

Zur Erläuterung der Definition der Einheit Ampere sowie der noch folgenden Definitionen von Kelvin, Mol und Candela **siehe auch**:

<https://www.mediatheque.lindau-nobel.org/videos/38524/si-units-iv-de>

1. Das Ampere erhält eine neue Basis

Für die Messung der elektrischen Stromstärke wurde als Einheit das **Ampere** gewählt – sie ist die einzige elektrische Grundgröße im Internationalen Einheitensystem. Die seit dem Jahr 1948 gültige Definition veranschaulicht **Abb. 1**:

Dabei wird die Basiseinheit 1 Ampere als die Stärke eines zeitlich konstanten elektrischen Stromes zwischen zwei unendlich langen parallelen Leitern definiert, die in 1 Meter Abstand voneinander eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N pro Meter Leiterlänge hervorruft.

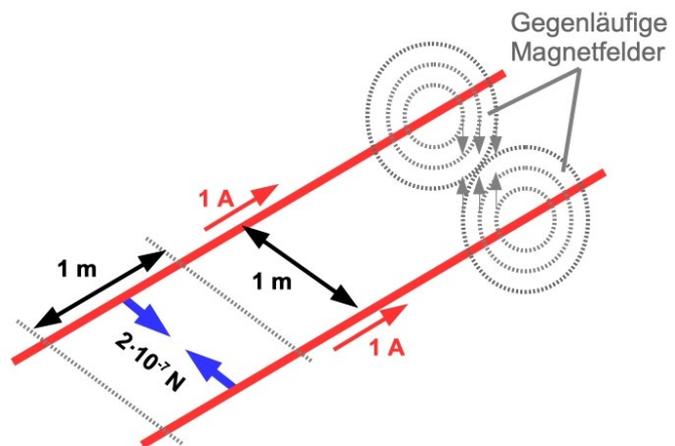


Abbildung 1: Wolfgang Vogg

Diese willkürlich gewählte und realitätsferne Messvorschrift konnte nur näherungsweise durchgeführt werden. Zudem hat sie den entscheidenden Nachteil, dass sie das Ampere über die Kraft mit dem Kilogramm verknüpft mit den bereits angesprochenen Problemen.

Schon vor Jahrzehnten wurde deshalb ein anderer Weg beschritten:

So hatte der britische theoretische Physiker und spätere Nobelpreisträger **Brian D. Josephson** bereits 1962 einen **Effekt in Supraleitern** vorhergesagt, der es möglich machte, elektrische Spannungen hochpräzise zu messen. Zudem entdeckte 1980 der deutsche Physiker und ebenfalls spätere Nobelpreisträger Klaus von Klitzing den **Quanten-Hall-Effekt**, der eine überaus exakte Bestimmung von elektrischen Widerständen ermöglichte.

- a) Informieren Sie sich über die Erkenntnisse der beiden Physiker und erläutern Sie, warum deren Erkenntnisse noch nicht vollständig zur Neudefinition des Ampere ausreichen!

Heute nach der Reform des SI-Systems steht das Ampere ebenfalls auf der Basis einer Naturkonstante – der Elementarladung des Elektrons. In aufwendigen Messungen ist es gelungen, das Ampere durch den Stromfluss von weit über 1 Trillion Elementarladungen pro Sekunde zu definieren.

Für die Elementarladung gilt: $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$

- b) Lösen Sie diese Beziehung nach der Einheit A auf und berechnen Sie mithilfe der zugehörigen Naturkonstante den Wert!

2. Definition der noch verbleibenden Basiseinheiten Kelvin (K), Mol (mol), Candela (cd)

a) Das Kelvin (K) als Einheit für die Temperatur

Das **Kelvin** ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Dabei ist die *Kelvin-Skala* nichts anderes als die im Alltag verwendete *Celsius-Temperaturskala* mit verschobenem Nullpunkt. Der absolute Nullpunkt bei $-273,15\text{ °C}$ entspricht 0 K . Folglich gibt es bei der Kelvin-Temperaturmessung keine negativen Temperaturen und ein Kelvinschritt entspricht einem Celsiusschritt.

Die Größe des Kelvins ist bestimmt durch die Naturkonstante k_B , die als *Boltzmann-Konstante* bezeichnet wird: $k_B = 1,3806488 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

α) Recherchieren Sie in Lehrbüchern und im Internet, wie die „Boltzmann-Konstante“ hergeleitet wurde!

β) Begründen Sie in einem Satz die Bedeutung von $k_B = 1,3806488 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$, wenn man die Temperatur um 1 K ändert!

γ) Berechnen Sie unter Einbeziehung weiterer Naturkonstanten (siehe auch **Abb. 2**) die für 1 K geltende Beziehung:

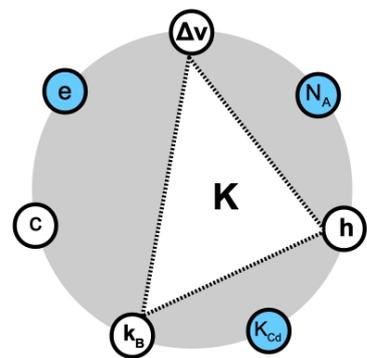
$$1\text{K} = 2,2666653 \dots \frac{\Delta\nu(133\text{ Cs})h}{k_B}$$


Abbildung 2: Wolfgang Vogg

b) Das Mol (mol) als Einheit der Stoffmenge

Durch die Festlegung des Kilogramms auf das Planck'sche Wirkungsquantum h wurde es möglich, die Avogadro-Konstante N_A zu bestimmen.

Daraus wiederum wurde es möglich, auch das Mol auf eine Naturkonstante zu beziehen, sodass heute gilt:

Das **mol** ist die Einheit einer Stoffmenge aus exakt $6,02214076 \cdot 10^{23}$ Einzelteilchen derselben Art, wobei es sich jeweils um Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen oder andere Partikel handeln kann. Somit gilt für 1 mol :

$$1\text{ mol} = \frac{6,02214076 \cdot 10^{23}}{N_A}$$

c) Die Candela (cd) als Einheit der Lichtstärke

Die Lichtstärke – definiert durch die Einheit **Candela** – kommt im Unterricht der gymnasialen Oberstufe so gut wie nicht vor, ist aber als Einheit in der Naturwissenschaft und den daraus resultierenden technischen Anwendungen von durchaus großer Bedeutung. Ihre Definition und Einordnung in das neue SI-System soll deshalb – in erster Linie als Anregung für Interessierte – nur vorgestellt werden:

Die Lichtstärke wurde früher abgeleitet von einer Kerzenflamme mit einer bestimmten Docht-höhe – mit solchen Standardkerzen konnte man bestimmen, wie hell eine Lichtquelle leuchtet.

Seit 1979 ist die Einheit Candela (cd) – lateinisch für Kerze – über die Lichtstärke einer grünen Lichtquelle mit einer Wellenlänge $\lambda = 555$ Nanometer definiert, die mit einer bestimmten Leistung (1/683 Watt) eine elektromagnetische Strahlung in einen gewissen Raumwinkel emittiert.

Eine Candela entspricht etwa der Lichtstärke einer Haushaltskerze. Über einen Umrechnungsfaktor, das *photometrische Strahlungsäquivalent* K_{cd} , ist die Größe, die eigentlich an die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges angepasst ist, an die elektromagnetische Strahlungsphysik angekoppelt. Dass die Candela als Einheit überlebt hat, ist ein Zugeständnis an die Beleuchtungsindustrie. An der Definition wird sich zukünftig deshalb auch nichts ändern.

Für 1 cd ergibt sich folgender Zusammenhang: $1\text{cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683}\right) \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$ *

* Die Einheit *Steradian* (sr) ist eine Maßeinheit für den Raumwinkel – auf einer Kugel von 1 m Radius umschließt ein Steradian eine Fläche von 1 m² auf der Kugeloberfläche.

Daraus folgt durch Einbeziehung weiterer Naturkonstanten:

$$1\text{cd} = \frac{1}{(6,62607015 \cdot 10^{-34}) \cdot (9192631770)^2} [\Delta\nu(^{133}\text{Cs})]^2 h K_{cd}$$

$$1\text{cd} = 2,614830 \dots \cdot 10^{10} [\Delta\nu(^{133}\text{Cs})]^2 h K_{cd}$$

Ein Candela ist somit die Lichtstärke einer Strahlenquelle in eine bestimmte Raumrichtung, die mit einer Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hz emittiert wird und eine Strahlungsintensität in dieser Richtung von 1/683 W sr⁻¹ hat.

3. Alle Basiseinheiten mit den zugehörigen Naturkonstanten im Überblick

Abb. 3 zeigt, auf welche Naturkonstante sich die jeweilige Basiseinheit bezieht und welche Beziehungen zwischen den einzelnen Maßeinheiten bestehen.

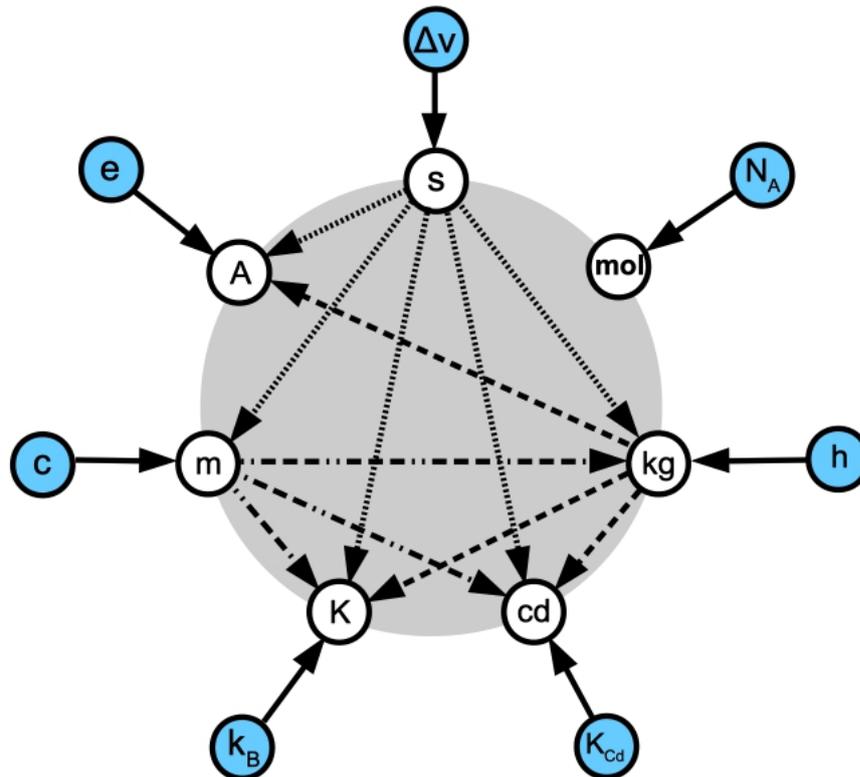


Abbildung 3: Wolfgang Vogg

Entwirren Sie die Verflechtungen anhand der unterschiedlich gezeichneten Pfeile und entdecken Sie so die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Basiseinheiten und deren zugehörigen Naturkonstanten!