

## Das neue SI-System - Paradigmenwechsel des Internationalen Einheitensystems

Am 20. Mai 2019 (Weltmetrologietag) sind die Neudefinitionen der SI-Basiseinheiten, die auf der 26. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) am 16. November 2018 beschlossen wurden, offiziell in Kraft getreten. Für die Definition der sieben Basisgrößen Länge, Masse, Zeit, Temperatur, Stromstärke, Stoffmenge und die Lichtstärke des Internationalen Einheitensystems SI (französisch: *Système International d'unités*) werden nun nur noch Konstanten verwendet. Dadurch wird es mit den neuen Definitionen möglich sein, z. B. Artefakte wie im Falle des Kilogramms, spezielle nicht mehr zeitgemäße Messvorschriften (Ampere) oder die Auswahl von speziellen Stoffeigenschaften (Kelvin, Mol) zu beseitigen. Die Festlegungen für die Sekunde (s), das Meter (m) und die Candela (cd) werden nicht geändert, aber ihre Definitionen werden in der Weise modifiziert, dass diese konsistent zu den neuen Definitionen von Kilogramm (kg), Ampere (A), Kelvin (K) und Mol (mol) sind.

**Tabelle 1** Übersicht über die im neuen SI-System sieben definierten Konstanten, festgelegte (genaue) Werte nach CODATA 2017 /1/

Frequenz $\Delta\nu$	Die Frequenz $\Delta\nu$ des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands von Atomen des Nuklids $^{133}\text{Caesium}$ ist genau 9 192 631 770 Hz.
Lichtgeschwindigkeit $c$	Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c$ ist genau $299\,792\,458\,\text{m s}^{-1}$ .
Planck-Konstante $h$	Die Planck-Konstante $h$ ist genau $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,\text{J s}$ . ( $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ )
Elementarladung $e$	Die Elementarladung $e$ ist genau $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,\text{C}$ . ( $\text{C} = \text{A s}$ )
Boltzmann-Konstante $k_B$	Die Boltzmann-Konstante $k_B$ ist genau $1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,\text{J K}^{-1}$ . ( $\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
Avogadro-Konstante $N_A$	Die Avogadro-Konstante $N_A$ ist genau $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$ .
Photometrisches Strahlungsäquivalent $K_{\text{cd}}$	Das photometrische Strahlungsäquivalent $K_{\text{cd}}$ einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}\,\text{Hz}$ ist genau $683\,\text{lm W}^{-1}$ . ( $\text{lm} = \text{cd sr}$ )

Die in den Klammern angegebenen Beziehungen zwischen den Einheiten können der Tabelle 1.2.1 (Physikalisches Praktikum, 14. Auflage) entnommen werden.

Den Zusammenhang zwischen den sieben SI-Basiseinheiten des neuen Internationalen Einheitensystems und den festgelegten Konstanten nach Tabelle 1 zeigt die folgende Tabelle.

**Tabelle 2** Basiseinheiten des SI-Systems mit der Neudefinition der Einheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol durch Festlegung der Werte für  $\Delta\nu$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $e$ ,  $k_B$ ,  $N_A$  und  $K_{\text{cd}}$  (beschlossen am 16. November 2018 durch die internationale Generalkonferenz für Maß und Gewicht /2/)

<b>Sekunde (s)</b>	$1\,\text{s} = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu$
<b>Meter (m)</b>	$1\,\text{m} = (c / 299\,792\,458)\,\text{s} = 30,663\,318 \dots c / \Delta\nu$
<b>Kilogramm (kg)</b>	$1\,\text{kg} = (h / 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34})\,\text{m}^2 \text{s}^{-1} = 1,475\,521 \dots 10^{40} h \Delta\nu / c^2$
<b>Ampere (A)</b>	$1\,\text{A} = (e / 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})\,\text{s}^{-1} = 6,789\,686 \dots 10^8 \Delta\nu e$
<b>Kelvin (K)</b>	$1\,\text{K} = (1,380\,649 \cdot 10^{-23} / k_B)\,\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} = 2,266\,665 \dots \Delta\nu h / k_B$
<b>Mol (mol)</b>	$1\,\text{mol} = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} / N_A$
<b>Candela (cd)</b>	$1\,\text{cd} = (K_{\text{cd}} / 683)\,\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{sr}^{-1} = 2,614\,830 \dots 10^{10} (\Delta\nu)^2 h K_{\text{cd}}$

Entsprechend den neuen Festlegungen werden die sieben Basisgrößen nun indirekt über die sieben festgelegten Konstanten definiert. Damit erübrigt sich die Unterscheidung zwischen Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten, da man alle Einheiten über die festgelegten Konstanten ableiten kann. Die Neudefinition der SI-Einheiten macht die Korrektur der in der 14. Auflage des Praktikumsbuches beschriebenen Festlegungen für die Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol erforderlich, die nun wie folgt formuliert werden müssen.

**Das Kilogramm (kg) ist die Einheit der Masse.**

Das Kilogramm wird mittels der Planck-Konstante  $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  definiert.

Dabei gilt  $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$  und die Sekunde  $s$  und das Meter  $m$  werden durch  $\Delta\nu$  und  $c$  definiert.

**Das Ampere (A) ist die Einheit der Stromstärke.**

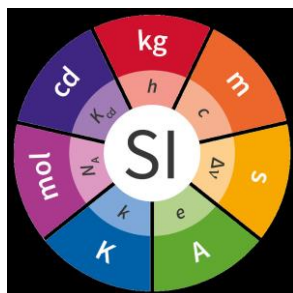
Das Ampere wird durch die Elementarladung  $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  definiert unter Verwendung der Beziehung für das Coulomb  $C = A s$ , wobei die Sekunde  $s$  durch  $\Delta\nu$  definiert wird.

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

Das Kelvin wird durch die Boltzmann-Konstante  $k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  definiert. Unter Verwendung der Beziehung  $\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$  werden die Einheiten  $\text{kg}$ ,  $m$  und  $s$  durch die Konstanten  $h$ ,  $\Delta\nu$  und  $c$  definiert.

**Das Mol (mol) ist die Einheit der Stoffmenge.**

Das Mol wird durch die Avogadro-Konstante  $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  definiert. Die Stoffmenge eines Systems kann aus vielen gleichartigen Teilchen, z. B. Atomen, Molekülen, Ionen, Elektronen oder auch speziellen Gruppierungen bestehen.



Am Weltmetrologietag (20. Mai 2019) sind die neuen Definitionen und Maßstäbe für die sieben Basisgrößen offiziell in Kraft getreten.

Logo des BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) zur Neudefinition des SI-Systems

Durch verbesserte Messverfahren und Messmethoden können die Messunsicherheiten der Konstanten verringert werden. Die Konsistenz des neuen Einheitensystems wird dadurch nicht beeinflusst, aber die Genauigkeit der Zahlenfaktoren wird höher. Eine Auswahl von Experimenten zur Bestimmung von Konstanten des neuen SI findet man z. B. in /3/.

### Literatur

/1/ The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k_B$ , and  $N_A$  for the revision of the SI

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aa950a/pdf>

/2/ BIPM, The International System of Units (SI)

<https://www.bipm.org/en/measurement-units/>

/3/ Experimente für das neue Internationale Einheitensystem (SI)

[https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb\\_mitteilungen/mitt2016/Heft2/PTB-Mitteilungen\\_2016\\_Heft\\_2.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2016/Heft2/PTB-Mitteilungen_2016_Heft_2.pdf)

Physikalisches Praktikum

Schenk, W.; Kremer, F.; Beddies, G.; Franke, Th.;

Galvosas, P.; Rieger, P. - Schenk, W.; Kremer, F. (Hrsg.)

2014, XIV, 397 S. 325 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-00665-5