

Allgemeine Informationen

SI-Einheiten

1. Internationales Einheitensystem SI

Gemäss Comité International des Poids et Mesures (CIPM)

Basisgrössen

Symbol	Physikalische Grösse	SI-Basiseinheit	Weitere SI-Einheiten
l	Länge	m (Meter)	km, dm, cm, mm, μm , nm, pm
m	Masse	kg (Kilogramm)	Mg, g, mg, μg
t	Zeit	s (Sekunde)	ks, ms, μs , ns
I	Elektrische Stromstärke	A (Ampère)	kA, mA, μA , nA, pA
T	Thermodynamische Temperatur	K (Kelvin)	
n	Stoffmenge	mol (Mol)	Gmol, Mmol, kmol, mmol, μmol
I_v	Lichtstärke	cd (Candela)	Mcd, kcd, mcd

2. Abgeleitete SI-Einheiten

Formelzeichen für Grössen werden schräg (kursiv), Einheitenzeichen senkrecht geschrieben.

Grösse	Formelzeichen	Einheitenname	Einheitenzeichen	Beziehung/Bemerkung
Geometrie				
Fläche	A	Quadratmeter	m^2	
Volumen	V	Kubikmeter	m^3	
Zeit				
Frequenz	f	Hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$
Kreisfrequenz	ω	rez. Sekunde	1/s	$\omega = 2\pi f$
Drehzahl	n	rez. Sekunde	1/s	
Mechanik				
Dichte	ρ	Kilogramm pro Kubikmeter	kg/m^3	
Geschwindigkeit	v	Meter pro Sekunde	m/s	
Beschleunigung	a	Meter pro Sekundenquadrat	m/s^2	
Kraft	F	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kgm}/\text{s}^2$
Impuls	I	Newtonsekunde	Ns	$1 \text{ Ns} = 1 \text{ kgm}/\text{s}$
Druck (mech.)	p	Pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2 = 10^{-5} \text{ bar}$
Energie, Arbeit	W	Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$
Moment	M	Newtonmeter	Nm	$1 \text{ Nm} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
Drehmoment	T	Newtonmeter	Nm	$1 \text{ Nm} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
Leistung	P	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm}/\text{s} = 1 \text{ J}/\text{s}$
Wärme				
Temperatur	ϑ	Grad Celsius	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta = T - T_0$ mit $T_0 = 273.15 \text{ K}$
Temperaturdifferenz	ΔT	Kelvin	K	bevorzugt
	$\Delta\vartheta$	Grad Celsius	$^{\circ}\text{C}$	$1^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$
Wärmemenge	Q	Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$
Wärmestrom	ϕ	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm}/\text{s} = 1 \text{ J}/\text{s}$
Elektrizität				
El. Spannung	U	Volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W}/\text{A}$
El. Ladung	Q	Coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
El. Kapazität	C	Farad	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C}/\text{V} = 1 \text{ As}/\text{V}$
El. Durchflutung	θ	Ampère	A	Ampèrewindungszahl der Spule
El. Widerstand	R	Ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V}/\text{A}$
El. Leitwert	G	Siemens	S	$G = 1/R$ $1 \text{ S} = 1 \text{ A}/\text{V} = 1/\Omega$

Allgemeine Informationen

2. Fortsetzung Abgeleitete SI-Einheiten

Formelzeichen für Grössen werden schräg (kursiv), Einheitenzeichen senkrecht geschrieben.

Grösse	Formelzeichen	Einheitenname	Einheitenzeichen	Beziehung/Bemerkung
Elektrizität				
El. Leitfähigkeit	κ	Siemens pro Meter	S/m	$\kappa = 1/\rho$
Spez. el. Widerstand	P	Ohmmeter	Ωm	$1 \Omega\text{m} = 1 \text{Vm/A}$
Magn. Fluss	Φ	Weber	Wb	$1 \text{Wb} = 1 \text{Vs}$
Magn. Feldstärke	H	Ampère pro Meter	A/m	
Magn. Flussdichte	B	Tesla	T	$1 \text{T} = 1 \text{Wb/m}^2 = 1 \text{Vs/m}^2$
Induktivität	L	Henry	H	$1 \text{H} = 1 \text{Wb/A} = 1 \text{Vs/A}$
Scheinleistung	S	Voltampère	VA	
Wirkleistung	P	Watt	W	$1 \text{W} = 1 \text{J/s}$
Blindleistung	Q	Voltampère	Var	
Energie	W	Joule	J	$1 \text{J} = 1 \text{Nm} = 1 \text{Ws}$
Scheinwiderstand, Impedanz	Z	Ohm	Ω	
Blindwiderstand Reaktanz	X	Ohm	Ω	
Phasenverschiebungswinkel	φ	Radian	rad	$1 \text{rad} = 1$

Grösse	Formelzeichen	Beziehung/Bemerkung
Permittivität des Vakuums	ϵ_0	$= 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
magnetische Permeabilität	μ_0	$= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

3. Begriffe und Beziehungen

Symbol	Physikalische Grösse	Einheit	Beziehung
R	Ohmscher Widerstand	$[\Omega = \frac{\text{V}}{\text{A}}]$	$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{G}$ $R_w = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T)$
X	Reaktanz	$[\Omega]$	
X_L	Induktive Reaktanz	$[\Omega]$	$X_L = \omega L$
X_C	Kapazitive Reaktanz	$[\Omega]$	$X_C = -\frac{1}{\omega C}$
			$\omega = 2\pi f = \text{Kreisfrequenz}$
Z	Impedanz	$[\Omega]$	(Wechselstromwiderstand) $Z = \sqrt{R_w^2 + X_L^2}$
ϵ_r	Rel. Dielektrizitätskonstante		
tg δ	Verlustwinkel		
φ	Phasenverschiebungswinkel		$\cos \varphi = P/S$
S	Scheinleistung	[VA]	$S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U$ (3-ph.)
P	Wirkleistung	[W]	$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi$ (3-ph.)
Q	Blindleistung	[Var]	$Q = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \sin \varphi$ (3-ph.)

Allgemeine Informationen

4. Wichtige Formeln der Kabeltechnik

4.1 Betriebskapazität C_B und Ladestrom I_C

Für Radialfeldkabel wie Polymer-Hochspannungskabel gilt:

$$C_B = \frac{5.56 \cdot \epsilon_r}{\ln(D/d)} \cdot 10^{-2} \quad [\mu\text{F/km}]$$

D = Durchmesser über der Isolation [mm]

d = Durchmesser über der Leiterglättung des Leiters [mm]

Ladestrom I_C und Erdschlussstrom I_E

$$I_C = I_E = U_0 \cdot \omega \cdot C_B \cdot 10^{-3} \quad [\text{A/km}]$$

U_0 = Phasenspannung

4.2 Kapazitive Blindleistung P_C

$$P_C = 3 \cdot I_C \cdot U_0 \quad [\text{kVA}]$$

wobei

I_C = Ladestrom in A

U_0 = Phasenspannung in kV

4.3 Verluste im Kabel

Dielektrische Verluste

$$P_d = U_0^2 \cdot \omega \cdot C_B \cdot \text{tg}\delta \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/km}]$$

Verlustfaktoren tg δ

XLPE (1.5 bis 3.5) $\cdot 10^{-4}$

EPR (4 bis 30) $\cdot 10^{-4}$

Ohmsche Leiterverluste pro Phase

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R_T \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/km}]$$

wobei:

$$R_T = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{th} (T - 20^\circ\text{C})] \quad [\text{kW/km}]$$

R_T = Widerstand des betriebswarmen Leiters

R_{20} = Gleichstromwiderstand bei 20 °C

T = Temperatur des betriebswarmen Leiters

α_{th} = Temperaturkoeffizient

für Kupfer: 0,00393/K

für Aluminium: 0,00403/K

4.4 Induktivität L

Induktivität je Phase für Dreileiterkabel oder 3 Einleiterkabel im Dreieck verlegt:

$$L' = 2 \left(0.25 + \ln \frac{2s}{d} \right) \cdot 10^{-4} \quad [\text{H/km}]$$

wobei

s = Abstand der Leiterachsen [mm]

d = Leiterdurchmesser [mm]

Für armierte Kabel erhöht sich die Induktivität um folgende Werte:

– leichte Stahlbandarmierung -CL: +5%

– übrige Armierungen -C, -F, -FF: +10%

4.5 Thermische Längenausdehnung der Kabel

$$\Delta l = \alpha_{th} \cdot l \cdot \Delta T \quad [\text{m}]$$

α_{th} = thermischer Ausdehnungskoeffizient

für Kupfer: 16.2 $\cdot 10^{-6}$ /K

für Aluminium: 23.8 $\cdot 10^{-6}$ /K

4.6 Griechisches Alphabet

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

4.7 SI-Vorsätze

Faktor	Vorsatz	Zeichen
1 000 000 000 000 = 10^{12}	billionenfach	Tera T
1 000 000 000 = 10^9	milliardenfach	Giga G
1 000 000 = 10^6	millionenfach	Mega M
1 000 = 10^3	tausendfach	Kilo k
100 = 10^2	hundertfach	Hekto h
10 = 10^1	zehnfach	Deka da
0.1 = 10^{-1}	Zehntel	Dezi d
0.01 = 10^{-2}	Hundertstel	Zenti c
0.001 = 10^{-3}	Tausendstel	Milli m
0.000 001 = 10^{-6}	Millionstel	Mikro μ
0.000 000 001 = 10^{-9}	Milliardenstel	Nano n
0.000 000 000 001 = 10^{-12}	Billionstel	Piko p