

11 Überprüfung der max. Leitungslänge

In diesem Abschnitt werden max. zulässige Längen von Kabeln und Leitungen unter Berücksichtigung des Fehlerschutzes, des Schutzes gegen elektrischen Schlag (DIN VDE 0100-410) besprochen und alle drei Anwendungsbereiche betrachtet. Der minimale einpolige Kurzschlussstrom ist von großer Bedeutung, weil die richtige Zuordnung von Schutzeinrichtungen zum Querschnitt der Kabel und Leitungen und ihrer max. zulässigen Länge geprüft werden muss, damit der geforderte Personenschutz eingehalten werden kann.

Die in DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06, Abschnitt 5.1.1 und Abschnitt 5.7.1 angegebenen Formeln werden mit einem Beispiel ausführlich erklärt. Dieser Fall gilt vor allem für den Anwendungsbereich 1, wenn man mit den Vorgaben des Netzes die Vorimpedanz exakt berechnen und dann für den Endstromkreis die zulässige Länge bestimmen will. Für den Anwendungsbereich 2 und 3 können die Tabellen im Anhang der DIN VDE 0100 Beiblatt 5 (siehe auch Kapitel 14 in diesem Buch) benutzt werden, da dabei die Vorimpedanz angenommen wird.

Grundsätzlich ergibt sich die max. Stromkreislänge als Kleinstwert aus

1. l_{\max} für den Schutz bei Kurzschluss bei Fehler am Ende des Stromkreises;
2. l_{\max} für den Fehlerschutz nach DIN VDE 0100-410;
3. l_{\max} für den maximalzulässigen Spannungsfall für den Stromkreis.

Grundlage für die Berechnung der zulässigen Stromkreislänge l_{\max} ist ein einfach einseitig gespeister kleinster einpoliger Kurzschlussstrom nach DIN EN 60909-0 (**VDE 0102**).

Anwendungsbereich 1

Für den Anwendungsbereich 1 können folgende Formeln herangezogen werden. Nach DIN EN 60909-0 (**VDE 0102**) gilt für den einpoligen Kurzschlussstrom:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{\left| \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{\left| 2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (11.1)$$

Für die Fehlerstelle F (Bild 1.1) am Ende des betrachteten Stromkreises ergibt sich folgender minimaler einpoliger Fehlerstrom:

$$I''_{k1\min} = \frac{\sqrt{3} c_{\min} U_n}{\sqrt{(2 \cdot R_N + R_{0N} + 2 \cdot R_L + R_{0L})^2 + (2 \cdot X_N + X_{0N} + 2 \cdot X_L + X_{0L})^2}} \quad (11.2)$$

Die Vorimpedanz Z_V des vorgelagerten Netzes (Einspeisenetz, Transformator und Einspeisekabel) beträgt:

$$\underline{Z}_V = R_V + jX_V = \frac{2R_N + R_{0N}}{3} + j \frac{2X_N + X_{0N}}{3} \quad (11.3)$$

Ersetzt man für das vorgeordnete Netz die Werte für das Mit- und das Nullsystem durch die Schleifenimpedanz für die

ohmsche Komponente:

$$2R_N + R_{0N} = 3 \cdot R_V \quad (11.4)$$

induktive Komponente:

$$2X_N + X_{0N} = 3 \cdot X_V \quad (11.5)$$

und für den betrachteten Stromkreis die Absolutwerte für den Wirkwiderstand bzw. die Reaktanz durch die Stromkreislänge l und den Wirkwiderstandsbelag bzw. Reaktanzbelag und fügt den Faktor f_φ für die Temperaturerhöhung des Leiterwiderstands in die Gleichung ein, ergibt sich:

$$2R_{(1)L} = f_\varphi \cdot l \cdot R'_{(1)L}, \quad X_{(1)L} = l \cdot X'_{(1)L} \quad (11.6)$$

$$R_{(0)L} = f_\varphi \cdot l \cdot R'_{(0)L}, \quad X_{(0)L} = l \cdot X'_{(0)L} \quad (11.7)$$

$$I''_{k\min} = \frac{\sqrt{3} \cdot c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{(3 \cdot R_V + 2 \cdot R_{(1)L} + R_{(0)L})^2 + (3 \cdot X_V + 2 \cdot X_{(1)L} + X_{(0)L})^2}} \quad (11.8)$$

Durch die Umstellung der Gl. (11.8) nach der Stromkreislänge l kann die max. zulässige Stromkreis-Grenzlänge l_{\max} bestimmt werden, wenn $I''_{k1\min}$ durch $I_{k\text{erf}}$ ersetzt wird:

$$l_{\max} = \frac{\sqrt{K_1^2 - 4 \cdot K_2 \cdot K_3} - K_1}{2 \cdot K_2} \quad (11.9)$$

Dabei ist:

$$K_1 = \left(2 \cdot 3 \cdot R_V \cdot f_\varphi \cdot (2 \cdot r_{(1)L} + r_{(0)L})\right) + \left(2 \cdot 3 \cdot X_V \cdot (2 \cdot x_{(1)L} + x_{(0)L})\right) \quad (11.10)$$

$$K_2 = \left(f_\varphi \cdot (2 \cdot r_{(1)L} + r_{(0)L})\right)^2 + \left(2 \cdot x_{(1)L} + x_{(0)L}\right)^2 \quad (11.11)$$

$$K_3 = (3 \cdot R_V)^2 + (3 \cdot X_V)^2 - \left(\frac{\sqrt{3} \cdot c_{\min} \cdot U_n}{I_{\text{kerf}}}\right)^2 \quad (11.12)$$

Anwendungsbereich 2

Für den Anwendungsbereich 2 kann folgende Formel eingesetzt werden:

$$l_{\max} = \frac{c_{\min} \cdot U_n - Z_V}{\frac{\sqrt{3} \cdot I_a}{2 \cdot z'_L}} \quad (11.13)$$

Anwendungsbereich 3

Für den Anwendungsbereich 3 stehen in DIN VDE 0100 Beiblatt 5 Tabellen mit einer gemessenen oder berechneten Vorimpedanz zur Verfügung.

11.1 Berechnung der max. zulässigen Kabel- und Leitungslänge

Ein Niederspannungsnetz mit $U_n = 400 \text{ V}$ und $f = 50 \text{ Hz}$ ist gegeben. Die Betriebsmitteldaten sind in **Tabelle 11.1** angegeben. Für die Berechnung der max. Länge für den Endstromkreis l_3 ist an der Unterverteilung (UV) die Vorimpedanz Z_V zu ermitteln.

Einspeisung Q	$U_{nQ} = 20 \text{ kV}; S''_{kQ} = 346,41 \text{ MVA}; I''_{kQ} = 10 \text{ kA}; c_{Q\max} = 1,1; R_Q = 0,1 \cdot X_Q;$ $X''_{kQ} = 0,995 \cdot Z_Q$
Transformator T	$S_{rT} = 630 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 20 \text{ kV}; U_{rTLV} = 400 \text{ V}; P_{krT} = 6,5 \text{ kW}; u_{kr} = 4 \%;$ $\text{Dyn5}; c_q = 1,1; R_{(0)T}/R_T = 1,0; X_{(0)T}/X_T = 0,95$
Kabel 1, K1, NSHV	$\text{NYY-J } 4 \times 240 \text{ mm}^2; \text{Cu}; l_1 = 4 \text{ m}; R'_L = 0,077 \Omega/\text{km}; X'_L = 0,079 \Omega/\text{km};$ $R_{(0)L} = 4 \cdot R_L; X_{(0)L} = 3,67 \cdot X_L$
Kabel 2, K2, HV	$\text{NYY-J } 4 \times 70 \text{ mm}^2; \text{Cu}; l_2 = 50 \text{ m}; R'_L = 0,263 \Omega/\text{km}; X'_L = 0,082 \Omega/\text{km};$ $R_{(0)L} = 4 \cdot R_L; X_{(0)L} = 3,66 \cdot X_L$
Kabel 3, K3, HV (Endstromkreis)	$\text{NYM-J } 3 \times 2,5 \text{ mm}^2; \text{Cu}; l_3 = 35 \text{ m}; R'_L = 7,410 \Omega/\text{km}; X'_L = 0,082 \Omega/\text{km};$ $R_{(0)L} = 4 \cdot R_L; X_{(0)L} = 3,66 \cdot X_L$

Tabelle 11.1 Daten des Netzes

Für das vorgeschaltete Netz am Knotenpunkt UV (**Bild 11.1**) wird die Schleifenimpedanz des vorgeordneten Netzes Z_V in der Berechnung verwendet. Die dafür notwendigen Berechnungsgrundlagen werden ausführlich dargestellt.

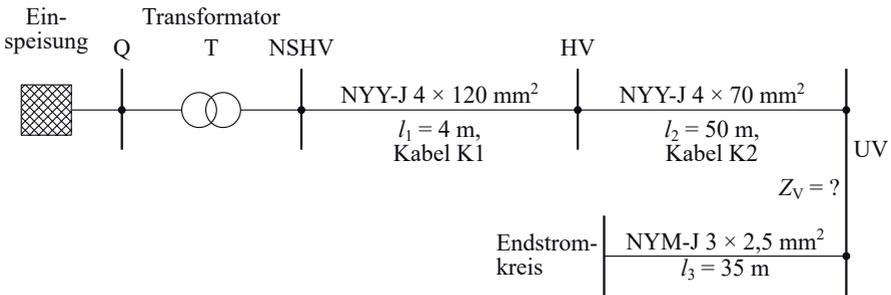


Bild 11.1 Netzplan

Für die Berechnung der max. zulässigen Leitungslänge l_{\max} wird der kleinste einpolige Kurzschlussstrom $I''_{k1\min}$ nach DIN EN 60909-0 (**VDE 0102**) verwendet. Grundlage der Berechnung der zulässigen Stromkreislänge ist einfach einseitig gespeister Kurzschluss.

Ist die tatsächliche Länge des Stromkreises kleiner oder gleich dieser max. zulässigen Stromkreis-Grenzlänge l_{\max} , ist der Schutz bei Kurzschluss auch für den minimalen Fehlerstrom am Ende des Stromkreises erfüllt.

Zuerst werden die vorgeschaltete Wirk- und Blindwiderstände des Netzes im Mit-, Gegen- und Nullsystem zusammengefasst. Dann kann die allgemeingültige Formel für die Berechnung der Grenzlänge abgeleitet (siehe DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06, dort die Formeln 45 bis 50). Die Anwendung dieser Gleichungen ist zeitaufwendig. In diesem Abschnitt wird das von uns ausgewählte Beispiel durchgerechnet.

Berechnung der Resistanz des vorgelagerten Netzes im Mitsystem:

$$\begin{aligned}
 R_{(1)N} &= R_{(1)QT} + R_{(1)T} + R_{(1)K1} + R_{(1)K2} \\
 &= 0,0505 \text{ m}\Omega + 2,62 \text{ m}\Omega + 0,382 \text{ m}\Omega + 16,306 \text{ m}\Omega \\
 &= 19,359 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

Berechnung der Resistanz des vorgelagerten Netzes im Nullsystem:

$$\begin{aligned}
 R_{(0)N} &= R_{(0)T} + R_{(0)K1} + R_{(0)K2} \\
 &= 2,63 \text{ m}\Omega + 1,528 \text{ m}\Omega + 65,224 \text{ m}\Omega \\
 &= 69,372 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

Berechnung der Resistanz des vorgelagerten Netzes:

$$\begin{aligned} R_V &= \frac{2 \cdot R_{(1)N} + R_{(0)N}}{3} \\ &= \frac{2 \cdot 19,359 \text{ m}\Omega + 69,372 \text{ m}\Omega}{3} \\ &= 36,03 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Berechnung der Reaktanz des vorgelagerten Netzes im Mitsystem:

$$\begin{aligned} X_{(1)N} &= X_{(1)QT} + X_{(1)T} + X_{(1)K1} + X_{(1)K2} \\ &= 0,505 \text{ m}\Omega + 9,86 \text{ m}\Omega + 0,361 \text{ m}\Omega + 4,1 \text{ m}\Omega \\ &= 14,781 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Berechnung der Reaktanz des vorgelagerten Netzes im Nullsystem:

$$\begin{aligned} X_{(0)N} &= X_{(0)T} + X_{(0)K1} + X_{(0)K2} \\ &= 9,37 \text{ m}\Omega + 1,159 \text{ m}\Omega + 15,066 \text{ m}\Omega \\ &= 25,595 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Berechnung der Reaktanz des vorgelagerten Netzes:

$$\begin{aligned} X_V &= \frac{2 \cdot X_{(1)N} + X_{(0)N}}{3} \\ &= \frac{2 \cdot 14,781 \text{ m}\Omega + 25,595 \text{ m}\Omega}{3} \\ &= 18,386 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Ermittlung des Temperaturkorrekturfaktors für 80 °C nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06, Tabelle A.5:

$$f_{80^\circ\text{C}} = 1,236$$

Ermittlung der Resistanzbeläge des Mitsystems von Kabeln (2,5 mm²) bei 20 °C nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06, Tabelle A.6:

$$r_{(1)L} = 7,410 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

Ermittlung der Resistanzbeläge im Nullsystem:

$$r_{(0)L} = 4 \cdot r_{(1)L} = 4 \cdot 7,410 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} = 29,64 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

Ermittlung der Reaktanzbeläge des Mitsystems von Niederspannungskabel nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06, Tabelle A.6:

$$X_{(1)L} = 0,08 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

Ermittlung der Reaktanzbeläge im Nullsystem:

$$X_{(0)L} = 3,66 \cdot X_{(1)L} = 3,66 \cdot 0,08 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} = 0,293 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$

Ermittlung des minimalen Kurzschlussstroms der Schutzeinrichtung nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06, Tabelle A.20:

$$S = 2,5 \text{ mm}^2$$

$$I_n = 16 \text{ A}$$

$$I_{\text{kerf}} = 80 \text{ A}$$

$$I_{\text{kmin}} = \frac{\sqrt{3} \cdot c_{\text{min}} \cdot U_n}{\sqrt{\left(3 \cdot R_V + 2 \cdot R_{(1)L} + R_{(0)L}\right)^2 + \left(3 \cdot X_V + 2 \cdot X_{(1)L} + X_{(0)L}\right)^2}} \quad (11.14)$$

Wobei

$$2R_{(1)L} = f_\varphi \cdot l \cdot R'_{(1)L}, \quad X_{(1)L} = l \cdot X'_{(1)L}$$

$$R_{(0)L} = f_\varphi \cdot l \cdot R'_{(0)L}, \quad X_{(0)L} = l \cdot X'_{(0)L}$$

Durch die Umstellung der Gl. (11.14) nach der Stromkreislänge l kann die max. zulässige Stromkreis-Grenzlänge l_{max} bestimmt werden, wenn I_{k1min} durch I_{kerf} ersetzt wird:

$$l_{\text{max}} = \frac{\sqrt{K_1^2 - 4 \cdot K_2 \cdot K_3 - K_1}}{2 \cdot K_2} \quad (11.15)$$

Dabei ist:

$$K_1 = \left(2 \cdot 3 \cdot R_V \cdot f_\varphi \cdot (2 \cdot r_{(1)L} + r_{(0)L})\right) + \left(2 \cdot 3 \cdot X_V \cdot (2 \cdot x_{(1)L} + x_{(0)L})\right)$$

$$K_2 = \left(f_\varphi \cdot (2 \cdot r_{(1)L} + r_{(0)L})\right)^2 + \left(2 \cdot x_{(1)L} + x_{(0)L}\right)^2$$

$$K_3 = (3 \cdot R_V)^2 + (3 \cdot X_V)^2 - \left(\frac{\sqrt{3} \cdot c_{\min} \cdot U_n}{I_{\text{kerf}}}\right)^2$$

Berechnung von K_1 :

$$\begin{aligned} K_1 &= \left(2 \cdot 3 \cdot R_V \cdot f_\varphi \cdot (2 \cdot r_{(1)L} + r_{(0)L})\right) + \left(2 \cdot 3 \cdot X_V \cdot (2 \cdot x_{(1)L} + x_{(0)L})\right) \\ &= \left(2 \cdot 3 \cdot 36,03 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot 1,236 \cdot \left(2 \cdot 7,410 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}} + 29,64 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}\right)\right) \\ &\quad + \left(2 \cdot 3 \cdot 18,386 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot 1,236 \cdot \left(2 \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}} + 0,293 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}\right)\right) \\ &= 0,01193 \frac{\Omega^2}{\text{m}} \end{aligned}$$

Berechnung von K_2 :

$$\begin{aligned} K_2 &= \left(f_\varphi \cdot (2 \cdot r_{(1)L} + r_{(0)L})\right)^2 + \left(2 \cdot x_{(1)L} + x_{(0)L}\right)^2 \\ &= \left(f_{80^\circ\text{C}} \cdot \left(2 \cdot 7,410 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}} + 29,64 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}\right)\right)^2 \\ &\quad + \left(2 \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}} + 0,293 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2 \\ &= 3,019 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2 \end{aligned}$$

Berechnung K_3 :

$$\begin{aligned} K_3 &= (3 \cdot R_V)^2 + (3 \cdot X_V)^2 - \left(\frac{\sqrt{3} \cdot c_{\min} \cdot U_n}{I_{\text{kerf}}}\right)^2 \\ &= \left(3 \cdot 36,03 \cdot 10^{-3} \Omega\right)^2 + \left(3 \cdot 18,386 \cdot 10^{-3} \Omega\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot 400 \text{ V}}{80 \text{ A}}\right)^2 \\ &= -67,68 \Omega^2 \end{aligned}$$

Mit den obigen Zwischenberechnungen kann nun die max. zulässige Kabel und Leitungslänge nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5:2021-06 ermittelt werden:

$$\begin{aligned}
 l_{\max} &= \frac{\sqrt{K_1^2 - 4 \cdot K_2 \cdot K_3 - K_4}}{2 \cdot K_2} \\
 &= \frac{\sqrt{\left(0,01193 \frac{\Omega^2}{\text{m}}\right) - 4 \cdot \left(3,019 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2\right) \cdot (-67,68 \Omega^2) - 0,01193 \frac{\Omega^2}{\text{m}}}}{2 \cdot 3,019 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2} \\
 &= 147,76 \text{ m} \approx 148 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Mit $c = 0,9$ erhält man:

$$\begin{aligned}
 l_{\max} &= \frac{\sqrt{\left(0,01193 \frac{\Omega^2}{\text{m}}\right) - 4 \cdot \left(3,019 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2\right) \cdot (-60,735 \Omega^2) - 0,01193 \frac{\Omega^2}{\text{m}}}}{2 \cdot 3,019 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2} \\
 &= 139,87 \text{ m} \approx 140 \text{ m}
 \end{aligned}$$

11.2 Berechnung der max. Leitungslänge in vereinfachter Art für die Praxis

In der Literatur findet man oft Näherungsformel für die Grenzlängen. Durch die Messung ermittelte Schleifenimpedanz vor der Überstromschutzeinrichtung mit Sicherheitsfaktoren oder die im Beiblatt angegebenen Werte vom 10 mΩ bis 700 mΩ können in die Gleichung eingesetzt und überschlägig die max. Leitungslänge berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 l_{\max} &= \frac{\frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3}} - Z_V}{2 \cdot z'_L} \\
 &= \frac{\frac{0,9 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3}} - 40,44 \cdot 10^{-3} \Omega}{2 \cdot \sqrt{\left(9,19 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2 + \left(0,11 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}\right)^2}} \quad (11.16) \\
 &= 139,14 \text{ m} \approx 139 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Tabelle 11.2 zeigt den Unterschied zwischen der exakten und vereinfachten Methode. Je größer der erforderliche Fehlerstrom ist, desto kleiner wird die zulässige Länge der Leitung.

Nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5	In vereinfachter Form für die Praxis
140	139

Tabelle 11.2 Zulässige Leitungslänge l_{\max} in m mit $c = 0,9$

11.3 Berechnung der max. Leitungslänge nach DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2:2023-10

Für die automatische Abschaltung der Stromversorgung nach DIN VDE 0100-410 ist für die max. zulässigen Längen von Kabeln und Leitungen in Wohngebäuden eine einfache Gleichung angegeben:

$$I_k = \frac{c_{\min} \cdot U_0}{R_S + Z_L} = \frac{c_{\min} \cdot U_0}{R_S + 2 \cdot l \cdot Z'_L} \quad (11.17)$$

Die Formel für die Berechnung der Gesamtimpedanz des Stromkreises wird so umgeformt, dass ein Wert für die Impedanz herauskommt, der für einen bestimmten Leiterquerschnitt immer gilt und bei dem man die möglichen Vorimpedanzen lediglich durch einen Korrekturfaktor berücksichtigen kann. Die Vorimpedanz wird mit 300 mΩ angenommen. Für andere Vorimpedanzen sind weitere Angaben in DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2 zu finden.

Durch Umstellen der Formeln für die Berechnung des Kurzschlussstroms auf die Leitungslänge kommt man zu folgender Gleichung für die max. Leitungslänge. Mit der Umstellung nach der zulässigen Leitungslänge erhält man dann:

$$l_{\max} = \frac{c_{\min} \cdot U_0}{I_k \cdot 2 \cdot Z'_L} - \frac{R_S}{2 \cdot Z'_L} \quad (11.18)$$

Dabei ist:

I_k Kurzschlussstrom (einpölig),

c_{\min} Spannungsfaktor bei Kurzschluss (0,9) nach DIN EN 60909-0 (**VDE 0102**),

U_0 Nennspannung gegen Erde (230 V),

R_S Schleifenwiderstand des vorgelagerten Netzes (300 mΩ),

Z_L Impedanz des Kabels (der Leitung) komplett (Hin- und Rückleiter),

Z'_L Impedanzbelag des Kabels (der Leitung) bei Temperatur am Ende des Kurzschlusses

Der erste Ausdruck (rechts vom Gleichheitszeichen) ergibt die Leitungslänge ohne Berücksichtigung der Schleifenimpedanz und der zweite Ausdruck die Reduzierung der Leitungslänge, die die Schleifenimpedanz hervorruft.

Der mit der Formel errechnete Kurzschlussstrom ist kleiner als bei der genauen Berechnung nach DIN EN 60909-0 (**VDE 0102**). Das bedeutet, dass die zulässige Leitungslänge immer auf der sicheren Seite liegt.

11.4 Bestimmung der Leiterendtemperatur ϑ_e am Ende der Fehlerzeit t_F

Bei der Bestimmung der max. zulässigen Leitungs- und Kabellänge ist die Leitertemperatur bei Beginn des Fehlers ϑ_a und am Ende der Fehlerzeit t_F bei minimal erforderlichen einpoligem Kurzschlussstrom $I_{k1\text{erf}}$ am Ende des betrachteten Stromkreises zu berücksichtigen.

Die tatsächlich auftretende Leiterendtemperatur ϑ_e ist von der Abschaltzeit und damit von der eingesetzten Überstromschutzeinrichtung (Sicherung, Leitungsschutzschalter oder Leistungsschalter) und von den tatsächlich vor dem Fehler vorliegenden Leitertemperaturen ϑ_a im Hinleiter (Außenleiter L1, L2 oder L3) und Rückleiter (N-, PE-, bzw. PEN-Leiter) abhängig.

Nach DIN VDE 0100-540:2012-06, Abschnitt 543.1.2 und nach DIN VDE 0298-4:2023-06, Tabelle 29 sind die Bemessungskurzzeitstromdichten J_{thr} für 1 s in Abhängigkeit vom Leitermaterial, dem Isolierwerkstoff sowie der zulässigen Betriebstemperatur am Leiter und der zulässigen Kurzschlussstemperatur angegeben. Die dort genannten Werte für die Bemessungskurzzeitstromdichten J_{thr} entsprechen den k -Faktoren nach VDE 0100-540:2012-06, Anhang A (normativ) für die Bemessung der Kurzschlussfestigkeit von Schutzleitern.

In diesem Anhang ist folgende Gleichung für die Berechnung des Materialkoeffizienten k im Zeitintervall $0 \leq t_F \leq 5$ s angegeben:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c \cdot (\beta + 20 \text{ °C})}{\rho_{20^\circ}} \cdot \ln\left(1 + \frac{\vartheta_a + \vartheta_e}{\beta + \vartheta_a}\right)} \quad (11.19)$$

Innerhalb des Zeitintervalls $0 \leq t_F \leq 5$ s dürfen die Werte für andere Fehlerströme I_F , andere Fehlerzeiten t_F sowie andere Leiterquerschnitte S umgerechnet werden:

$$I_F^2 \cdot t_F = k^2 \cdot S^2 \quad (11.20)$$

Umgestellt nach t_F ergibt sich:

$$t_F = \left(\frac{k \cdot S}{I_F}\right)^2 \quad (11.21)$$

Wird in Gl. (11.19) für k die Gl. (11.21) eingesetzt, ergibt sich folgende Gleichung für die Berechnung der zulässigen Fehlerzeit bis zum Erreichen der Grenztemperatur bis 5 s:

$$t_F = \frac{Q_c \cdot (\beta + 20 \text{ }^\circ\text{C})}{\rho_{20^\circ}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\vartheta_a + \vartheta_e}{\beta + \vartheta_a} \right) \cdot \frac{S^2}{I_F^2} \quad (11.22)$$

Stellt man diese Gleichung nach ϑ_e um, kann die voraussichtliche Leiterendtemperatur bei gegebener Fehlerzeit t und Fehlerstrom I_F berechnet werden:

$$\vartheta_e = \left[\left(e^{\frac{t \cdot \rho_{20^\circ}}{Q_c \cdot (\beta + 20^\circ\text{C})} \cdot \frac{S^2}{I_F^2}} - 1 \right) \cdot (\beta + \vartheta_a) + \vartheta_a \right] \quad (11.23)$$

Bei der Berechnung von der Leiterendtemperatur ist in der Gl. (11.17) ein **Materialkoeffizient** k -Faktor enthalten. Die Formel ist dafür in IEC 60949 und in DIN VDE 0100-540 mit unterschiedlichen Einheiten wiedergegeben. Es wird dabei aufgezeigt, dass das Ergebnis beider Formeln identisch ist.

Die Formel in IEC 60949

K constant depending on the material of the current carrying component (As^2/mm^2):
see Table I

$$K = \sqrt{\frac{\sigma_c (\beta + 20) \times 10^{-12}}{\rho_{20}}}$$

S geometrical cross-sectional area of the current carrying component (mm^2):
for conductors specified in IEC 228 it is sufficient to take the nominal cross-sectional area

θ_f final temperature ($^\circ\text{C}$)

θ_i initial temperature ($^\circ\text{C}$)

β reciprocal of temperature coefficient of resistance of the current carrying component at $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (K): see Table I

\ln \log_e

σ_c volumetric specific heat of the current carrying component at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\text{J}/\text{K} \cdot \text{m}^3$):
see Table I

ρ_{20} electrical resistivity of the current carrying component at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Omega \cdot \text{m}$):
see Table I

Die Berechnungsgrößen sind in **Tabelle 11.3** aufgezeigt.

Material	K (As ^{1/2} /mm ²) ¹⁾	β (K) ²⁾	σ_c (J/K · m ³) ³⁾	ρ_{20} (Ω · m) ²⁾
<i>a) Conductors</i>				
Copper	226	234.5	3.45×10^6	1.7241×10^{-8}
Aluminium	148	228	2.5×10^6	2.8264×10^{-8}
<i>b) Sheaths, screens and armour</i>				
Lead or lead alloy	41	230	1.45×10^6	21.4×10^{-8}
Steel	78	202	3.8×10^6	13.8×10^{-8}
Bronze	180	313	3.4×10^6	3.5×10^{-8}
Aluminium	148	228	2.5×10^6	2.84×10^{-8}

Tabelle 11.3 Table I der IEC 60949:1988-11 Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects

Wenn wir nun die Daten in die Formel einsetzen, erhalten wir:

$$k = \sqrt{\frac{\sigma_c \cdot (\beta + 20) \cdot 10^{-12}}{\rho_{20}}} = \sqrt{\frac{3,45 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{J}}{\text{°C} \cdot \text{m}^3} \right) (234,5 \text{ °C} + 20 \text{ °C}) \cdot 10^{-12}}{1,7241 \cdot 10^{-8} \text{ Ωm}}}$$

$$= 225,67 \frac{\text{A} \sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$$

(In dieser Formel macht $\frac{\text{m}^3}{\text{m}} = 10^{-12}$.)

Die Formel in DIN VDE 0100-540

Der Faktor k ist mit folgender Gleichung zu berechnen:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c (\beta + 20 \text{ °C})}{\rho_{20}} \cdot \ln \left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{\beta + \theta_i} \right)}$$

Dabei ist:

Q_c die volumetrische Wärmekapazität des Leiterwerkstoffs [J/(°C · mm³)] bei 20 °C;

β der Reziprokwert des Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstands bei 0 °C für den Leiter [°C];

ρ_{20} der spezifische elektrische Widerstand des Leiterwerkstoffs bei 20 °C [Ωmm];

θ_i die Anfangstemperatur des Leiters [°C];

θ_f die Endtemperatur des Leiters [°C]

Werkstoff	β^a [°C]	Q_c^b [J/(°C mm ³)]	ρ_{20} [Ω mm]	$\sqrt{\frac{Q_c (\beta + 20 \text{ °C})}{\rho_{20}}}$ [$\frac{\text{A}\sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$]
Kupfer	234,5	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$17,241 \cdot 10^{-6}$	226
Aluminium	228	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$28,264 \cdot 10^{-6}$	148
Blei	230	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$214 \cdot 10^{-6}$	41
Stahl	202	$3,80 \cdot 10^{-3}$	$138 \cdot 10^{-6}$	78

a) Werte sind abgeleitet nach Tabelle 1 von IEC 60287-1-1.
b) Werte sind abgeleitet nach Tabelle E2 von IEC 60853-2.

Tabelle 11.4 Werte der Parameter für verschiedene Leiterwerkstoffe gemäß DIN VDE 0100-540:2012-06, Tabelle A.54.1

In der DIN VDE 0100-540:2012-06, Tabelle A.54.1 stehen alle Parameter zur Berechnung des k-Faktors, wenn wir hier die abgekürzten Dimensionen berücksichtigen, erhalten wir wieder das gleiche Ergebnis wie bei der IEC 60949:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c \cdot (\beta + 20 \text{ °C})}{\rho_{20}}} = \sqrt{\frac{3,45 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{J}}{\text{°C} \cdot \text{mm}^3} \right) (234,5 \text{ °C} + 20 \text{ °C})}{17,241 \cdot 10^{-6} \text{ Ωmm}}} = 225,67 \frac{\text{A}\sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$$

Die Ergebnisse sind lediglich auf $226 \frac{\text{A}\sqrt{\text{s}}}{\text{mm}^2}$ aufgerundet.

**Beispiel: Schutzeinrichtung- MCB-B, 16 A, bei 0,1 s, $I_a = 80 \text{ A}$.
Kabel NYM-J $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$, Cu mit PVC-Isolierung**

$$\vartheta_e = \left[\left(\frac{0,1 \text{ s} \cdot 17,241 \cdot 10^{-10}}{e^{3,45 \cdot 10^{-3} \cdot (235,5 + 20)} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} \cdot 80 \text{ A}^2 - 1 \right) \cdot (234,5 + 70) + 70 \right] = 71,7 \text{ °C}$$

Mit der folgenden Formel kann die voraussichtliche Leiterendtemperatur ϑ_e bei gegebener Fehlerdauer t_f und Fehlerstrom I_f berechnet werden:

$$\vartheta_e = \left(e^{t_f \cdot \frac{\rho_{20}}{Q_c \cdot (\beta + 20)} \cdot \frac{I_f^2}{S^2}} - 1 \right) \cdot (\beta + \vartheta_a) + \vartheta_a \quad (11.24)$$

Mit:

- Q_c volumetrische Wärmekapazität des Leiterwerkstoffs bei 20 °C;
- β Reziprokwert des Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstands bei 0 °C für den Leiterwerkstoff;
- ρ_{20} spezifischer elektrische Widerstand des Leiterwerkstoffs bei 20 °C;
- ϑ_a Anfangstemperatur des Leiters
(Tabellenwerte für Grenzlängen gelten bei 70 °C);
- ϑ_e Endtemperatur des Leiters;
- k Materialkoeffizient

Setzt man den minimal erforderlichen Fehlerstrom $I_{k\text{erf}}$ für den Fehlerstrom I_F sowie die bei $I_{k\text{erf}}$ sich ergebende max. Auslösezeit t_F der eingesetzten Kurzschluss-schutzeinrichtung sowie Anfangstemperatur des Leiters bei Fehlereintritt in obige Gleichung ein, kann die Leiterendtemperatur ϑ_e und damit die zu berücksichtigende Widerstandserhöhung bestimmt werden.

Beispiel

Die Berechnung wird mit einem Leitungsschutzschalter B16 A/MCB durchgeführt, der am Endstromkreis angeschlossen ist. Die Abschaltzeit beträgt 0,1 s und der Abschaltstrom 80 A. Der Querschnitt des Leiters ist NYM-J $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$.

$$\vartheta_e = \left(e^{\frac{0,1 \text{ s} \cdot \frac{17,241 \cdot 10^{-6}}{3,45 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{80 \text{ A}^2}{2,5 \text{ mm}^2} - 1}{\beta}} \right) \cdot (234,5 \text{ °C} + 70 \text{ °C}) + 70 \text{ °C} = 71,53 \text{ °C}$$

Bei Schmelzsicherungen der Betriebsklasse gG kann die Endtemperatur bei 5 s höhere Werte annehmen. Die max. Endtemperatur kann bei Kunststoffmantelleitung (NYM-J) 160 °C nicht erreicht werden. Daher ist es zu empfehlen mit einem **Durchschnittswert** von 80 °C zu berechnen.

Fazit

Die max. zulässige Kabel- und Leitungslänge wurde nach DIN VDE 0100 Beiblatt 5 mit der exakten und vereinfachten Formel berechnet.

Wie die Beispiele zeigen, hat der Spannungsfaktor c einen Einfluss auf die Grenzlänge. Auch die konstante Leiteranfangstemperatur, die variable Endtemperatur und Fehlerausschaltzeiten bewirken unterschiedliche Grenzlängen für Fehlerschutz und Schutz bei Kurzschluss.

Der Spannungsfaktor c beträgt 0,9, gemäß DIN EN 60909-0 (**VDE 0102**):2016-12. Für die Berechnung der Exponentialfunktion (Gln. (9.1) bis (11.24)) können manche Planer oder Praktiker überfordert sein. Fehler sind dabei unvermeidbar. Mit der Nutzung einer Software oder Messung der Schleifenimpedanz vor der Schutzeinrichtung ist man immer auf der sicheren Seite.