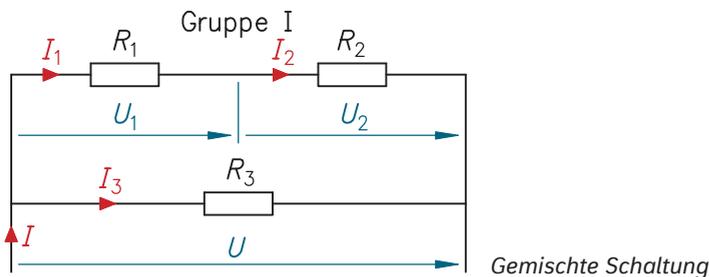


3 Schaltung von Widerständen

connection of resistances

3.3 Gruppenschaltung von Widerständen



$$R = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}$$

$$R_1 = R_1 + R_2$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$I = I_1 + I_3$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{U}{R_1}$$

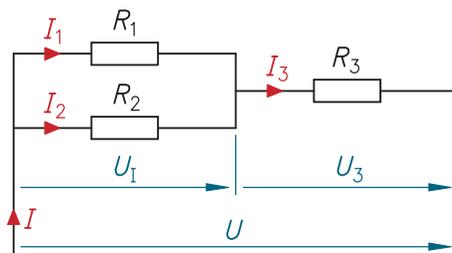
$$I_3 = \frac{U}{R_3}$$

$$U = I \cdot R$$

$$U_1 = I_1 \cdot R_1$$

$$U_2 = I_2 \cdot R_2$$

Gruppe I



$$R = R_1 + R_3$$

$$R_1 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$I = I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_1}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}$$

$$U = I \cdot R$$

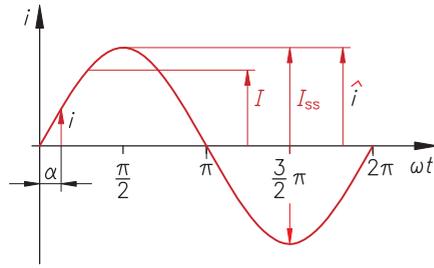
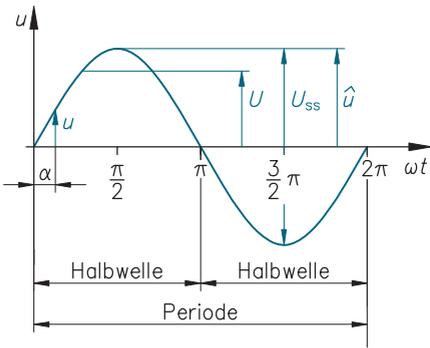
$$U_1 = I \cdot R_1$$

$$U_3 = I_3 \cdot R_3$$

Zeichen	Bedeutung	Einheit
$U, U_1 \dots U_3$	Elektrische Spannung	V
U_1	Gruppenspannung	V
I	Elektrische Stromstärke	A
$I_1 \dots I_3$	Teilströme	A
R	Elektrischer Gesamt-, Ersatzwiderstand	Ω
R_1	Elektrischer Widerstand, Gruppe I	Ω
$R_1 \dots R_3$	Teilwiderstände	Ω

14 Wechselstromgrundlagen

basics of alternating current



$$f = \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

Hinweis:
Bei der Eingabe von α die Einstellung des Taschenrechners beachten!

Zeitwert einer Wechselstromgröße

$$u = \hat{u} \cdot \sin \alpha$$

$$i = \hat{i} \cdot \sin \alpha$$

Effektiv- und Scheitelwert (Gilt nur bei sinusförmigen Werten)

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$U = 0,707 \cdot U_{\max}$$

$$U_{\max} = U \cdot \sqrt{2}$$

$$U_{ss} = 2 \cdot U_{\max}$$

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$I = 0,707 \cdot I_{\max}$$

$$I_{\max} = I \cdot \sqrt{2}$$

$$I_{ss} = 2 \cdot I_{\max}$$

Kreisfrequenz

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$$

Drehwinkel

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t$$

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$$

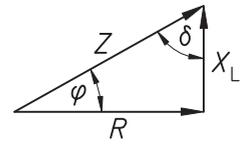
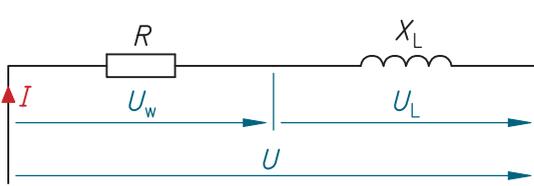
$$\alpha = \omega \cdot t$$

Zeichen	Bedeutung	Einheit
U	Effektivwert der Wechselspannung	} V
U_{\max}, \hat{u}	Scheitelwert, Maximalwert der Wechselspannung	
U_{ss}	Spannung von Spitze zu Spitze	
u	Augenblicks- oder Zeitwert der Wechselspannung	
I	Effektivwert des Wechselstroms	} A
I_{\max}, \hat{i}	Scheitelwert, Maximalwert des Wechselstroms	
I_{ss}	Strom von Spitze zu Spitze	
i	Augenblicks- oder Zeitwert des Wechselstroms	
f	Frequenz	Hz, s ⁻¹
T	Periodendauer	s
p	Polpaarzahl	–
n	Umdrehungsfrequenz	1/min
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹
α	Drehwinkel im Bogenmaß	rad
t	Zeit	s

17 Spule im Wechselstromkreis

coil in alternating current circuit

17.1 Reihenschaltung von Wirkwiderstand und Induktivität



Widerstandsdreieck

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2}$$

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Verlustfaktor

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

$$Z = \frac{R}{\cos \varphi}$$

$$\tan \delta = \frac{R}{X_L}$$

Spulengüte

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{Z}$$

$$X_L = Z \cdot \sin \varphi$$

$$Z = \frac{X_L}{\sin \varphi}$$

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_L}{R}$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

$$U = Z \cdot I$$

$$U^2 = U_w^2 + U_L^2$$

$$U = \sqrt{U_w^2 + U_L^2}$$

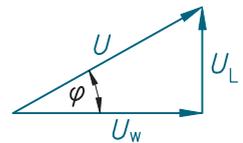
$$U_w = \sqrt{U^2 - U_L^2}$$

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_w^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_w}{U}$$

$$U_w = U \cdot \cos \varphi$$

$$U = \frac{U_w}{\cos \varphi}$$



Spannungsdreieck

$$\sin \varphi = \frac{U_L}{U}$$

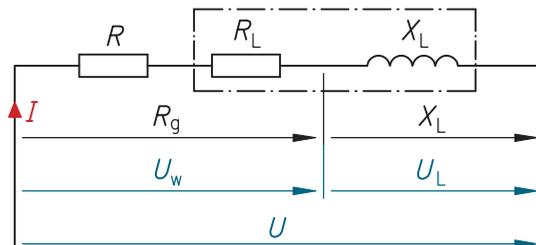
$$U_L = U \cdot \sin \varphi$$

$$U = \frac{U_L}{\sin \varphi}$$

$$U_w = R \cdot I$$

$$U_L = X_L \cdot I$$

Reihenschaltung von Wirkwiderstand und Spule



$$R_g = R + R_L$$

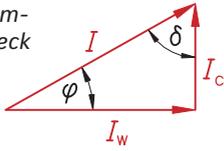
Für alle weiteren Berechnungen siehe „Reihenschaltung von Wirkwiderstand und Induktivität“ auf der vorliegenden Seite.

18 Kondensator

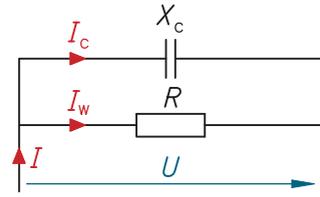
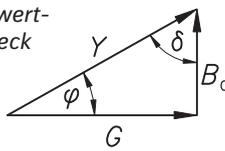
capacitor

18.5 Parallelschaltung von Kondensator und Wirkwiderstand

Strom-
dreieck



Leitwert-
dreieck



$$I^2 = I_w^2 + I_c^2$$

$$I = \sqrt{I_w^2 + I_c^2}$$

$$I_w = \sqrt{I^2 - I_c^2}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_w^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{I_w}{I}$$

$$I = \frac{I_w}{\cos \varphi}$$

$$I_w = I \cdot \cos \varphi$$

$$\sin \varphi = \frac{I_c}{I}$$

$$I = \frac{I_c}{\sin \varphi}$$

$$I_c = I \cdot \sin \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{I_c}{I_w}$$

$$I_w = \frac{I_c}{\tan \varphi}$$

$$I_c = I_w \cdot \tan \varphi$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_c^2}}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{Z} \cdot \cos \varphi$$

$$\frac{1}{X_c} = \frac{1}{Z} \cdot \sin \varphi$$

$$Y^2 = G^2 + B_c^2$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_c^2}$$

$$G = Y \cdot \cos \varphi$$

$$B_c = Y \cdot \sin \varphi$$

$$Y = \frac{1}{Z}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

$$B_c = \frac{1}{X_c}$$

Verlustbehafteter Kondensator, Verlustfaktor

$$\delta = 90^\circ - \varphi$$

$$d = \tan \delta$$

$$Q = \frac{1}{d}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{Q}$$

$$\tan \delta = \frac{I_w}{I_c}$$

$$\tan \delta = \frac{X_c}{R}$$

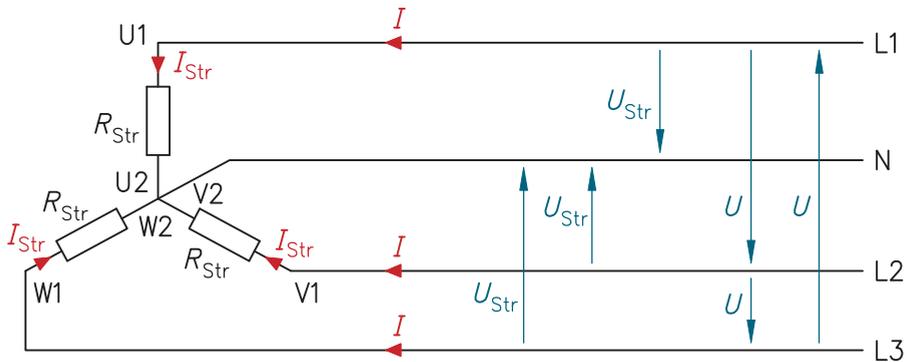
Einheit (Umformung) $1 \text{ S} = 1/\Omega = 1 \text{ A/V}$

Zeichen	Bedeutung	Einheit
U	Klemmenspannung	V
I, I_w, I_c	Scheinstrom/Gesamtstrom, Wirkstrom, Kapazitiver Blindstrom	A
Z	Scheinwiderstand	Ω
R	Wirkwiderstand, ohmscher Widerstand	Ω
X_c	Kapazitiver Blindwiderstand	Ω
Y	Scheinleitwert	S
G	Wirkleitwert	S
B_c	Kapazitiver Blindleitwert	S
$\cos \varphi, \sin \varphi$	Wirkleistungsfaktor, Blindleistungsfaktor	–
$\sphericalangle \varphi$	Phasenverschiebungswinkel	$^\circ$ (Grad)
$d, \tan \delta$	Verlustfaktor	–
$\sphericalangle \delta$	Verlustwinkel	$^\circ$ (Grad)
Q	Gütefaktor	–
Q_c	Kapazitive Blindleistung	var
P	Wirkleistung	W

23 Drehstrom

three-phase current

23.1 Sternschaltung (symmetrisch-ohmsche Belastung, $\cos \varphi = 1$)



$$I = I_{\text{Str}} = \frac{U_{\text{Str}}}{R_{\text{Str}}}$$

$$U_{\text{Str}} = I_{\text{Str}} \cdot R_{\text{Str}}$$

$$R_{\text{Str}} = \frac{U_{\text{Str}}}{I_{\text{Str}}}$$

$$P_{\text{Str}} = U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}}$$

$$U_{\text{Str}} = \frac{P_{\text{Str}}}{I_{\text{Str}}}$$

$$I_{\text{Str}} = \frac{P_{\text{Str}}}{U_{\text{Str}}}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$U = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I}$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U}$$

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Str}}$$

$$U_{\text{Str}} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$P = 3 \cdot P_{\text{Str}}$$

$$P = 3 \cdot U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}}$$

$$W = P \cdot t$$

$$W = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot t$$

Zeichen	Bedeutung	Einheit
U	Außenleiterspannung	V
U_{Str}	Strangspannung	V
I	Außenleiterstrom	A
I_{Str}	Strangstrom	A
R_{Str}	Strangwiderstand	Ω
P_{Str}	Strangleistung	W
P	Gesamtwirkleistung	W
W	Elektrische Arbeit	Wh
t	Zeit	h

28 Elektrische Maschinen

electrical engines

28.3 Mechanische Leistung und Drehmoment bei Drehstrommotoren

$$P = F \cdot v$$

$$F = \frac{P}{v}$$

$$v = \frac{P}{F}$$

$$P = F \cdot \pi \cdot d \cdot n$$

$$F = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot n}$$

$$d = \frac{P}{\pi \cdot F \cdot n}$$

$$n = \frac{P}{d \cdot \pi \cdot F}$$

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$n = \frac{P}{M \cdot 2 \cdot \pi}$$

$$P = M \cdot \omega$$

$$M = \frac{P}{\omega}$$

$$\omega = \frac{P}{M}$$

$$P = \frac{M \cdot n}{9550}$$

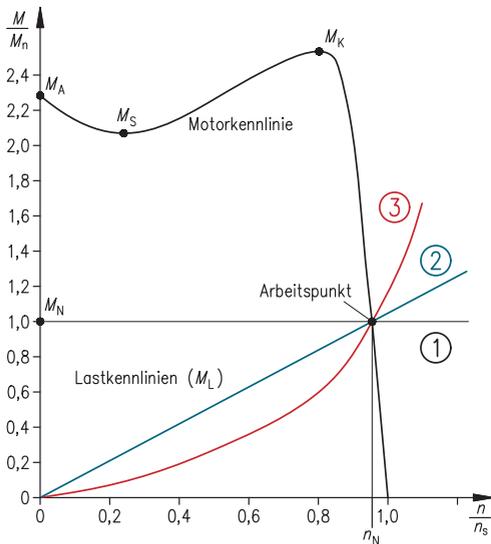
$$M = \frac{P \cdot 9550}{n}$$

$$n = \frac{P \cdot 9550}{M}$$

Hinweis:

Als Zahlenwertgleichung sind hier nur die Maßzahlen verknüpft. Die Größen sind einzusetzen: M in Nm, n in 1/min, P in kW

28.4 Drehstromasynchronmotor mit angetriebener Lastmaschine



Die Lastmomente

1: konstant (Hebezeuge, Förderer)

2: linear (Kalander, Glättwalzen)

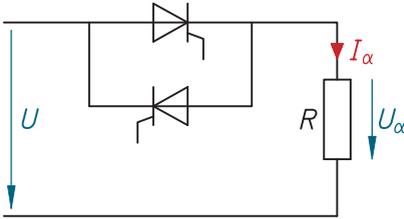
3: quadratisch (Pumpen, Lüfter)

Das Drehmoment des Motors erhöht die Drehfrequenz solange, wie M_{Motor} größer ist als M_{Last} .

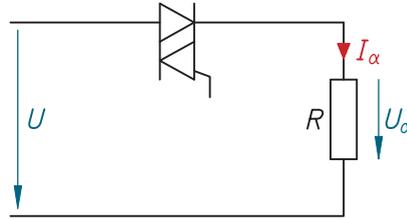
Ein Hochlauf des Motors ist nicht möglich, wenn das Motordrehmoment kleiner ist als das Lastmoment.

Zeichen	Bedeutung	Einheit
P	Leistung	W, kW
F	Kraft	N
v	Geschwindigkeit	m/s
M	Drehmoment	Nm
M_N	Bemessungsdrehmoment, Nennmoment	Nm
M_A	Anlaufmoment	Nm
M_S	Sattelmoment	Nm
M_K	Kippmoment	Nm
M_L	Lastmoment durch die Arbeitsmaschine	Nm
n	Drehfrequenz, Drehzahl	1/s, 1/min
n_N	Bemessungsdrehfrequenz, Nenndrehzahl	1/min

29.4 Wechselstromsteller

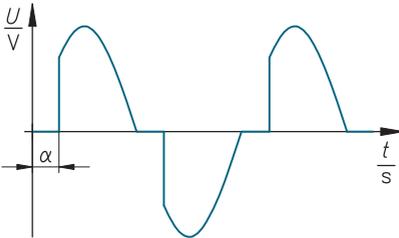


Thyristor-Schaltung



Triac-Schaltung

29.4.1 Phasenanschnittsteuerung

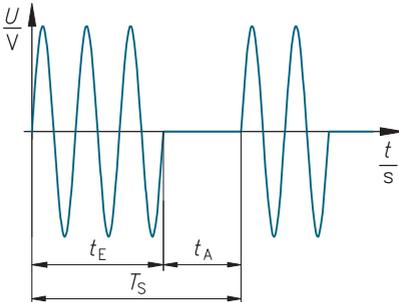


$$U_\alpha = U \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$$I_\alpha = I \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$$P_\alpha = U_\alpha \cdot I_\alpha = \frac{U_\alpha^2}{R} = I_\alpha^2 \cdot R$$

29.4.2 Schwingungspaketsteuerung (Vielperiodensteuerung)



Leistung ohne Schaltpause
($t_E = T_S$ bzw. $t_A = 0$)

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

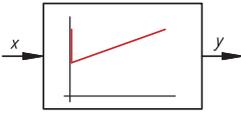
Leistung mit Schaltpause ($t_E < T_S$)

$$P_T = \frac{t_E}{T_S} \cdot P \quad T_S = t_E + t_A$$

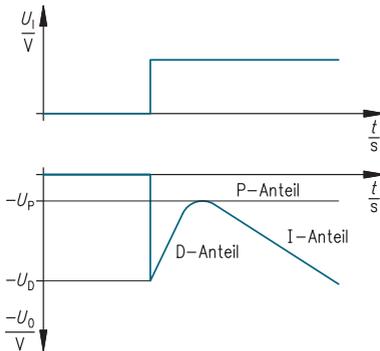
Zeichen	Bedeutung	Einheit
U	Effektivwert der Eingangsspannung, ungesteuert ($\alpha = 0$)	V
I	Effektivwert des Stromes, ungesteuert ($\alpha = 0$)	A
U_α	Effektivwert der Spannung mit dem Zündwinkel α	V
I_α	Effektivwert des Stromes mit dem Zündwinkel α	A
P	Leistungsaufnahme des Verbrauchers, ungesteuert ($\alpha = 0$)	W
P_α	Leistungsaufnahme des Verbrauchers beim Zündwinkel α	W
P_T	Leistungsaufnahme des Verbrauchers in Abhängigkeit von der Einschaltdauer	W
α	Zündwinkel der Ventile	°
t_E	Einschaltzeit des Verbrauchers	s
t_A	Ausschaltzeit des Verbrauchers (Pausenzeit)	s
T_S	Schaltperiodendauer	s
R	Widerstand	Ω

31.6 PID-Regler

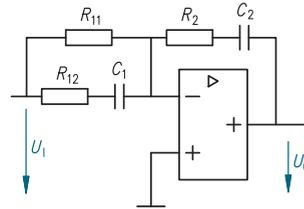
allgemein:



Sprungantwort:



elektronisch:



$$-U_p = \frac{U_1 \cdot R_2}{R_{11}}$$

$$-U_D = \frac{U_1 \cdot R_2 \cdot (R_{11} + R_{12})}{R_{11} \cdot R_{12}}$$

$$K_p = \frac{R_2 \cdot (R_{12} + R_{11})}{R_{12} \cdot R_{11}}$$

$$T_n = R_2 \cdot C_2$$

Zeichen	Bedeutung	Einheit
K_p	Proportionalbeiwert	1
K_I	Integrierbeiwert	1/s
T_n	Nachstellzeit	s
T_v	Vorhaltezeit, Zeitkonstante des D-Anteils	s
x	Regelgröße	-
y	Stellgröße	-
U_1	Eingangsspannung des Reglers	V
$-U_0$	Ausgangsspannung des Reglers	V
$-U_p$	Proportionalanteil der Ausgangsspannung	V
$-U_D$	Differenzieranteil der Ausgangsspannung	V

34 Elektrische Leitungen

electric lines

34.4 Berechnung des Leistungsverlustes elektrischer Leitungen

Gleichstrom und Wechselstrom bei $\cos \varphi = 1$

$$P_v = \frac{2 \cdot l \cdot P^2}{\gamma \cdot A \cdot U^2}$$

$$A = \frac{2 \cdot l \cdot P^2}{\gamma \cdot P_v \cdot U^2}$$

$$P_v = \frac{2 \cdot l \cdot I^2}{\gamma \cdot A}$$

$$A = \frac{2 \cdot l \cdot I^2}{\gamma \cdot P_v}$$

Einphasenwechselstrom, induktiv oder kapazitiv belastet

$$P_v = \frac{2 \cdot l \cdot P^2}{\gamma \cdot A \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

$$A = \frac{2 \cdot l \cdot P^2}{\gamma \cdot P_v \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

$$P_v = \frac{2 \cdot l \cdot I^2}{\gamma \cdot A}$$

$$A = \frac{2 \cdot l \cdot I^2}{\gamma \cdot P_v}$$

Drehstrom, induktiv oder kapazitiv belastet

$$P_v = \frac{l \cdot P^2}{\gamma \cdot A \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

$$A = \frac{l \cdot P^2}{\gamma \cdot P_v \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

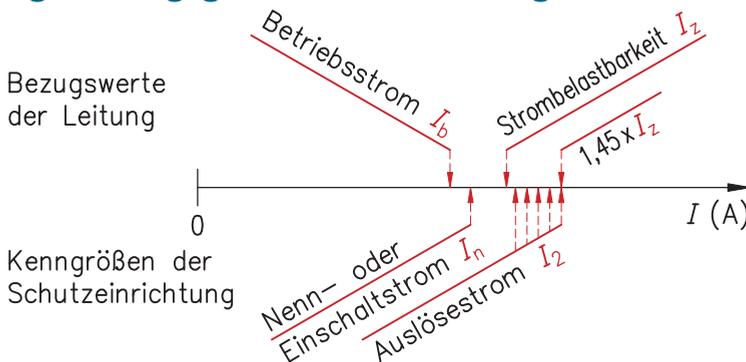
$$P_v = \frac{3 \cdot l \cdot I^2}{\gamma \cdot A}$$

$$A = \frac{3 \cdot l \cdot I^2}{\gamma \cdot P_v}$$

Für den Leistungsverlust in Prozent gilt allgemein: $P_{v\%} = \frac{P_v \cdot 100\%}{P}$

Zeichen	Bedeutung	Einheit
U	Betriebsspannung	V
I	Belastungsstrom	A
P	Wirkleistung	W
P_v	Leistungsverlust	W
$P_{v\%}$	Leistungsverlust (in %)	%
l	Einfache Leiterlänge	m
γ	Elektrische Leitfähigkeit	$\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$
A	Leiterquerschnitt	mm^2
$\cos \varphi$	Wirkleistungsfaktor	–

34.5 Leitungsschutz gegen zu hohe Erwärmung



Eine elektrische Leitung kann zeitlich begrenzt – bis max. 1 Stunde – mit $1,45 \times I_z$ überlastet werden ($I_z =$ zulässige Strombelastbarkeit).

36 Schutz gegen elektrischen Schlag

protection against electric shock

36.4 Fehlerspannung – Fehlerstrom – Berührungsspannung

$$R = R_{L1} + R_F + R_M + R_{\ddot{u}} + R_B + R_{L2}$$

$$I_F = \frac{U_0}{R}$$

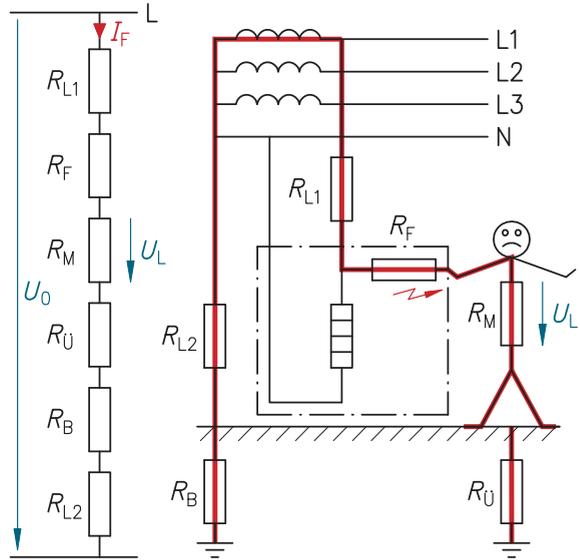
$$U_L = I_F \cdot R_M \quad U_L = \frac{U_0 \cdot R_M}{R}$$

$$U_L = \frac{U_0 \cdot R_M}{R_{L1} + R_F + R_M + R_{\ddot{u}} + R_B + R_{L2}}$$

Sind R_{L1} , R_{L2} , R_F , R_B vernachlässigbar klein, gilt:

$$U_L = \frac{U_0 \cdot R_M}{R_M + R_{\ddot{u}}}$$

$$U_F = U_L + R_{\ddot{u}} \cdot I_F$$



Zeichen	Bedeutung	Einheit
U_L	Berührungsspannung	V
U_0	Spannung gegen Erde	V
U_F	Fehlerspannung	V
I_F	Fehlerstrom	A
R	Gesamtwiderstand des Fehlerstromkreises	Ω
R_{L1}	Leitungswiderstand zum Gerät	Ω
R_{L2}	Leitungswiderstand von der Betriebserde zum Transformatorensternpunkt	Ω
R_F	Fehlerwiderstand	Ω
R_M	Körperwiderstand des Menschen	Ω
$R_{\ddot{u}}$	Erdübergangswiderstand	Ω
R_B	Betriebserdungswiderstand	Ω