



Sekunde



Meter



Kilogramm



Ampere



Kelvin



Mol



Candela

## Neue Definitionen im Internationalen Einheitensystem (SI)



Sieben Naturkonstanten, sogenannte „definierende Konstanten“, erhalten im neuen SI festgelegte Werte; die Zahlenwerte entstammen den Ausgleichsrechnungen von CODATA im Sommer 2017.

Die hier wiedergegebenen Definitionen der Einheiten sind aus der Richtlinie 2019/1258 der Europäischen Kommission übernommen. Diese ist eine offizielle deutsche Übersetzung der Neudefinitionen aus der 9. Auflage der SI-Broschüre des Internationalen Büros für Maße und Gewichte (BIPM).

Die Definitionen traten am 20. Mai 2019 in Kraft, dem Datum des alljährlichen Weltmetrologietags.

### Quellen:

- Peter J. Mohr et al, Metrologia 55, 125–146 (2018)
- Richtlinie (EU) 2019/1258 der Kommission vom 23. Juli 2019 zur Änderung des Anhangs der Richtlinie 80/181/EWG des Rates hinsichtlich der Definitionen der SI-Basiseinheiten zwecks ihrer Anpassung an den technischen Fortschritt
- Le Système international d'unités (SI), 9e édition 2019, Bureau international des poids et mesures

### Impressum

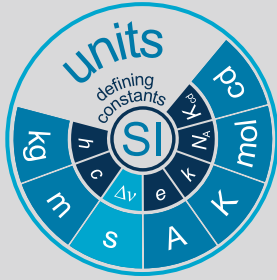
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

www.ptb.de  
presse@ptb.de  
Redaktionsschluss: September 2019

### Definierende Konstanten

- Frequenz des **Hyperfeinstrukturübergangs** des Grundzustands im  $^{133}\text{Cs}$ -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**  $K_{\text{cd}}$  einer monochromatischen Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$  ist genau gleich 683 Lumen durch Watt.

## Sekunde



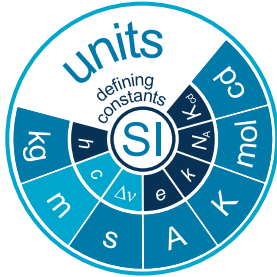
Die Sekunde, Einheitenzeichen s, ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist definiert, indem für die Cäsiumfrequenz  $\Delta\nu$ , der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms 133, der Zahlenwert 9 192 631 770 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit Hz, die gleich  $s^{-1}$  ist.

Diese Definition legt  $\Delta\nu$  fest zu  $9\,192\,631\,770\,s^{-1}$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit s auf, so ergibt sich:

$$1\,s = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu} \quad \text{oder} \quad 1\,\text{Hz} = \frac{\Delta\nu}{9\,192\,631\,770}$$

Das heißt, eine Sekunde ist gleich der Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen der Strahlung, die der Energie des Übergangs zwischen den zwei Hyperfeinstrukturturniveaus des ungestörten Grundzustands im  $^{133}\text{Cs}$ -Atom entspricht.

## Meter



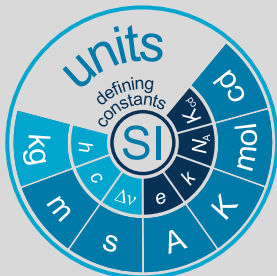
Der Meter, Einheitenzeichen m, ist die SI-Einheit der Länge. Er ist definiert, indem für die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum  $c$  der Zahlenwert 299 792 458 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit m/s, wobei die Sekunde mittels  $\Delta\nu$  definiert ist.

Diese Definition gibt  $c$  den Wert  $299\,792\,458\,m\,s^{-1}$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit m auf, so ergibt sich:

$$1\,m = \left( \frac{c}{299\,792\,458} \right) s = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu} \approx 30\,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu}$$

Das heißt, ein Meter ist gleich der Strecke, die Licht im Vakuum innerhalb des Bruchteils von  $1/299\,792\,458$  einer Sekunde zurücklegt.

## Kilogramm



Das Kilogramm, Einheitenzeichen kg, ist die SI-Einheit der Masse. Es ist definiert, indem für die Planck-Konstante  $h$  der Zahlenwert  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit J s, die gleich  $kg\,m^2\,s^{-1}$  ist, wobei der Meter und die Sekunde mittels  $c$  und  $\Delta\nu$  definiert sind.

Diese Definition gibt  $h$  den Wert  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,kg\,m^2\,s^{-1}$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit kg auf, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} 1\,kg &= \left( \frac{h}{6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}} \right) m^{-2}\,s \\ &= \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h\,\Delta\nu}{c^2} \approx 1,475\,5214 \cdot 10^{40} \frac{h\,\Delta\nu}{c^2} \end{aligned}$$

Das heißt, die Einheit kg wird mit der Wirkung (Einheit:  $kg\,m^2\,s^{-1}$ ) verknüpft, einer physikalischen Größe in der theoretischen Physik. Zusammen mit der Definition für die Sekunde und den Meter ergibt sich die Definition für das Kilogramm als Funktion des Planck'schen Wirkungsquantums  $h$ .

## Ampere



Das Ampere, Einheitenzeichen A, ist die SI-Einheit der elektrischen Stromstärke. Es ist definiert, indem für die Elementarladung  $e$  der Zahlenwert  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit C, die gleich A s ist, wobei die Sekunde mittels  $\Delta\nu$  definiert ist.

Diese Definition gibt  $e$  den Wert  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,A\,s$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit A auf, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} 1\,A &= \left( \frac{e}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}} \right) s^{-1} \\ &= \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})} e\,\Delta\nu \approx 6,789\,687 \cdot 10^8 e\,\Delta\nu \end{aligned}$$

Das heißt, ein Ampere entspricht dem Stromfluss von  $1/(1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})$  Elementarladungen (Elektronen) pro Sekunde.

Das Kelvin, Einheitenzeichen K, ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es ist definiert, indem für die Boltzmann-Konstante  $k$  der Zahlenwert  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$  festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit  $\text{J K}^{-1}$ , die gleich  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$  ist, wobei das Kilogramm, der Meter und die Sekunde mittels  $h$ ,  $c$  und  $\Delta\nu$  definiert sind.

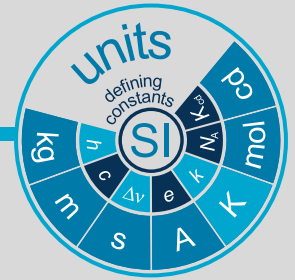
Kelvin

Diese Definition gibt  $k$  den Wert  $1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit K auf, so ergibt sich:

$$1 \text{ K} = \left( \frac{1,380\,649}{k} \right) \cdot 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$= \frac{1,380\,649 \cdot 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu h}{k} \approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu h}{k}$$

Das heißt, ein Kelvin entspricht einer Änderung der thermodynamischen Temperatur, die mit einer Änderung der thermischen Energie ( $kT$ ) um  $1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J}$  einhergeht.



Das Mol, Einheitenzeichen mol, ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält genau  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  Einzelteilchen. Diese Zahl entspricht dem für die Avogadro-Konstante  $N_A$  geltenden festen Zahlenwert, ausgedrückt in der Einheit  $\text{mol}^{-1}$ , und wird als Avogadro-Zahl bezeichnet.

Mol

Die Stoffmenge, Zeichen  $n$ , eines Systems ist ein Maß für eine Zahl spezifizierter Einzelteilchen. Bei einem Einzelteilchen kann es sich um ein Atom, ein Molekül, ein Ion, ein Elektron, ein anderes Teilchen oder eine Gruppe solcher Teilchen mit genau angegebener Zusammensetzung handeln.

Diese Definition gibt  $N_A$  den Wert  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit mol auf, so ergibt sich:

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

Das heißt, ein Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  eines bestimmten Einzelteilchens enthält.



Die Candela, Einheitenzeichen cd, ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung. Sie ist definiert, indem für das photometrische Strahlungsäquivalent  $K_{cd}$  der monochromatischen Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  der Zahlenwert 683 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit  $\text{lm W}^{-1}$ , die gleich  $\text{cd sr W}^{-1}$  oder  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$  ist, wobei das Kilogramm, der Meter und die Sekunde mittels  $h$ ,  $c$  und  $\Delta\nu$  definiert sind.

Candela

Diese Definition gibt  $K_{cd}$  den Wert  $683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ . Löst man diese Beziehung nach der Einheit cd auf, so ergibt sich:

$$1 \text{ cd} = \left( \frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

$$= \frac{1}{(6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34})(9\,192\,631\,770)^2 \cdot 683} (\Delta\nu)^2 h K_{cd} \approx 2,614\,830 \cdot 10^{10} (\Delta\nu)^2 h K_{cd}$$

Das heißt, eine Candela ist die Lichtstärke (in eine bestimmte Raumrichtung) einer Strahlquelle, die mit einer Frequenz von  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  emittiert und die eine Strahlungsintensität in dieser Richtung von  $1/683 \text{ W sr}^{-1} \text{ hat}^*$ .



Anmerkung: Die Definitionen für die Sekunde, den Meter und die Candela entsprechen inhaltlich den bisher gültigen Definitionen für diese drei Einheiten (Sekunde: 1967/1968, Meter: 1983, Candela: 1979). Allerdings sind diese Definitionen in ihrer Formulierung den neuen Definitionen für das Kilogramm, das Ampere, das Mol und das Kelvin angepasst.

\* Der Steradian (sr) ist eine Maßeinheit für den Raumwinkel. Auf einer Kugel mit 1 m Radius umschließt ein Steradian eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  auf der Kugeloberfläche.