

## Neue Grundgrößen- bzw. Basiseinheiten-Definitionen

Am 20. Mai 2019 sollen die letzten ‚körperlichen‘ Normale für die physikalischen Mess- bzw. Basiseinheiten verschwinden. Mit dem neuen internationalen Einheitensystem SI wird dann ein Paradigmenwechsel abgeschlossen, der z.T. schon vor Jahrzehnten angefangen hat.

### Altes System

Nach der französischen Revolution wurde in Frankreich das ‚Zeitalter der Vernunft‘ ausgerufen. Damit einher ging die Abkehr von der Vielfalt lokaler Maße und die flächendeckende Einführung des Dezimalsystems. Ein neues Maßsystem sollte international überzeugen.

Wichtigstes Normal war der (auch: das) Urmeter (ab 1799; 1889 durch einen neuen Körper gleicher Länge ersetzt): Auf einer Metallschiene wurden zwei Einkerbungen angebracht und ihr Abstand als 1 m (Meter) definiert. Der Abstand hätte prinzipiell beliebig sein können, wurde aber so gewählt, dass der Äquatorumfang der erstmals ziemlich exakt vermessenen (und teilweise extra nachvermessenen) Erde 40 000 km betragen sollte. Zusammen mit der Einteilung des Vollwinkels in 400 Neugrad ( $^g$  bzw. gon; auf dem Taschenrechner G oder GRA) hätten dann zwei um  $1^g$  verschiedene geografische Längengrade durch den Nord- und Südpol der Erde auf dem Äquator immer 100 km lange Strecken bzw. Bogenstücke abgeteilt. Und der in Gebäudeecken und vielen Gegenständen allgegenwärtige rechte Winkel hätte statt krummer  $90^\circ$  ([Alt-]Grad; D oder DEG auf dem Taschenrechner) den schöneren Wert von  $100^g$  gehabt.

Geeichte Messlatten konnten leicht durch Anlegen an den Urmeter hergestellt werden. Dazu muss der Maßstab an den Stellen, die an den beiden Kerben des Urmeters liegen, mit Strichen markiert und dazwischen in 100 gleiche Teile (für die Zentimeter-Unterteilung) eingeteilt werden. Mit solchen Längenmaßstäben wird seither in den meisten Ländern die Länge gemessen. Natürlich muss nicht jeder Zollstock- bzw. Gliedermeter-Fabrikant oder Schullineal-Hersteller nach Paris fahren, sondern kann nationale bzw. bei den Eichämtern hinterlegte Kopien des Urmeters (Kopien 2., 3. oder weiterer Ordnung) verwenden.

Aber auch für weitere Größen stand der Urmeter Pate: Das Wasser in einem mit dem Meter- bzw. cm-Maßstab abgemessenen würfelförmigen Hohlraum von 10 cm Kantenlänge (dem Hohlmaß oder Volumen, das als 1 Liter definiert wurde) sollte die Masse von 1 kg haben. Da Wasser ohne umhüllendes Gefäß leider nicht verwendbar ist und seine Dichte außerdem mit der Temperatur und durch Verunreinigungen schwankt, wurde 1889 ein passender Metallkörper hergestellt, der als Urkilogramm bis heute das Normal für die (schwere und letztlich auch träge) Masse ist.

Das Wasser und das Dezimalsystem wurden auch zur Festlegung des Temperaturmaßes verwendet: Der Temperaturunterschied zwischen Schmelz- und Siedepunkt von Wasser wurde als  $100^\circ\text{C}$  (Grad Celsius) bzw. später als 100 K (Kelvin) definiert.

Nur bei der Zeit folgte die Festlegung der Grundeinheit s (Sekunde) der Tradition als  $\frac{1}{86\,400}$ -ster Teil der Dauer eines Tages bzw. der Umdrehungsdauer der Erde. Die um 1790 vorgeschlagene

Einteilung eines Tages in 10 Stunden zu je 100 Minuten von je 100 Sekunden konnte sich leider nicht durchsetzen, da der Vorschlag auch eine 10-Tage-Woche vorsah und die Menschen damals verständlicherweise wenig Begeisterung dafür aufbrachten, immer neun statt nur sechs Tage bis zum nächsten freien Sonntag arbeiten zu müssen. So blieb es beim herkömmlichen Kalender und der Uhr mit 2 mal 12 Stunden zu 60 Minuten von je 60 Sekunden (insgesamt also 86 400 Sekunden am Tag statt 100 000 Neusekunden). Und auch die 400-Neugrad-Einteilung des Vollwinkels konnte sich im Alltag nicht durchsetzen, wird aber seither in der Geodäsie verwendet – ähnlich wie auch amerikanische Wissenschaftler überwiegend das metrische System verwenden, obwohl im US-Alltag Meilen und Pfunde vorherrschen.

### **Probleme mit dem alten System und zwischenzeitliche Korrekturen**

Im Laufe der Zeit entwickelten Physiker und zunehmend auch Physikerinnen immer genauere Instrumente, bessere Messverfahren und -methoden. So wurde mit dem Mikroskop erkannt, dass die Kerben im Urmeter nicht völlig gerade, nicht wirklich parallel und damit nicht so scharf definiert waren, wie man inzwischen messen konnte. Die Meterdefinition wurde daher bereits 1960 vom Urmeter-Körper abgekoppelt und genauer über die Wellenlänge einer bestimmten Licht-Spektrallinie definiert, die vom chemischen Element Krypton ausgesandt wird.

Außerdem fiel auf, dass die Erddrehung nicht völlig gleichmäßig ist und sich außerdem die Rotation langfristig etwas verlangsamt. Seit 1967 wurde die Sekunde deshalb über die Schwingungsdauer eines bestimmten Lichts von Cäsium-Atomen definiert und sehr genau mit Atomuhren dargestellt. In der Folge mussten in manchen Jahren an Sylvester noch eine oder zwei Schaltsekunden abgewartet werden, um der verlängerten Jahresdauer Rechnung zu tragen (von 1958 bis 2016 waren es insgesamt 36 Sekunden).

Mit den neuen Normalen für Länge und Zeit konnten nun auch Geschwindigkeiten immer genauer bestimmt werden (Die Geschwindigkeit ist als Quotient aus den beiden Grundgrößen Länge und Zeit eine hergeleitete Größe). Insbesondere die universelle Lichtgeschwindigkeit  $c$  (die als relativistische Höchstgeschwindigkeit oder z.B. in der Formel  $E = m \cdot c^2$  eine wichtige Rolle spielt) wurde immer besser bekannt. Irgendwann war keine weitere Verbesserung des Wertes möglich, weil auch die Meterdefinition von 1960 nicht mehr Genauigkeit hergab. Deshalb wurde 1983 der bisher beste Messwert für die Lichtgeschwindigkeit (bzw. ein aus verschiedenen Präzisionsmessungen gebildetes Mittel) als endgültig definiert und die Längendefinition so abgeändert, dass ein Meter seitdem als die Länge gilt, die das Licht im Vakuum in einer bestimmten (sehr kurzen) Zeit zurück legt. Mit diesem Schritt – Festlegen eines endgültigen Werts für eine Naturkonstante und Definition einer Grundgröße unter Verwendung dieses Wertes – wurde vor 36 Jahren der erste Schritt auf dem Weg eingeschlagen, der jetzt (2019) zum neuen Einheitensystem führen soll.

In der Übergangszeit ungelöst blieb das Problem des Urkilogramms. Der zum Normal erklärte Körper wird nur alle paar Jahrzehnte aus dem Tresor geholt und mit den zwischenzeitlich benutzten Kopien erster Ordnung verglichen, die als sogenannte Zeugen bzw. als Arbeitsnormale gelten. Dabei wurden kleine Abweichungen beobachtet: seit dem zweiten Weltkrieg war das Urkilogramm unerklärlicherweise bis in die 1990er Jahre geringfügig leichter geworden; 2014 war die Abweichung aber wieder etwas zurück gegangen. Deshalb überlegte man seither, wie man das Urkilogramm durch eine unveränderliche Größe ersetzen kann. Unter anderem gab es die Idee, 1 kg über die Masse einer festzulegenden Anzahl von Atomen zu definieren. Die

deutsche Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig hat daher in den letzten Jahren zwei extrem exakt rund-geschliffene Kugeln von etwa 9,4 cm Durchmesser mit einer Masse von je genau 1 kg aus hochreinem Silizium hergestellt, um darin die Anzahl der Atome zu bestimmen. Eine solche Kugel wurde Anfang 2018 für 1 Million Euro nach Taiwan verkauft. Im Sommer 2018 wurde aber beschlossen, das Kilogramm doch nicht durch die Angabe der Atomzahl, sondern mit Hilfe einer so genannten Wattwaage über die endgültig festgelegte Naturkonstante  $h$  (Planck-Konstante; früher Plancksches Wirkungsquantum) zu bestimmen.

### Neues Einheitensystem (ab Mai 2019)

Für das neue Einheitensystem wird der mit der Festschreibung der Lichtgeschwindigkeit 1983 begonnene Weg konsequent fortgesetzt. Für sechs weitere Naturkonstanten wurden aus den besten bis Mitte 2018 gemessenen Werten Mittelwerte errechnet und für endgültig erklärt; hier alle Definitionen:

Naturkonstante			festgelegter Wert	Einheit
Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs vom Grundzustand des Cäsium-Isotops 133	$f_{\text{Cs}}$	=	9 192 631 770	$\cdot \text{s}^{-1}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c$	=	299 792 458	$\cdot \text{m s}^{-1}$
Planck-Konstante (Wirkungsquantum)	$h$	=	$6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$	$\cdot \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
Elementarladung	$e$	=	$1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$	$\cdot \text{A s}$
Boltzmann-Konstante	$k$	=	$1,380\,649 \cdot 10^{-23}$	$\cdot \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
Avogadro-Konstante	$N_{\text{A}}$	=	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$	$\cdot \text{mol}^{-1}$
Photometrisches Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung von $540 \cdot 10^{12}$ Hz	$K_{\text{cd}}$	=	683	$\cdot \text{lm W}^{-1}$

(wobei hier außer den im vorangehenden Text schon beschriebenen Einheiten noch die Einheiten A (Ampere) für die elektrische Stromstärke, mol für die Stoffmenge, lm (lumen) für den Lichtstrom und W (Watt) für die Leistung auftreten – wobei W auch durch  $W = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$  hätte ersetzt werden können. Seit 1984 ist die Einheit A (Ampere) über die durch die magnetische Stromwirkung erzeugte Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern in 1 m Abstand definiert – zuvor war die chemische Stromwirkung über die Masse der galvanischen Silberabscheidung in einer bestimmten Zeit herangezogen worden.)

In der Vergangenheit hatte ich gelegentlich über die scheinbare Veränderungen von Naturkonstanten berichtet, wenn durch bessere Messungen genauere Werte erreicht werden konnten (vgl. <http://www.r-krell.de/ph.htm#Konstanten>). Das wird es bei den oben genannten Konstanten ab sofort nicht mehr geben: ihre Werte liegen jetzt per Definition fest. Damit werden auch die Einheiten des neuen Systems unveränderlich, denn die Basiseinheiten sind durch folgende physikalischen Gesetze an die Konstanten gebunden bzw. können nach den angegebenen Formeln aus diesen berechnet werden. Jetzt steht übrigens die Sekunde am Anfang, denn diese Einheit wird zusätzlich bei der Meterdefinition gebraucht – wobei dort das s hinter

der Klammer nicht etwa bedeutet, dass Längen in Sekunden gemessen werden, denn die Lichtgeschwindigkeit  $c$  in der Klammer trägt ja schon die Einheit  $m\ s^{-1}$ , sodass das hintere  $s$  dazu dient, dass sich die Sekunden verkürzen und wirklich  $m$  für Meter übrig bleibt. Ähnliches gilt für die Definition der weiteren Basiseinheiten, wobei natürlich immer nur mit bereits definierten Einheiten korrigiert werden darf, damit keine zirkulären Rückbezüge entstehen. Zum Glück müssen bei der Sekundendefinition keine anderen Einheiten benutzt werden (deshalb mal 1), weil die Frequenz im Nenner ja die Einheit Hz (Hertz) =  $s^{-1}$  trägt und damit der Bruch auch ohne Korrekturfaktoren schon die Einheit  $s$  hat.

Grundgröße	Basiseinheit	Formel
Zeit	Sekunde	$1\ s = \left( \frac{9\ 192\ 631\ 770}{f_{Cs}} \right) \cdot 1$
Länge	Meter	$1\ m = \left( \frac{c}{299\ 792\ 458} \right) \cdot s$
Masse	Kilogramm	$1\ kg = \left( \frac{h}{6,626\ 070\ 15 \cdot 10^{-34}} \right) \cdot \frac{s}{m^2}$
Stromstärke	Ampere	$1\ A = \left( \frac{e}{1,602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}} \right) \cdot \frac{1}{s}$
Temperatur	Kelvin	$1\ K = \left( \frac{1,380\ 649 \cdot 10^{-23}}{k} \right) \cdot \frac{kg\ m^2}{s^2}$
Stoffmenge	Mol	$1\ mol = \left( \frac{6,022\ 140\ 76 \cdot 10^{23}}{N_A} \right) \cdot 1$
Lichtstärke (in eine bestimmte Raumrichtung)	Candela	$1\ cd = \left( \frac{K_{cd}}{683} \right) \cdot \frac{kg\ m^2}{s^3\ sr}$

Bei der Lichtstärke taucht neben den bereits vorher festgelegten Basiseinheiten noch als Einheit  $sr$  (Steradian) auf. Hier handelt es sich um das Gegenstück der für das Bogenmaß eines ebenen Winkels verwendeten Bezeichnung  $rad$  (Radiant; auf dem Taschenrechner  $R$  oder  $RAD$ ), jetzt allerdings für einen Raumwinkel. Ebenso wie beim (ebenen) Bogenmaß ist das Raumwinkelmaß eigentlich eine dimensionslose Zahl, trägt also die physikalische Einheit 1 (weil der Raumwinkel der Quotient eines Flächeninhalts durch das Quadrat des Radius ist). Das  $sr$  wird hier zusätzlich angegeben, um zu verdeutlichen, dass Candela nicht das gesamte von einer Quelle ausgehende Licht misst, sondern nur den Anteil in eine bestimmte Richtung bzw. innerhalb eines anzugebenden Lichtkegels. Der (in einer Ebene, die die Symmetrieachse enthält, gemessene)

Öffnungswinkel eines Kreiskegels, der einen Raumwinkel von 1 sr abdeckt, beträgt etwa  $65,54^\circ$ , was im Bogenmaß die Zahl 1,144 ergibt – also 1,144 rad wäre.

Die Festlegungen für Sekunde, Meter und Candela entsprechen prinzipiell dem Stand der letzten Jahrzehnte, auch wenn man jetzt wohl extra die Feinstrukturkonstante  $f_{cs}$  (die auch mit der griech. Buchstabenkombination  $\Delta v_{cs}$  [delta-ny] abgekürzt wird) erfunden hat, um auch für die Sekunde eine formal ähnliche Gleichung wie bei allen anderen Größen aufstellen zu können. Die Werte dieser drei Basiseinheiten sind seit 1967 (s), 1973 (m) bzw. 1979 (cd) auch nicht genauer geworden. Die übrigen vier Basiseinheiten werden aber jetzt neu festgelegt – wobei die Zahlen natürlich so gewählt wurden, dass sie möglichst den alten Normalen entsprechen. Denn im Alltag soll es durch die Neudefinitionen ja keinen Unterschied geben. Beispielsweise soll ein neues Kelvin nicht größer oder kleiner als das alte Kelvin sein. Nur soll die Definition jetzt exakter werden. Zuletzt war nämlich das Kelvin als 273,26-ster Teil einer bestimmten Temperatur nur auf fünf statt jetzt auf sieben Stellen festgelegt, sodass hier eine Verbesserung der Genauigkeit um zwei Größenordnungen bzw. um das Hundertfache erreicht wird. Und das Kilogramm liegt jetzt nicht nur viel genauer, sondern auch eindeutig fest, selbst wenn sich der Urkilogramm-Körper eventuell weiter verändert.

Für Alltag, Handel und Wirtschaft ist die neue Genauigkeit wohl nicht unbedingt nötig, für immer bessere Messungen in der Wissenschaft allerdings schon!

Vielleicht sind im Mai 2019 noch geringfügige Korrekturen vor dem endgültigen Beschluss der neuen SI-Einheiten (SI = System International) möglich, aber wohl unwahrscheinlich.

Die hier genannten Werte und Formeln in den beiden Tabellen stützen sich übrigens im Wesentlichen auf die Angaben (und eine Beilage) des Hefts 14 der von der PTB unregelmäßig herausgegebenen, lesenswerten Zeitschrift „maßstäbe“ mit Redaktionsschluss November 2018; online unter <https://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/masstaebe.html>. Dort oder auch auf <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/s/si-einheiten.php> werden die einzelnen Tabelleneinträge noch ausführlicher erläutert als hier von mir. (In einer ersten Veröffentlichung der PTB hatte sich bei Angabe der Basiseinheit K (Kelvin) als Dezimalbruch-Vielfaches der Grundgrößen übrigens ein Schreibfehler eingeschlichen, der inzwischen korrigiert wurde. Richtig ist  $1 \text{ K} = 2,2666653 \cdot f_{cs} \cdot \text{h} \cdot \text{k}^{-1}$ ).

Die (seit 2014) gültigen Werte nicht nur der sieben oben genannten, sondern aller Naturkonstanten sowie einiger hergeleiteter Werte finden sich – zusammen mit früheren Werten der Konstanten (sieben Berechnungen seit 1969) – auf der CoData-Webseite <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>. Die Planck-Konstante  $h$  ist dort noch mit einer Messunsicherheit angegeben, die durch die Definition natürlich verschwindet. Anfang des Jahres 2019 war diese Regierungsseite übrigens wegen des Haushalts-Shutdowns in den USA einige Wochen lang offline. Neuere Werte (mit Redaktionsschluss bzw. zum Stichtag 31.12.2018) sind offenbar noch in Arbeit und werden nach aktueller Ankündigung auf dem hier vorgestellten neuen SI-Einheitensystem beruhen.