

Dietmar Mende
Günter Simon

PHYSIK

Gleichungen und Tabellen

Stoff	ϱ $10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$ bei 20° C	λ $10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{K m}}$ bei 20° C	ρ $10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$ bei 20° C	λ $10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{K m}}$ bei 20° C
Stein, gesteine	1,0...1,5	2,2...2	2,2...2	≈ 1
Aussteingestein	2,05...3,1	2,8...3	2,8...3	
Kies, Sand	1,5...2,2	0,9...1	0,9...1	
Beton, Mörtel	1,5...2,2	2,2...2	2,2...2	
Arbeitsbeton	$\approx 1,1$	dichte)	dichte)	
Braserton	0,5...0,9	gelöscht	gelöscht (Schütt-	
Leichtbeton	bis 1,8	dichte)	dichte)	1,1...1
Schwammbeton				1,5...1,6
Stahlbeton				
Spannbeton	2,2...2,5	Kalkstein	Kalzit	2,5...2

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

Mende/Simon
PHYSIK
Gleichungen und Tabellen

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	m	Masse	kg
t	Zeit	s	V	Volumen	m^3
v	Geschwindigkeit	$m\ s^{-1}$	p	Druck	Pa

m	Masse	kg	T	Temperatur	K
A	Fläche	m^2	t	Celsius-Temperatur	$^{\circ}C$

V	Volumen	m^3	<i>Gleichstromkreis:</i>		
F	Kraft	N	I	Stromstärke	A
p	Druck	Pa	U	Spannung	V

R	Widerstand	Ω
-----	------------	----------

Schwingungen und Wellen:

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

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 – Körpuskel	332
9.3	Atomhülle	334
9.4	Physik der Atomkerne	361
9.5	Dosimetrie und Strahlenschwächung	388
10	Häufig benötigte physikalische Konstanten (Fundamentalkonstanten) nach CODATA 2014	403
11	Grundlagen der Vektorrechnung	409
11.1	Vektoralgebra	409
11.2	Vektoranalysis (Differentialoperationen)	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:

- $G = \{G\} [G]$

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 Thermo-elements spezifische Aktivität Temperaturleitfähigkeit VAN-DER-WAALS'sche Konstante	C_V	volumenbezogene Wärme-kapazität Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen Lichtgeschwindigkeit PLANCK'sche Strahlungs-konstanten
B	Bildgröße Blindleitwert magnetische Flussdichte	D	spezifische Wärmekapazität Abstand der Hauptebenen Brechwert von Linsen elektrische Flussdichte Energiedosis Winkelrichtgröße
b	Bildweite Länge, Abstand	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		Einheitsvektor in Richtung der x -Achse
	elektrische Feldstärke	\vec{i}	
	Energie		
E_k	kinetische Energie	J	elektrische Stromdichte
E_p	potenzielle Energie		Ionendosis (Exposition)
e	Elementarladung		magnetische Polarisation
	Exzentrizität		(Massen-)Trägheitsmoment
\vec{e}	Einheitsvektor		Schallintensität
F	FARADAY-Konstante	j	magnetisches Moment (Dipolmoment)
	Kraft	\vec{j}	Einheitsvektor in Richtung der y -Achse
F_G	Gewichtskraft	K	fotometrisches Strahlungs- äquivalent
F_N	Normalkraft		Kerma
F_R	Reibungskraft		Kompressionsmodul
f	absolute Feuchte		kryoskopische Konstante
	Anzahl der Freiheitsgrade	k	BOLTZMANN-Konstante
	Brennweite		elektrochemisches Äquivalent
	Frequenz		Federkonstante, Richtgröße
G	elektrischer Leitwert, Wirkleitwert		Öffnungszahl
	Gegenstandsgröße, Dinggröße		Polytopenexponent
	Gravitationskonstante		Stoßparameter
	Schubmodul, Torsionsmodul	\vec{k}	Wärmedurchgangskoeffizient
g	Fallbeschleunigung		Einheitsvektor in Richtung der z -Achse
	Gegenstandsweite	L	Drehimpuls
	Gitterkonstante		Induktivität
H	Äquivalentdosis		Leuchtdichte
	Belichtung	L_p	Strahldichte
	Drehstoß	l	Schalldruckpegel
	Enthalpie	l_i	Länge
	Häufigkeit	M	Bahndrehimpuls-Quantenzahl
	Heizwert		Drehmoment, Kraftmoment
	magnetische Feldstärke		Magnetisierung
h	Höhe		molare Masse
	PLANCK'sches Wirkungs- quantum	M_r	relative Molekülmasse
	spezifische Enthalpie	m	Masse
\hbar	Drehimpulsquantum	m_i	Magnetquantenzahl
I	elektrische Stromstärke		
	Flächenträgheitsmoment		

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

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

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

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 *) technische Atmosphäre *)	$1 \text{ atm} = 101325 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ kg}$ $1 \text{ at} = 98066,5 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ kg}$

*) 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

Einheitenzeichen	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	Oested*)	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	$1 \text{ sm} = 1852 \text{ m}$
X-Einheit	XE	$1 \text{ XE} = 1,00202 \cdot 10^{-13} \text{ m}$
Ångström	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
Astronomische Einheit	AE	$1 \text{ AE} = 1,49600 \cdot 10^{11} \text{ m}$
Lichtjahr	ly	$1 \text{ ly} = 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ m}$
Parsec	pc	$1 \text{ pc} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ m}$ ($1 \text{ pc} = 3,2617 \text{ ly}$)

Umrechnungstabelle für Zeiteinheiten

Einheit	Einhei-tenzei-chen	Faktor zur Umrechnung in				
		a	d	h	min	s
Jahr	a	1	365,242	8765,81	525949	31556926
Tag	d	$2,738 \cdot 10^{-3}$	1	24	1440	86400
Stunde	h	$1,141 \cdot 10^{-4}$	0,0417	1	60	3600
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	$1 \text{ kW h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$
Kilopondmeter	kp m	$1 \text{ kp m} = 9,80665 \text{ J}$
Erg	erg	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J} = 0,1 \mu\text{J}$
Kikalororie	kcal	$1 \text{ kcal} = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ J} = 4,1868 \text{ kJ}$
Elektronvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,160218 \text{ aJ}$

Umrechnungstabelle für Winkeleinheiten

Einheit	Einheiten-zeichen	Faktor zur Umrechnung in	rad	l	°	°	'	"	gon
Radian	rad	1	0,636620	57,295781	57	17	44,8	63,662	
1 Rechter	l	1,570796	1	90		90	0	0	100
$= \frac{\pi}{2}$ Radian									
Grad	°	17,45329	1,11111	1		1	0	0	1,11111
		$\cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-2}$						
Minute	'	2,90888	1,85185	1,66667	0	1	0	1,85185	$\cdot 10^{-2}$
		$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-4}$	$\cdot 10^{-2}$					
Sekunde	"	4,848137	3,0864	2,77	0	0	1	3,0864	$\cdot 10^{-4}$
		$\cdot 10^{-6}$	$\cdot 10^{-6}$	$\cdot 10^{-4}$					
Gon	gon	1,570796	10^{-2}	0,9	0	54	0	1	$\cdot 10^{-2}$

Umrechnungstabelle SI-fremder Druckeinheiten in Pascal

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

Umrechnungstabelle SI-fremder Krafteinheiten in Newton

Einheit	Einheiten-zeichen	Umrechnung in Newton	
Dyn	dyn	1 dyn	$= 10^{-5}$ N
Kilopond	kp	1 kp	$= 9,80665$ N
Megapond	Mp	1 Mp	$= 9,80665 \cdot 10^3$ N

Umrechnungstabelle SI-fremder Leistungseinheiten in Watt

Einheit	Einheiten- zeichen	Umrechnung in Watt (1 W = 1 J/s)
Kilowatt	kW	$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$
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	$1 \text{ PS} = 735,5 \text{ W}$
Kilokalorie	kcal	$1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 1,163 \text{ W}$
Stunde	h	

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 Groteskbuchstaben* benutzt:

Basisgröße	Dimensionszeichen	Basisgröße	Dimensionszeichen
Länge	L	Temperatur	T
Zeit	Z	(thermo-	
Masse	M	dynamische)	
Stromstärke	I	Stoffmenge	N
		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	$L Z^{-2} M$	$1 \text{ m s}^{-2} \text{ kg} = 1 \text{ N}$

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	$L^2 Z^{-3} M \text{ I}^{-1}$	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ kg A}^{-1} = 1 \text{ V}$
Elektrische Ladung	$Z \text{ I}$	$1 \text{ s A} = 1 \text{ C}$
Molare Masse	$M \text{ N}^{-1}$	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

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

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)	<i>M</i>	2	-2	1	0	0	0	0
Energie, Arbeit	<i>E, W</i>	2	-2	1	0	0	0	0
Leistung	<i>P</i>	2	-3	1	0	0	0	0
Wirkung	<i>H</i>	2	-1	1	0	0	0	0
Energiedichte	<i>w</i>	-1	-2	1	0	0	0	0
Wirkungsgrad	<i>η</i>	0	0	0	0	0	0	0
Reibungszahl	<i>μ</i>	0	0	0	0	0	0	0
Elastizitätsmodul	<i>E</i>	-1	-2	1	0	0	0	0
Schub-, Torsionsmodul	<i>G</i>	-1	-2	1	0	0	0	0
Kompressionsmodul	<i>K</i>	-1	-2	1	0	0	0	0
POISSON-Zahl	<i>μ</i>	0	0	0	0	0	0	0
Richtgröße	<i>k</i>	0	-2	1	0	0	0	0
Gravitationskonstante	<i>G</i>	3	-2	-1	0	0	0	0
Oberflächenspannung	<i>σ</i>	0	-2	1	0	0	0	0
Dynamische Viskosität	<i>η</i>	-1	-1	1	0	0	0	0
Kinematische Viskosität	<i>v</i>	2	-1	0	0	0	0	0
Volumenstrom	<i>V̇</i>	3	-1	0	0	0	0	0
REYNOLDS-Zahl	<i>Re</i>	0	0	0	0	0	0	0
Elongation	<i>y</i>	1	0	0	0	0	0	0
Periodendauer	<i>T</i>	0	1	0	0	0	0	0
Schallschnelle	<i>v</i>	1	-1	0	0	0	0	0
Lautstärkepegel	<i>L_s</i>	0	0	0	0	0	0	0
Dämm-Maß	<i>R</i>	0	0	0	0	0	0	0
Temperatur (thermo- dynamische)	<i>T</i>	0	0	0	0	1	0	0
Stoffmenge	<i>n</i>	0	0	0	0	0	1	0
Molare Masse	<i>M</i>	0	0	1	0	0	-1	0
Molares Volumen	<i>V_m</i>	3	0	0	0	0	-1	0
Wärmemenge, Wärmeenergie	<i>Q</i>	2	-2	1	0	0	0	0
Wärmekapazität	<i>C</i>	2	-2	1	0	-1	0	0
Spezifische Wärmekapazität	<i>c</i>	2	-2	0	0	-1	0	0
Volumenbezogene Wärme- kapazität	<i>C_V</i>	-1	-2	1	0	-1	0	0
Molare Wärmekapazität	<i>C_m</i>	2	-2	1	0	-1	-1	0
Enthalpie	<i>H</i>	2	-2	1	0	0	0	0
Entropie	<i>S</i>	2	-2	1	0	-1	0	0
Gaskonstante	<i>R</i>	2	-2	1	0	-1	-1	0
BOLTZMANN-Konstante	<i>k</i>	2	-2	1	0	-1	0	0
Adiabatenexponent	<i>x</i>	0	0	0	0	0	0	0
Polytropenexponent	<i>k</i>	0	0	0	0	0	0	0
Spezifische Schmelzwärme	<i>q</i>	2	-2	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>
Spezifische Verdampfungswärme	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
Längenausdehnungskoeffizient	α	0	0	0	0	-1	0	0
Raumausdehnungskoeffizient	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	α	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 Polarisation	P	-2	1	0	1	0	0	0
Magnetische Polarisation	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:

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

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:

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

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

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

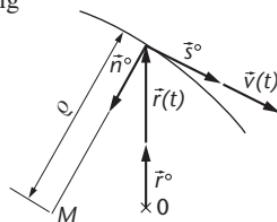
- Die Zeit ist eine Basisgröße. Die *Einheit* der Zeit ist die *Sekunde*: Die Sekunde ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes des Atoms Cäsium 133 entspricht.

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

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

Geschwindigkeit bei gleichförmiger Bewegung

● $v = \frac{s}{t}$ für $t_0 = 0$ 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	1225	340
Punkt am Äquator (Umfangsgeschwindigkeit der Erde)	1670	464
Überschallverkehrsflugzeug	2500	695
Gewehrgeschoss (Anfangsgeschwindigkeit)	3130	870
Wasserstoffmoleküle bei 0 °C und 101,325 kPa	6625	1840
Erdbebenwelle	13000	3600
Künstlicher Erdsatellit	28800	8000
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

(\rightarrow)	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 $\varphi_0 = 0$

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

Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit

- $v = \omega r$

Anzahl der Umdrehungen bei konstanter Drehfrequenz

- $z = ft$

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

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

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

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

Durchschnittsbeschleunigung

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