

Leitungsbemessung und Leitungsschutz

Um den Querschnitt von elektrischen Leitern und Kabeln zu bemessen, genügen die klassischen Bestimmungsmethoden längst nicht mehr. Bezüglich der Strombelastbarkeit wurden im Rahmen der europäischen Richtlinien diverse Änderungen eingeführt. Die zur Zeit gültige Praxis soll in diesem Beitrag aufgezeigt werden.

1 Spannungsfall

Jeder Stromfluss in einem elektrischen Leiter erzeugt einen Spannungsabfall (kurz Spannungsfall), der von der Stromstärke und dem elektrischen Widerstand abhängig ist.

$$\Delta U = I \cdot R \quad \rho \text{ Spezifischer Widerstand in } \Omega \text{ mm}^2/\text{m} (\rho_{\text{Cu}} \approx 0,0175)$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad \kappa \text{ Leitfähigkeit in } \text{m}/\Omega \text{ mm}^2 (\kappa_{\text{Cu}} \approx 57); \text{ anstelle } \kappa \text{ von wird auch } \gamma \text{ verwendet.}$$

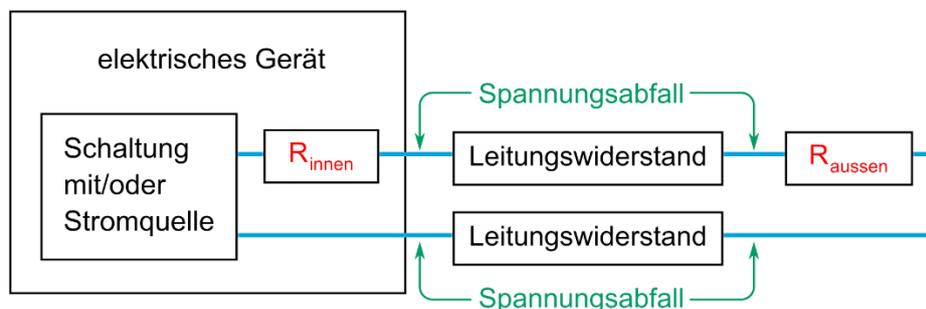


Abb. 1: Spannungsfall auf Leitungen¹

Damit Verbraucher zuverlässig arbeiten, gibt es in den einschlägigen Normen Grenzwerte, die einzuhalten sind. Nach DIN VDE 0100-520 soll der Spannungsfall in Verbraucheranlagen zwischen Hausanschluss und Verbrauchsmitteln (Steckdosen oder Geräteanschlussklemmen) nicht mehr als **3 %** für Beleuchtungsanlagen und **5 %** für andere elektrische Verbrauchsmittel betragen. Von den obigen Werten abweichende bzw. strengere Regelungen sind möglich, wenn dies durch anderweitige Normen oder den Produktionsprozess gefordert wird. Für einen störungsfreien Betrieb sollten generell 4 % nicht überschritten werden.

In praxi wird für Berechnungen in Hausinstallationen in der Regel nur der ohmsche Leitungswiderstand berücksichtigt. Die induktive/kapazitive Belastung der Leitungen ist meist gering und daher vernachlässigbar.

$$\text{Wechselstrom: } \Delta U = \frac{2l \cdot I \cdot \cos\varphi}{\gamma \cdot A}$$

$2l$ Leitungslänge in m (Hin- und Rückleiter)

γ Leitfähigkeit in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

$$\text{Drehstrom: } \Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos\varphi}{\gamma \cdot A}$$

A Leiterquerschnitt in mm^2

$\sqrt{3}$ Verkettungsfaktor

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsabfall>

Der Wirkfaktor ($\cos\varphi$) ist erforderlich wegen der Phasenverschiebung zwischen Netzspannung und Leitungsstrom.

Beispiel: Es muss ein Erdkabel (NAYY) für die Speisung eines Nebengebäudes verlegt werden. Die Distanz beträgt 50 Meter. Der höchstzulässige Spannungsfall bei einem Bemessungsstrom von 120 A soll 1,5 % nicht überschreiten. Wie gross muss der Leiterquerschnitt mindestens sein?

Lösung:

$$A = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos\varphi}{\gamma \cdot \Delta U} = \frac{1,73 \cdot 50 \text{ m} \cdot 120 \text{ A} \cdot 0,8}{33 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 6 \text{ V}} = 41,9 \text{ mm}^2$$

1,5 % von 400 V = 6 V
 γ für Aluminium = 33 m/ Ω mm²

Der minimale Leiterquerschnitt beträgt 50 mm².

2 Strombelastbarkeit von Kabel und Leitungen

2.1 Leitungsbemessung ohne Korrekturfaktoren

Früher wurden Leiterquerschnitt und Nennstromstärke der vorzuschaltenden Sicherung einzig aufgrund des Bemessungsstromes des angeschlossenen Verbrauchers bestimmt. Dazu gab es eine einfache Tabelle mit genormten Querschnitten und der dazugehörigen Nennstromstärke. Frei liegende Schlauchleitungen durften eine Stufe stärker belastet werden.

Querschnitt mm ²	Isolierte Kupferleitungen		Höchste dauernd zulässige Stromstärke in Amp. für im Erdboden verlegte Kupferkabel				
	Sicherung für Amp.	Höchststrom Amp.	Einleiter bis Volt 750	Zweileiter verseilt bis Volt		Dreileiter verseilt bis Volt	
				3000	10000	3000	10000
1	6	11	24	19	–	17	–
1,5	10	14	31	25	–	22	–
2,5	15	20	41	33	–	29	–
4	20	25	55	42	–	37	–
6	25	31	70	53	–	47	–
10	35	43	95	70	65	65	60
16	60	75	130	95	90	85	80
25	80	100	170	125	115	110	105
35	100	125	210	150	140	135	125
50	125	160	260	190	175	165	155

Tabelle 1: Auszug einer alten Belastungstabelle für isolierte Kupferleiter

Bei einer Häufung von Kabeln in Kanälen oder im Erdboden ist für den maximalen Strom ein Reduktionsfaktor von 0,75 zulässig.

Im Laufe der Zeit mussten bei der Bemessung der Strombelastbarkeit – und damit des Leiterquerschnittes – verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

2.2 Verlegearten für Kabel und Leitungen

Heutzutage ist die Bestimmung des Leitungsquerschnittes eine anspruchsvolle Aufgabe. Als Hilfe für den Elektroplaner gibt es glücklicherweise geeignete Software, wodurch sich die Arbeit erheblich erleichtert.

Zu berücksichtigen sind u.a. die folgenden Referenzverlegearten:

A1	einadrige Ader- und Mantelleitungen	Verlegung in wärmegeädänte Wänden mit Rohr, Kabelkanal oder direkt	
A2	mehradrige Ader- und Mantelleitungen		
B1	einadrige Ader- und Mantelleitungen	Verlegung in und auf Wände mit Rohr oder geschlossenem Kabelkanal	
B2	mehradrige Ader- und Mantelleitungen		
C	einadrige und mehradrige Kabel und Mantelleitungen	Direkte Verlegung auf Wände, Decken und ungelochte Kabelrinnen	
D	mehradrige Kabel	Verlegung in Installationsrohr oder Kabelschacht im Erdboden	
E	Mehradrige Kabel und Mantelleitungen sowie Steigleitungen	Verlegung in Luft, auf Tragseile oder in gelochte Kabelrinnen, Gitterkanäle oder Kabelpritschen (Kabeltrassen)	
F	Einadrige Kabel und Mantelleitungen	mit Berührung	Verlegung in Luft, auf Tragseile oder in gelochte Kabelrinnen
G	Einadrige Kabel und Mantelleitungen	ohne Berührung	Verlegung in Luft, auf Tragseile oder in gelochte Kabelrinnen
			blanke Leiter auf Isolatoren

Tabelle 2: Referenzverlegearten nach DIN VDE 0298-4

Anm.: Kabelkanäle aus verzinktem Stahlblech werden bezüglich der Bauart unterschieden in Kabelrinnen (Kabelwannen), gelocht oder ungelocht, sowie Kabelpritschen (Trassen). Gelegentlich werden auch Gitterkanäle verwendet. Für Anwendungen in nasser Umgebung sind zudem Kabelkanäle aus korrosionsbeständigem Stahl (V2A, V4A) erhältlich.



Abb. 2a: Kabelrinne gelocht



Abb. 2b: Kabelpritsche (Trasse)

Von dem tabellarischen Strombelastungswert I_r ausgehend (der die Verlegeart bereits berücksichtigt), müssen Einflussgrößen wie Umgebungstemperatur, Häufung von Leitungen, Anzahl aktiver Leiter, Oberwellenvorkommen, Isolationswerkstoffe usw. ins Auge gefasst werden. Dazu sind geeignete Tabellen nach DIN VDE 0298-4 zu konsultieren. Für uns als Praktiker ist ein Blick in den "Westermann" (s. Lernquellen in Kap. 7) ausreichend genug.

Querschnitt mm ² Cu	Gruppe A2 in Amp.	Gruppe B1 in Amp.	Gruppe B2 in Amp.	Gruppe C in Amp.	Gruppe D in Amp.	Gruppe E in Amp.
1,5	13	15.5	15	17,5	18	18,5
2,5	17,5	21	20	24	24	25
4	23	28	27	32	30	34
6	29	36	34	41	38	43
10	39	50	46	57	50	60
16	52	68	62	76	64	80
25	68	89	80	96	82	101
35	83	110	99	119	98	126
50	99	134	118	144	116	153

Tabelle 3: Strombelastbarkeit I_R von festverlegten Leitungen bei drei stromführenden Adern, zulässige Betriebstemperatur am Leiter 70 °C und Umgebungstemperatur 30 °C (nach DIN VDE 0298 Teil 4).

2.3 Leitungsbemessung mit Korrekturfaktoren

Die erste Bedingung bei der Leitungsbemessung nach VDE 0100 Teil 430 lautet:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (\text{Nennstromregel als 1. Bedingung des Überstromschutzes})$$

Je nach Fachbuch und Normenausgabe werden die Indizes mit Klein- oder Grossbuchstaben geschrieben.

I_B Betriebsstrom des Verbrauchers.

I_{MW} Mindestwert der Strombelastbarkeit gemäss Schmolke.²

I_n Bemessungsstrom der Überstromschutzeinrichtung.

I_r Tabellarischer Bemessungswert (von rated value) bei 25 bzw. 30 °C.

I_z Zulässige Strombelastbarkeit der Leitung bei abweichenden Betriebsbedingungen, wobei gilt: $I_z \geq I_B$.

Korrekturfaktoren:

f_1 Umgebungstemperatur

f_2 Häufung von Leitungen

f_3 Anzahl belasteter Leiter

f_4 Einfluss von Oberwellen

² Herbert Schmolke: Auswahl und Bemessung von Kabeln und Leitungen (Hüthig & Pflaum Verlag).

Anm.: Mit dem Inkrafttreten des neuen Teils DIN VDE 0100-430 (2010) ergaben sich für einige Formelzeichen formale Änderungen, so wurde I_b zu I_B und I_z zu I_Z . In der aktuellen DIN VDE 0298-4 (2013) wird der Index von I_z weiterhin mit einem Kleinbuchstaben geschrieben (Hösl et al, Die vorschriftsmässige Elektroinstallation, 8.4.1). Wir folgen in diesem Artikel der vorgenommenen Änderung.

Im Idealfall ist $I_r = I_Z$.

Unter realen Bedingungen gilt diese Vereinfachung nur noch in ausgesuchten Fällen, weil die vorhandenen Einflussgrössen als "Korrekturfaktoren" in die Berechnung eingehen. Generell sollten in praxi immer die ungünstigsten Bedingungen berücksichtigt werden.

Die zulässige Strombelastbarkeit mit Korrektur beträgt demzufolge:

$$I_Z \leq I_r = f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n \cdot I_r$$

Für einen praxistauglichen Mindestwert I_{MW} gilt dann:

$$I_{MW} = \frac{I_B}{f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n}$$

Nun kann I_r der Tabelle entnommen werden (wobei gilt: $I_r > I_{MW}$). Daraus resultiert ein höherer Leiterquerschnitt, als es ohne diese Einflussgrössen nötig wäre. Danach kann die zulässige Strombelastbarkeit I_z und damit auch der Bemessungsstrom I_N des Schutzorgans bestimmt werden. In jedem Fall ist die Nennstromregel $I_B \leq I_n \leq I_Z$ einzuhalten.

Beispiel: Ein Drehstromverbraucher (Glühofen) besitzt laut Leistungsschild eine Bemessungsstromstärke von 30 A. Die Leitungsverlegung erfolgt in einem geschlossenen Kabelkanal mit Wandmontage. Im Kanal befinden sich bereits fünf voll belastete Leitungen ohne Abstand zueinander. Die maximale Umgebungstemperatur beträgt 40 °C. Der Leistungsanteil von Oberschwingungserzeugern ist kleiner als 10 %. Welcher Leiterquerschnitt (NYM) und welcher LS-Schalter ist erforderlich?

Lösung in 9 Schritten:

1) Der Betriebsstrom I_B ist bekannt und beträgt 30 A.

2) Gemäss Aufgabenstellung kommt Verlegeart B2 zur Anwendung.

3) Ermittlung der Korrekturfaktoren:

a) Für eine PVC-Mantelleitung (zulässige Betriebstemperatur 70 °C) ist bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C (Tabellarische Referenztemperatur 25 °C) ein Korrekturfaktor von 0,82 nötig. Bei einer Referenztemperatur von 30 °C beträgt der Faktor 0,87.

Anm.: Kabel und Leitungen mit PVC-Isolation (NYM, NYY) dürfen sich auf eine zulässige Betriebstemperatur von 70 °C und Schlauchleitungen mit einer Isolation aus Gummi (H07RN-F) bis auf 60 °C erwärmen. Für Kabel oder Leitungen mit einer erhöhten Wärmebeständigkeit (VPE) gilt ein Grenzwert von 90 °C. Diese Kriterien sind bei der Planung zu berücksichtigen.

b) Die Häufung bei Verlegung in einem geschlossenen Kabelkanal mit insgesamt sechs parallelen Leitungen ergibt einen Korrekturfaktor von 0,57.

- c) Weil der Oberwellenanteil gering ist, wird ein Korrekturfaktor von 1,0 verwendet.
- d) Bei drei aktiven Leitern pro Kabel oder Leitung resultiert ein Korrekturfaktor von 1,0, welcher im Tabellenwerk von Westermann bereits mitberücksichtigt wurde.

4) Aus den vorhandenen Angaben wird der "Mindestwert der Strombelastbarkeit" errechnet.

$$I_{MW} = \frac{I_B}{\prod f_n} = \frac{30 \text{ A}}{0,82 \cdot 0,57 \cdot 1 \cdot 1} \approx 64 \text{ A}$$

5) Darauf wird aus der Strombelastbarkeitstabelle der dazu passende Bemessungswert I_r für die Verlegeart B2 bei drei aktiven Leitern entnommen (wobei gilt, dass $I_r > I_{MW}$). Im Beispiel resultiert ein Bemessungswert von 66 A.

6) Der dazugehörige Leiterquerschnitt in der ersten Spalte der Tabelle beträgt 16 mm². Folglich muss eine Mantelleitung NYM-J 5 x 16 mm² verlegt werden.

7) Nun lässt sich die zulässige Strombelastbarkeit I_Z für die Zuleitung bestimmen:

$$I_Z = \prod f_n \cdot I_R = 0,47 \cdot 66 \text{ A} \approx 31 \text{ A}$$

8) Aus der Tabelle wird anschliessend der Bemessungsstrom I_N für die mit I_Z korrespondierende Überstromschutzeinrichtung entnommen. Aus der Tabelle geht desweiteren hervor, dass es sich offensichtlich um einen problematischen Bereich handelt, so dass für I_n ein Wert von 35 A festgelegt wurde. Der zugehörige I_r -Wert beträgt 36 A (wodurch sich eine leicht nach oben korrigierte Strombelastbarkeit I_Z ergibt).

9) Probe mittels Nennstromregel:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z = 30 \text{ A} \leq 35 \text{ A} \leq 36 \text{ A}$$

Die Nennstromregel wird mit den vorliegenden Werten eingehalten, so dass definitiv eine Mantelleitung NYM-J 5 x 16 mm² verlegt werden kann.

2.4 Mindestquerschnitte für isolierte Leiter in ortsfesten Installationen

- Hausleitung 6 mm² Cu
- Lichtstrom- und Steckdosenstromkreise 1,5 mm² Cu

In Bezug auf einen reduzierten Neutralleiter gilt:

- Der Bemessungsstrom (inkl. Oberwellenanteil) darf nicht grösser sein, als der zulässige Strom für den reduzierten Querschnitt.
- Der Neutralleiterstrom darf nicht grösser als 50 % vom Aussenleiterstrom sein.
- Der Neutralleiter ist mit den in L_{1,2,3} vorgeschalteten Sicherungen gegen I_k geschützt.

Weil der Neutralleiterstrom oft unbekannt ist, sollte in praxi keine Querschnittsreduktion erfolgen. Adäquate Empfehlungen gelten für den PEN-Leiter.

3 Leitungsschutz

Wir unterscheiden beim Überstromschutz zwischen Überlast und Kurzschluss.

3.1 Schutz bei Überlast

Überstromschutzeinrichtungen müssen so beschaffen sein, dass sie den Nennstrom dauernd führen können. Bei Überlast erfolgt eine verzögerte Abschaltung. Die Strombelastbarkeit der Leitung darf in diesem Fall kurzzeitig überschritten werden.

Bei Schmelzsicherungen für den Leitungsschutz (gG, früher gL) und Leitungsschutzschaltern (B, C und D) gilt nach DIN VDE 100 430:

$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z$ (Auslöserregel als 2. Bedingung des Überstromschutzes)

I_2 Auslösestrom, in der Produktnorm auch mit I_f (grosser Prüfstrom) oder mit I_t bezeichnet.

Für Leitungsschutzschalter der Charakteristik B, C und D ist die zweite Bedingung des Überstromschutzes (Auslöserregel) automatisch erfüllt, wenn die erste Bedingung (Nennstromregel) eingehalten werden kann.

Résumé: Schutz vor zu hoher Leitungserwärmung bei Überstrom wird folglich sichergestellt, wenn folgende Bedingungen durchgehend erfüllt sind:

$I_B \leq I_N \leq I_Z$	I_B Betriebsstrom des Stromkreises bei Belastung
$I_2 \leq 1,45 I_Z$	I_Z Zulässige Belastbarkeit der Leitung bzw. des Kabels
$I_N \leq I_Z$	I_N Nenn- oder Einstellstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung
$I_N \leq I_Z$	I_2 Ansprechstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung (grosser Prüfstrom)

Verringert sich der Leitungsquerschnitt und damit die Strombelastbarkeit, so sind zusätzliche Überstromschutzeinrichtungen in die Leitung einzubauen. Das Gesagte gilt in adäquater Weise bei Änderung der Verlegungsart oder bei Wechsel des Isolierwerkstoffes der Leitung.

3.2 Schutz bei Kurzschluss

Im Kurzschlussfall müssen Schutzorgane den Stromkreis unterbrechen, bevor die zulässige Grenztemperatur des Leiters überschritten wird. Nach DIN VDE 0100-410 gelten im TN-Netz für Endstromkreise ≤ 32 A Abschaltzeiten von **0,4 s** (für 230 V Installationen) und **0,2 s** (für 400 V Installationen). Für Verteilungsstromkreise und Endstromkreise > 32 A gilt eine Abschaltzeit von max. **5 s**. Die höchstzulässige Abschaltzeit (t_w) lässt sich unter Verwendung eines Materialbeiwertes (k) berechnen.

$t_w = \left(k \cdot \frac{A}{I_k}\right)^2$	t_w	Abschaltzeit in s	Materialbeiwert			
	A	Leiterquerschnitt in mm ²	Werkstoff	PVC	Gummi	PE-X
	I_k	Kurzschlußstrom in A	Kupfer	115	141	143
			Aluminium	76	87	94

Anm.: Der in obiger Formel vorkommende k-Faktor besitzt die Einheit $\frac{\sqrt{s} \cdot A}{mm^2}$ (wobei s für Sekunde und A für Ampere steht).

Nur mit den Einheiten geschrieben lautet die Formel $\frac{\sqrt{s} \cdot A}{mm^2} \cdot \frac{mm^2}{A}$. Es ist evident, dass sich A und mm² kürzen lassen und \sqrt{s} resp. nach Quadrierung s allein übrig bleibt.

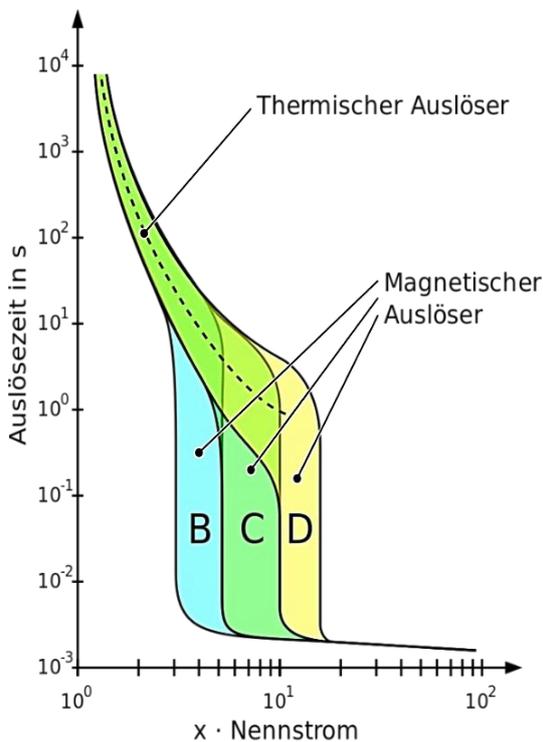
Aufgrund dessen können vereinfachend lediglich die Zahlenwerte für k, Leiterquerschnitt und Kurzschlußstrom in die Formel eingesetzt werden. Das Ergebnis (die Abschaltzeit) erfolgt dann "automatisch" in Sekunden.

3.3 Leitungsschutzschalter

Leitungsschutzschalter werden nach ihrer Auslösecharakteristik unterschieden.

- A** begrenzter Halbleiterschutz, Schutz von Stromkreisen mit Wandlern
- B** Leitungsschutz in Hausinstallationen (Licht- und Steckdosenstromkreise)
- C** Leitungsschutz bei hohen Anlaufströmen (Lampengruppen, Motoren)
- D** für impulserzeugende Betriebsmittel ((Schweisstrafos, Motoren)
- E** für hohe Selektivität an Zählerplätzen
- K** für Stromkreise mit hohen Stromspitzen durch Induktivitäten und Kapazitäten

Leitungsschutzschalter ≤ 63 A mit der Charakteristik B, C und D müssen beim 1,45-fachen Nennstrom (grosser Prüfstrom) innert 1 Std. ausschalten. Kurzzeitige Anlaufströme, die ein Vielfaches des Nennstromes betragen, dürfen keine Ausschaltung bewirken. Beim Typ C bspw. beträgt der tolerierte Einschaltstrom das 5 bis 10-fache des Nennstromes.



Typ	Auslösezeit			
	halten	auslösen	elektromagn.	therm. bei 1,45 I _N
B	3-5 x I _n	5 x I _n	0,1 s	≤ 1 h
C	5-10 x I _n	10 x I _n	0,1 s	≤ 1 h
D	10-20 x I _n	20 x I _n	0,1 s	≤ 1 h

Abb. 2: Auslösekennlinien LS-Schalter

Sicherungsautomaten mit K- oder der Z-Charakteristik gewährleisten einen nahezu vollständigen Schutz bei Überlast, weil der thermische Auslösestrom mit $I_2 \leq 1,2 \cdot I_N$ wesentlich niedriger ist als die Forderung nach DIN VDE 0100 430 ($I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z$).

3.4 NH-Sicherungen

NH-Sicherungen (Niederspannungshochleistungssicherungen) können hohe Kurzschlußströme sicher abschalten. Sie werden also dort eingesetzt, wo im Fehlerfall grosse Ströme zu erwarten sind.

NH-Sicherungen werden nach Betriebsklassen mit zwei Buchstaben gekennzeichnet.

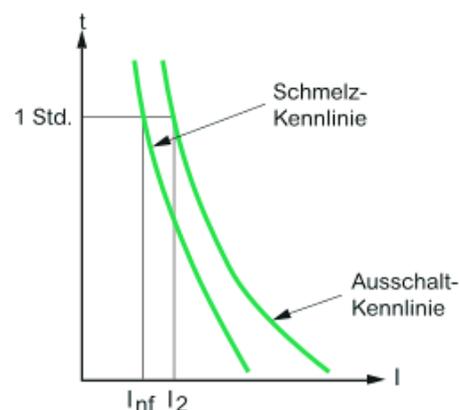
1. Buchstabe: Funktionsklasse	2. Buchstabe: Verwendungszweck
g Ganzbereichssicherungen	G Kabel- und Leitungsschutz
a Teilbereichssicherungen	B Bergbauanlagenschutz
	M Schaltgeräteschutz
	R Halbleiterschutz
	Tr Transformatorenschutz

Um Selektivität bei Kurzschluss zu gewährleisten, müssen gestaffelte Leitungsschutzorgane ≥ 16 A im Verhältnis 1:1,6 bemessen sein. Die Forderung ist erfüllt, wenn die grössere Schmelzsicherung zwei Stufen höher bemessen wird. Dadurch löst im Fehlerfall nur die der Fehlerquelle unmittelbar vorgeschaltete Schutzeinrichtung aus.

Die Prüfdauer (Auslösezeit) durch den grossen Prüfstrom ($I_f = 1,6 \cdot I_N$) beträgt bei NH-Sicherungen, welche für den Leitungsschutz vorgesehen sind:

Bemessungsstrom	Auslösung
≤ 63 A	1 h
80 ... 160 A	2 h
200 ... 400 A	3 h
> 400 A	4 h

Abb. 3: Kennlinienbereich NH-Sicherung gG³



Zwischen zwei Schmelzsicherungen liegt Selektivität vor, wenn sich die Streubänder der Zeit-Strom-Bereiche nicht schneiden oder berühren.

³ <http://de.electrical-installation.org/dewiki/>

4 Motorschutz

Um Elektromotoren bei Überlast wirksam zu schützen, sind spezielle Schutzorgane nötig.

- Motorschutzschalter
- Motorschutzrelais (Thermorelais)
- Bimetallschalter (Klixon, Pilotherm)
- Kaltleiter (PTC)

Bei Drehstrommotoren werden in der Regel drei Bimetallschalter oder drei Kaltleiter in die Statorwicklung eingelegt. Bei Kaltleitern ist darauf zu achten, dass bei einer Durchgangsprüfung die Prüfspannung 5 V nicht überschreitet, da sonst das Bauelement zerstört werden kann (so wie es dem Schreibenden einst widerfuhr). Im günstigsten Fall ist nur ein Kaltleiter defekt, so dass die restlichen beiden noch immer einen genügenden Schutz gegen Überlast ermöglichen.

Damit ein Motorschutzrelais bei einem Kurzschluss nicht zerstört wird, ist eine Vorsicherung erforderlich, deren Nennstromstärke nach den Angaben des Herstellers zu bemessen ist. Das Gesagte gilt prinzipiell auch beim Einsatz von Motorschutzschaltern. Eigensichere Geräte, die auch hohe Kurzschlußströme beherrschen, benötigen dagegen kein vorgeschaltetes Schutzorgan. In diesem Fall übernimmt der MS-Schalter zugleich den Leitungsschutz.

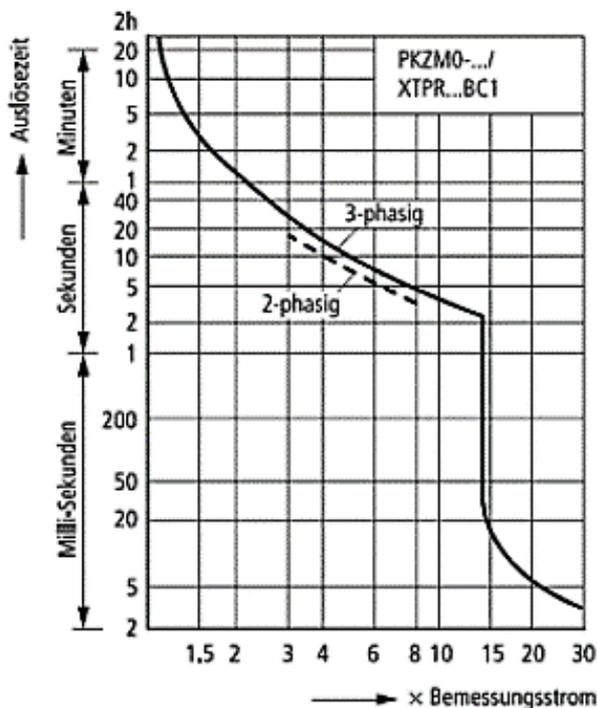


Abb. 4: Kennlinie Motorschutzschalter⁵

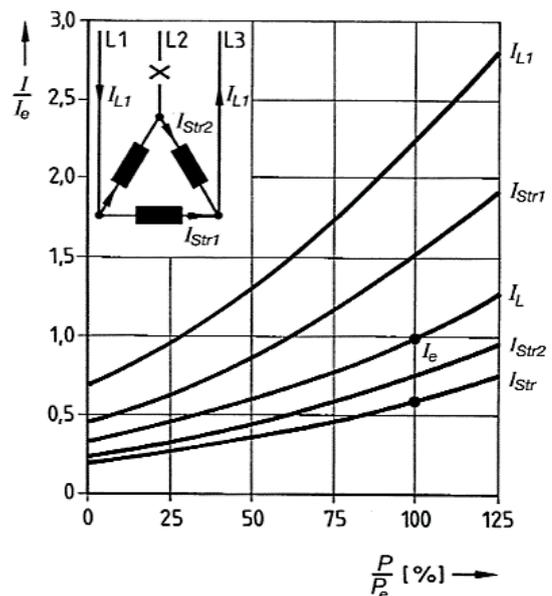


Abb. 5: Lastabhängige Ströme für Drehstrommotoren in Δ -Schaltung⁴

I_L, I_{Str} = Ströme im ungestörten Betrieb
 $I_{L1}, I_{Str1}, I_{Str2}$ = Ströme bei Phasenausfall

Der Bemessungsstrom (Nennstrom) I_N bezieht sich bei einstellbaren Überlastschutzgeräten auf den eingestellten Wert.

⁴ Bildquelle → Grundlagen für die Praxis Motorschutz (Fachschrift Rockwell Automation).

⁵ Bildquelle → Joseph Uphaus: Grundlagen der Drehstrom-Antriebstechnik (Hanser).

Es gelten folgende Auslösekriterien (s. Ries, Elektrische Installationen und Apparate):

- Auslösung bei 1,2-fachem Bemessungsstrom innerhalb von 2 Stunden.
- Auslösung bei 1,5-fachem Bemessungsstrom innerhalb von 90 bis 180 Sekunden.

Anm.: Bei Ausfall einer Phase steigt die Stromaufnahme bei einem Drehstrommotor in Dreieckschaltung unter Nennlastbedingungen (Abb. 5) auf etwas mehr als das Doppelte des regulären Polleiterstromes an, so dass eine Auslösung durch ein konventionelles Motorschutzrelais nach ca. 1 Minute erfolgt. Ries spricht von einem 1,8-fachen Überstrom bei Phasenausfall eines Normmotors. Durch Verwendung eines elektronischen Motorschutzrelais erfolgt die Auslösung bereits nach wenigen Sekunden. Drehstrommotoren in Sternschaltung sind bei Phasenausfall weniger stark gefährdet. Für bestimmte Anwendungen werden in Drehstromnetzen auch Phasenüberwachungsrelais eingesetzt, die auf Spannungs- und Phasenunsymmetrie reagieren.

5 Praxisbeispiele

Abschliessend soll an mehreren Beispielen die Vorgehensweise bei der Projektierung einer Zuleitung zu einem elektrischen Verbrauchers aufgezeigt werden.

Beispiel 1

Gegeben sei ein Motor der Baugrösse 160 L mit einer Drehzahl von $1'460 \text{ min}^{-1}$. Gemäss Tabellenbuch (Westermann) beträgt die Nennleistung 15 kW, der Wirkfaktor 0,85 und der Wirkungsgrad 89 %. Der Motor soll mit einem Stern-Dreieck-Starter (Abb. 6) betrieben werden.

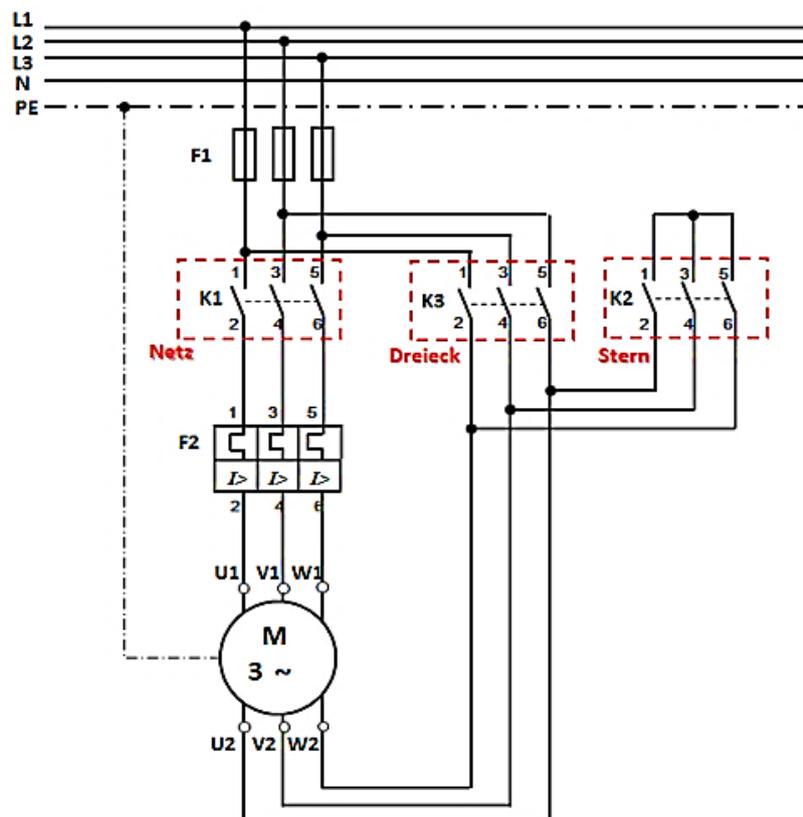


Abb. 6: YΔ-Motorstarter

Die Länge der Leitung (Starter bis Motor) beträgt 52 m und die Umgebungstemperatur steigt

im Sommer bis auf 40 °C.

- Auf welchen Wert muss der Motorschutzschalter (F2) eingestellt werden?
- Wie gross muss der vorzuschaltende Leitungsschutz (F1) mindestens sein?
- Welcher Leitungsquerschnitt ist erforderlich, wenn der Motor an eine Mantelleitung (PVC), die in einem offenen Kabelkanal verlegt wird, angeschlossen wird?

Lösung:

- Zunächst muss der Bemessungsstrom des Drehstrommotors bestimmt werden.

$$I_B = \frac{P_{mech}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{15 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,85 \cdot 0,89} \approx 29 \text{ A}$$

Nun kann der Strangstrom berechnet werden, welcher in Dreieckschaltung $0,58 \cdot 29 \text{ A} = 16,8 \text{ A}$ beträgt. Auf diesen Wert ist der Motorschutzschalter einzustellen. Befände sich der Überlastschutz vor der Schützenkombination, so müsste der MS-Schalter auf den Polleiterstrom bzw. Nennstrom des Motors eingestellt werden.

- Als Vorsicherung wird eine Schmelzsicherung mit trägem Auslösecharakter gewählt, deren Bemessungsstrom zwei Stufen über dem Nennstrom des Motors liegt.

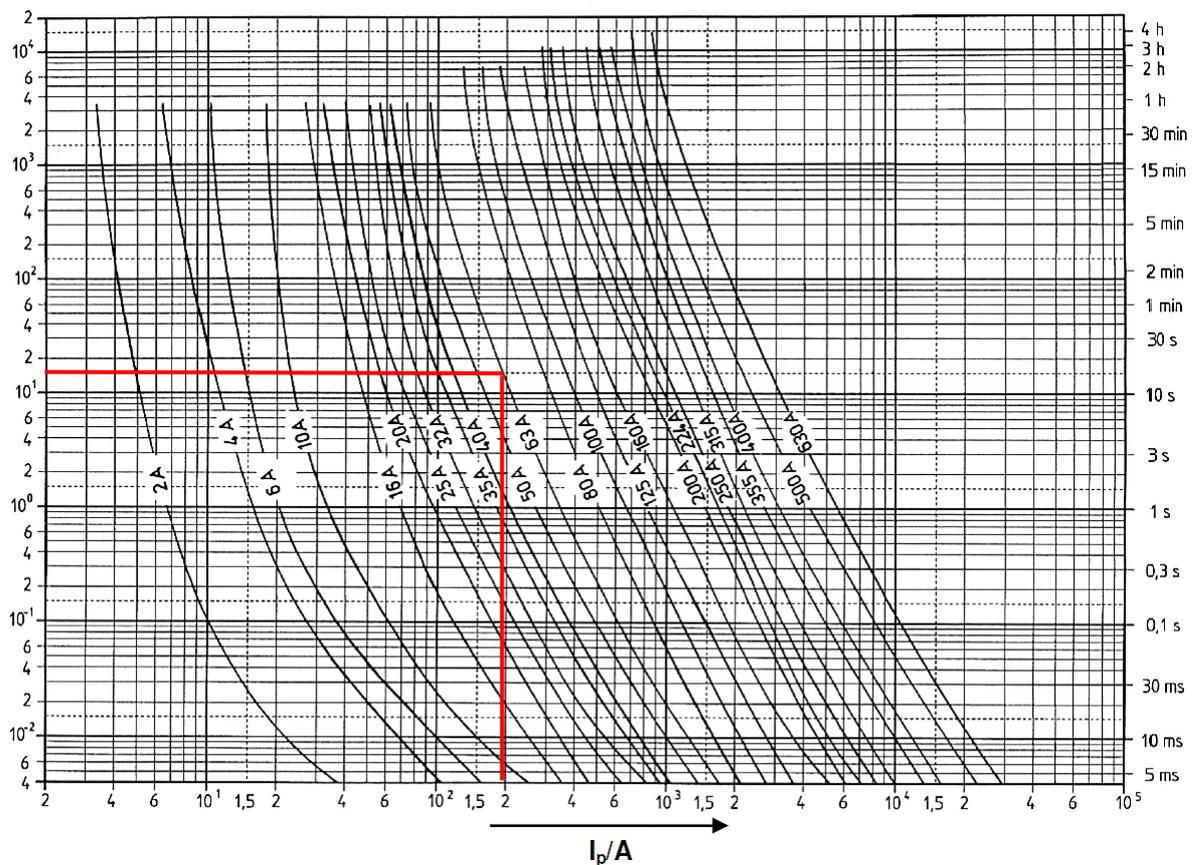


Abb. 7: Zeit-Strom-Kennlinien von NH-Sicherungen

Für einen Motorstrom von 29 A wird eine NH-Sicherung gL/gG (Ganzbereichsschutz für allgemeine Anwendungen) der Grösse 00 mit einer Nennstromstärke von 63 A eingesetzt, welche

einen 6 bis 7-fachen Nennstrom (Abb. 7) während des Hochlaufs des Antriebes erträgt. Alternativ kann auch ein Leitungsschutzschalter (Typ D) mit derselben Bemessungsstromstärke verwendet werden.

c) Der Leitungsquerschnitt zwischen Vorsicherung und Schützenkombination beträgt 16 mm^2 . Damit ist gewährleistet, dass sich die Leiter im Kurzschlussfall nicht unzulässig erwärmen.

Für die Motorzuleitung kann der Querschnitt entsprechend der Bemessungsstromstärke des Motorschutzes reduziert werden.

Für Verlegungsart C in einem offenen Kabelkanal muss die Motorleitung bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C mit einem korrigierten Querschnitt bemessen werden.

Temperaturkorrekturfaktor für $40 \text{ °C} = 0,82$

Minimale Strombelastbarkeit der Leitung = $I_B : f_1 = 29 \text{ A} : 0,82 = 35 \text{ A}$

Daraus resultiert gemäss Tabellenbuch ein minimaler Leitungsquerschnitt von 4 mm^2 .

Insgesamt sind damit die DIN VDE Bedingungen an die Strombelastbarkeit der Leiter erfüllt.

Zuletzt muss auch der Spannungsfall der Leitung berücksichtigt werden. Gemäss Norm darf ΔU nicht grösser als 3 % sein.

3 % entspricht einem Spannungsverlust von 12 V.

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos\varphi}{\kappa \cdot q} = \frac{\sqrt{3} \cdot 52 \text{ m} \cdot 29 \text{ A} \cdot 0,85}{56_{\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 4 \text{ mm}^2} = 9,9 \text{ V}$$

Ein Querschnitt von 4 mm^2 für die Mantelleitung genügt im vorliegenden Fall den einschlägigen Bedingungen.

Beispiel 2

Die Isolation einer Mantelleitung für einen Drehstrom-Glühofen besteht aus Ethylenpropylen-Kautschuk (Betriebstemperatur 80 °C) und verläuft in einem Alu-Rohr auf Mauerwerk. Der Betriebsstrom beträgt 45 A. Die Umgebungstemperatur steigt im Sommer bis auf 40 °C . Welcher Leiterquerschnitt ist zu verwenden?

Lösung:

Bei 40 °C gilt für eine Mantelleitung aus synthetischem Kautschuk gemäss VDE 0298 Teil 4 ein Reduktionsfaktor von 0,89.

Die Strombelastbarkeit der Leitung muss folglich bemessen werden für:

$$I_r = I_z \geq I_B : f_1 = 45 \text{ A} \div 0,89 = 50,6 \text{ A}$$

Für die Verlegeart B2 ist bei drei stromführenden Adern somit ein Leiterquerschnitt von 10 mm^2 erforderlich.

Beispiel 3

Eine Drehstromleitung NYM mit einer Strombelastung von 40 A soll in einem Installationskanal

auf Putz verlegt werden. Im Kanal befinden sich bereits zwei Mantelleitungen. Die Umgebungstemperatur beträgt 25 °C.

a) Welcher Leiterquerschnitt ist erforderlich?

b) Wie gross ist der Bemessungsstrom der Überstromschutzeinrichtung?

Lösung:

$$I_Z = I_r \cdot f_1 \cdot f_2 \rightarrow I_B = \frac{I_Z}{f_1 \cdot f_2} = \frac{40 \text{ A}}{1,06 \cdot 0,7} = 53,9 \text{ A}$$

a) Für Verlegeart B2 ist gemäss Tabelle ein Leiterquerschnitt von 16 mm² erforderlich.

b) Für den Überlast- und Kurzschlußschutz kann eine NH-Sicherung mit 50 A Nennstromstärke eingesetzt werden.

Beispiel 4

Die Zuleitung eines Elektrowärmespeichers besteht aus einer fünfadrigen Mantelleitung aus PVC mit einem Querschnitt von 2,5 mm² Cu. Die Leitung wird durch ein Installationsrohr auf Mauerwerk geschützt, in dem sich drei weitere Mantelleitungen befinden. Wie gross ist die Überstromschutzeinrichtung zu bemessen?

Lösung:

Gemäss Tabelle gilt bei Verlegungsart B2 und einer Umgebungstemperatur von 30 °C für eine Leitung mit 2,5 mm² eine Bemessungsstromstärke von 20 A. Der Umrechnungsfaktor für die Häufung von Leitungen beträgt 0,65, so dass eine Strombelastbarkeit von 20 A · 0,65 = 13 A resultiert.

Die Nennstromstärke des Leitungsschutzschalters beträgt 13 A. Sollte der Leitungsschutzschalter zu klein für den angeschlossenen Verbraucher und dessen Betriebsstrom sein, muss eine Leitung mit grösserem Querschnitt verlegt werden. In diesem Fall wäre ein Leitungsschutzschalter C 16 einzusetzen.

Beispiel 5

Ein Drehstrommotor hat einen Bemessungsstrom von 24 A. Die Motorzuleitung besitzt eine Belastbarkeit von 28 A. Für den Überlastschutz wird ein Motorschutzschalter verwendet, dessen Auslösestrom $1,3 \cdot I_N$ beträgt. Ist der Überlastschutz gewährleistet?

Lösung:

$$I_B = 24 \text{ A}, I_Z = 28 \text{ A}, I_a = 1,3 \cdot 24 \text{ A} = 31,2 \text{ A}$$

Erste VDE-Bedingung: $I_B \leq I_Z \rightarrow 24 \text{ A} \leq 28 \text{ A}$ ist erfüllt.

Zweite VDE-Bedingung: $I_Z \geq I_a : 1,45 \rightarrow 31,2 \text{ A} \cdot 0,69 = 21,6 \text{ A}$ ist erfüllt.

Der Überlastschutz ist gewährleistet.

Beispiel 6

Um die Belüftung eines Betriebsraumes sicherzustellen, soll ein Ventilator durch einen Drehstrommotor angetrieben werden. Für den Antrieb des Ventilators ist ein Drehmoment von 15 Nm erforderlich. Im Ersatzteilleger befinden sich zwei Motoren.

Motor 1	3 kW	3 x 400 V	$\cos\varphi = 0,82$	$n = 2'920 \text{ min}^{-1}$	$\eta = 81 \%$	$M_A/M_N = 2,5$
Motor 2	3 kW	3 x 400 V	$\cos\varphi = 0,80$	$n = 1'420 \text{ min}^{-1}$	$\eta = 80 \%$	$M_A/M_N = 2,6$

Die Motorzuleitung besitzt eine Länge von 80 m. Es wird ein Elektrorohr in einer teilweise wärmegeämmten Wand verwendet, in dem sich bereits fünf mehradrige Leitungen befinden. Die Umgebungstemperatur beträgt 40 °C. Den Motorschutz übernimmt ein vor Ort befindlicher Motorschutzschalter.

- Welcher Motor ist geeignet?
- Wie gross muss der Leitungsquerschnitt bemessen werden?
- Welche Nennstromstärke für eine NH-Sicherung (gG) ist erforderlich?
- Wird der zulässige Spannungsfall $\leq 3 \%$ eingehalten?

Lösung:

a) Zunächst wird das vom Drehstrommotor gelieferte Drehmoment bestimmt; dafür kann eine "Praktikerformel" verwendet werden:

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

Motor 1 erzeugt ein Drehmoment von 9,8 Nm und scheidet folglich aus.

Motor 2 erzeugt ein Drehmoment von 20,2 Nm und eignet sich damit.

b) Nun wird der Betriebsstrom berechnet.

$$I_B = \frac{P_2}{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{3000 \text{ W}}{0,8 \cdot 1,73 \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,8} = 6,8 \text{ A}$$

Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren beträgt die Strombelastung:

$$I_Z = \frac{I_B}{\Pi f} = \frac{6,8 \text{ A}}{0,82 \cdot 0,57} = 14,5 \text{ A}$$

Ein Leiterquerschnitt von 1,5 mm² ist ausreichend.

c) Die DII-Vorsicherung wird mit 13 A (träge) bemessen.

Die VDE-Bedingung $I_B \leq I_n \leq I_Z = 6,8 \text{ A} \leq 13 \text{ A} \leq 14,5 \text{ A}$ ist damit erfüllt.

d) Der zulässige Spannungsfall ist auch erfüllt.

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos\varphi}{\kappa \cdot A} = \frac{1,73 \cdot 80 \text{ m} \cdot 6,8 \text{ A} \cdot 0,8 \cdot \Omega \text{mm}^2}{57 \cdot 1,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{m}} = 8,8 \text{ V}$$

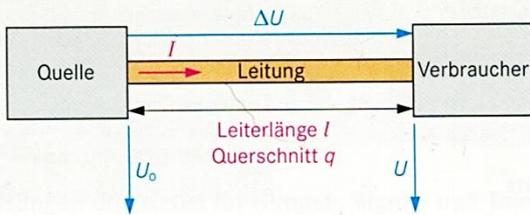
$$\Delta u = \frac{8,8 \text{ V}}{400 \text{ V}} \cdot 100 \% = 2,2 \%$$

6 Tabellen Strombelastbarkeit

Entnommen aus *Elektronik Tabellen - Betriebs- und Automatisierungstechnik* (Westermann).

Prinzip

- Durch den Stromfluss und den Leitungswiderstand ist die Spannung am Verbraucher U stets geringer als an der Quelle U_0 .
- Die Differenz ist der Spannungsfall ΔU . Er wird oft in % angegeben (Δu).
- Der Spannungsfall ist abhängig von der Stromstärke, der Leiterlänge, der Leitfähigkeit und dem Leiterquerschnitt.



ΔU : Spannungsfall

q_n : Normquerschnitt $\kappa_{Cu} = 56 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$

κ : Elektrische Leitfähigkeit

- Normquerschnitte in mm^2

1,5	2,5	4	6	10
16	25	35	50	70

Einflussfaktoren f

- f_1 : Erhöhte Umgebungstemperatur
- f_2 : Gehäufte Leitungsverlegung
- f_3 : Vieladrig belastete Leitungen
- f_4 : Einfluss von Oberschwingungen

Ermittlung des Leiterquerschnitts

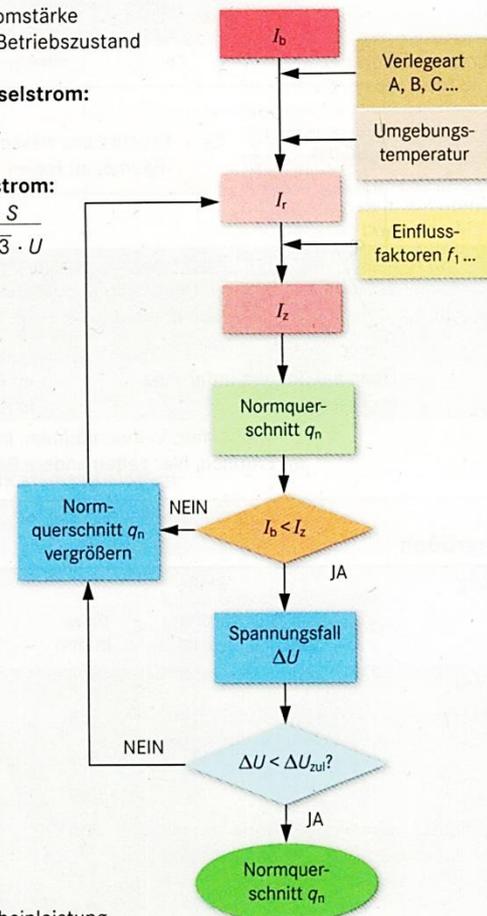
I_b : Stromstärke im Betriebszustand

Wechselstrom:

$$I_b = \frac{S}{U}$$

Drehstrom:

$$I_b = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$



S : Scheinleistung

U : Bemessungsspannung

- Umgebungstemperatur 25 °C

- Zulässige Bemessungstemperatur am Leiter 70 °C

I_f : Stromstärke unter idealen Bedingungen

I_z : Stromstärke bei realen Bedingungen

q_n : Normquerschnitt

ΔU : Spannungsfall

ΔU_{zul} : Zulässiger Spannungsfall

Berechnungsformeln

Kenngröße	Art des Netzes		
	Gleichstrom	Wechselstrom	Drehstrom
Spannungsfall in V, unverzweigtes Netz	$\Delta U = \frac{2 \cdot l \cdot I}{\kappa \cdot q}$	$\Delta U = \frac{2 \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{\kappa \cdot q}$	$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{\kappa \cdot q}$
Spannungsfall in V, verzweigtes Netz	$\Delta U = \frac{2}{\kappa \cdot q} \cdot \sum (I \cdot l)$	$\Delta U = \frac{2 \cdot \cos \varphi_m}{\kappa \cdot q} \cdot \sum (I \cdot l)$	$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_m}{\kappa \cdot q} \cdot \sum (I \cdot l)$
Verlustleistung in W	$P_V = \frac{2 \cdot l \cdot I^2}{\kappa \cdot q}$	$P_V = \frac{2 \cdot l \cdot I^2}{\kappa \cdot q}$	$P_V = \frac{3 \cdot l \cdot I^2}{\kappa \cdot q}$
maximale Leitungslänge in m	$l = \frac{\Delta u \cdot U_N \cdot q \cdot \kappa}{2 \cdot 100 \% \cdot I}$	$l = \frac{\Delta u \cdot U_N \cdot q \cdot \kappa}{2 \cdot 100 \% \cdot I \cdot \cos \varphi}$	$l = \frac{\Delta u \cdot U_N \cdot q \cdot \kappa}{\sqrt{3} \cdot 100 \% \cdot I \cdot \cos \varphi}$
Spannungsfall in %	$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 \%$		Verlustleistung in % $P_{V\%} = \frac{P_V}{P} \cdot 100 \%$

Einflussfaktoren

Die Bemessungsstromstärke I_n eines Überstrom-Schutzorgans einer Leitung hängt neben der Verlegeart noch von folgenden Faktoren (f) ab:

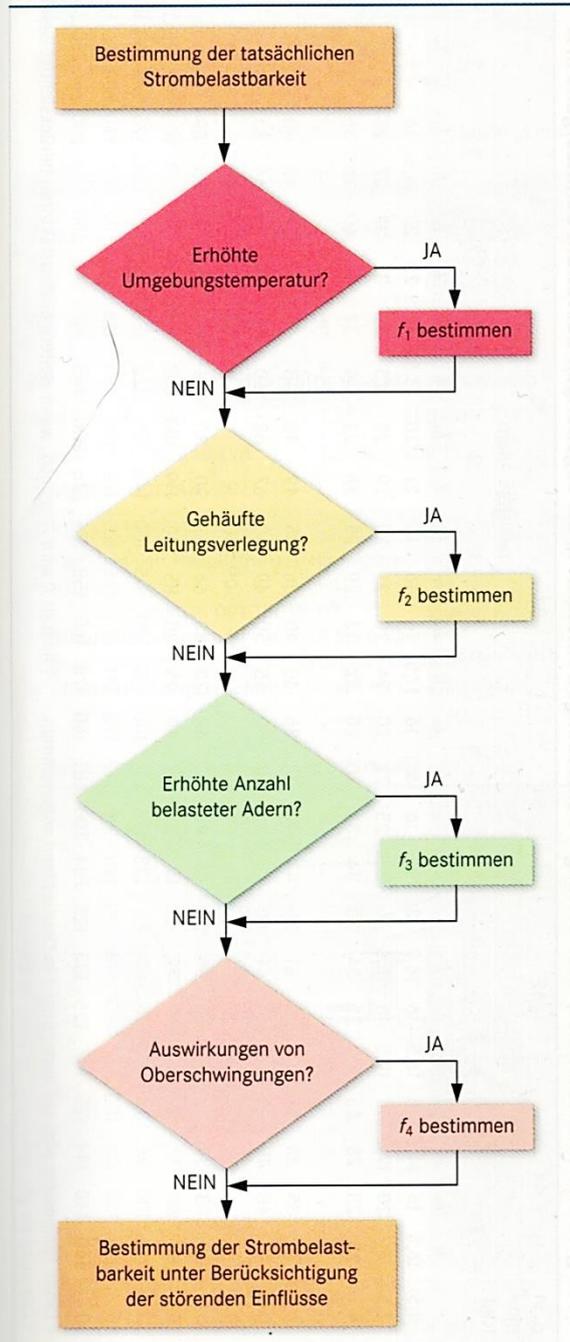
- Abweichende Umgebungstemperatur f_1
- Gehäufte Leitungsverlegung f_2
- Zahl der belasteten Adern f_3
- Auswirkung von Oberschwingungen f_4

Die Faktoren f_1 bis f_4 sind aus Tabellen der DIN VDE 0298-4: 2003-08 zu entnehmen.

Berechnungsformel: $I_z = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot I_r$

I_z : Zulässige Strombelastbarkeit unter realen Bedingungen
 I_r : Bemessungsstromstärke ohne Berücksichtigung der Einflussfaktoren (ideale Bedingungen)

Ablaufschema



Werte der Einflussfaktoren

Faktor f_1
(bei einer von 30 °C abweichenden Umgebungstemperatur)

ϑ in °C	10	15	20	25	30	35
f_1	1,22	1,17	1,12	1,06	1,0	0,94
ϑ in °C	40	45	50	55	60	65
f_1	0,87	0,79	0,71	0,61	0,50	0,35

Faktor f_1
(bei einer von 25 °C abweichenden Umgebungstemperatur)¹⁾

ϑ in °C	10	15	20	25	30	35
f_1	1,15	1,1	1,06	1,0	0,94	0,89
ϑ in °C	40	45	50	55	60	65
f_1	0,82	0,75	0,67	0,58	0,47	0,33

Zulässige bzw. empfohlene Betriebstemperatur am Leiter 70 °C.
¹⁾ Umgerechnete Werte für f_1 zur einfacheren Nutzung in Deutschland.

Faktor f_2 (gehäufte Leitungsverlegung)

Verlegung	Anzahl der mehradrigen Leitungen					
	1	2	3	4	6	9
gebündelt im Elektroinstallationsrohr/-kanal	1,0	0,8	0,7	0,65	0,57	0,5
Einlagig direkt auf der Wand oder dem Fußboden	1,0	0,85	0,79	0,75	0,72	0,7
in gelochter Kabelwanne	1,0	0,88	0,82	0,79	0,76	0,73
auf einer Kabelpritsche	1,0	0,87	0,82	0,8	0,79	0,78

Faktor f_3 (Verlegung vieladrig belasteter Leitungen)

belastete Adern								
	2	3	5	7	10	14	19	24
f_3	1,0	1,0	0,75	0,65	0,55	0,5	0,45	0,4

Faktor f_4 (Auswirkung von Oberschwingungen)

Wirkleistungsanteil der Geräte mit Oberschwingungen zur Gesamtwirkleistung in Prozent							
	0 %	11 %	23 %	31 %	35 %	39 %	...
f_4	1,00	0,86	0,70	0,67	0,61	0,56	...

7 Lernquellen

Kiefer, Schmolke: VDE 0100 und die Praxis (VDE Verlag)

Fritsche et al: Schutz durch DIN VDE (Europa Lehrmittel)

Braukhoff et al: Praxis Elektrotechnik (Europa Lehrmittel)

Isele et al: Formeln für Elektrotechniker (Europa Lehrmittel)

Häberle et al: Tabellenbuch Elektrotechnik (Europa Lehrmittel)

Hans R. Ries: Elektrische Installationen und Apparate (Electrosuisse)

Hösel, Ayx, Busch: Die vorschriftsmässige Elektroinstallation (VDE Verlag)

Fritsche; Häberle, Schmitt: Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik (Europa Lehrmittel)

Schmolke: Auswahl und Bemessung von Kabeln und Leitungen (Hüthig & Pflaum Verlag)

Machon (Hrsg.): Friedrich Tabellenbuch Elektrotechnik/Elektronik (Bildungsverlag EINS)

Dzieia et al: Elektronik Tabellen - Betriebs- und Automatisierungstechnik (Westermann)