

ANLAGE III PHYSIKALISCHE GRÖSSEN UND EINHEITEN	NP
--	----

Physikalische Größen

Als physikalische Größe bezeichnet man eine eindeutig verabredete bzw. definierte und grundsätzlich messbare Eigenschaft von physikalischen Objekten und Erscheinungen, mit deren Hilfe physikalische Vorgänge beschrieben werden können. Beispiele sind *Länge, Zeit, Geschwindigkeit, Kraft, Arbeit und Energie, elektrische Spannung, magnetische Feldstärke, Temperatur*, usw.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten stellen Zusammenhänge zwischen den Größen her, durch die neue (abgeleitete) Größen aus vorhandenen Ausgangsgrößen gewonnen werden. Zurückgehend kann man auf diese Weise sämtliche beobachtbaren physikalischen Größen auf einige wenige Grundgrößen zurückführen. Durch die Gesetzmäßigkeiten sind die Rollen von Ausgangs- und abgeleiteten Größen nicht vorgegeben, und es wurden aus praktischen bzw. messtechnischen Gründen folgende Größen als Grundgrößen mit ihren Einheiten als *SI-Basiseinheiten* durch Vereinbarung festgelegt:

Länge l ,	Einheit 1 m	(Meter);
Masse m ,	Einheit 1 kg	(Kilogramm);
Zeit t ,	Einheit 1 s	(Sekunde);
Elektrische		
Stromstärke I ,	Einheit 1 A	(Ampere);
Temperatur T ,	Einheit 1 K	(Kelvin);
Stoffmenge n ,	Einheit 1 mol	(Mol);
Lichtstärke I ,	Einheit 1 cd	(Candela).

Dimensionen und Einheiten

Physikalische Größen werden durch ihre *Größenart* und ihre wertmäßige, *quantitative Angabe* charakterisiert. Die Größenart wird auch als *Dimension* bezeichnet. Die Dimensionen der Grundgrößen entsprechen den Begriffen selbst; also Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke. Die Dimensionen der abgeleiteten Größen ergeben sich aus den jeweili-

gen Definitionsgleichungen. Die Dimension der Beschleunigung ist demnach $Länge/Zeit^2$, die der Kraft (= Masse \times Beschleunigung) $Masse \times Länge/Zeit^2$.

Die quantitative Angabe einer physikalischen Größe erfolgt durch eine *Maßzahl* und eine *Einheit* (Maßeinheit). Die Einheiten legen (quantitative) Vergleichsgrößen fest, und die Maßzahlen sagen aus, wie oft eine Einheit in der zu beschreibenden Größe enthalten ist:

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Maßzahl} \times \text{Einheit.}$$

Einheitensystem

Ausgehend von den Beziehungen zwischen den Größen lässt sich ein Einheitensystem aufbauen, indem man Einheiten für die Grundgrößen festlegt, und die Einheiten aller weiteren Größen als abgeleitete Einheiten aus den Verknüpfungsgleichungen herleitet. Ein derartiges Einheitensystem wird als *kohärentes Einheitensystem* bezeichnet. Es gibt seit geraumer Zeit internationale Konferenzen zur Entwicklung und Einführung eines solchen Einheitensystems. Das so geschaffene System führt den Namen *Système International d'Unités* oder kurz SI. Es setzt sich zunehmend in allen Bereichen der Naturwissenschaften und in den Gesetzgebungen der Nationalstaaten über Maße und Gewichte durch und wird auch im Praktikum ausschließlich verwendet.

Prinzipiell ist es möglich, für jede Größe beliebige und unterschiedliche Einheiten nebeneinander festzulegen. Diese Situation wird aus der historischen Entwicklung heraus noch vielfach vorgefunden. Sie hat neben der erschwerten Vergleichbarkeit den Nachteil, dass eine große Zahl von Umrechnungsfaktoren erforderlich ist, die aufwendig mit großer Genauigkeit bestimmt werden müssen. (Solche Umrechnungsfaktoren waren z.B. das mechanische und das elektrische Wärmeäquivalent).

Auf den nachfolgenden Seiten ist eine kurze Übersicht über das SI mit den Grundgrößen, einigen Ergänzungsgrößen, den Einheitenvorsätzen für Teile und Vielfache und einer Auswahl abgeleiteter Größen angegeben.

Definition der Basiseinheiten

(Zur Information, nicht zum Auswendiglernen).

Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299792458$ Sekunden durchläuft.

Das Kilogramm ist die Einheit der Masse; es ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps (eines im Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres bei Paris aufbewahrten Zylinders von ca. 39 mm Durchmesser und gleicher Höhe aus einer Pt-Ir-Legierung).

Die Sekunde ist das 9192631770 fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.

Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stroms, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft von 2×10^{-7} N hervorrufen würde.

Das Kelvin¹⁾, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der $273,16$ te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers. (Der Nullpunkt der Celsiusskala wurde exakt zu $273,15$ K definiert.)

Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviele Einzelteilchen besteht, wie Atome in $0,012$ kg des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind. (Die Anzahl ist gleich dem Zahlenwert der Avogadro-Konstante).

Die Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, welche monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz in eine bestimmte Richtung aussendet, in der die Strahlstärke $1/683$ Watt pro Steradian beträgt.

¹⁾ Temperaturen können neben K in $^{\circ}\text{C}$ angegeben werden, wobei im wissenschaftlichen Bereich die Kelvin-Skala zu bevorzugen ist. Zur Umrechnung gilt durch Definition:

$$t / ^{\circ}\text{C} = T / \text{K} + 273,15 .$$

Temperaturdifferenzen werden in Kelvin angegeben, d.h.

$$30,7 ^{\circ}\text{C} - 21,3 ^{\circ}\text{C} = 9,4 \text{ K} !$$

Wichtige Größen und Einheiten des SI

Ergänzungsgrößen (Basisgrößen siehe oben)

Winkel	α	$\alpha = \frac{\text{Bogen}}{\text{Radius}}$	$1 \frac{\text{m}}{\text{m}} = 1 \text{ rad}^{2)3)}$ (Radiant)
Raumwinkel	Ω	$\Omega = \frac{\text{Fläche}}{\text{Radius}^2}$	$1 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = 1 \text{ sr}^{2)}$ (Steradian)

²⁾Die Einheiten bzw. Einheitenamen Radiant und Steradian sind symbolische Namen als Hinweis auf die Größenart (Winkel, Raumwinkel), die aus der Zahlenwertangabe selbst nicht hervorgeht. In abgeleiteten Einheiten oder Einheitenverknüpfungen fallen die Einheitenbezeichnungen gegebenenfalls weg (z.B. bei Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung).

³⁾Neben der obigen Definition der Winkeleinheit als *Bogenmaß* ist das Grad-Maß gebräuchlich. Die Umrechnung ergibt sich aus dem Vollwinkel mit $2 \pi \text{ rad} = 360^\circ$ (Grad) zu $1 \text{ rad} \approx 57,3^\circ$ bzw. $1^\circ \approx 0,0175 \text{ rad}$.

Mechanik, Wärme, Hydrodynamik

Geschwindigkeit	\vec{v}	$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \text{ m s}^{-1}$
Winkelgeschwindigkeit	ω	$\omega = \frac{d\phi}{dt}$	$\frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1}$
Beschleunigung	\vec{a}	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ m s}^{-2}$
Winkelbeschleunigung	α	$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2}$	$\frac{1}{\text{s}^2} = 1 \text{ s}^{-2}$
Frequenz	f, ν	$f = \frac{1}{T}$	$\frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Hz}$ (Hertz)
Kreisfrequenz	ω	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$\frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1}$
Impuls	\vec{p}	$\vec{p} = m \vec{v}$	$1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}} = 1 \text{ kg m s}^{-1}$
Drehimpuls	\vec{L}	$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$	$1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$

Kraft	\vec{F}	$\vec{F} = m \vec{a}$	$1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 1 \text{ N}$ (Newton)
Drehmoment	\vec{M}	$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$	1 N m
Trägheitsmoment	I	$I = \int r^2 dm$	1 m ² kg
Arbeit	W	$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{s}$	1 N m = 1 J (Joule)
Energie	E	alle Formen	1 J (Joule) ⁴⁾
Leistung	P	$P = \frac{dW}{dt}$	$1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ W}$ (Watt)
Dichte	ρ	$\rho = \frac{dm}{dV}$	$1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1 \text{ kg m}^{-3}$
Druck	p	$p = \frac{F}{A}$	$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pa}$ (Pascal) ⁵⁾
Wärmekapazität	C	$C = \frac{dQ}{dT}$	1 J K ⁻¹
Dynamische Viskosität	η	$F = \eta A \frac{dv}{dz}$	$1 \frac{\text{N m}}{\text{m}^2 \text{ m/s}} = 1 \text{ Pa s}$
Kinematische Viskosität	ν	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	$1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

⁴⁾ Im ernährungsphysiologischen Bereich findet man noch heute die überholte Energieeinheit 1 cal \approx 4,18 J.

⁵⁾ Als zwischenzeitlicher Einheitenname für 10⁵ Pa bestand die Bezeichnung 1 bar (Bar). Diese Bezeichnung wird noch häufig verwendet.

Elektrizitätslehre

Ladung	Q	$Q = \int I dt$	$1 \text{ A s} = 1 \text{ C (Coulomb)}$
Elektrische Feldstärke	\vec{E}	$\vec{F} = Q \vec{E}$	$1 \frac{\text{N}}{\text{A s}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
Magnetische Erregung	H	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$	$1 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
Magnetischer Fluss	\vec{B} ⁶⁾	$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$	$1 \frac{\text{V s}}{\text{m}^2} = 1 \text{ T (Tesla)}$
Elektrische Spannung	U	$U = \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$	$1 \frac{\text{N m}}{\text{A s}} = 1 \text{ V (Volt)}$
Elektrischer Widerstand	R	$R = \frac{U}{I}$	$1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega \text{ (Ohm)}$
Kapazität	C	$C = \frac{Q}{U}$	$1 \frac{\text{A s}}{\text{V}} = 1 \text{ F (Farad)}$
Induktivität	L	$U_L = -L \frac{dI}{dt}$	$1 \frac{\text{V s}}{\text{A}} = 1 \text{ H (Henry)}$

6) Der magnetische Fluss B wird in der Literatur häufig auch als *magnetische Feldstärke* bezeichnet.

Radioaktivität und Dosimetrie

Aktivität	A	$A = \frac{dN}{dt}$	$1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq (Bequerel)}$ ⁷⁾
Energiedosis	D_E	$D_E = \frac{E_{\text{absorbiert}}}{m}$	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Gy (Gray)}$
Ionendosis	D_Q	$D_Q = \frac{Q_{\text{ionisiert in Luft}}}{m}$	$1 \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ ⁸⁾
Äquivalentdosis	$D_{\dot{A}}$	$D_{\dot{A}} = RBW D_E$	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Sv (Sievert)}$ ⁹⁾

7) Eine ältere Aktivitätseinheit ist 1 Ci (Curie) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

8) Eine ältere Einheit für die Ionendosisleistung ist 1 R (Röntgen) = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg

9) Eine ältere, im englischsprachigen Raum noch vielfach gebräuchliche Einheit für die Äquivalentdosis ist 1 rem (Rem) = 0,01 Sv.

Einheitenvorsätze für Teile und Vielfache

10^{-18}	a (Atto)	10^{-2}	c (Zenti)	10^3	k (Kilo)
10^{-15}	f (Femto)	10^{-1}	d (Dezi)	10^6	M (Mega)
10^{-12}	p (Pico)			10^9	G (Giga)
10^{-9}	n (Nano)	10^1	D (Deka)	10^{12}	T (Tera)
10^{-6}	μ (Mikro)	10^2	h (Hekto)	10^{15}	P (Peta)
10^{-3}	m (Milli)			10^{18}	E (Exa)
			wissenschaftlich weniger gebräuchlich und zu vermeiden		

Größenordnung

Unter dem Hinweis auf die *Größenordnung* versteht man *etwa innerhalb eines Faktors 10*, d.h. die charakteristische *Zehnerpotenz* des Zahlenwertes. Größenordnungsabschätzungen kennzeichnen häufig die Arbeits- und Sprechweise des Physikers und anderer Naturwissenschaftler. Werte liegen in der *gleichen Größenordnung*, wenn sie sich um weniger als den Faktor 10 unterscheiden. Die Zahlen 3247,16 und 8000 haben die gleiche Größenordnung, aber auch 8000 und 20000, nämlich 10^3 bzw. 10^4 . Die Größenordnung der Elektronenmasse ist 10^{-30} kg, ihr genauer Wert beträgt $9,10938188(72) \cdot 10^{-31}$ kg.

ANLAGE IV KONSTANTEN UND FORMELZEICHEN	NP
---	-----------

Physikalische Konstanten

Die Fehler sind in Klammern gesetzt und geben die Schwankung der letzten Stellen der Werte an. Einige Konstanten sind durch gesetzmäßige Zusammenhänge miteinander verbunden.

Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	$c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ (exakt)
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V s}}{\text{A m}} = 1,256\dots \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ (exakt)
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8,854\dots \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ (exakt)
Gravitationskonstante	$G = 6,673(10) \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6,626\,068\,76(52) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
Elementarladung	$e = 1,602\,176\,462(63) \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Spezifische Elektronenladung	$e/m_e = 1,758\,820\,174(71) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$
Ruhemasse des Elektrons	$m_e = 9,109\,381\,88(72) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Ruhemasse des Protons	$m_p = 1,672\,621\,58(13) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Ruhemasse des Neutrons	$m_n = 1,674\,927\,16(13) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Avogadro-Konstante	$N_A = 6,022\,141\,99(47) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Universelle (molare) Gaskonstante	$R = 8,314\,472(15) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Loschmidt-Konstante	$n_0 = N_A/V_m = 2,686\,777\,5(47) \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Molvolumen des idealen Gases unter Normalbedingungen ($T = 273,15 \text{ K}$, $p = 101,325 \text{ kPa}$)	$V_M = 22,413\,996(39) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	$k = 1,380\,650\,3(24) \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Fallbeschleunigung im Praktikumsgebäude (1. Obergeschoss) $\beta = 52^0\,27'\,35(5)''$, $h = 59(3) \text{ m}$	$g = 9,812\,777(5) \text{ m s}^{-2}$
---	--------------------------------------

Empfohlene Formelzeichen für physikalische Größen

Raum und Zeit

x, y, z	Kartesische Ortskoordinaten	t	Zeit
\vec{r}	Ortsvektor	T	Periodendauer
l, s	Weglänge	f, ν	Frequenz
A, S	Fläche	ω	Kreisfrequenz
V	Volumen	τ	Abklingkonstante (Zeitkonstante)
α, β, \dots	ebener Winkel	\vec{v}	Geschwindigkeit
θ, ϕ		ω	Winkelgeschwindigkeit
Ω	Raumwinkel	\vec{a}	Beschleunigung
k	Wellenzahl	α	Winkelbeschleunigung
δ	Abklingkonstante (Dämpfungskoeffizient)	g	Fallbeschleunigung
		c	Vakuumlichtgeschwindigkeit

Mechanik

m	Masse	ϵ	Dehnung
ρ	Dichte	E	Elastizitätsmodul
\vec{p}	Impuls	G	Schubmodul
\vec{L}	Drehimpuls	μ	Poisson-Zahl
I, J	Trägheitsmoment	η	dynamische Viskosität
\vec{F}	Kraft	ν	kinematische Viskosität
\vec{G}	Gewichtskraft	E	Energie
\vec{M}	Drehmoment	W	Arbeit
p	Druck	E_p	potentielle Energie
σ	Normalspannung	E_k	kinetische Energie
τ	Schubspannung	P	Leistung

Thermodynamik

Q	Wärme	β	Spannungskoeffizient
T	Kelvin-Temperatur	λ	Wärmeleitfähigkeit
t	Celsius-Temperatur	A	Temperaturleitfähigkeit
S	Entropie	C	Wärmekapazität
U	innere Energie	c	spezifische Wärmekapazität
F	freie Energie	κ	Isentropenindex c_p/c_v
H	Enthalpie		

Elektrizität und Magnetismus

Q	Ladung	\vec{B}	magnetische Feldstärke (magnetische Flussdichte)
ρ	Raumladungsdichte	Φ	magnetischer Fluss
σ	Flächenladungsdichte	μ_0	magnetische Feldkonstante
ϕ	elektrisches Potential	μ	Permeabilität
U	elektrische Spannung	\vec{M}	Magnetisierung
\vec{E}	elektrische Feldstärke	χ_m	magnetische Suszeptibilität
\vec{D}	dielektrische Verschiebung	\vec{J}	magnetische Polarisierung
ϵ	Dielektrizitätskonstante	R	Widerstand
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	ρ	spezifischer Widerstand
\vec{P}	elektrische Polarisierung	σ	Leitfähigkeit
\vec{p}	elektrisches Dipolmoment	Z	Impedanz
I	elektrische Stromstärke	C	Kapazität
\vec{j}	Stromdichte	L	Selbstinduktionskoeffizient
\vec{H}	magnetische Feldstärke (magnetische Erregung)	\vec{S}	Poynting-Vektor
		\vec{A}	magnetisches Vektorpotential

Atom- und Kernphysik

e	Elementarladung	A	Nukleonenzahl
n	Hauptquantenzahl	Z	Ordnungszahl (Ladungszahl)
L, l_i	Bahndrehimpulsquantenzahl	N	Neutronenzahl
S, s_i	Spinquantenzahl	λ	Zerfallskonstante
M, m_i	Orientierungsquantenzahl (Magnetquantenzahl)	τ	mittlere Lebensdauer
J, j_i	Gesamt-Drehimpulsquantenzahl der Elektronenhülle	$T_{1/2}$	Halbwertszeit
		A	Aktivität
I, J	Kern-Spinquantenzahl		
F	Gesamt-Drehimpulsquantenzahl eines Teilchens		

Das griechische Alphabet

Eine Reihe der großen und einige kleine Buchstaben ($\iota, \omicron, \upsilon$) stimmen mit den lateinischen Buchstaben überein oder sind ihnen so ähnlich, dass sie als Symbole keine Verwendung finden.

A	α	Alpha	I	ι	Jota	P	ρ	Rho
B	β	Beta	K	κ	Kappa	Σ	σ	Sigma
Γ	γ	Gamma	Λ	λ	Lambda	T	τ	Tau
Δ	δ	Delta	M	μ	My	Y	υ	Ypsilon
E	ϵ	Epsilon	N	ν	Ny	Φ	ϕ, φ	Phi
Z	ζ	Zeta	Ξ	ξ	Xi	X	χ	Chi
H	η	Eta	O	\omicron	Omikron	Ψ	ψ	Psi
Θ	θ	Teta	Π	π	Pi	Ω	ω	Omega