

Leitungsberechnung und Reduktionsfaktoren

EINE LEITUNGSBERECHNUNG muss so ausgeführt werden, dass die Leitung während des normalen Betriebs sowie nach vorhersehbaren, vorübergehenden Grenzsituationen wie Kurzschluss oder Überlastung nicht so geschädigt wird, dass gefährliche Zustände eintreten – z. B. ein Brand. Somit könnte ein kompletter Austausch der betreffenden Leitung notwendig werden.



AUF EINEN BLICK

NORM FÜR STROMBELASTBARKEIT Kabel und Leitungen dimensioniert man in der Regel nach DIN VDE 0298-4, in welcher Tabellen die Werte vorgeben

ANFORDERUNGEN AN KABEL UND LEITUNGEN Für die richtige Dimensionierung sind vor allem die Strombelastbarkeit sowie Betriebsart und Verlegebedingungen zu beachten

ANWENDUNG DER NORM An einem konkreten Beispiel aus einer Anfrage im Rahmen der Rubrik Praxisprobleme zeigt der Autor, dass die Querschnittsermittlung auf zwei Wegen zum selben Ergebnis führt

Der »de«-Leser H.H., Baden-Württemberg wandte sich mit folgender Frage an die Redaktion: »Ich bin Elektromeister und studiere zur Zeit Energiesysteme an der Hochschule. Nun stellte sich heraus, dass viele Dinge, welche ich als Meister gelernt habe, laut meinem Professor nicht stimmen. Hier ein Beispiel: Es war die zu verlegende Leitung in der Verlegeart B1 für einen Dreh-

strommotor mit $P = 5,5 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,8$ und $\eta = 0,9$ an $400 \text{ VAC}/50 \text{ Hz}/3\sim$ bei 50° C Umgebungstemperatur und Häufungsfaktor $0,6$ zu berechnen. Hier würde ein Gesamtstrom von 11 A fließen. Nun geht die Berechnung laut Professor so, dass die gewählte Leitung NYM $3 \times 1,5$ laut VDE-Tabelle mit $16,5 \text{ A}$ belastet werden könnte. Der Professor nimmt jetzt die $16,5 \text{ A}$ und teilt diesen einfach durch die zwei Reduktionsfaktoren $0,6$ für Häufung und $0,71$ für Temperaturabweichung, so dass $38,7 \text{ A}$ herauskommen und die Leitung nun so gewählt werden müsste dass man sie mit $38,7 \text{ A}$ belasten könnte, also laut VDE 6 mm^2 . Außerdem wählt er hier noch einen Leitungsschutzschalter von $K25 \text{ A}$. Auf meinen Einwand hin, dass man das so nicht rechnen könne und warum man einen Leitungsschutzschalter von 25 A , bei einem tatsächlichen Strom von 11 A verwenden, meinte er: »Das ist so. Auf der Hochschule rechnet man anders als auf dem Dorf«. Nun ist meine Angst, dass an den Prüfungen mein ursprünglich Gelerntes nicht mehr zählt und der Professor alles anders sieht. Könnten Sie bitte einmal zum Vergleich eine ausführliche Berechnung durchführen?«



INFOS

Fachbeiträge

Schmolke, H.: Ermittlung des realen Spannungsfalls
»de« 3.2012 → S. 15 ff.

Schmolke, H.: Berechnung des großen Prüfstroms
»de« 5.2011 → S. 20 f.

Schmolke, H.: Reale Strombelastbarkeit von Erdkabeln
»de« 8.2013 → S. 21 ff.

Schmolke, H.: Leiterwiderstandserhöhung durch Fehlerstromerwärmung
»de« 12.2012 → S. 20 f.

Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen

Um die in den einleitenden Worten beschriebene Leitungsauswahl zu gewährleisten, benötigt man eine Leitung, die eine genügend hohe Strombelastbarkeit aufweist. Darüber hinaus muss durch eine entsprechende Auswahl von Überstrom-Schutzeinrichtungen sichergestellt werden, dass auch bei einem Kurzschluss oder einer Überlastung die gewählte Leitung geschützt bleibt. Die Norm, die hierzu klare Anforderungen vorgibt, ist DIN VDE 0100-430 (VDE 0100-430) »Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-3: Schutzmaßnahmen – Schutz bei Überstrom«. Die Bestimmungen dieser Norm sind relativ eindeutig und glücklicherweise nicht derart verschlungen und theoretisch abgehoben, dass nur eine Person mit einem abgeschlossenen Hochschulstudium die Anforderungen verstehen und richtig umsetzen kann.

Die entsprechenden Strombelastbarkeitswerte für übliche Kabel und Leitungen findet man in der Regel in Tabellen der im Folgenden beschriebenen Norm.

Betriebsart und Verlegebedingungen

Es handelt sich konkret um die DIN VDE 0298-4 (VDE 0298 Teil 4), Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen.

Die dort aufgeführten Tabellenwerte beziehen sich dabei stets auf folgende Betriebsbedingungen:

- Betriebsart,
- Verlegebedingungen,
- Umgebungsbedingungen.

Die Betriebsart beschreibt den zeitlichen Verlauf des Belastungsstroms. Die Referenz-Betriebsart, die den Werten in den Tabellen zugrunde gelegt wurden, ist die Dauerbelastung (konstanter Strom über längere Zeit). Die Verlegebedingungen geben die Art der Verlegung der Kabel und Leitungen an. Hier können folgende Fragen eine Rolle spielen:

- Aus welchem Material besteht die unmittelbare Umgebung (Luft, Putz oder Erdreich usw.)?
- Muss mit Wärmestau gerechnet werden, z. B. in geschlossenen Verlegesystemen (wie Kanäle oder Rohre)?
- Wie gut kann die Verlustwärme, die im Kabel bzw. in der Leitung entsteht, abgeführt werden?

In den Tabellen der DIN VDE 0298-4 (VDE 0298 Teil 4) werden die Verlegebedingungen auf acht Referenzverlegearten in Luft sowie eine Referenzverlegeart im Erdreich beschränkt.

Umgebungsbedingungen beachten

Die **Umgebungsbedingungen** beziehen sich im Wesentlichen auf die **Umgebungstemperatur** sowie die **Häufung** von gemeinsam verlegten, belasteten Kabeln und Leitungen. Die Referenz-Umgebungsbedingungen für die Tabellenwerte sind wie folgt festgelegt: Keine Häufung (also nur die Berücksichtigung einer einzelnen Leitung) bei jeweils zwei oder drei belasteten Leitern. Umgebungstemperaturen von 30 °C (für europäische Länder) oder 25 °C (für Deutschland).

Da die in der Norm aufgeführten Tabellen stets diese Referenzbedingungen voraussetzen, findet man darin auch nicht wirklich die Strombelastbarkeit I_z eines realen Kabels oder einer realen Leitung, weil die konkrete Strombelastbarkeit ja stets nur für die tatsächlichen Betriebsbedingungen gelten kann. Die Tabelle gibt stattdessen lediglich einen Bemessungswert I_r an – auch wenn dies noch sehr häufig in der Fachliteratur gerne einmal übersehen wird. Nur wenn die konkrete Verlegung mit allen Betriebsbedingungen mit den Referenzbedingungen der Tabelle übereinstimmt, entspricht der Bemessungswert der Tabelle der tatsächlichen Strombelastbarkeit ($I_r = I_z$).

Abweichende Betriebsbedingungen

Liegen von den Referenzbedingungen abweichende Betriebsbedingungen vor, müs-

sen die in den Strombelastbarkeitstabellen angegebenen Bemessungswerte I_r nach VDE 0298-4, Abschnitt 5.3, mit entsprechenden Reduktions- bzw. Umrechnungsfaktoren korrigiert werden. Dieser Methode liegt folgende Beziehung zugrunde:

$$I_r = \frac{I_z}{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3}$$

bzw.

$$I_z = I_r \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$$

Hierbei bedeuten:

- I_z – Dauerstrombelastbarkeit des gewählten Kabels oder der Leitung unter Berücksichtigung aller tatsächlich vorhandenen Betriebsbedingungen
- I_r – Bemessungswert, also ein Tabellenwert, welcher die zulässige Dauerstrombelastbarkeit bei vereinbarten Betriebsbedingungen – den Referenzbedingungen – angibt
- f_1 – Umrechnungsfaktor (Reduktionsfaktor) für die Umgebungstemperatur, die von der vereinbarten Umgebungstemperatur abweicht

- f_2 – Umrechnungsfaktor (Reduktionsfaktor) bei Häufung von belasteten Kabeln und Leitungen
- f_3 – Umrechnungsfaktor (Reduktionsfaktor), z. B. angewendet für die Berücksichtigung von Oberschwingungen oder bei mehr als drei belasteten Adern pro Kabel bzw. Leitung usw.

Überlegungen zum Rechengang

Mit dieser Überlegung kann nach VDE 0100-430, Abschnitt 433 eine entsprechende Koordination der Leiterquerschnitte und der Überstrom-Schutzeinrichtungen ermittelt werden. Dies geschieht, indem man grundsätzlich die folgenden beiden Gleichungen berücksichtigt:

$$I_B \leq I_n \leq I_z$$

und

$$I_z \leq 1,45 \cdot I_B$$

Dabei ist

- I_B – der Betriebsstrom für den zu schützenden Stromkreis
- I_z – die zulässige Dauerstrombelastbarkeit des Kabels bzw. der Leitung

- I_n – der Bemessungsstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung
- I_2 – der Strom, der eine wirksame Abschaltung in der für die Schutzeinrichtung festgelegten Zeit sicherstellt.

Den Strom I_2 aus der zweiten Gleichung bezeichnet man als »großen Prüfstrom«. Man gibt ihn in entsprechenden Produktnormen auch mit I_t oder I_f an. Diese zweite Gleichung sagt etwas darüber aus, wie nahe der Bemessungsstrom I_n der vorgeschalteten Überstrom-Schutzeinrichtung bei der ersten Gleichung an den Wert von I_2 – also der Strombelastbarkeit – heranreichen darf. Bei üblichen Leitungsschutzschaltern des Typs B oder C wird die Bedingung der zweiten Gleichung immer eingehalten.

Die erste Gleichung sagt im Grunde Folgendes aus: Der Betriebsstrom I_B darf nur maximal so groß sein wie der Bemessungswert (Nennstrom) der Überstrom-Schutzeinrichtung I_n , weil sonst eine ungewollte Abschaltung im normalen Betriebszustand möglich wäre. Weiterhin darf I_n nur maximal so groß sein, wie die Dauerstrombelastbarkeit des Kabels bzw. der Leitung I_2 , weil sonst die Überstrom-Schutzeinrichtung das Kabel bzw. die Leitung selbstverständlich nicht wirklich schützen kann.

Anwendung für eine Motorzuleitung

Bei der Projektierung einer Leitung kennt man in der Regel den Betriebsstrom. In der Anfrage war dies durch die Werte des angeschlossenen Motors gegeben:

$$I_B = \frac{P}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}$$

$$= \frac{5500 \text{ W}}{400 \text{ V} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 11 \text{ A}$$

Der so rechnerisch ermittelte Betriebsstrom von 11 A wird als Dauerstrombelastung die Leitung beanspruchen. Er wird selbstverständlich auch dann nicht größer, wenn andere Betriebsbedingungen vorausgesetzt werden müssen als jene, die in der Tabelle erwähnt werden. Durch die anderen Betriebsbedingungen wird zwar die tatsächliche Dauerstrombelastbarkeit der Leitung reduziert, aber der Betriebsstrom bleibt davon natürlich unbeeinflusst.

Die Frage ist nun, wie man die deutlich abweichenden Betriebsbedingungen in der Anfrage (Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 50^\circ\text{C}$ und Häufung) bei der Ermittlung des Leitungsquerschnitts berücksichtigt. Fest steht, dass zwar kein höherer Strom als 11 A fließen

wird, aber die Dauerstrombelastbarkeit der Leitung aufgrund der »schlechteren« Betriebsbedingungen deutlich geringer ausfallen wird als es die Tabelle vorgibt.

Die für diese Betrachtung notwendigen Reduktions- bzw. Umrechnungsfaktoren findet man in VDE 0298-4. Für den Fall der Häufung wäre das z.B. Tabelle 21. In der Anfrage wird der Faktor mit 0,6 angegeben. Die Tabelle mit den entsprechenden Faktoren für die Umgebungstemperaturen findet man in der Tabelle 17. Dort findet man für eine Umgebungstemperatur von 50°C eine Reduktionsfaktorangabe von 0,71.

In der Anfrage wird eine Verlegeart B1 erwähnt, die jedoch kaum zu der angegebenen Leitung NYM 3 x 1,5 passt. Wahrscheinlich liegt in der Anfrage ein Tippfehler vor und es ist die Verlegeart B2 mit zwei belasteten Adern gemeint. Dazu findet man in VDE 0209-, Tabelle 3 tatsächlich einen Bemessungswert $I_t = 16,5 \text{ A}$ (einphasiger Wechselstromkreis mit zwei belasteten Adern einer mehradrigen Leitung, z.B. im Rohr verlegt). Die Referenzbedingungen in dieser Tabelle sind folgende: $\vartheta_U = 30^\circ\text{C}$ und keine Häufung.

Vorläufige Überlegung vor der Berechnung

Angenommen, es lägen **keine** abweichenden Betriebsbedingungen vor, dann würde man mit dem Wert des Betriebsstroms I_B in die Tabelle 3 aus VDE 0298- gehen und dort direkt den notwendigen Leiterquerschnitt herauslesen:

Man käme dabei auf einen Leitungsquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$. Für den Schutz bei Überstrom würde man einen Leitungsschutzschalter mit 13 A oder 16 A wählen können. Die erste oben erwähnte Gleichung würde damit erfüllt:

$$11 \text{ A} \leq 13 \text{ A (16 A)} \leq 16,5 \text{ A}$$

Berechnung bei realen Bedingungen

Wenn man die in der Praxis tatsächlich vorliegenden Betriebsbedingungen berücksichtigt, muss man

- a) entweder die Bemessungswerte I_t der Tabelle aus VDE 0298- mit den Reduktionsfaktoren für die anderen Betriebsbedingungen nach VDE 0298-, Abschnitt 5.3, korrigieren
- b) oder so tun, als würde die Leitung mit einem höheren Strom belastet als dies tatsächlich der Fall ist.

Berechnungen zu a)

Der Bemessungswert für den Leiterquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ wäre bei B2 ein $I_t = 16,5 \text{ A}$. Mit der oben erwähnten Formel könnte man daraus die tatsächliche Dauerstrombelastbarkeit I_2 der Leiter berechnen:

$$I_2 = I_t \cdot f_1 \cdot f_2$$

$$= 16,5 \text{ A} \cdot 0,6 \cdot 0,71 = 7 \text{ A}$$

Das bedeutet, die Leitung könnte unter den gegebenen Betriebsbedingungen lediglich eine Dauerstrombelastung von 7 A vertragen. Der Betriebsstrom von 11 A wäre also eindeutig zu hoch.

Auf diese Weise könnte man in der Tabelle 3 aus VDE 0298- den Bemessungswert eines größeren Leiterquerschnitts wählen und die gleiche Berechnung vornehmen. Unter Umständen muss man diesen Schritt ein-, zwei- oder dreimal wiederholen, bis man auf diese Weise einen Wert für I_t ermitteln kann, bei dem sich nach der Multiplikation mit den Reduktionsfaktoren noch ein genügend großer Wert für I_2 ergibt.

Erst bei einem Wert von $I_t = 30 \text{ A}$ kommt man zu einem befriedigenden Ergebnis:

$$I_2 = I_t \cdot f_1 \cdot f_2$$

$$= 30 \text{ A} \cdot 0,6 \cdot 0,71 = 12,8 \text{ A}$$

Der Bemessungswert von $I_t = 30 \text{ A}$ wurde bei einem Querschnitt von 4 mm^2 abgelesen. Die Leitung mit diesem Querschnitt hat bei den angegebenen, tatsächlichen Betriebsbedingungen eine Dauerstrombelastbarkeit $I_2 = 12,8 \text{ A}$. Diese Belastbarkeit kann in die Gleichung aus VDE 0100-430 eingesetzt werden:

$$11 \text{ A} \leq I_n \leq 12,8 \text{ A}$$

Allerdings fehlt die korrekte Zuordnung der Überstrom-Schutzeinrichtung. Es ist leicht zu erkennen, dass es auch gar keine Überstrom-Schutzeinrichtung mit einem Nennstrom gibt, der zwischen die Werte (11 A, 12,8 A) passen würde. Deshalb muss in der Tabelle 3 aus VDE 0298- ein höherer Querschnitt gewählt werden:

Gewählt wird folgende Leitung: Querschnitt: $6 \text{ mm}^2 \rightarrow I_t = 38 \text{ A}$.

Damit kann die Dauerstrombelastbarkeit dieser Leitung erreicht werden:

$$I_2 = I_t \cdot f_1 \cdot f_2$$

$$= 38 \text{ A} \cdot 0,6 \cdot 0,71 = 16,2 \text{ A}$$

Die vorgenannte Gleichung aus VDE 0100-430 lautet jetzt:

$$11 \text{ A} \leq I_n \leq 16,2 \text{ A}$$

Für diese Gleichung kann eine Überstrom-Schutzeinrichtung gewählt werden, deren

Nennstrom zwischen die beiden Stromwerte passt:

$$I_n = 16A \rightarrow 11A \leq 16A \leq 16,2A$$

Zusammenfassung für a)

Die Gleichung ist erfüllt. Die Gewählte Leitung wäre NYM-J 3 x 6mm², die mit einem Leitungsschutzschalter (Typ B oder Typ C) mit einem Bemessungsstrom (Nennstrom) von 16A abgesichert werden muss.

Hierzu noch folgende Anmerkung: Höher darf der Nennstrom des Leitungsschutzschalters auch nicht gewählt werden, weil die vorgenannte Leitung bei den angegebenen Betriebsbedingungen nur mit einem Dauerstrom von maximal 16,2A belastet werden darf.

Berechnungen zu b)

Der zweite Weg erscheint für viele Fachleute der einfachere zu sein. Eine Bewertung soll hier jedoch nicht vorgenommen werden. Die Hauptsache ist, dass man mit beiden Methoden zum gleichen Ergebnis kommt.

Die Idee dieser Methode besteht darin, dass man so tut, als würde ein größerer Strom fließen als der tatsächliche Betriebsstrom. Dabei wird dieser Strom mit Hilfe der Reduktionsfaktoren so gewählt, dass man in der Tabelle direkt den entsprechenden Leitungsquerschnitt auswählen kann.

Der erste Planungsschritt wäre also die theoretische Erhöhung des Betriebsstroms. Der »zu hohe« Betriebsstrom soll an dieser Stelle I'_B genannt werden. Er wird mit Hilfe der zuvor genannten Reduktionsfaktoren wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} I'_B &= \frac{I_B}{f_1 \cdot f_2} \\ &= \frac{11A}{0,6 \cdot 0,71} = 25,8A \end{aligned}$$

In der Tabelle 3 aus VDE 0298-4 muss also ein $I_r > 25,8A$ gesucht werden. Dort findet man bei der Verlegeart B2 und zwei belasteten Adern ein $I_r = 30A$. Als Querschnitt findet man dann in der ersten Spalte dieser Tabelle 4mm².

Um die Gleichung aus VDE 0100-430 zu erfüllen ($I_B \leq I_n \leq I_z$), muss jedoch mit Hilfe der Reduktionsfaktoren aus I_r die tatsächliche Dauerstrombelastbarkeit I_z dieses Leitungsquerschnitts errechnet werden:

$$\begin{aligned} I_z &= I_r \cdot f_1 \cdot f_2 \\ &= 30A \cdot 0,6 \cdot 0,71 = 12,8A \end{aligned}$$

Wie es weiter geht, kennen wir bereits aus der ersten Methode nach Punkt a): Man findet für

diese Dauerstrombelastbarkeit **keine** Überstrom-Schutzeinrichtung, deren Nennstrom zwischen dem Betriebsstrom und der Dauerstrombelastbarkeit passt – siehe unter a). Deshalb muss in diesem Fall ein größerer Querschnitt zur Auswahl kommen.

Gewählt wird demzufolge ein Querschnitt von 6mm² und einer Dauerstrombelastbarkeit von $I_r = 38A$. Jetzt errechnet sich I_z so:

$$\begin{aligned} I_z &= I_r \cdot f_1 \cdot f_2 \\ &= 38A \cdot 0,6 \cdot 0,71 = 16,2A \end{aligned}$$

Auch nach dieser Methode kommt man zum gleichen Ergebnis. Unter den gegebenen Betriebsbedingungen muss folgende Leitung gewählt werden: NYM-J 3 x 6.

Gewählt wird zudem eine Überstrom-Schutzeinrichtung mit einem Nennstrom von $I_n = 16A$.

Auch hier gilt, dass nur eine Überstrom-Schutzeinrichtung mit einem maximalen Nennstrom von 16A zum Einsatz kommen kann, weil die gewählte Leitung bei den angegebenen Betriebsbedingungen keinen Dauerstrom über 16,2A führen darf. Nur so wird die Gleichung aus VDE 0100-430 erfüllt:

$$I_B \leq I_n \leq I_z \rightarrow 11A \leq 16A \leq 16,2A$$

Schlusswort

Diese Berechnung entspricht den allgemein anerkannten Regeln der Technik, die sowohl an Hochschulen als auch in Berufs- und Meisterschulen gelten. Ihre allgemeine Gültigkeit ist dazu auch nicht abhängig von der Bevölkerungsdichte – wie es in der Anfrage angeklungen ist –, denn die Regeln gelten sowohl auf dem Dorf als auch in der Großstadt.



AUTOR

Dipl.-Ing. Herbert Schmolke

Studium der Energietechnik.

Jahrelange Tätigkeit in einem größeren Planungsbüro für Großindustriepanung und Sonderbau. Er war auch einige Jahre als Berufsschullehrer bei einem privaten Bildungsträger tätig. Seit über 15 Jahren im Einsatz bei VdS Schadenverhütung, Köln. Dort zuständig für die Anerkennung von Experten auf dem Gebiet der Elektrotechnik. Mitarbeit in zahlreichen Normungsgremien und DKE-Arbeitskreisen.