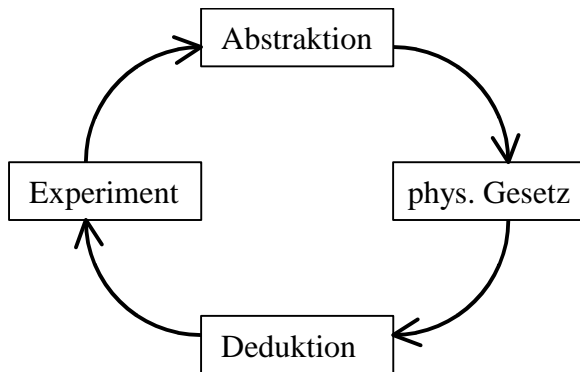


# 1 Physikalische Gesetze, Größen und Einheiten

Physik ist die Naturwissenschaft der unbelebten Materie.



Physikalische Gesetze werden durch Verallgemeinerung von Experimenten (Abstraktion) gefunden und zur Vorhersage der Verhaltensweisen der Materie (Deduktion) verwendet.

Die Quantenphysik beschreibt Eigenschaften unzerlegbarer Teilchen. Sie wird in dieser Vorlesung nicht behandelt.

Klassische Physik als makroskopische Beschreibung der Materie wird gewöhnlich unterteilt in

- Mechanik,
- Thermodynamik,
- Elektrizität und Magnetismus,
- Wellenlehre (Optik, Akustik).

In dieser Vorlesung werden

- Mechanik, Kapitel 1-6,
- Schwingungen, Kapitel 7, und Wellen, Kapitel 8, mit Bezug auf elektromagnetische Wellen und Akustik,
- die Strahlungsgesetze, Kapitel 9, die der Optik zugeordnet werden können und
- die Wärmeleitung, Kapitel 10, aus der Thermodynamik

behandelt.

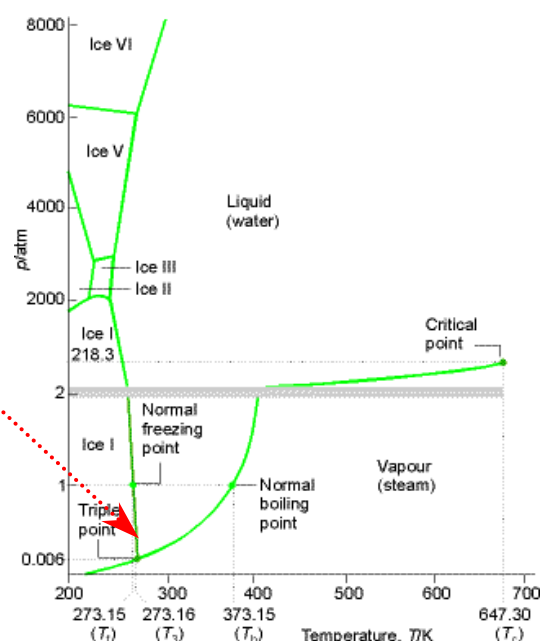
Eine *physikalische Größe* besteht aus einem Zahlenwert (quantitative Größe) und einer Maßeinheit (qualitative Größe). Für Temperatur und Druck beim Tripelpunkt des Wassers gilt z. B.

$$T = 273,16 \text{ K}, p = 610,628 \text{ Pa}$$

(Abbildung rechts ist Fig. 6.5 aus Atkins<sup>6</sup>) und für die Haushalts-Netzspannung in Europa gilt

$$U = 230 \text{ V.}$$

Vereinbarungsgemäß wird die physikalische Größe (Temperatur  $T$  bzw. Spannung  $U$ ) schräg und die Maßeinheit (K bzw. V) gerade gedruckt. Vektoren und Matrizen als physikalische Größen werden schräg und fett gedruckt.



Seit Anfang 1978 sind in der BRD die Vereinbarungen der Internationalen Organisation für Standardisierung (ISO) gültig, die in der Physik als SI-Einheiten (*Système International D'Unités*) bezeichnet werden. Gegenwärtig werden 7 Größen als SI-Grundeinheiten mit folgenden Festlegungen verwendet:

**Größe (Symbol)**

Einheit (Symbol)

Definition (Jahr der Einführung)

Messgenauigkeit

**Länge ( $l$ )**

Meter (m)

Das Meter ist die Weglänge, die Licht im Vakuum in  $1/299\,792\,458$  s durchläuft (1983) $10^{-14}$ **Masse ( $m$ )**

Kilogramm (kg)

Das Kilogramm ist die Masse des internationalen Prototyps in Paris (1901)

 $10^{-9}$ **Zeit ( $t$ )**

Sekunde (s)

Die Sekunde ist die Dauer von  $9\,192\,631\,770$  Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den zwei Hyperfein-Niveaus des Grundzustandes des Cäsium-133-Atoms entspricht (1967) $10^{-14}$ **Elektrische Stromstärke ( $I$ )**

Ampere (A)

Das Ampere ist der konstante elektrische Strom, der eine Kraft von  $2 \times 10^{-7}$  N pro Meter Leitungslänge erzeugt, wenn er in zwei unendlichen parallelen im Vakuum befindlichen Leitern im Abstand von einem Meter fließt (1948) $10^{-6}$ **Temperatur ( $T$ )**

Kelvin (K)

Das Kelvin ist  $1/273,16$  der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers (1967) $10^{-6}$ **Stoffmenge ( $n$  Elementareinheiten)**

Mol (mol)

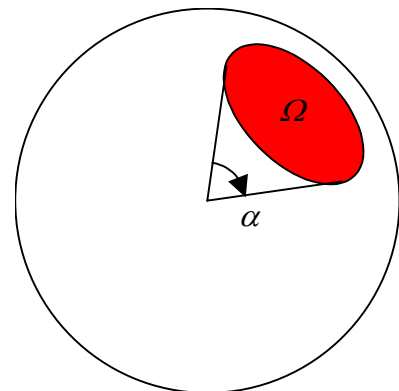
Das Mol ist die Stoffmenge mit soviel Elementareinheiten, wie in  $0,012$  kg des Kohlenstoff-12 Atome enthalten sind (1971) $10^{-6}$ **Lichtstärke ( $I_v$ )**

Candela (cd)

Die Candela ist die Lichtstärke in einer gegebenen Richtung, die eine Lichtquelle mit der Frequenz  $540 \times 10^{12}$  Hz ( $0,555 \mu\text{m}$ , gelblich-grün) emittiert, wenn sie eine Strahlungsleistung in dieser Richtung von  $1/683$  Watt pro Steradian (sr) hat (1979)

 $5 \times 10^{-3}$ 

Ein Raumwinkel  $\Omega$  (engl. *solid angle*) hat die SI-Einheit Steradian (sr) und entspricht der Fläche, die ein im Mittelpunkt einer Kugel mit dem Radius eins ausgehender Kegel mit dem Öffnungswinkel  $\alpha$  auf der Kugeloberfläche ausschneidet. Es gilt  $\Omega = 2\pi[1 - \cos(\alpha/2)]$ , also  $4\pi$  für einen vollen Öffnungswinkel von  $\alpha = 360^\circ$ ,  $\pi$  für  $\alpha = 120^\circ$  und 1 für  $\alpha \approx 65,54^\circ$ .



Die nächsten beiden Seiten zeigen die Abb. 3.4 und 3.5 aus Größen, Einheiten und Symbole in der Physikalischen Chemie (deutsche Fassung), IUPAC, VCH Weinheim 1996, ISBN 3-527-29326-4

### 3.4 ABGELEITETE SI-EINHEITEN MIT SPEZIELLEN NAMEN UND SYMBOLEN

<i>Physikalische Größe</i>	<i>Name der SI-Einheit</i>	<i>Symbol der SI-Einheit</i>	<i>Ausdruck in Form der SI-Basiseinheiten</i>
Frequenz <sup>1)</sup>		<b>Hz</b>	$s^{-1}$
Kraft		<b>N</b>	$m\ kg\ s^{-2}$
Druck, Spannung		<b>Pa</b>	$N\ m^{-2} = m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
Energie, Arbeit, Wärmemenge		<b>J</b>	$N\ m = m^2\ kg\ s^{-2}$
Leistung, Strahlungsfluß		<b>W</b>	$J\ s^{-1} = m^2\ kg\ s^{-3}$
elektrische Ladung		<b>C</b>	$A\ s$
elektrische Spannung, elektromotorische Kraft		<b>V</b>	$J\ C^{-1} = m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
elektrischer Widerstand	Ohm	<b><math>\Omega</math></b>	$V\ A^{-1} = m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
elektrischer Leitwert	Siemens	<b>S</b>	$\Omega^{-1} = m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
elektrische Kapazität	Farad	<b>F</b>	$C\ V^{-1} = m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
magnetische Flußdichte	Tesla	<b>T</b>	$V\ s\ m^{-2} = kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
magnetischer Fluß	Weber	<b>Wb</b>	$V\ s = m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
Induktivität	Henry	<b>H</b>	$V\ A^{-1}\ s = m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
Celsius-Temperatur <sup>2)</sup>	Grad Celsius	<b>°C</b>	<b>K</b>
Lichtstrom	Lumen	<b>lm</b>	<b>cd sr</b>
Beleuchtungsstärke	Lux	<b>lx</b>	<b>cd sr m<sup>-2</sup></b>
Aktivität <sup>3)</sup> (radioaktive)	Becquerel	<b>Bq</b>	$s^{-1}$
absorbierte (Strahlen-) Dosis <sup>3)</sup>	Gray	<b>Gy</b>	$J\ kg^{-1} = m^2\ s^{-2}$
Äquivalentdosis, Energiedosis <sup>3)</sup>	Sievert	<b>Sv</b>	$J\ kg^{-1} = m^2\ s^{-2}$
ebener Winkel <sup>4)</sup>	Radian	<b>rad</b>	$= m\ m^{-1}$
Raumwinkel <sup>4)</sup>	Steradian	<b>sr</b>	$= m^2\ m^{-2}$

(1) Für die Kreisfrequenz und die Winkelgeschwindigkeit sollte die Einheit  $rad\ s^{-1}$  oder einfach  $s^{-1}$ , aber nicht Hz benutzt werden. Die Einheit Hz sollte *nur* für die Frequenz im Sinne von Zyklen pro Sekunde verwandt werden.

(2) Die Celsius-Temperatur ist durch folgende Gleichung bestimmt:

$$\theta / ^\circ C = T / K - 273,15$$

Die SI-Einheit der Celsius-Temperatur ist das  $^\circ C$ , das dem Kelvin, K, gleich ist.  $^\circ C$  sollte als ein Symbol verstanden werden, ohne Leerzeichen zwischen dem  $^\circ$ -Zeichen und dem Buchstaben C. (Das Symbol  $^\circ K$  und das Symbol  $^\circ$  sollten nicht mehr benutzt werden.)

(3) Die Einheiten Becquerel, Gray und Sievert betreffen den Umgang mit und die Einwirkung von radioaktiver und Röntgenstrahlung auf den Menschen. Sie sind deshalb als eigene Einheiten im Interesse des Gesundheitsschutzes zugelassen worden [3].

(4) Die Einheiten Radian und Steradian werden als „zusätzliche SI-Einheiten“ bezeichnet [3]. Dennoch werden sie in Chemie und Physik [4] üblicherweise als dimensionslose abgeleitete Einheiten behandelt, was durch die CIPM 1980 anerkannt wurde. Da sie die Dimension 1 haben, bleibt die Möglichkeit offen, sie in Ausdrücken abgeleiteter SI-Einheiten, wie  $rad\ s^{-1}$ , einzubeziehen oder nicht. In der Praxis bedeutet das, daß rad und sr benutzt werden können, wenn es angebracht erscheint, oder weggelassen werden können, wenn dadurch die Eindeutigkeit nicht verlorengeht.

### 3.5 ABGELEITETE SI-EINHEITEN FÜR ANDERE GRÖSSEN

Die Tabelle zeigt Beispiele anderer abgeleiteter SI-Einheiten; sie dient lediglich der Veranschaulichung und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

<i>Physikalische Größe</i>	<i>Ausdruck in Form der SI-Basiseinheiten</i>	
Fläche	$m^2$	
Volumen	$m^3$	
Geschwindigkeit (skalar, vektoriell)	$m s^{-1}$	
Winkelgeschwindigkeit	$s^{-1}, rad s^{-1}$	
Beschleunigung	$m s^{-2}$	
Drehmoment	$N m$	$= m^2 kg s^{-2}$
Wellenzahl	$m^{-1}$	
Dichte, Massendichte	$kg m^{-3}$	
spezifisches Volumen	$m^3 kg^{-1}$	
(Stoffmengen-)Konzentration <sup>1)</sup>	$mol m^{-3}$	
molares Volumen	$m^3 mol^{-1}$	
Wärmekapazität, Entropie	$J K^{-1}$	$= m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
molare Wärmekapazität, molare Entropie	$J K^{-1} mol^{-1}$	$= m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
spezifische Wärmekapazität, spezifische Entropie	$J K^{-1} kg^{-1}$	$= m^2 s^{-2} K^{-1}$
molare Energie	$J mol^{-1}$	$= m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$
spezifische Energie	$J kg^{-1}$	$= m^2 s^{-2}$
Energiedichte	$J m^{-3}$	$= m^{-1} kg s^{-2}$
Oberflächenspannung, Grenzflächenspannung	$N m^{-1} = J m^{-2}$	$= kg s^{-2}$
Wärmestromdichte, Bestrahlungsstärke	$W m^{-2}$	$= kg s^{-3}$
Wärmeleitfähigkeit	$W m^{-1} K^{-1}$	$= m kg s^{-3} K^{-1}$
kinematische Viskosität, Diffusionskoeffizient	$m^2 s^{-1}$	
dynamische Viskosität	$N s m^{-2} = Pa s$	$= m^{-1} kg s^{-1}$
elektrische Ladungsdichte	$C m^{-3}$	$= m^{-3} s A$
elektrische Stromdichte	$A m^{-2}$	
elektrische Leitfähigkeit	$S m^{-1}$	$= m^{-3} kg^{-1} s^3 A^2$
molare Leitfähigkeit	$S m^2 mol^{-1}$	$= kg^{-1} mol^{-1} s^3 A^2$
Permittivität	$F m^{-1}$	$= m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
Permeabilität	$H m^{-1}$	$= m kg s^{-2} A^{-2}$
elektrische Feldstärke	$V m^{-1}$	$= m kg s^{-3} A^{-1}$
magnetische Feldstärke	$A m^{-1}$	
Leuchtdichte	$cd m^{-2}$	
Ionendosis	$C kg^{-1}$	$= kg^{-1} s A$
absorbierte Dosis pro Zeit	$Gy s^{-1}$	$= m^2 s^{-3}$

(1) Wenn keine Gefahr der Zweideutigkeit besteht, kann man diese Größe einfach „Konzentration“ nennen.