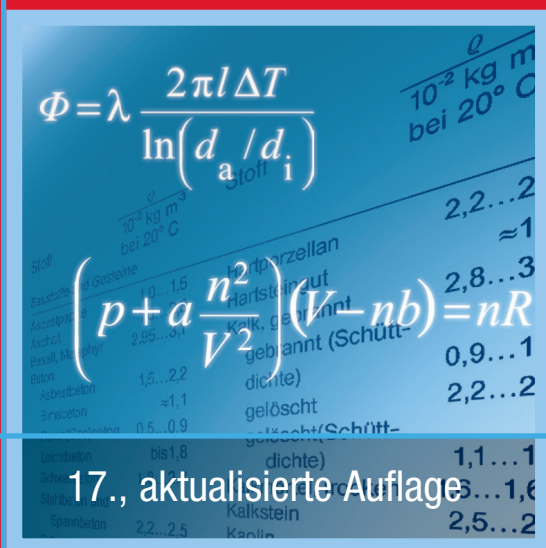


Dietmar Mende
Günter Simon

PHYSIK

Gleichungen
und Tabellen



17., aktualisierte Auflage



HANSER

1	Grundbegriffe der Metrologie	M
2	Mechanik fester Körper	FK
3	Mechanik der Flüssigkeiten und Gase	FG
4	Thermodynamik	T
5	Elektrik	E
6	Schwingungen	S
7	Wellen	W
8	Spezielle Relativitätstheorie	R
9	Quantentheorie und Atombau	Q
10	Physikalische Konstanten	K
11	Grundlagen der Vektorrechnung	V
12	Grundlagen der Fehlerrechnung	F
13	Umrechnung von Einheiten	UE

PHYSIK

Gleichungen und Tabellen

Von Dipl.-Phys. Dietmar Mende (†), Riesa
und Dipl.-Phys. Günter Simon, Apolda

17., aktualisierte Auflage
Mit 297 Bildern



FACHBUCHVERLAG LEIPZIG
im Carl Hanser Verlag



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-44969-5

E-Book-ISBN 978-3-446-44970-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Philipp Thorwirth

Herstellung: Katrin Wulst

Satz: Werksatz Schmidt & Schulz GmbH, Gräfenhainichen

Zeichnungen: Peter Palm, Berlin

Druck und Bindung: Friedrich Pustet, Regensburg

Printed in Germany

Vorwort

Die Zusammenstellung der wichtigsten Gleichungen, Größen, Zahlenwerte und Konstanten aus dem Gesamtbereich der Physik auf möglichst knappem Raum, dabei übersichtlich, einprägsam und rasch auffindbar, wo möglich in Tabellenform – das ist das Anliegen dieses Buches. Dem Benutzer soll ein Hilfsmittel für theoretische und praktische Arbeiten auf dem Gebiet der Physik, ein „Speicher“ für gelerntes Wissen zur Verfügung gestellt werden.

„PHYSIK – Gleichungen und Tabellen“ ist kein Lehrbuch, es baut auf vorhandenen Kenntnissen auf. Unterschiedlichen Niveaustufen wird durch entsprechende Gliederung des Stoffes Rechnung getragen; dem Einarbeiten in die Methodik des Buches dienen die Benutzungshinweise. In seiner Anlage wendet sich dieses Nachschlagewerk vorrangig an Studenten der Fachhochschulen, Technischen Hochschulen und Universitäten, Ingenieure, Techniker und Laboranten, aber auch an Naturwissenschaftler.

Zugang zu den gewünschten Informationen erhält der Benutzer vor allem durch das umfangreiche Sachwortverzeichnis am Schluss des Buches.

Für Hinweise zur weiteren Verbesserung des Werkes sind wir sehr dankbar.

Autoren und Verlag

Benutzungshinweise

1. Es wird grundsätzlich das *Internationale Einheitensystem* (SI) verwendet. Umrechnungen früherer, SI-fremder Einheiten in SI-Einheiten enthält Abschnitt 1.4.
2. Im Abschnitt 1.2 sind die im Buch verwendeten *Formelzeichen* physikalischer Größen in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt. Außerdem ist jedem Abschnitt eine Übersicht über die vorkommenden Größen vorangestellt: Formelzeichen, Größe, SI-Einheit, oft auch die Beziehung der Einheit zu anderen, insbesondere Basiseinheiten.
3. Die am häufigsten vorkommenden *Größen* werden im Allgemeinen nicht vor jedem Abschnitt wiederholt. Sie sind hier zusammengefasst:

Mechanik:

s	Weg	m
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	m s^{-1}
m	Masse	kg
A	Fläche	m^2
V	Volumen	m^3
F	Kraft	N
p	Druck	Pa

Schwingungen und Wellen:

λ	Wellenlänge	m
t	Zeit	s
T	Periodendauer	s
f	Frequenz	Hz
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}

Thermodynamik:

m	Masse	kg
V	Volumen	m^3
p	Druck	Pa
T	Temperatur	K
t	Celsius-Temperatur	$^{\circ}\text{C}$

Gleichstromkreis:

I	Stromstärke	A
U	Spannung	V
R	Widerstand	Ω

4. In der Regel sind die im Buch vorkommenden Gleichungen *Größengleichungen*. Sie gelten unabhängig von der Wahl der Einheiten. In Ausnahmefällen ist auch die Form der zugeschnittenen Größengleichung gewählt worden.
5. Besonders *wichtige Gleichungen* sind durch einen Punkt ● am linken Seitenrand markiert, die *Konstanten* durch ein Dreieck ►.
6. Im *Sachwortverzeichnis* wird grundsätzlich auf die Seitenzahl verwiesen.
7. *Fehlergrenzen* der physikalischen Konstanten sind nur im Kapitel 10 angegeben.
8. Vektoren werden durch das entsprechende Formelzeichen mit einem Pfeil versehen dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe der Metrologie	11
1.1	Physikalische Größen	11
1.2	Formelzeichen physikalischer Größen (Auswahl)	11
1.3	Einheiten physikalischer Größen	15
1.4	Umrechnungstabellen (s. auch Kapitel 13)	18
1.5	Dimensionen physikalischer Größenarten	20
1.6	Physikalische Gleichungen	25
2	Mechanik fester Körper	26
2.1	Kinematik	26
2.2	Statik starrer Körper	39
2.3	Physikalische Grundlagen der Festigkeitslehre	47
2.4	Dynamik	66
2.5	Zusammenfassung wichtiger Gesetze der Kinematik und Dynamik	83
2.6	Gravitation	86
3	Mechanik der Flüssigkeiten und Gase	93
3.1	Allgemeine Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase	93
3.2	Ruhende Flüssigkeiten und Gase	95
3.3	Strömende Flüssigkeiten und Gase	98
4	Thermodynamik	111
4.1	Temperatur	111
4.2	Thermische Ausdehnung der festen Körper und Flüssigkeiten	112
4.3	Zustandsgleichung des idealen Gases	116
4.4	Wärmemenge	120
4.5	Wärmeübertragung	129
4.6	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	135
4.7	Zustandsänderungen des idealen Gases	136
4.8	Carnot'scher Kreisprozess	143
4.9	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	145
4.10	Exergie und Anergie	145
4.11	Änderungen des Aggregatzustandes	145
4.12	Reale Gase	155
4.13	Kinetische Theorie der Wärme	159
5	Elektrik	169
5.1	Gleichstrom	169

5.2	Elektrisches Feld	181
5.3	Magnetisches Feld	192
5.4	Zusammenfassung der wichtigsten Gesetze des elektrischen und magnetischen Feldes	212
5.5	Leitungsvorgänge in Festkörpern und Flüssigkeiten	215
5.6	Leitungsvorgänge in Gasen und im Vakuum	224
5.7	Wichtige Bauelemente der Elektronik	229
5.8	Grundlagen der Schaltalgebra	239
6	Schwingungen	243
6.1	Mechanische Schwingungen	243
6.2	Elektrische Schwingungen	256
6.3	Wechselstrom	258
7	Wellen	272
7.1	Allgemeine Wellenlehre	272
7.2	Wellenfeld	275
7.3	Schallwellen	279
7.4	Schallfeldgrößen	285
7.5	Physiologische Akustik	291
7.6	Elektromagnetische Wellen	293
7.7	Lichtausbreitung	298
7.8	Optische Abbildung	309
7.9	Optische Geräte	313
7.10	Fotometrie	315
7.11	Lichtabsorption	320
7.12	Temperaturstrahlung	322
8	Spezielle Relativitätstheorie	326
9	Quantentheorie und Atombau	331
9.1	Atom	331
9.2	Dualismus Welle – Korpuskel	332
9.3	Atomhülle	334
9.4	Physik der Atomkerne	361
9.5	Dosimetrie und Strahlenschwächung	388
10	Häufig benötigte physikalische Konstanten (Fundamental- konstanten) nach CODATA 2014	403
11	Grundlagen der Vektorrechnung	409
11.1	Vektoralgebra	409
11.2	Vektoranalysis (Differenzialoperationen)	413
12	Grundlagen der Fehlerrechnung	416
13	Umrechnung von Einheiten	422
14	Sachwortverzeichnis	428

1 Grundbegriffe der Metrologie

1.1 Physikalische Größen

G	Wert der physikalischen Größe
$\{G\}$	Zahlenwert der physikalischen Größe
$[G]$	Einheit der physikalischen Größe

Jeder Größenwert ist das Produkt aus Zahlenwert und Einheit:

$$\bullet \quad G = \{G\} [G]$$

Beispiele: $l = 20 \text{ m}$, $F = 8 \text{ N}$, $U = 230 \text{ V}$

Physikalische Größen, die sich als Quotienten gleicher Größenarten ergeben, haben die Einheit 1.

Beispiele: Wirkungsgrad, Reibungszahl, Permeabilitätszahl

1.2 Formelzeichen physikalischer Größen (Auswahl)

A	Absorptionsfläche Aktivität Fläche Massenzahl numerische Apertur	b	Spaltbreite VAN-DER-WAALS'sche Konstante WIEN'sche Konstante
A_H	HALL-Koeffizient	C	elektrische Kapazität Wärmekapazität
A_r	relative Atommasse	C_m	molare Wärmekapazität
a	Albedo Beschleunigung Länge, Abstand Materialwert eines Thermoelements spezifische Aktivität Temperaturleitfähigkeit VAN-DER-WAALS'sche Konstante	C_V	volumenbezogene Wärmekapazität
B	Bildgröße Blindleitwert magnetische Flussdichte	c	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen Lichtgeschwindigkeit PLANCK'sche Strahlungskonstanten spezifische Wärmekapazität
b	Bildweite Länge, Abstand	D	Abstand der Hauptebenen Brechwert von Linsen elektrische Flussdichte Energiedosis Winkelrichtgröße
		d	Dicke, Abstand

d	Durchmesser	I	Kraftstoß
$d_{1/2}$	Halbwertsdicke		Lichtstärke
E	Beleuchtungsstärke		Strahlstärke
	Bestrahlungsstärke	i	elektrische Stromstärke (zeitlich veränderlich)
	ebullioskopische Konstante		Trägheitsradius
	Elastizitätsmodul	\vec{i}	Einheitsvektor in Richtung der x -Achse
	elektrische Feldstärke	J	elektrische Stromdichte
	Energie		Ionendosis (Exposition)
E_k	kinetische Energie		magnetische Polarisierung
E_p	potenzielle Energie		(Massen-)Trägheitsmoment
e	Elementarladung		Schallintensität
	Exzentrizität	j	magnetisches Moment (Dipolmoment)
\vec{e}	Einheitsvektor	\vec{j}	Einheitsvektor in Richtung der y -Achse
F	FARADAY-Konstante	K	fotometrisches Strahlungs- äquivalent
	Kraft		Kerma
F_G	Gewichtskraft		Kompressionsmodul
F_N	Normalkraft	k	kryoskopische Konstante
F_R	Reibungskraft		BOLTZMANN-Konstante
f	absolute Feuchte		elektrochemisches Äquivalent
	Anzahl der Freiheitsgrade		Federkonstante, Richtgröße
	Brennweite		Öffnungszahl
	Frequenz		Polytropenexponent
G	elektrischer Leitwert, Wirkleitwert		Stoßparameter
	Gegenstandsgröße, Dinggröße		Wärmedurchgangskoeffizient
	Gravitationskonstante	\vec{k}	Einheitsvektor in Richtung der z -Achse
	Schubmodul, Torsionsmodul	L	Drehimpuls
g	Fallbeschleunigung		Induktivität
	Gegenstandsweite		Leuchtdichte
	Gitterkonstante		Strahldichte
H	Äquivalentdosis	L_p	Schalldruckpegel
	Belichtung	l	Länge
	Drehstoß	l_i	Bahndrehimpuls-Quantenzahl
	Enthalpie	M	Drehmoment, Kraftmoment
	Häufigkeit		Magnetisierung
	Heizwert		molare Masse
	magnetische Feldstärke	M_r	relative Molekülmasse
h	Höhe	m	Masse
	PLANCK'sches Wirkungs- quantum	m_i	Magnetquantenzahl
	spezifische Enthalpie		
\hbar	Drehimpulsquantum		
I	elektrische Stromstärke		
	Flächenträgheitsmoment		

N	Anzahl der Neutronen	S	Steilheit
	Windungszahl	\vec{S}	POYNTING-Vektor
N_A	AVOGADRO-Konstante	s	konventionelle Sehweite
n	Brechzahl		spezifische Entropie
	Drehzahl		Weg, Länge
	Elektronenkonzentration	s_i	Spindrehimpuls-Quantenzahl
	Hauptquantenzahl	T	Periodendauer
	Stoffmenge		thermodynamische Temperatur
n_0	LOSCHMIDT-Konstante	$T_{1/2}$	Halbwertszeit
n_{eq}	Äquivalentmenge	t	CELSIUS-Temperatur
\vec{n}^o	Einheitsvektor in Richtung der Bahnnormalen		optische Tubuslänge
P	elektrische Polarisierung		Zeit
	Leistung, Wirkleistung	U	elektrische Spannung
p	Druck		innere Energie
	Impuls		Wärmedurchgangskoeffizient
	Schalldruck	U_q	Quellenspannung
	elektrisches Moment	u	Beweglichkeit von Ladungs- trägern
Q	Blindleistung		elektrische Spannung (zeitlich veränderlich)
	elektrische Ladung		spezifische innere Energie
	Lichtmenge	V	magnetische Spannung
	Wärmemenge, Wärmeenergie		Normalvergrößerung
q	elektrische Ladung (zeitlich veränderlich)		Volumen
	gleichmäßig verteilte Be- lastung	\dot{V}	Volumenstrom
	spezifische Schmelzwärme	V_m	molares Volumen
	Wärmestromdichte	v	Geschwindigkeit
R	elektrischer Widerstand, Wirkwiderstand		Parallelverschiebung
	Gaskonstante		Schallschnelle
	RYDBERG-Konstante		spezifisches Volumen
	Schalldämm-Maß	W	Arbeit
R_{th}	Wärmewiderstand		Widerstandsmoment
R_{thk}	Wärmedurchgangswiderstand	w	Energiedichte
$R_{th\alpha}$	Wärmeübergangswiderstand		Wahrscheinlichkeit
$R_{th\lambda}$	Wärmeleitwiderstand	X	Blindwiderstand
Re	REYNOLDS-Zahl	x	Koordinate
r	Radius, Abstand	Y	Scheinleitwert
	spezifische Verdampfungs- wärme	y	Elongation
\vec{r}	Ortsvektor		Koordinate
S	Entropie		Verlängerung
	Scheinleistung	Z	Kernladungszahl (Ordnungs- zahl)
			Scheinwiderstand

z	Anzahl Koordinate Wertigkeit	ϑ	Streuwinkel
		κ	Adiabatexponent (Isen- tropyenexponent) Kompressibilität
α	Absorptionsgrad Dämpfungskoeffizient Dehnungskoeffizient Dissoziationsgrad elektrische Polarisierbarkeit Längenausdehnungs- koeffizient Phasendifferenz Temperaturkoeffizient Wärmeübergangskoeffizient Winkel Winkelbeschleunigung	Λ	magnetischer Leitwert mittlere freie Weglänge
		λ	Wärmeleitfähigkeit Wellenlänge Zerfallskonstante
α_s	spezifische Drehung	μ	Ausflusszahl magnetisches Moment von Elementarteilchen makroskopischer Wirkungs- querschnitt Permeabilität POISSON-Zahl Reibungszahl Schwächungskoeffizient
β	Abbildungsmaßstab Phasenkoeffizient Schubkoeffizient Temperaturkoeffizient Winkel	μ_0	magnetische Feldkonstante
		μ_r	Permeabilitätszahl
Γ	Dosisleistungskonstante Wellenwiderstand	ν	ABBE-Zahl kinematische Viskosität
γ	Ausbreitungskoeffizient Druckkoeffizient elektrische Leitfähigkeit Raumausdehnungskoeffizient Scherung (Schiebung) Winkel	ξ	spezifische magnetische Suszeptibilität
Δ	LAPLACE-Operator	ϱ	Dichte Krümmungsradius Raumladungsdichte Reflexionsgrad spezifischer elektrischer Widerstand Winkel (natürlicher Böschungswinkel)
δ	Abklingkoeffizient Gangunterschied Winkel	σ	mikroskopischer Wirkungs- querschnitt Oberflächenspannung (spe- zifische Grenzflächen- energie)
ε	Dehnung Emissionsgrad Winkel		STEFAN-BOLTZMANN- Konstante
ε_0	elektrische Feldkonstante		Streukoeffizient
ε_r	Permittivitätszahl		Zugspannung, Druck- spannung
η	dynamische Viskosität Lichtausbeute Wirkungsgrad	τ	Schubspannung Transmissionsgrad
ϑ	Dämpfungsgrad mittlere Dispersion		

τ	Zeitkonstante	Ψ	elektrischer Verschiebungs- fluss
Φ	Lichtstrom	Ψ	orts- und zeitabhängige Wellenfunktion
	magnetischer Fluss	ψ	Druckkoeffizient der Siede- temperatur
	Strahlungsfluss		ortsabhängige Wellen- funktion
	Wärmestrom	Ω	Raumwinkel
φ	elektrostatisches Potenzial	ω	Kreisfrequenz
	Phasenverschiebungswinkel		Winkel
	relative Feuchte		Winkelgeschwindigkeit
	Strahlungsflussdichte		
	Winkel		
χ_e	elektrische Suszeptibilität		
χ_m	magnetische Suszeptibilität		

1.3 Einheiten physikalischer Größen

Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI)

Einheit der Länge:	Meter	m
Einheit der Zeit:	Sekunde	s
Einheit der Masse:	Kilogramm	kg
Einheit der Stromstärke:	Ampere	A
Einheit der Temperatur:	Kelvin	K
Einheit der Stoffmenge:	Mol	mol
Einheit der Lichtstärke:	Candela	cd

Abgeleitete SI-Einheiten

Abgeleitete SI-Einheiten (kohärente Einheiten) sind alle Einheiten, die aus den Basiseinheiten direkt gebildet werden können (ohne Verwendung von Zahlenfaktoren ungleich 1).

Beispiele für abgeleitete SI-Einheiten:

Einheit des ebenen Winkels:	Radian	$1 \text{ rad} = 1 \text{ m m}^{-1} = 1$
Einheit des Raumwinkels:	Steradian	$1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} = 1$
Einheit der Geschwindigkeit:	Meter/Sekunde	1 m s^{-1}
Einheit der Kraft:	Newton	$1 \text{ N} = 1 \text{ m s}^{-2} \text{ kg}$
Einheit der Arbeit:	Joule	$1 \text{ J} = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ kg}$
Einheit des Druckes:	Pascal	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ kg}$
Einheit der Leistung:	Watt	$1 \text{ W} = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ kg}$
Einheit der elektrischen Spannung:	Volt	$1 \text{ V} = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ kg A}^{-1}$
Einheit des Widerstandes:	Ohm	$1 \Omega = 1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ kg A}^{-2}$

SI-fremde Einheiten

SI-fremde Einheiten lassen sich zwar auch auf die Basiseinheiten zurückführen, jedoch treten in den entsprechenden Gleichungen Zahlenwerte auf, die von eins verschieden sind.

Beispiele für SI-fremde Einheiten:

Einheit der Länge:	Kilometer	$1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$
Einheit der Zeit:	Stunde	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$
Einheit der Masse:	Tonne	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
Einheit der Kraft:	Kilopond *)	$1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ m s}^{-2} \text{ kg}$
Einheit der Energie:	Kalorie *)	$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ kg}$
Einheiten des Druckes:	physikalische	
	Atmosphäre *)	$1 \text{ atm} = 101325 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ kg}$
	technische	
	Atmosphäre *)	$1 \text{ at} = 98066,5 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ kg}$

*) Nicht mehr gesetzlich

Vielfache und Teile der Einheiten

Vielfache und Teile der Einheiten werden durch *Vorsätze* gekennzeichnet:

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Bedeutung
Yotta	Y	10^{24} Einheiten
Zetta	Z	10^{21} Einheiten
Exa	E	10^{18} Einheiten
Peta	P	10^{15} Einheiten
Tera	T	10^{12} Einheiten
Giga	G	10^9 Einheiten
Mega	M	10^6 Einheiten
Kilo	k	10^3 Einheiten
Hekto *)	h	10^2 Einheiten
Deka *)	da	10 Einheiten
Dezi *)	d	10^{-1} Einheiten
Zenti *)	c	10^{-2} Einheiten
Milli	m	10^{-3} Einheiten
Mikro	μ	10^{-6} Einheiten
Nano	n	10^{-9} Einheiten
Piko	p	10^{-12} Einheiten
Femto	f	10^{-15} Einheiten
Atto	a	10^{-18} Einheiten
Zepto	z	10^{-21} Einheiten
Yocto	y	10^{-24} Einheiten

*) Diese Vorsätze sollen nur bei solchen Einheiten angewendet werden, bei denen sie bisher üblich waren (z. B. cm, dm, hl).

In der Informatik bedeutet Mega (M) $2^{20} = 1\,048\,576$ und Kilo (k) $2^{10} = 1\,024$.

Einheiten, die nach Personen benannt sind

Einheiten- zeichen	Einheit	Größe	Beziehungen zu den SI-Einheiten
A	Ampere	elektrische Stromstärke	Basiseinheit
Å	Ångström*)	Länge	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
Bi	Biot*)	elektrische Stromstärke	$1 \text{ Bi} = 10 \text{ A}$
Bq	Becquerel	Aktivität	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
C	Coulomb	elektrische Ladung	$1 \text{ C} = 1 \text{ A s}$
Ci	Curie*)	Aktivität	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
Cl	Clausius*)	Entropie	$1 \text{ Cl} = 4,1868 \text{ J K}^{-1}$
°C	Grad Celsius	Temperatur	$0 \text{ °C} = 273,15 \text{ K}$
D	Debye*)	Dipolmoment	$1 \text{ D} = 3,3 \cdot 10^{-30} \text{ C m}$
F	Farad	Kapazität	$1 \text{ F} = 1 \text{ A s V}^{-1}$
Fr	Franklin*)	elektrische Ladung	$1 \text{ Fr} = 3,336 \cdot 10^{-10} \text{ C}$
G	Gauß*)	magn. Flussdichte	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
Gal	Gal*)	Beschleunigung	$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$
Gb	Gilbert*)	magnetische Spannung	$1 \text{ Gb} = \frac{10}{4\pi} \text{ A}$
Gy	Gray	Energiedosis	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$
H	Henry	Induktivität	$1 \text{ H} = 1 \text{ V s A}^{-1}$
Hz	Hertz	Frequenz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
J	Joule	Energie	$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ W s}$
K	Kelvin	Temperatur	Basiseinheit
M (Mx)	Maxwell*)	magnetischer Fluss	$1 \text{ M} = 10^{-8} \text{ Wb}$
N	Newton	Kraft	$1 \text{ N} = 1 \text{ m kg s}^{-2}$
Oe	Oersted*)	magnetische Feldstärke	$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A m}^{-1}$
Ω	Ohm	elektrischer Widerstand	$1 \text{ Ω} = 1 \text{ V A}^{-1}$
P	Poise*)	dynamische Viskosität	$1 \text{ P} = 0,1 \text{ Pa s}$
Pa	Pascal	Druck, Spannung	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$
R	Röntgen*)	Ionendosis	$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$
S	Siemens	elektrischer Leitwert	$1 \text{ S} = 1 \text{ Ω}^{-1}$
St	Stokes*)	kinematische Viskosität	$1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Sv	Sievert	Äquivalentdosis	$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$
T	Tesla	magn. Flussdichte	$1 \text{ T} = 1 \text{ V s m}^{-2}$
Torr	Torr*)	Druck	$1 \text{ Torr} = 133,3224 \text{ Pa}$
V	Volt	elektrische Spannung	$1 \text{ V} = 1 \text{ W A}^{-1}$
W	Watt	Leistung	$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1} = 1 \text{ V A}$
Wb	Weber	magnetischer Fluss	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V s}$

*) Einheit nicht (oder nicht mehr) gesetzlich

1.4 Umrechnungstabellen (s. auch Kapitel 13)

Umrechnungstabelle SI-fremder Längeneinheiten in Meter

Einheit	Einheiten- zeichen	Umrechnung in Meter
Seemeile	sm	1 sm = 1 852 m
X-Einheit	XE	1 XE = $1,00202 \cdot 10^{-13}$ m
Ångström	Å	1 Å = 10^{-10} m
Astronomische Einheit	AE	1 AE = $1,49600 \cdot 10^{11}$ m
Lichtjahr	ly	1 ly = $9,4605 \cdot 10^{15}$ m
Parsec	pc	1 pc = $3,0857 \cdot 10^{16}$ m (1 pc = 3,261 7 ly)

Umrechnungstabelle für Zeiteinheiten

Einheit	Einheits- zeichen	Faktor zur Umrechnung in				
		a	d	h	min	s
Jahr	a	1	365,242	8 765,81	525 949	31 556 926
Tag	d	$2,738 \cdot 10^{-3}$	1	24	1 440	86 400
Stunde	h	$1,141 \cdot 10^{-4}$	0,041 7	1	60	3 600
Minute	min	$0,1901 \cdot 10^{-5}$	$0,694 \cdot 10^{-3}$	0,01667	1	60
Sekunde	s	$0,3169 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,01667	1

Umrechnungstabelle SI-fremder Energieeinheiten in Joule

Einheit	Einheiten- zeichen	Umrechnung in Joule (1 J = 1 N m = 1 W s)
Kilowattstunde	kW h	1 kW h = $3,6 \cdot 10^6$ J = 3,6 MJ
Kilopondmeter	kp m	1 kp m = 9,80665 J
Erg	erg	1 erg = 10^{-7} J = 0,1 µJ
Kilokalorie	kcal	1 kcal = $4,1868 \cdot 10^3$ J = 4,1868 kJ
Elektronvolt	eV	1 eV = $1,60218 \cdot 10^{-19}$ J = 0,160218 aJ



Umrechnungstabelle für Winkeleinheiten

Einheit	Einheitenzeichen	Faktor zur Umrechnung in						
		rad	└	°	°	'	''	gon
Radiant	rad	1	0,636620	57,295781	57	17	44,8	63,662
1 Rechter	└	1,570796	1	90	90	0	0	100
$= \frac{\pi}{2}$ Radiant								
Grad	°	17,45329 · 10 ⁻³	1,11111 · 10 ⁻²	1	1	0	0	1,11111
Minute	'	2,90888 · 10 ⁻⁴	1,85185 · 10 ⁻⁴	1,66667 · 10 ⁻²	0	1	0	1,85185 · 10 ⁻²
Sekunde	''	4,848137 · 10 ⁻⁶	3,0864 · 10 ⁻⁶	2,77 · 10 ⁻⁴	0	0	1	3,0864 · 10 ⁻⁴
Gon	gon	1,570796 · 10 ⁻²	10 ⁻²	0,9	0	54	0	1

Umrechnungstabelle SI-fremder Druckeinheiten in Pascal

Einheit	Einheitenzeichen	Umrechnung in Pascal (1 Pa = 1 N/m ²)	
Bar	bar	1 bar	= 10 ⁵ Pa = 100 kPa = 10 ³ hPa
Mikrobar	μbar = $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$	1 μbar	= 0,1 Pa
Millimeter Wassersäule	mm WS = $\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$	1 mm WS	= 9,80665 Pa
Physikalische Atmosphäre	atm	1 atm	= 1,01325 · 10 ⁵ Pa = 101,325 kPa
Torr	Torr	1 Torr	= 133,3224 Pa
Technische Atmosphäre	at	1 at	= 9,80665 · 10 ⁴ Pa = 98,0665 kPa

Umrechnungstabelle SI-fremder Krafteinheiten in Newton

Einheit	Einheitenzeichen	Umrechnung in Newton
Dyn	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
Kilopond	kp	1 kp = 9,80665 N
Megapond	Mp	1 Mp = 9,80665 · 10 ³ N

Umrechnungstabelle SI-fremder Leistungseinheiten in Watt

Einheit	Einheiten- zeichen	Umrechnung in Watt (1 W = 1 J/s)
Kilowatt	kW	1 kW = 10^3 W
Kilopondmeter	kp m	$1 \frac{\text{kp m}}{\text{s}} = 9,80665 \text{ W}$
Sekunde	s	
Kilokalorie	kcal	$1 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ W} = 4,1868 \text{ kW}$
Sekunde	s	
Pferdestärke	PS	1 PS = 735,5 W
Kilokalorie	kcal	
Stunde	h	$1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 1,163 \text{ W}$

1.5 Dimensionen physikalischer Größenarten

Die Dimension kennzeichnet die *Qualität* einer physikalischen Größenart; sie gibt den Zusammenhang einer physikalischen Größe mit den Basisgrößen an.

Der Begriff der Dimension ist von dem der Einheit zu unterscheiden. So hat z. B. die Geschwindigkeit

die Dimension $\frac{\text{Länge}}{\text{Zeit}}$ und die Einheit $\frac{\text{Meter}}{\text{Sekunde}}$

Als Dimensionszeichen werden *große steile Grotteskbuchstaben* benutzt:

Basisgröße	Dimensionszeichen	Basisgröße	Dimensionszeichen
Länge	L	Temperatur	T
Zeit	Z	(thermo- dynamische)	
Masse	M	Stoffmenge	N
Stromstärke	I	Lichtstärke	J

Beispiele für Dimensionen und Einheiten

Größenart	Dimension	Einheit
Fläche	L^2	1 m ²
Volumen	L^3	1 m ³
Geschwindigkeit	$L Z^{-1}$	1 m s ⁻¹
Beschleunigung	$L Z^{-2}$	1 m s ⁻²
Kraft	$L Z^{-2} M$	1 m s ⁻² kg = 1 N

Größenart	Dimension	Einheit
Druck	$L^{-1} Z^{-2} M$	$1 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ kg} = 1 \text{ Pa}$
Arbeit, Energie	$L^2 Z^{-2} M$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ kg} = 1 \text{ J}$
Leistung	$L^2 Z^{-3} M$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ kg} = 1 \text{ W}$
Elektrische Spannung	$L^2 Z^{-3} M I^{-1}$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ kg A}^{-1} = 1 \text{ V}$
Elektrische Ladung	$Z I$	$1 \text{ s A} = 1 \text{ C}$
Molare Masse	$M N^{-1}$	1 kg mol^{-1}

Die Dimension der Größe G kann also in der Form

$$\dim G = L^i Z^j M^k I^l T^m N^n J^p$$

die SI-Einheit als

$$[G] = \text{m}^i \text{s}^j \text{kg}^k \text{A}^l \text{K}^m \text{mol}^n \text{cd}^p$$

dargestellt werden. Die Exponenten i, j, k, l, m, n, p sind der folgenden Tabelle zu entnehmen (Auswahl):

Größe	Formel- zeichen	i	j	k	l	m	n	p
Länge	l	1	0	0	0	0	0	0
Fläche	A	2	0	0	0	0	0	0
Volumen	V	3	0	0	0	0	0	0
Brechwert	D	-1	0	0	0	0	0	0
Ebener Winkel	φ	0	0	0	0	0	0	0
Raumwinkel	Ω	0	0	0	0	0	0	0
Zeit	t	0	1	0	0	0	0	0
Frequenz	f	0	-1	0	0	0	0	0
Kreisfrequenz	ω	0	-1	0	0	0	0	0
Winkelgeschwindigkeit	ω	0	-1	0	0	0	0	0
Winkelbeschleunigung	α	0	-2	0	0	0	0	0
Geschwindigkeit	v	1	-1	0	0	0	0	0
Beschleunigung	a	1	-2	0	0	0	0	0
Masse	m	0	0	1	0	0	0	0
Dichte	ρ	-3	0	1	0	0	0	0
Spezifisches Volumen	v	3	0	-1	0	0	0	0
Kraft	F	1	-2	1	0	0	0	0
Druck	p	-1	-2	1	0	0	0	0
Spannung (Zug-, Druck-)	σ	-1	-2	1	0	0	0	0
Impuls	p	1	-1	1	0	0	0	0
Drehimpuls	L	2	-1	1	0	0	0	0
Massenträgheitsmoment	J	2	0	1	0	0	0	0
Flächenträgheitsmoment	I	4	0	0	0	0	0	0

Größe	Formel- zeichen	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>
Drehmoment (Kraftmoment)	M	2	-2	1	0	0	0	0
Energie, Arbeit	E, W	2	-2	1	0	0	0	0
Leistung	P	2	-3	1	0	0	0	0
Wirkung	H	2	-1	1	0	0	0	0
Energiedichte	w	-1	-2	1	0	0	0	0
Wirkungsgrad	η	0	0	0	0	0	0	0
Reibungszahl	μ	0	0	0	0	0	0	0
Elastizitätsmodul	E	-1	-2	1	0	0	0	0
Schub-, Torsionsmodul	G	-1	-2	1	0	0	0	0
Kompressionsmodul	K	-1	-2	1	0	0	0	0
POISSON-Zahl	μ	0	0	0	0	0	0	0
Richtgröße	k	0	-2	1	0	0	0	0
Gravitationskonstante	G	3	-2	-1	0	0	0	0
Oberflächenspannung	σ	0	-2	1	0	0	0	0
Dynamische Viskosität	η	-1	-1	1	0	0	0	0
Kinematische Viskosität	ν	2	-1	0	0	0	0	0
Volumenstrom	\dot{V}	3	-1	0	0	0	0	0
REYNOLDS-Zahl	Re	0	0	0	0	0	0	0
Elongation	y	1	0	0	0	0	0	0
Periodendauer	T	0	1	0	0	0	0	0
Schallschnelle	v	1	-1	0	0	0	0	0
Lautstärkepegel	L_s	0	0	0	0	0	0	0
Dämm-Maß	R	0	0	0	0	0	0	0
Temperatur (thermo- dynamische)	T	0	0	0	0	1	0	0
Stoffmenge	n	0	0	0	0	0	1	0
Molare Masse	M	0	0	1	0	0	-1	0
Molares Volumen	V_m	3	0	0	0	0	-1	0
Wärmemenge, Wärmeenergie	Q	2	-2	1	0	0	0	0
Wärmekapazität	C	2	-2	1	0	-1	0	0
Spezifische Wärmekapazität	c	2	-2	0	0	-1	0	0
Volumenbezogene Wärme- kapazität	C_V	-1	-2	1	0	-1	0	0
Molare Wärmekapazität	C_m	2	-2	1	0	-1	-1	0
Enthalpie	H	2	-2	1	0	0	0	0
Entropie	S	2	-2	1	0	-1	0	0
Gaskonstante	R	2	-2	1	0	-1	-1	0
BOLTZMANN-Konstante	k	2	-2	1	0	-1	0	0
Adiabatexponent	κ	0	0	0	0	0	0	0
Polytropenexponent	k	0	0	0	0	0	0	0
Spezifische Schmelzwärme	q	2	-2	0	0	0	0	0

Größe	Formel- zeichen	i	j	k	l	m	n	p
Spezifische Verdampfungs- wärme	r	2	-2	0	0	0	0	0
Heizwert (feste und flüssige Brennstoffe)	H	2	-2	0	0	0	0	0
Heizwert (gasförmige Brennstoffe)	H'	-1	-2	1	0	0	0	0
Längenausdehnungs- koeffizient	α	0	0	0	0	-1	0	0
Raumausdehnungs- koeffizient	γ	0	0	0	0	-1	0	0
Wärmeleitfähigkeit	λ	1	-3	1	0	-1	0	0
Wärmeübergangskoeffizient	α	0	-3	1	0	-1	0	0
Wärmedurchgangskoeffizient	k, U	0	-3	1	0	-1	0	0
Wärmestrom	Φ	2	-3	1	0	0	0	0
Wärmestromdichte	q	0	-3	1	0	0	0	0
Temperaturleitfähigkeit	a	2	-1	0	0	0	0	0
Ebullioskopische Konstante	E	0	0	0	0	1	0	0
Kryoskopische Konstante	K	0	0	0	0	1	0	0
Dissoziationsgrad	α	0	0	0	0	0	0	0
VAN-DER-WAALS'sche Konstante	a	5	-2	1	0	0	-2	0
VAN-DER-WAALS'sche Konstante	b	3	0	0	0	0	-1	0
Absolute Feuchte	f	-3	0	1	0	0	0	0
Relative Feuchte	φ	0	0	0	0	0	0	0
Elektrische Stromstärke	I	0	0	0	1	0	0	0
Elektrische Ladung	Q	0	1	0	1	0	0	0
Elektrische Stromdichte	J	-2	0	0	1	0	0	0
Elektrische Spannung	U	2	-3	1	-1	0	0	0
Elektrischer Widerstand	R	2	-3	1	-2	0	0	0
Elektrischer Leitwert	G	-2	3	-1	2	0	0	0
Spezifischer elektrischer Widerstand	ϱ	3	-3	1	-2	0	0	0
Elektrische Leitfähigkeit	γ	-3	3	-1	2	0	0	0
Elektrische Feldstärke	E	1	-3	1	-1	0	0	0
Magnetische Feldstärke	H	-1	0	0	1	0	0	0
Elektrische Kapazität	C	-2	4	-1	2	0	0	0
Induktivität	L	2	-2	1	-2	0	0	0
Elektrische Flussdichte	D	-2	1	0	1	0	0	0
Magnetische Flussdichte	B	0	-2	1	-1	0	0	0
Magnetischer Fluss	Φ	2	-2	1	-1	0	0	0

Größe	Formel- zeichen	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>
Magnetische Spannung	V	0	0	0	1	0	0	0
Magnetischer Widerstand	R_m	-2	2	-1	2	0	0	0
Elektrische Feldkonstante	ε_0	-3	4	-1	2	0	0	0
Magnetische Feldkonstante	μ_0	1	-2	1	-2	0	0	0
Dielektrizitätszahl	ε_r	0	0	0	0	0	0	0
Permeabilitätszahl	μ_r	0	0	0	0	0	0	0
Elektrische Suszeptibilität	χ_e	0	0	0	0	0	0	0
Magnetische Suszeptibilität	χ_m	0	0	0	0	0	0	0
Elektrische Polarisierung	P	-2	1	0	1	0	0	0
Magnetische Polarisierung	J	0	-2	1	-1	0	0	0
Elektrisches Moment	p	1	1	0	1	0	0	0
Magnetisches Moment	j	3	-2	1	-1	0	0	0
Elektrische Polarisierbarkeit	α	0	4	-1	2	0	0	0
Magnetische Polarisierbarkeit	β	4	-2	1	-2	0	0	0
FARADAY-Konstante	F	0	1	0	1	0	-1	0
Lichtstärke	I, I_v	0	0	0	0	0	0	1
Lichtstrom	Φ, Φ_v	0	0	0	0	0	0	1
Leuchtdichte	L, L_v	-2	0	0	0	0	0	1
Beleuchtungsstärke	E, E_v	-2	0	0	0	0	0	1
Strahlungsfluss	Φ, Φ_e	2	-3	1	0	0	0	0
Strahlungsflussdichte	φ	0	-3	1	0	0	0	0
Strahlstärke	I, I_e	2	-3	1	0	0	0	0
Strahldichte	L, L_e	0	-3	1	0	0	0	0
Bestrahlungsstärke	E, E_e	0	-3	1	0	0	0	0
Numerische Apertur	A	0	0	0	0	0	0	0
Brennweite	f	1	0	0	0	0	0	0
Brechzahl	n	0	0	0	0	0	0	0
Gitterkonstante	g	1	0	0	0	0	0	0
Relative Atommasse	A_r	0	0	0	0	0	0	0
Relative Molekülmasse	M_r	0	0	0	0	0	0	0
Aktivität	A	0	-1	0	0	0	0	0
PLANCK'sches Wirkungs- quantum	h	2	-1	1	0	0	0	0
Drehimpulsquantum	\hbar	2	-1	1	0	0	0	0
AVOGADRO-Konstante	N_A	0	0	0	0	0	-1	0
LOSCHMIDT-Konstante	n_0	-3	0	0	0	0	0	0
Zerfallskonstante	λ	0	-1	0	0	0	0	0

1.6 Physikalische Gleichungen

Größengleichungen

In jeder Größengleichung steht das *Formelzeichen für die physikalische Größe*, also für das Produkt aus Zahlenwert und Einheit. Die Größengleichung gilt unabhängig von der Wahl der Einheiten, sie ist daher bevorzugt anzuwenden.

Beispiele für Größengleichungen:

$$s = vt, \quad v = 2\pi rf, \quad F = ma$$

Zugeschnittene Größengleichungen

Auch in der zugeschnittenen Größengleichung steht das *Formelzeichen für die physikalische Größe*. In der Gleichung wird der *Quotient aus der Größe und der Einheit* gebildet, in der die Größe zu messen ist. Dieser Quotient ergibt den *Zahlenwert der Größe*.

Beispiele für zugeschnittene Größengleichungen:

$$s/m = \frac{1}{3,6} v/\text{km h}^{-1} \cdot t/s, \quad F/N = m/\text{kg} \cdot a/\text{m s}^{-2}$$

$$v/\text{m s}^{-1} = 0,10472 r/\text{m} \cdot f/\text{min}^{-1}$$

Zahlenwertgleichungen

Das *Formelzeichen* bedeutet in einer Zahlenwertgleichung nur den *Zahlenwert* der physikalischen Größe, dem eine ganz bestimmte Einheit zugeordnet ist, die in einer Gleichungslegende (Einheitenrechen, WALLOT'scher Kamm) angegeben werden muss. Wegen der abweichenden Bedeutung der Formelzeichen – nur Zahlenwert, nicht physikalische Größe – werden in diesem Buch grundsätzlich *keine* Zahlenwertgleichungen verwendet.

Beispiele für Zahlenwertgleichungen:

$$s = \frac{1}{3,6} vt \quad \frac{s}{\text{m}} \left| \frac{v}{\text{km h}^{-1}} \right| \frac{t}{\text{s}} \quad v = 0,10472 rf \quad \frac{v}{\text{m s}^{-1}} \left| \frac{r}{\text{m}} \right| \frac{f}{\text{min}^{-1}}$$

2 Mechanik fester Körper

2.1 Kinematik

Länge

- Die Länge ist eine Basisgröße. Die *Einheit* der Länge ist das *Meter*: Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft.

Zeit

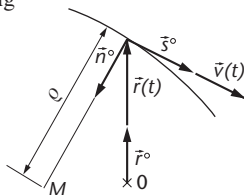
- Die Zeit ist eine Basisgröße. Die *Einheit* der Zeit ist die *Sekunde*: Die Sekunde ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Cäsium 133 entspricht.

Bahngeschwindigkeit

$s, t \rightarrow$	Benutzungshinweise	
v	Bahngeschwindigkeit (Geschwindigkeit)	m s^{-1}
\vec{r}	Ortsvektor	m
\vec{s}°	Einheitsvektor in Richtung der Bahnkurve	1
\vec{r}°	Einheitsvektor in Richtung des Ortsvektors	1

$v, \vec{r}, s, \vec{r}^\circ$ und \vec{s}° sind im Allgemeinen zeitabhängig

- $$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$
$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r}' = \frac{ds}{dt} \vec{s}^\circ = v \vec{s}^\circ$$



Bahngeschwindigkeit auf gerader Bahn

$s, t \rightarrow$	Benutzungshinweise	
v	Bahngeschwindigkeit (Geschwindigkeit)	m s^{-1}
s_0	zur Zeit t_0 bereits zurückgelegter Weg	m

Augenblicksgeschwindigkeit

- $$v = \frac{ds}{dt} = \dot{s}$$

Durchschnittsgeschwindigkeit

●
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s - s_0}{t - t_0} \quad v = \frac{s - s_0}{t} \quad \text{für } t_0 = 0$$

Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung

●
$$v = \frac{s}{t} \quad \text{für } t_0 = 0 \quad \text{und } s_0 = 0$$

Einige Geschwindigkeiten (Durchschnittswerte)

Bewegung	$\frac{v}{\text{km h}^{-1}}$	$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$
Gletscherbewegung	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$
Schneeflocken	0,72	0,2
Gehen	5	1,4
Dauerlauf	10	2,8
Radfahren	20	5,5
Kurzstreckenlauf	bis 36	bis 10
Brieftaube	72	20
Rennpferd	90	25
Orkan (Windstärke 12)	126	35
Schallgeschwindigkeit in Luft bei 0 °C und 101,325 kPa	1 225	340
Punkt am Äquator (Umfangs- geschwindigkeit der Erde)	1 670	464
Überschallverkehrsflugzeug	2 500	695
Gewehrsgeschoss (Anfangsgeschwindigkeit)	3 130	870
Wasserstoffmoleküle bei 0 °C und 101,325 kPa	6 625	1 840
Erdbebenwelle	13 000	3 600
Künstlicher Erdsatellit	28 800	8 000
Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne	$1,1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$
Licht im Vakuum (gerundet)	$1,1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^8$

Bahngeschwindigkeit bei Kreisbewegung mit konstanter Drehfrequenz

v	Bahngeschwindigkeit	m s^{-1}
r	Radius der Kreisbahn	m
f	Drehfrequenz (Drehzahl)	s^{-1}

●
$$v = 2\pi r f$$

Winkelgeschwindigkeit

(→ Bild S. 26); M und O liegen in der Zeichenebene

$\vec{\omega}$ Winkelgeschwindigkeit bezüglich O $\text{rad s}^{-1} \equiv \text{s}^{-1}$

\vec{r} Ortsvektor m

\vec{e}° Einheitsvektor, senkrecht zur Bahnebene 1

φ Winkel zwischen \vec{r} und einer vorgegebenen Richtung $\text{rad} \equiv 1$

\vec{n}° Einheitsvektor in Richtung der Normalen der Bahnkurve zum Krümmungsmittelpunkt 1

ϱ Krümmungsradius der Bahnkurve m

$$\overrightarrow{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)} = \frac{d\varphi}{dt} \vec{e}^\circ$$

Winkelgeschwindigkeit bezüglich O

$$\vec{e}^\circ \perp \vec{r} \quad \overrightarrow{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)} = \frac{1}{r^2} (\vec{r} \times \vec{v})$$

Winkelgeschwindigkeit bezüglich M

$$\vec{e}^\circ \perp \vec{n}^\circ \quad \vec{\omega} = \frac{1}{\varrho} (\vec{v} \times \vec{n}^\circ) \quad \omega = \frac{v}{\varrho}$$

Wenn O und M zusammenfallen, gilt $\vec{\omega} = \overrightarrow{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)}$.

Winkelgeschwindigkeit bei Kreisbewegung

ω Winkelgeschwindigkeit $\text{rad s}^{-1} \equiv \text{s}^{-1}$

φ Drehwinkel $\text{rad} \equiv 1$

t Zeit s

T Periodendauer (Umlaufzeit) s

f Drehfrequenz (Drehzahl) s^{-1}

v Bahngeschwindigkeit m s^{-1}

r Radius der Kreisbahn m

s Kreisbogen m

z Anzahl der Umdrehungen 1

Augenblickswinkelgeschwindigkeit

● $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} \quad \text{mit} \quad \varphi = \frac{s}{r}$

Durchschnittswinkelgeschwindigkeit

● $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi - \varphi_0}{t - t_0}, \quad \omega = \frac{\varphi - \varphi_0}{t} \quad \text{für} \quad t_0 = 0$

Winkelgeschwindigkeit bei konstanter Drehfrequenz für $t_0 = 0$ und $\varphi_0 = 0$

$$\bullet \quad \omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega = 2\pi f, \quad f = \frac{1}{T}$$

Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit

$$\bullet \quad v = \omega r$$

Anzahl der Umdrehungen bei konstanter Drehfrequenz

$$\bullet \quad z = ft$$

Beschleunigung

(→ Bild S. 26)

\vec{a}	Vektor der Beschleunigung	m s^{-2}
\vec{r}	Ortsvektor	m
a_t	Bahnbeschleunigung (Tangentialbeschleunigung)	m s^{-2}
v	Bahngeschwindigkeit	m s^{-1}
a_r	Radialbeschleunigung	m s^{-2}
ϱ	Krümmungsradius der Bahnkurve	m
\vec{s}°	Einheitsvektor in Richtung der Bahnkurve	1
\vec{n}°	Einheitsvektor in Richtung der Normalen der Bahnkurve	1
t	Zeit	s

$$\bullet \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} = \dot{\vec{r}} = \dot{v}\vec{s}^\circ + \frac{v^2}{\varrho}\vec{n}^\circ = \vec{a}_t + \vec{a}_r$$

Betrag der Beschleunigung

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2}, \quad a_t = \dot{v}, \quad a_r = \frac{v^2}{\varrho}$$

Bahnbeschleunigung

a_t	Bahnbeschleunigung (Tangentialbeschleunigung)	m s^{-2}
v	Bahngeschwindigkeit	m s^{-1}
t	Zeit	s
v_0, t_0	Anfangswerte von v und t	

Augenblicksbeschleunigung

$$\bullet \quad a_t = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \ddot{s}$$

Durchschnittsbeschleunigung

$$\bullet \quad a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0}, \quad a_r = \frac{v - v_0}{t} \quad \text{für} \quad t_0 = 0$$