

## 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, $\mu\text{m}$ , nm, pm
$m$	Masse	kg (Kilogramm)	Mg, g, mg, $\mu\text{g}$
$t$	Zeit	s (Sekunde)	ks, ms, $\mu\text{s}$ , ns
$I$	Elektrische Stromstärke	A (Ampère)	kA, mA, $\mu\text{A}$ , nA, pA
$T$	Thermodynamische Temperatur	K (Kelvin)	
$n$	Stoffmenge	mol (Mol)	Gmol, Mmol, kmol, mmol, $\mu\text{mol}$
$I_v$	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
<b>Geometrie</b>				
Fläche	$A$	Quadratmeter	$\text{m}^2$	
Volumen	$V$	Kubikmeter	$\text{m}^3$	
<b>Zeit</b>				
Frequenz	$f$	Hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$
Kreisfrequenz	$\omega$	rez. Sekunde	1/s	$\omega = 2\pi f$
Drehzahl	$n$	rez. Sekunde	1/s	
<b>Mechanik</b>				
Dichte	$\rho$	Kilogramm pro Kubikmeter	$\text{kg}/\text{m}^3$	
Geschwindigkeit	$v$	Meter pro Sekunde	m/s	
Beschleunigung	$a$	Meter pro Sekundenquadrat	$\text{m}/\text{s}^2$	
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	$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm}/\text{s} = 1 \text{ J}/\text{s}$
<b>Wärme</b>				
Temperatur	$\vartheta$	Grad Celsius	$^{\circ}\text{C}$	$\vartheta = T - T_0$ mit $T_0 = 273.15 \text{ K}$
Temperaturdifferenz	$\Delta T$	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	$\phi$	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm}/\text{s} = 1 \text{ J}/\text{s}$
<b>Elektrizität</b>				
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	$\theta$	Ampère	A	Ampèrewindungszahl der Spule
El. Widerstand	$R$	Ohm	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ V}/\text{A}$
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
<b>Elektrizität</b>				
El. Leitfähigkeit	$\kappa$	Siemens pro Meter	S/m	$\kappa = 1/\rho$
Spez. el. Widerstand	$P$	Ohmmeter	$\Omega\text{m}$	$1 \Omega\text{m} = 1 \text{Vm/A}$
Magn. Fluss	$\Phi$	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	$\Omega$	
Blindwiderstand Reaktanz	$X$	Ohm	$\Omega$	
Phasenverschiebungswinkel	$\varphi$	Radian	rad	$1 \text{rad} = 1$

Grösse	Formelzeichen	Beziehung/Bemerkung
Permittivität des Vakuums	$\epsilon_0$	$= 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
magnetische Permeabilität	$\mu_0$	$= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

### 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) $Z = \sqrt{R_w^2 + X_L^2}$
$\epsilon_r$	Rel. Dielektrizitätskonstante		
$\text{tg}\delta$	Verlustwinkel		
$\varphi$	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  $\text{tg}\delta$

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

$\alpha_{th}$  = 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

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

$\alpha_{th}$  = 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 ο
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	Υ 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 <sup>12</sup>	billionenfach	Tera T
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	milliardenfach	Giga G
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	millionenfach	Mega M
1 000 = 10 <sup>3</sup>	tausendfach	Kilo k
100 = 10 <sup>2</sup>	hundertfach	Hekto h
10 = 10 <sup>1</sup>	zehnfach	Deka da
0.1 = 10 <sup>-1</sup>	Zehntel	Dezi d
0.01 = 10 <sup>-2</sup>	Hundertstel	Zenti c
0.001 = 10 <sup>-3</sup>	Tausendstel	Milli m
0.000 001 = 10 <sup>-6</sup>	Millionstel	Mikro μ
0.000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	Milliardenstel	Nano n
0.000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	Billionstel	Piko p