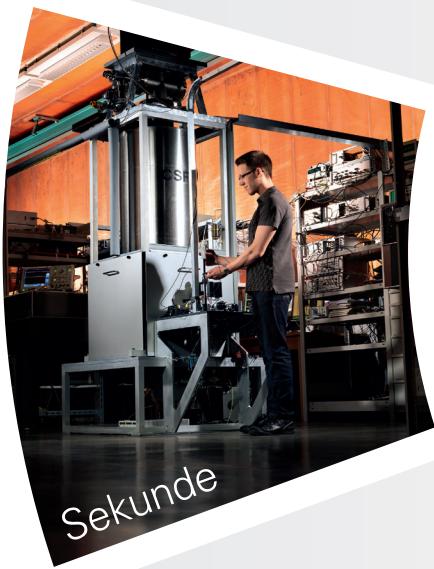


Das neue Internationale Einheitensystem (SI)



Das neue Internationale Einheitensystem (SI)

Das Bezugssystem, in dem wir „die Welt vermessen“, liegt fest. Wir teilen etwa die Zeit in Sekunden, die Länge in Meter und die Masse in Kilogramm. Das Internationale Einheitensystem (SI) wird von nahezu 100 Staaten mitgetragen und ist damit eine globale Erfolgsgeschichte. Jetzt erhält das SI eine grundlegende Auffrischung, sodass es allen wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts gelassen entgegensehen kann. Naturkonstanten wie die Lichtgeschwindigkeit oder die Ladung des Elektrons werden den Einheiten die bestmögliche Definitionsgrundlage liefern.



Die Idee

Die Sekunde und der Meter haben schon seit Langem einen Zustand erreicht, den die anderen Einheiten noch anpeilen: Sie beziehen sich auf unveränderliche Eigenschaften der physikalischen Welt. So beruht die Sekunde auf einer definierten Zahl von Schwingungen in der Elektronenhülle des Cäsiumatoms und der Meter macht sich zunutze, dass die konstante Geschwindigkeit des Lichts ein fundamentales Merkmal der Natur ist. 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 ändert den Meter, von irgendwelchen Beschädigungen des Objekts ganz zu schweigen. Änderungen in der Größenordnung von Mikrometern sind, auch bei sorgfältigstem Umgang, für einen Urmeter an der Tagesordnung. Für eine hochtechnisierte Welt, in der längst der Nanometer Einzug gehalten hat, sind solche Änderungen freilich gigantisch und müssen 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 die übrigen Einheiten noch vor sich. Aber der Fahrplan für diesen Wandel steht fest. Im Herbst des Jahres 2018 wird – so die (sehr wahrscheinliche) Prognose – eine Weltkonferenz in Paris den Umbau des Einheitensystems mit Brief und Siegel verabschieden.

Die Experimente

Heute hat man Einheiten und bestimmt in diesem Einheitensystem die Werte der Naturkonstanten. So haben wir definiert, was ein Kilogramm sein soll, und messen in dieser Einheit etwa die Masse eines Protons, eines Elektrons oder anderer elementarer Teilchen. Dies führt zu dem bemerkenswerten Umstand, dass sich die Werte der Naturkonstanten permanent ändern, weil sich in diesen Werten unsere Messmöglichkeiten widerspiegeln. Es gibt sogar eine Expertengruppe, nämlich die „CODATA Task Group on Fundamental Constants“ in den USA, deren Aufgabe es ist, die in den Physiklaboratorien aus aller Welt ermittelten Werte von Naturkonstanten zu bewerten und unter einen Hut zu bringen. Alle vier Jahre bekommt so beispielsweise die Ladung des Elektrons einen neuen Zahlenwert – obwohl sich die Ladung real natürlich nicht geändert hat. Geändert haben sich lediglich unsere Messkunst und damit unser Wissen über die Welt. Mit der Revision des Ein-



Schon Max Planck brachte im Jahr 1900, als er sein Strahlungsgesetz formulierte, „Constanten“ und die Idee „natürlicher Maßeinheiten“ ins Spiel, gültig für „alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und außermenschliche Culturen“.

Foto (aufgenommen ca. 1901): Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem

Δv

Probleme mit dem Kilogramm

Das Kilogramm ist in einem ganz wörtlichen Sinne in die Jahre gekommen. Es ist heute immer noch das, was es schon Ende des 19. Jahrhunderts war: die Masse eines ganz gewissen Metallzyinders in einem Tresor im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in der Nähe von Paris. Jedes Kilogrammstück auf der Welt bezieht sich auf dieses Ur-Kilogramm. Und nicht nur das: Viele andere Einheiten wie das Mol oder das Ampere sind von ihm abhängig. Hat das Kilogramm ein Problem, haben es die anderen Einheiten automatisch auch. Die Probleme der Kilogramm-Definition stecken in der Verkörperung – denn jedes makroskopische Objekt in dieser Welt verändert sich. So auch das Ur-Kilogramm und seine nationalen Kopien, die die Mitgliedsstaaten der Meterkonvention bekommen haben. Wer also heute behauptet, dass niemand wüsste, wie schwer ein Kilogramm auf das Mikrogramm genau wirklich ist, widerspricht zwar der Definition, kommt jedoch dem Kern des Problems sehr nahe. Dies hat die Metrologen auf den Plan gerufen, um eine Lösung für dieses Problem zu finden.

heitensystems wird der Spieß nun genau umgedreht: So ließe sich im neuen System 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. Allerdings hätte man natürlich gerne, dass beispielsweise die Standardkörpertemperatur des gesunden Menschen auch im neuen System bei 37 °C liegt oder dass sich das Körpergewicht nicht daran stört, wie das Kilogramm definiert ist. Aus eben diesem Grund, einem nahtlosen Übergang vom alten ins neue System, versuchen die metrologischen Laboratorien die fraglichen Naturkonstanten ein letztes Mal so gut es irgend geht zu messen. Diese Experimente laufen in einer Art kooperativem Wettbewerb zwischen den nationalen Metrologieinstituten. Und am Ende werden neben der heute schon definierten „Uhrfrequenz“ im Cäsiumatom und neben der Lichtgeschwindigkeit unter anderem auch noch folgende Konstanten feste Werte bekommen: das Planck'sche Wirkungsquantum h , die Avogadro-Konstante N_A , die Boltzmann-Konstante k_B und die Elementarladung e .

Zwei prinzipiell unterschiedliche Experimente sind es, die dem Kilogramm ein zukünftig stabiles Dasein verschaffen wollen. Die eine Herangehensweise kompensiert die Schwerkraft auf ein Massestück durch eine elektromagnetische Kraft. Hierbei werden mehrere elektrische Quanteneffekte ausgenutzt, was dazu führt, dass diese Experimente, die sogenannten Wattwaagen-Experimente, einen Wert des Planck'schen Wirkungsquantums h liefern. Wesentliche Protagonisten dieses Experiments arbeiten etwa in Kanada, in den USA oder in England. Ein dazu alternatives Experiment, das von der PTB favorisiert wird, 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 isotopenreinem Silizium, das als Ausgangsmaterial in zehntausenden von Zentrifugen angereichert wurde. Der wissenschaftliche Wettstreit zwischen beiden Experimenten muss jedoch schlussendlich auf einer gemeinsamen Ebene landen: Nur wenn die Ergebnisse aus beiden Experimenten untereinander konsistent sind, ist der Weg zu einem neuen Kilogramm offen.

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 Maß und Gewicht (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 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 gilt ganz besonders für die bevorstehende Generalkonferenz im November des Jahres 2018, auf deren Agenda die Verabschiedung der grundlegenden Revision des SI steht. 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 aufgestellt. Alle Anzeichen deuten darauf hin, dass die Metrologieinstitute die gesteckten Ziele (vor allem: hinreichend kleine Unsicherheiten bei den Messungen) erreichen. Offiziell in Kraft treten soll das neue SI dann, ganz symbolträchtig, am 20. Mai 2019 – dem Weltmetrologietag, dem Jahrestag der Meterkonvention.

Das neue SI in der Schule

Die Lehrerfrage „Was ist ein Kilogramm?“ ist heute eine leichte Beute für jeden Schüler, der seine Nase nur ein wenig in die Bücher gesteckt hat. Denn für die richtige Antwort folgen lediglich die Begriffe „Ur-Kilogramm“, „sehr alt“ und „Paris“, womit fast schon alles gesagt wäre. Nach der Neudeinition wird dieselbe Lehrerfrage, so ein Lehrer sie überhaupt noch stellen wird, höchstens die Finger der Physik-Cracks in die Höhe schnellen lassen. Aus mehrheitlicher Schülersicht ist das natürlich schade. Aber das neue SI ist nun einmal deutlich abstrakter und intellektuell anspruchsvoller als das jetzige 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, bekäme jede Einheit einfach „ihre Konstante“, 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.

Das neue SI in der Wissenschaft

Das neue Einheitensystem ist ein Meilenstein der Wissenschaftsgeschichte und, in absehbarer Zeit nach der Neudeinition, auch der Technikgeschichte. Zugleich ist es wegen seiner Universalität noch deutlich mehr: Es ist ein Meilenstein in der Kulturgeschichte. Vom Mittelalter bis weit ins 18./19. Jahrhundert hinein waren die Einheiten „fürstlich bestimmt“ und im Wesentlichen regional. Dann kamen die Revolutionäre in Frankreich Ende des 18. Jahrhunderts. Jetzt wurden Füße, Ellen, Meilen, Linien, Klafter und Ruten abgelöst durch ein Maß, das dem Planeten Erde abgerungen wurde – die Welt erlebte die Geburt des Meters und mit ihm des Kilogramms. Mit der Meterkonvention (im Jahr 1875) und allen beitretenen Staaten wurden diese Einheiten global. Heute leben wir auf unserem Planeten in der Wissenschaft vollständig (und im Alltag weitgehend) mit einem einheitlichen Maßsystem. Und im Jahr 2018 erfolgt dann der Schritt über unseren kleinen Planeten hinaus. Der Rückgriff auf Naturkonstanten macht die Einheitendefinitionen prinzipiell universal. Für die Wissenschaft ist dies allein schon aus systematischen Gründen ein enormer Fortschritt. Die Systematik meint den Anwendungsbereich des SI und zugleich seine innere „Logik“. So entfällt im neuen SI die Unterscheidung zwischen Basis единиц и производных единиц. Vielmehr sind alle Einheiten dann aus Naturkonstanten „abgeleitet“ und in diesem Sinne gleichwertig.

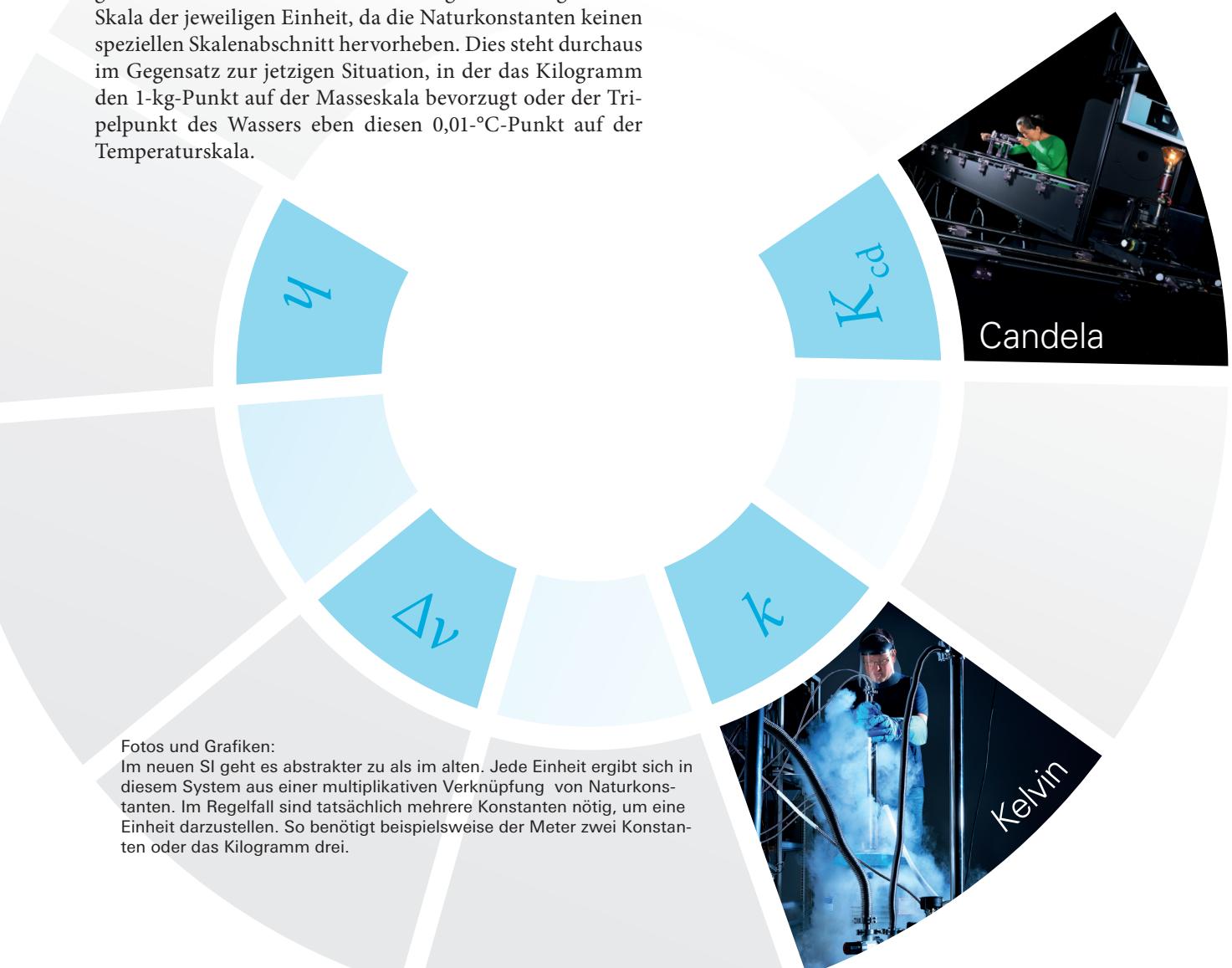


Das neue SI in der Technik

Für die Wissenschaft tritt der Fortschritt sofort ein, sobald die Neudefinitionen verabschiedet sind. Für die Technik zeigen sich die Fortschritte als Langzeitwirkung. Ein Clou am neuen Einheitensystem ist, dass in ihm keinerlei technische Barrieren mehr eingebaut sind. Schwankt etwa im jetzigen System die Masse des Ur-Kilogramms in einer gewissen Größenordnung, so ist die beste erreichbare Genauigkeit einer Wägung eben dadurch begrenzt. Im neuen SI dagegen gibt es keine Schwankungen mehr, da die Naturkonstanten ja verbindlich festgelegte Werte bekommen. So wird die Kilogramm-Definition unabhängig von möglichen Massedriften jedweder Verkörperungen sein. Alle elektrischen Einheiten inklusive des Ampere werden als Quantenrealisierungen (über den Josephson- und den Quanten-Hall-Effekt oder „einfach“ durch Zählen von Elektronen pro Zeit) Teil des Systems. Und nicht zuletzt wird das Mol nun auch definitorisch über eine festgelegte Anzahl von Teilchen (die Avogadro-Konstante) einer spezifizierten Substanz erfasst. Daher gilt im neuen SI: Kann genauer gemessen werden, können auch die Einheiten genauer realisiert werden – ohne Änderung der zugrundeliegenden Definition. In einer hochtechnischen Welt, in der weder die Längenteilungen beim Nanometer aufhören werden noch die Zeitteilungen bei Femtosekunden, ist diese technische Offenheit des neuen SI gegenüber allen zukünftigen Genauigkeitsfortschritten ein großer Gewinn. Und diese Offenheit gilt auf der gesamten Skala der jeweiligen Einheit, da die Naturkonstanten keinen speziellen Skalenabschnitt hervorheben. Dies steht durchaus im Gegensatz zur jetzigen Situation, in der das Kilogramm den 1-kg-Punkt auf der Masseskala bevorzugt oder der Tripelpunkt des Wassers eben diesen 0,01 °C-Punkt auf der Temperaturskala.

Das neue SI für die Öffentlichkeit

Die gute Nachricht für alle Bürger über das neue SI wird sein, dass niemand umdenken muss. Die Messungen am Tag nach der Verabschiedung der Neudefinitionen werden nicht anders ausfallen als die Messungen am Tag zuvor. Die Änderungen an der Systematik des SI werden im alltäglichen Leben unbemerkt bleiben. Die Waage im Supermarkt und die Zapfsäule an der Tankstelle werden auch nach den Neudefinitionen genauso arbeiten wie vorher. Weder das Kleine Blutbild im medizinischen Labor noch das große Koordinatenmessgerät in der Industrie werden neue Werte liefern. Und auch die Stromrechnung wird sich, zumindest deswegen, nicht ändern. Dieser lücken- und reibungslose Übergang stellt eine der wichtigsten Anforderungen bei der Revision des Einheitensystems dar. Schließlich geht es beim SI weniger um ein hochästhetisches Theoriegebilde (auch wenn sich die Metrologen über die Systematik des neuen Systems freuen) als vielmehr um ein praxistaugliches System, das es gestatten soll, unseren technischen Alltag in einer globalisierten Welt zu managen. Daher lautet die wirklich gute Nachricht für alle Bürger über das neue SI so: „Große globale Einigkeit: Kilogramm, Kelvin und Co. haben einen festen und zukunftssicheren Boden unter die Füße bekommen.“ Und die gute Zusatznachricht für alle exportorientierten Staaten: „Einem regen Handel mit allen Marsianern et al. steht nun nichts mehr im Wege.“



Anhang: Einheiten und „ihre“ Konstanten

Sieben Naturkonstanten erhalten im neuen SI festgelegte Werte; die Zahlenwerte entstammen den Ausgleichsrechnungen von CODATA im Sommer 2017 (CODATA 2017 special adjustment).

- Frequenz des **Hyperfeinstrukturübergangs** des Grundzustands im ^{133}Cs -Atom
 $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$
- **Lichtgeschwindigkeit** im Vakuum
 $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$
- **Planck-Konstante**
 $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ ($\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$)
- **Elementarladung**
 $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ($\text{C} = \text{A s}$)
- **Boltzmann-Konstante**
 $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ($\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
- **Avogadro-Konstante**
 $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Das **Photometrische Strahlungsäquivalent** K_{cd} einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ist genau gleich 683 Lumen durch Watt.

Sekunde (s)

$$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu$$

Meter (m)

$$1 \text{ m} = (c/299\,792\,458) \text{ s} = 30,663\,318\dots c / \Delta\nu$$

Kilogramm (kg)

$$1 \text{ kg} = (h/6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}) \text{ m}^{-2} \text{ s} = 1,475\,521\dots \cdot 10^{40} h \Delta\nu / c^2$$

Ampere (A)

$$1 \text{ A} = e/(1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}) \text{ s}^{-1} = 6,789\,686\dots \cdot 10^8 \Delta\nu e$$

Kelvin (K)

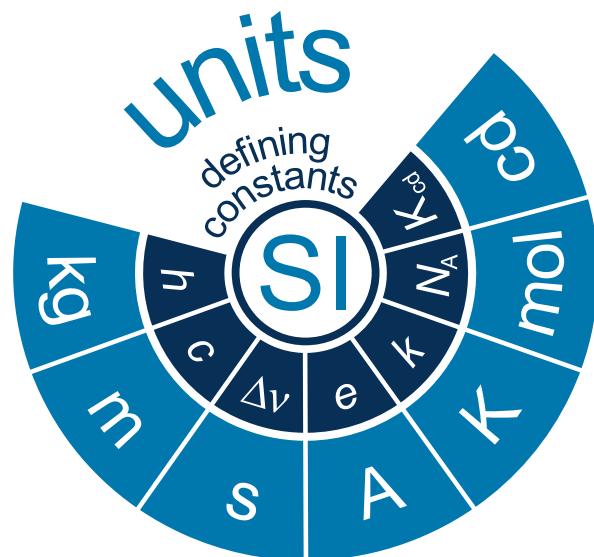
$$1 \text{ K} = (1,380\,649 \cdot 10^{-23} / k) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 2,266\,665\dots \Delta\nu h / k$$

Mol (mol)

$$1 \text{ mol} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} / N_A$$

Candela (cd)

$$1 \text{ cd} = (K_{cd}/683) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} = 2,614\,830\dots \cdot 10^{10} (\Delta\nu)^2 h K_{cd}$$



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-3006
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de

Stand: 11/2017



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

Foto Deckblatt (Erde): NASA