auswirkungen auf die „messende Wirtschaft“ in allen ihren Technologiebereichen und auf jeden Bürger, dessen Alltag immer

In der Welt des Messens herrscht große Einigkeit. So zu erleben in Versailles im November 2018 auf der Generalkonferenz der Meterkonvention, eines auf das Jahr 1875 zurückgehenden Vertrags, der mittlerweile von über 100 Staaten akzeptiert ist. Die Delegierten antworteten alle mit „Ja“ auf die Frage, ob in Zukunft Naturkonstanten die Einheiten definieren sollen – ein Meilenstein in der Wissenschaftsgeschichte „für alle Zeiten, für alle Völker“. (Foto: BIPM)





ein „vermessener Alltag“ ist, ob als Verbraucher, Kunde oder Patient. Daher werden Entscheidungen zum Einheitensystem auf einer Generalkonferenz nicht en passant getroffen, sondern sind von langer Hand vorbereitet. Dies galt ganz besonders für die 26. Generalkonferenz im November des Jahres 2018, auf deren Agenda die Verabschiedung der grundlegenden Revision des SI stand. Bereits auf mehreren Generalkonferenzen zuvor wurden die Voraussetzungen für und die Forderungen an ein neues SI formuliert und somit auch Zielmarken für die metrologischen Laboratorien (vor allem: hinreichend kleine Unsicherheiten bei den Messungen) aufgestellt. Das Ergebnis der Abstimmung bei dieser Generalkonferenz fiel sehr eindeutig, nämlich einstimmig aus: Die Staaten der Meterkonvention (alle Delegierten wurden länderspezifisch aufgerufen und um Ihre Stimme gebeten) votierten für den Umbau des Einheitensystems auf der Grundlage von Naturkonstanten.

## Die Konstanten

Ein kurzer Blick zurück, vor die Zeit der Neudefinitionen, zeigt die Problematik der Situation. Vor dem 20. Mai 2019 hatte man die Einheiten auf unterschiedlichste Weise festgelegt, etwa mit einem Artefakt beim Kilogramm oder einer idealisierten Messvorschrift beim Ampere, und bestimmte in diesem Einheitensystem die Werte der Naturkonstanten. So legte eine Definition aus dem Jahre 1889 fest, was ein Kilogramm sein sollte, und auf dieser Grundlage wurden etwa die Masse eines Protons, eines Elektrons oder anderer elementarer Teilchen gemessen. Dies führte zu dem bemerkenswerten Umstand, dass sich die Werte der Naturkonstanten permanent änderten, weil sich in diesen Werten die jeweiligen Messmöglichkeiten widerspiegelten. Eine Expertengruppe, nämlich die „CODATA Task Group on Fundamental Constants“ in den USA, hatte (und hat) die Aufgabe, die in den Physiklaboratorien aus aller Welt ermittelten Werte von Naturkonstanten zu bewerten und unter einen Hut zu bringen. Alle vier Jahre bekam so beispielsweise die Ladung des Elektrons einen neuen Zahlenwert – obwohl sich die Ladung real natürlich nicht geändert hatte. Geändert hatte sich lediglich unsere Messkunst und damit unser Wissen über die Welt. Mit der Revision des Einheitensystems wurde der Spieß nun genau umgedreht: So lässt sich im neuen System, in dem insgesamt sieben Naturkonstanten festgelegte Werte bekommen haben, jede beliebige Geschwindigkeit relativ zur Lichtgeschwindigkeit ausdrücken oder jede elektrische Ladung relativ zur Elementarladung des Elektrons. In diesem Sinne werden die Einheiten im neuen System nicht mehr gesetzt, sie werden vielmehr – anhand der vorgegebenen Naturkonstanten – ausgerechnet. Nun wurden die Werte der ausgewählten Naturkonstanten freilich nicht willkürlich festgelegt. Schließlich sollte beispielsweise die Standardkörpertemperatur des gesunden Menschen auch im neuen System bei 37 °C liegen, und es sollte sich das Körpergewicht nicht daran stören, wie das Kilogramm definiert ist. Aus eben diesem Grund, einem nahtlosen Übergang vom alten ins neue System, versuchten die metrologischen Laboratorien die fraglichen Naturkonstanten ein letztes Mal so gut es irgend geht zu messen. Diese Experimente liefen in einer Art kooperativem Wettbewerb zwischen den nationalen Metrologieinstituten, also etwa der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Deutschland, dem National Institute

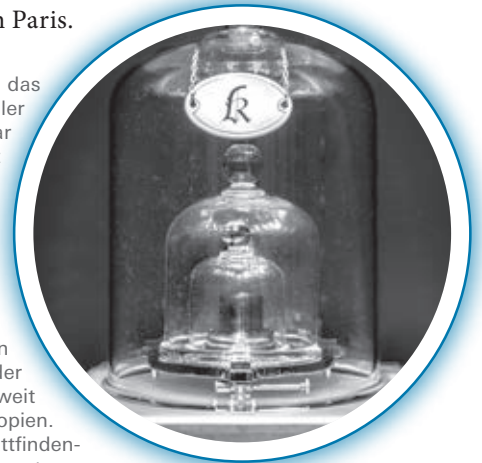
of Standards and Technologie (NIST) in den USA oder dem National Metrology Institute of Japan. Schließlich bekamen, neben der schon definierten „Uhrenfrequenz“ im Cäsiumatom und neben der Lichtgeschwindigkeit, auch noch folgende Konstanten feste Werte: das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$ , die Avogadro-Konstante  $N_A$ , die Boltzmann-Konstante  $k_B$  und die Elementarladung  $e$ .

## Probleme mit dem Kilogramm

Die größte Not im alten Einheitensystem hat das Kilogramm bereitet, das in einem ganz wörtlichen Sinne in die Jahre gekommen war. Es war auch im 21. Jahrhundert immer noch das, was es schon Ende des 19. Jahrhunderts war: die Masse eines ganz gewissen Metallzylinders in einem Tresor im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in der Nähe von Paris.

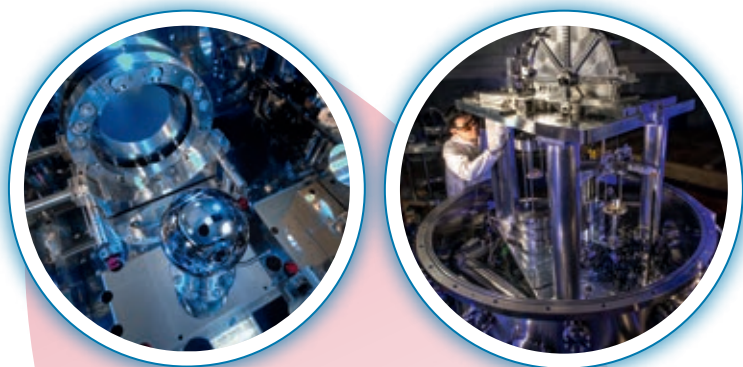
Von 1889 bis 2019 war das Urkilogramm das Maß aller Massen. Per Definition war festgelegt: 1 kg entspricht der Masse dieses Metallstücks. In einem Tresor im Internationalen Büro für Maße und Gewichte (BIPM) bei Paris wurde und wird das Urkilogramm („Le grand k“) zusammen mit offiziellen Kopien, den sogenannten „Témoins“ oder Zeugen, aufbewahrt. Weltweit gibt es zudem nationale Kopien. Bei den alle paar Jahre stattfindenden Massevergleichen musste man

feststellen: Im Vergleich zum Urkilogramm wurden fast alle Kopien scheinbar schwerer. Warum, das kann man nicht mit Sicherheit sagen. Deshalb war klar: Das Urkilogramm muss abgelöst werden. (Foto: BIPM)



Jedes Kilogrammstück auf der Welt bezog sich auf dieses Urkilogramm. Und nicht nur das: Viele andere Einheiten wie das Mol oder das Ampere waren von ihm abhängig. Hatte das Kilogramm ein Problem, hatten es die anderen Einheiten automatisch auch. Die Probleme einer solchen Kilogramm-Definition stecken prinzipiell in der Verkörperung – denn jedes makroskopische Objekt in dieser Welt verändert sich, und so auch das Ur-Kilogramm und seine nationalen Kopien, die die Mitgliedsstaaten der Meterkonvention bekommen haben. Wer also im alten Einheitensystem behauptete, dass niemand wüsste, wie schwer ein Kilogramm auf das Mikrogramm genau wirklich sei, widersprach damit zwar der Definition, kam jedoch dem Kern des Problems sehr nahe. Dies rief die Metrologen auf den Plan, um eine Lösung für dieses Problem zu finden.

Zwei prinzipiell unterschiedliche Experimente wurden erdacht und ausgeführt, die dem Kilogramm ein zukünftig stabiles Dasein verschaffen sollten. In der einen experimentellen Anordnung wird die Schwerkraft auf ein Massestück durch eine elektromagnetische Kraft kompensiert. Hierbei werden mehrere elektrische Quanteneffekte ausgenutzt, was dazu führt, dass dieses sogenannte Wattwaagen-Experiment einen Wert des Planck'schen Wirkungsquantums  $h$  liefert. Wesentliche Pro-



Wie alle anderen Einheiten wird auch das Kilogramm seit dem 20. Mai 2019 über eine Naturkonstante definiert. Dafür wurde eine Konstante ausgewählt, deren Einheit das kg enthält und deren Wert mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Die Wahl fiel auf die Planck-Konstante  $h$ . Deren Wert wurde über zwei voneinander unabhängige Experimente bestimmt: das Avogadro-Experiment (hier zählt man Atome in einer perfekten Siliziumkristallkugel, (links): PTB) und die Wattwaage (hier kompensiert man ein Gewicht über quantenelektrische Effekte, (rechts): NIST).

tagonisten dieses Experiments arbeiteten etwa in Kanada, in den USA oder in England. Ein dazu alternatives Experiment, das von der PTB favorisiert wurde, führt eine makroskopische Masse auf die Masse eines Atoms zurück. Der Weg des Zählens einer sehr großen Anzahl von Atomen gelingt dabei nur, wenn sich die Atome in einer hochgeordneten Struktur befinden – in der Struktur eines Einkristalls. Dieses Avogadro-Experiment (das so heißt, weil als direktes Messergebnis die Avogadro-Konstante auftaucht) verwendet eine Kristallkugel aus isotonenreinem Silizium, das als Ausgangsmaterial in zehntausenden von Zentrifugen angereichert wurde. Da sich neben der Avogadro-Konstante zugleich auch das Planck'sche Wirkungsquantum aus den Messungen im Avogadro-Experiment ermitteln lässt, sind die Ergebnisse mittels Wattwaage und Siliziumkugel vergleichbar. Der wissenschaftliche Wettstreit zwischen beiden Experimenten musste jedoch schlussendlich auf einer gemeinsamen Ebene landen: Erst als die Ergebnisse aus beiden Experimenten untereinander konsistent waren, war der Weg zu einem neuen Kilogramm offen.

Das Rezept für ein neues Kilogramm beginnt so: „Man nehme 21,442... Quadrillionen Atome“. Und zwar nehme man Atome des Elements Silizium. Denn aus Silizium lassen sich große Kristalle züchten. Und in diesen lässt sich sehr genau zählen, wie viele Atome im Kristall „verbaut“ sind. Eine Siliziumkristallkugel ist damit eine perfekte Zählmaschine für Atome und der Ausgangspunkt für eine neue Definition, was ein Kilogramm sein soll.



Material	natürliches Silizium bestehend aus 3 Isotopen: $^{28}\text{Si}$ (ca. 92 %), $^{29}\text{Si}$ (ca. 5 %), $^{30}\text{Si}$ (ca. 3 %)
Größe	etwa 93,6 mm Durchmesser
Form	max. Abweichung von der Kugelform beträgt wenige zehn nm (1 Nanometer = 1 nm = 1 milliardstel Meter)
Masse	etwa 1 kg
Kristallzüchtung	Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Berlin
Kugelherstellung	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig

Messungen	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig Für Hochpräzisionsmessungen werden Kugeln aus einem einzigen Isotop $^{28}\text{Si}$ (ca. 99,999 %) benötigt. (Weil man nur die leichte Siliziumvariante nimmt, braucht man etwas mehr Atome für ein Kilogramm, nämlich 21,525... Quadrillionen.) Ein solches isotonenreines Material ist nur in einem sehr aufwendigen Prozess herzustellen und entsprechend teuer. Die Produktionskosten für eine solche Kugel liegen in der Größenordnung von 1 Million Euro.
Neudefinition des kg	Beschluss der Generalkonferenz für Maße und Gewichte (CGPM) im Herbst 2018. Die Neudefinition trat dann am Weltmetrologietag (20. Mai) des Jahres 2019 in Kraft.

## Das neue SI in der Schule

Die Lehrerfrage „Was ist ein Kilogramm?“ war vor dem 20. Mai 2019 eine leichte Beute für jeden Schüler, der seine Nase nur ein wenig in die Bücher gesteckt hatte. Denn für die richtige Antwort folgten lediglich die Begriffe „Ur-Kilogramm“, „sehr alt“ und „Paris“, womit fast schon alles gesagt war. Nach der Neudefinition lässt dieselbe Lehrerfrage, so ein Lehrer sie überhaupt noch stellen wird, höchstens die Finger der Physickracks in die Höhe schnellen. Aus mehrheitlicher Schülersicht ist das natürlich schade. Aber das neue SI ist nun einmal deutlich abstrakter und intellektuell anspruchsvoller als das vorherige System. Zunächst gilt es für jeden Schüler, die generelle Bedeutung der Naturkonstanten in Ansätzen nachzuvollziehen und ihr Konzept zu hinterfragen: Was sind Naturkonstanten, woher kommen sie, warum sind sie so, wie sie sind? Und dann müssen die ausgewählten Naturkonstanten im Einzelnen verstanden werden, was bei der Lichtgeschwindigkeit sicher noch funktioniert, bei einer Konstante mit der Dimension einer Wirkung ( $h$ ) aber möglicherweise schon nicht mehr. Die eigentliche Verständnishürde entsteht dadurch, dass die ausgewählten Konstanten nicht eins zu eins die Basiseinheiten abbilden. Das wäre der Fall, hätte jede Einheit einfach „ihre Konstante“ bekommen, was allerdings voraussetzt, dass diese Konstante auch die Dimension eben dieser Einheit trägt. Die frühere Definition des Meters über eine Lichtwellenlänge als elementare Länge war beispielsweise eine solche „einfache Zuordnung“. Das neue SI verlangt dagegen eine größere Transferleistung. So werden etwa alle Größen der Mechanik – die aus den Einheiten für Zeit, Länge und Masse gebildet werden – durch die drei Konstanten einer Frequenz, einer Geschwindigkeit und einer Wirkung repräsentiert. Was hier im Wesentlichen geschieht, ist die Darstellung der Welt in einem neuen Koordinatensystem. Und in dem gilt es, sich zurechtzufinden – eine Herausforderung nicht nur an jeden Schüler, sondern auch an die didaktischen Konzepte jedes Lehrers und jeder Lehrerin.

## Das neue SI in der Wissenschaft

Das neue Einheitensystem ist ein Meilenstein der Wissenschaftsgeschichte und, in absehbarer Zeit nach der Neudefinition, auch der Technikgeschichte. Zugleich ist es wegen



\*Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsium-Isotops  $^{133}\text{Cs}$

**Das Kilogramm**  
(Symbol kg)

ist die SI-Einheit der Masse. Es wird definiert durch die Konstante des Planck'schen Wirkungsquantums  $h$ . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  festgelegt, wenn sie in der Einheit  $\text{J} \cdot \text{s}$  bzw.  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  angegeben wird und die Sekunde und der Meter durch  $\Delta\nu$  und  $c$  definiert sind.



**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  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  angegeben wird und die Sekunde durch  $\Delta\nu$  definiert ist.



**Die Sekunde**  
(Symbol s)

ist die SI-Einheit der Zeit. Sie wird definiert durch die Konstante der Cäsiumfrequenz  $\Delta\nu$ , der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsium-Isotops  $^{133}\text{Cs}$ . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf 9 192 631 770 festgelegt, wenn sie in der Einheit Hz bzw.  $\text{s}^{-1}$  angegeben wird.



**Das Ampere**  
(Symbol A)

ist die SI-Einheit der Stromstärke. Es wird definiert durch die Konstante der Elementarladung  $e$ . Der Zahlenwert dieser Konstante ist auf  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  festgelegt, wenn sie in der Einheit C bzw.  $\text{A} \cdot \text{s}$  angegeben wird und die Sekunde durch  $\Delta\nu$  definiert ist.



**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  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  festgelegt, wenn sie in der Einheit  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$  bzw.  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  angegeben wird und das Kilogramm, der Meter und die Sekunde durch  $h$ ,  $c$  und  $\Delta\nu$  definiert sind.



**Das Mol**  
(Symbol mol)

ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält genau  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  Einzelteilchen. Diese Zahl ist der festgelegte numerische Wert der Avogadrokonstante  $N_A$ , ausgedrückt in der Einheit  $\text{mol}^{-1}$ , und wird als Avogadrozahl bezeichnet. Die Stoffmenge, Symbol  $n$ , eines Systems ist ein Maß für eine Anzahl spezifizierter Einzelteilchen. Dies kann ein Atom, Molekül, Ion, Elektron sowie ein anderes Teilchen oder eine Gruppe solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.



**Die Candela**  
(Symbol cd)

ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Raumrichtung. Sie wird definiert durch die Konstante  $K_{\text{cd}}$ , das photometrische Strahlungsäquivalent 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  $\Delta\nu$  definiert sind.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Telefon: (0531) 592-3006  
E-Mail: [presse@ptb.de](mailto:presse@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

Stand: 5/2020

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.