

5. Dimensionierung und Koordinierung von Stromkreisen

Die Kurzschlussstromberechnung nach DIN EN 60909-0 ist Voraussetzung für die richtige Bemessung der elektrischen Betriebsmittel, die Überprüfung der Schutzmaßnahmen und der Kurzschlussfestigkeit bei der Auswahl der Geräte. Der größtmögliche Kurzschlussstrom I''_{k3} ist für die Bemessung der Betriebsmittel auf thermische und dynamische Beanspruchungen im Kurzschlussfall und der kleinste Kurzschlussstrom I''_{k1} für die Schutzmaßnahme "Schutz durch Abschaltung" sowie für die Einstellung des Netzschutzes maßgebend wie z.B. Leistungsschalter und Schutzrelais. An jedem Knotenpunkt müssen beide Kurzschlussströme berechnet werden.

5.1 Kurzschlussstromberechnung

In diesem Beiblatt wird die Kurzschlussstromberechnung nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2016-01 mit Grundlagen und technischen Hinweisen möglichst einfach und verständlich zusammengefasst.

5.1.1 Impedanzen der Betriebsmittel nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102)

Zur Berechnung der Kurzschlussströme in einem Netz müssen die leiterbezogenen Daten und Impedanzen der elektrischen Betriebsmittel, die im Allgemeinen vom Hersteller angegeben werden, bekannt sein. Diese Impedanzen bestehen aus einem ohmschen (Resistanz R) und einem induktiven Widerstand (Reaktanz X). Als Betriebsmittel in den Energieverteilungsnetzen kommen z.B. Netzeinspeisung, Generatoren, Transformatoren, Kabel und Leitungen, Motoren und andere Verbraucher vor. Die Kurzschlussimpedanzen der einzelnen Betriebsmittel werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

a) Vorgelagertes Netz

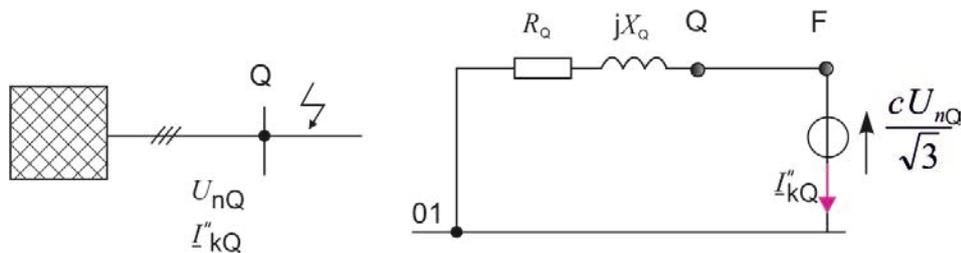


Bild 3: Netzeinspeisung und Ersatzschaltbild im Mitsystem

Die Einspeisung erfolgt aus einem Netz, das mit „Q“ (Quelle) bezeichnet wird. Die übergeordnete Spannungsebene und das Ersatzschaltbild (ESB) ist in Bild 3 dargestellt.

Wenn der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I''_{kQ} am Anschlusspunkt Q bekannt ist, dann kann die Kurzschlussmitimpedanz Z_Q an der Fehlerstelle bestimmt werden mit:

$$Z_{(1)Q} = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_k''} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (1)$$

Wenn das Verhältnis $\frac{R_Q}{X_Q}$ bekannt ist, kann die Reaktanz X_Q mit

$$X_{(1)Q} = \frac{Z_{(1)Q}}{\sqrt{1 + (R_{(1)Q} / X_{(1)Q})^2}} \quad (2)$$

$$R_{(1)Q} = X_{(1)Q} \cdot (R_{(1)Q} / X_{(1)Q}) \quad (3)$$

berechnet werden.

Dabei ist

$Z_{(1)Q}$ die Impedanz des vorgelagerten Netzes im Mitsystem;

$R_{(1)Q}$ der Wirkwiderstand (Resistanz) des vorgelagerten Netzes im Mitsystem;

$X_{(1)Q}$ der Blindwiderstand (Reaktanz) des vorgelagerten Netzes im Mitsystem;

c der Spannungsfaktor (c_{\min} ; c_{\max});

für Netze mit $U_n > 1$ kV: $c_{\min} = 1,0$; $c_{\max} = 1,1$;

für Netze mit $U_n \leq 1$ kV: $c_{\min} = 0,95$; $c_{\max} = 1,1$ für Netze mit +10% Toleranz;

für Netze mit $U_n \leq 1$ kV: $c_{\min} = 0,9$; Für Niederspannungsnetze mit einer Toleranz von ± 10 %.

U_{nQ} die Netznennspannung;

S_{kQ}'' die Netzkurzschlussleistung min. / max. des vorgelagerten Netzes;

I_{kQ}'' der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom min. / max. des vorgelagerten Netzes;

R_Q/X_Q das R/X -Verhältnis des vorgelagerten Netzes im Mitsystem.

Wenn R/X nicht bekannt, kann $R_Q/X_Q = 0,1$ bzw. $X_{(1)Q} = 0,995 Z_{(1)Q}$ gesetzt werden.

Früher wurde anstelle I_{kQ}'' die Kurzschlussleistung ($S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_k''$) z.B. für 110kV 6...8GVA, für 20kV 500MVA und 10 kV ca. 250-350 MVA angegeben. Der Kurzschlussstrom an der Übergabestelle kann vom Versorgungsnetzbetreiber (VNB) angefragt oder selbst berechnet werden. I_{kQ}'' ist eine wichtige Größe für die Bemessung von Betriebsmitteln. Wird das MS-Netz jedoch im Notbetrieb nur über Notstromaggregate gespeist, so können dort nicht selten Kurzschlussleistungen kleiner 25 MVA auftreten.

b) Transformator (Zweiwicklungs-Transformator)

Der Kurzschluss wird über ein Mittelspannungs gespeist und nur der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I''_{kQ} ist am Anschlusspunkt Q bekannt. In diesem Fall kann die Netzeninnenimpedanz Z_{Qt} im Mitsystem bezogen auf die Unterspannungsseite des Transformators wie folgt berechnet werden (Bild 4). In der Gleichung (4) t ist die Indizes für die transformierte Größe.

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (4)$$

Das Bemessungsübersetzungsverhältnis t_r des Transformators, bei dem der Stufenschalter auf der Hauptanzapfung steht, beträgt:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \quad (5)$$

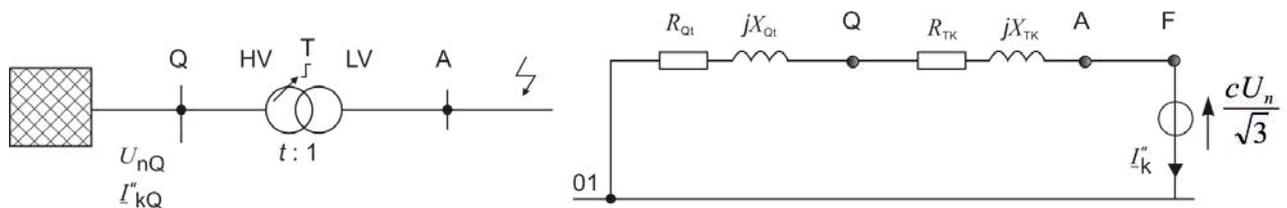


Bild 4: Netzeinspeisung mit Transformator und ESB im Mitsystem
 (HV: High Voltage (OS), LV: Low Voltage (US), SS: Sammelschiene)

$$Z_{(1)T} = \frac{u_{kr} \cdot U_{rT}^2}{100 \% \cdot S_{rT}} \quad (6)$$

$$Z_{(1)T} = \sqrt{R_{(1)T}^2 + X_{(1)T}^2} \quad (7)$$

$$R_{(1)T} = \frac{u_{Rr} \cdot U_{rT}^2}{100 \% \cdot S_{rT}} = \frac{R_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (8)$$

$$X_{(1)T} = \sqrt{Z_{(1)T}^2 - R_{(1)T}^2} \quad (9)$$

Dabei ist

U_{rT} die Bemessungsleerlaufspannung des Transformators (bezogen auf eine Spannungsseite);

- S_{rT} die Bemessungsscheinleistung des Transformators;
 P_{krT} die Kurzschlussverluste des Transformators;
 $Z_{(1)T}$ die Impedanz des Transformators im Mitsystem;
 $R_{(1)T}$ die Resistanz des Transformators im Mitsystem;
 $X_{(1)T}$ die Reaktanz des Transformators im Mitsystem;
 x_T die relative Reaktanz des Transformators;
 u_{kr} die relative Kurzschlussspannung des Transformators; z. B. 6 % entspricht 0,06;
 u_{Rr} der relative Wirkanteil der Kurzschlussspannung des Transformators.

Der Korrekturfaktor K_T für die Berechnung der Transformatorimpedanz kann bei Verteiltransformatoren vernachlässigt werden. Für die Nullimpedanz des Transformators gilt:

$$R_{(0)T} = R_{(1)T} \cdot (R_{(0)T} / R_T) \quad \text{und} \quad X_{(0)T} = X_{(1)T} \cdot (X_{(0)T} / X_T) \quad (10)$$

Dabei ist

$R_{(0)T}$ die Resistanz des Transformators im Nullsystem;

$X_{(0)T}$ die Reaktanz des Transformators im Nullsystem.

Je nach Konstruktion, Schaltgruppe und Leistung weisen die Transformatoren unterschiedliche Null-/ Mitsystem-Verhältnisse bei Resistanzen und Reaktanzen auf. Typische Werte bei Verteiltransformatoren (drei Schenkel) bei unterschiedlichen Schaltgruppen können Tabelle A.1.1 entnommen werden.

Die Umrechnung der Impedanz des vorgelagerten Netzes bzw. der auf die Oberspannungsseite bezogenen Transformatorimpedanz auf die Niederspannungsseite erfolgt nach:

$$\underline{Z}_{LV} = \left(\frac{U_{LV}}{U_{HV}} \right)^2 \cdot \underline{Z}_{HV} \quad (11)$$

Dabei ist

\underline{Z}_{HV} die Impedanz bezogen auf die Oberspannungsseite;

\underline{Z}_{LV} die Impedanz bezogen auf die Unterspannungsseite;

U_{HV} die Bemessungsspannung der Oberspannungsseite;

U_{LV} die Bemessungsspannung der Unterspannungsseite.

c) Synchrongenerator

In Industrienetzen oder Niederspannungsnetzen werden Generatoren mit direktem Anschluss eingesetzt. Für den Kurzschluss wird die Mitimpedanz des Generators benötigt und beträgt mit dem Korrekturfaktor:

$$Z_{(1)GK} = K_G \cdot Z_{(1)G} = K_G \cdot \sqrt{R_G^2 + X_d''^2} \quad (12)$$

Korrekturfaktor ist:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (13)$$

$$X_d'' = \frac{x_d'' \cdot U_{rg}^2}{S_{rg}} \quad (14)$$

$$X_{(1)GK} = K_G \cdot X_d'' \text{ und } R_{(1)GK} = K_G \cdot R_G \quad (15)$$

Dabei ist

U_{nQ} die Netznominalspannung;

U_{rG} die Bemessungsspannung des Generators;

S_{rG} die Bemessungsscheinleistung des Generators;

$Z_{(1)GK}$ die „korrigierte“ Impedanz des Generators im Mitsystem;

$R_{(1)GK}$ die „korrigierte“ Resistanz des Generators im Mitsystem;

$X_{(1)GK}$ die „korrigierte“ Reaktanz des Generators im Mitsystem;

$Z_{(1)G}$ die Impedanz des Generators im Mitsystem;

K_G der Korrekturfaktor für die Impedanz des Generators;

x_d'' die relative subtransiente Reaktanz (gesättigt) des Generators;

X_d'' die subtransiente Reaktanz (gesättigt) des Generators;

R_G die fiktive Resistanz des Generators.

Als ausreichend genau darf für Synchrongeneratoren angenommen werden:

$$R_G \approx 0,15 \cdot X_d'' \quad \text{Generatoren mit } U_{rG} \leq 1\,000 \text{ V}$$

$$R_G \approx 0,07 \cdot X_d'' \quad \text{Generatoren mit } U_{rG} > 1 \text{ kV und } S_{rG} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_G \approx 0,05 \cdot X_d'' \quad \text{Generatoren mit } U_{rG} > 1 \text{ kV und } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$$

Mit dieser Kurzschlussimpedanz wird der maximale dreipolige Kurzschlussstrom des Generators ermittelt. Die subtransiente Reaktanz X_d'' des Generators kann je nach Hersteller unterschiedlich ausfallen. In der Regel liegt sie zwischen 5 % ... 18 % in einem Leistungsbereich bis ca. 3 500 kVA.

Wenn vom Hersteller nichts Konkretes angegeben wird, können bei direkt geerdeten NS-Generatoren annähernd die maximalen einpoligen Kurzschlussströme gleich den maximalen dreipoligen Kurzschlussströmen für die Dimensionierung in Niederspannungsnetzen gesetzt werden.

Wenn die Nullimpedanz des Generators kleiner ist als die Mitimpedanz, ist bei einem Kurzschluss in unmittelbarer Nähe des Generators der einpolige Kurzschlussstrom der größere.

Dient der Synchrongenerator als Netzersatzaggregat bzw. Notstromaggregat, so muss er mit dem entsprechenden Erregersystem ausgestattet werden. Damit liefert er einen Dauerkurzschlussstrom für eine definierte Zeit. Wenn vom Hersteller nichts anderes angegeben wird, kann im Allgemeinen angenommen werden:

$I_{k1} \approx 5 \cdot I_{rG}$ für den einpoligen Dauerkurzschlussstrom;

$I_{k3} \approx 3 \cdot I_{rG}$ für den dreipoligen Dauerkurzschlussstrom;

ANMERKUNG Dauerkurzschlussströme rotierender USV-Anlagen können sich von den in Diesel-Aggregaten auftretenden unterscheiden und sind daher explizit beim Hersteller zu erfragen. Für die Kurzschlussstromberechnung statischer USV- und BSV-Anlagen ist die Spannungscharakteristik, also Spannung als Funktion der Strombelastung, oder der Kurzschlussstromverlauf vom Hersteller anzugeben.

Eine Kurzschlussdauer von 1 s sollte aus Stabilitätsgründen des Aggregates (Motor und Generator) nicht überschritten werden.

Diese Dauerkurzschlussstromangaben dienen der Ermittlung der minimalen Kurzschlussströme im Netz.

d) Leitung / Kabel / Stromschienen

Leitungen, Kabel oder Stromschienen verbinden elektrische Anlagen miteinander. Sie übertragen die elektrische Energie von den Erzeugern bis zu den Verbrauchern. Die Ersatzschaltung einer Freileitung besteht aus einem ohmschen Widerstand, Induktivität und Kapazität. Bild 5 zeigt vereinfacht das Ersatzschaltbild von Leitungen und Kabeln.

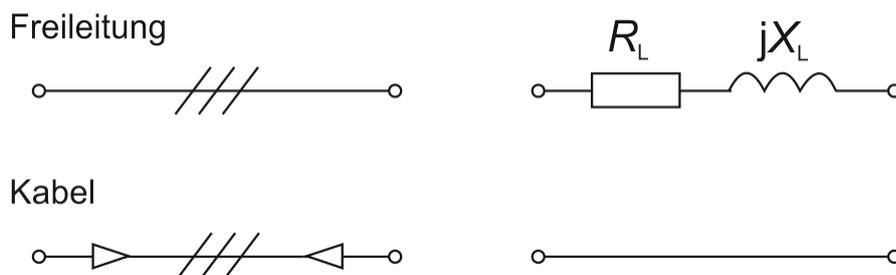


Bild 5: Aufbau und Ersatzschaltbild der Kabel und Leitungen

$$Z_{(1)L} = \sqrt{R_{(1)L}^2 + X_{(1)L}^2} \quad (16)$$

$$R_{(1)L} = R'_{(1)L} \cdot \frac{l}{n} \quad (17)$$

$$X_{(1)L} = X'_{(1)L} \cdot \frac{l}{n} \quad (18)$$

Dabei ist

- l die Leitungslänge;
- n die Anzahl paralleler Kabel des betrachteten Stromkreises;
- $Z_{(1)L}$ die Impedanz der Verbindung im Mitsystem;
- $R_{(1)L}$ die Resistanz der Verbindung im Mitsystem;
- $X_{(1)L}$ die Reaktanz der Verbindung im Mitsystem;
- $R'_{(1)L}$ der Resistanzbelag der Verbindung im Mitsystem;
- $X'_{(1)L}$ der Reaktanzbelag der Verbindung im Mitsystem.

Anstelle der Impedanzen im Nullsystem werden bei NS-Kabeln oftmals Faktoren für das Verhältnis Nullsystem zu Mitsystem angegeben ($R_{(0)L}/R_L$ bzw. $X_{(0)L}/X_L$), womit dann gilt:

$$R_{(0)L} = \left(R_{(0)L} / R_L \right) \cdot R_{(1)L} \quad (19)$$

$$X_{(0)L} = \left(X_{(0)L} / X_L \right) \cdot X_{(1)L} \quad (20)$$

Dabei ist

- $R_{(0)L}$ die Resistanz der Verbindung im Nullsystem;
- $X_{(0)L}$ die Reaktanz der Verbindung im Nullsystem;
- $R_{(0)L}/R_L$ das Resistanzverhältnis Nullsystem zu Mitsystem;
- $X_{(0)L}/X_L$ das Reaktanzverhältnis Nullsystem zu Mitsystem.

Die Temperaturabhängigkeit der Resistanz, sowohl im Mitsystem als auch im Nullsystem, wird hierbei wie folgt berücksichtigt:

$$R_L = R_{L20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\Theta_e - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \quad (21)$$

Dabei ist

- R_L die Resistanz des Leiters bei Temperatur Θ_e ;
- R_{L20} die Resistanz des Leiters bei 20 °C;
- Θ_e die von 20 °C abweichende Leitertemperatur;
- α_{20} der Temperaturkoeffizient nach IEC 60228:2004-11

bei Kupferleiter 0,00393/K

bei Aluminiumleiter 0,00403/K.

Sind bei Leitungen und Kabeln die Resistenzen nicht bekannt, so können sie näherungsweise über die Leitfähigkeit κ ermittelt werden:

$$R'_{L20} \approx \frac{\rho}{S} = \frac{1}{\kappa \cdot S} \quad (22)$$

Dabei ist

- S der Nennquerschnitt des Leiters;
 ρ der spezifische Widerstand des Leiters bei 20 °C;
 κ die Leitfähigkeit des Leiters bei 20 °C
bei Cu 54 m/Ωmm² oder 56 m/Ωmm²,
bei Al 34 m/Ωmm².

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$X_L = X_{L50\text{Hz}} \cdot \frac{f}{50\text{Hz}}$$

Dabei ist

- X_L die Reaktanz des Leiters;
 L die Induktivität des Leiters;
 f die Netzfrequenz;
 X_{Lf} die Reaktanz des Leiters bei einer von 50 Hz abweichenden Frequenz;
 $X_{L50\text{Hz}}$ die Reaktanz des Leiters bei 50 Hz.

Bei Kabeln mit Kupferleitern bis 16 mm² bzw. mit Aluminiumleitern bis 25 mm² können die Reaktanzen gegenüber den Resistenzen vernachlässigt werden. Bei steigendem Querschnitt nimmt auch deren Anteil an der Kabelimpedanz zu, so dass sie dann nicht mehr vernachlässigt werden dürfen.

Bei Einsatz von Stromschienen in NS-Netzen mit 5 Leitern (L1 bis L3, N, PE) besteht aufgrund ihrer Konstruktion die Möglichkeit, dass der minimale 1-polige Kurzschlussstrom nicht notwendigerweise bei Fehler Außenleiter - PE-Leiter auftritt, sondern bei Fehler Außenleiter - Neutralleiter. Umgekehrt gilt dies auch für den maximalen 1-poligen Kurzschlussstrom.

e) Asynchronmotor

In Industrie und Gewerbe werden Asynchronmotoren (ASM) zum Antrieb von Pumpen, Lüftern, Förderanlagen und als Einphasenmotor im Haushaltsbereich angewandt. Sie liefern mit sehr hohen Bemessungsleistungen Beiträge bei einem Kurzschluss zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_k'' , zum Stosskurzschlussstrom i_p , zum Ausschaltwechselstrom I_b (Indizes b steht für *breaking current*) und bei unsymmetrischen Kurzschlüssen auch zum Dauerkurzschlussstrom I_k [2]. Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines ASM ist in Bild 6 gezeigt.

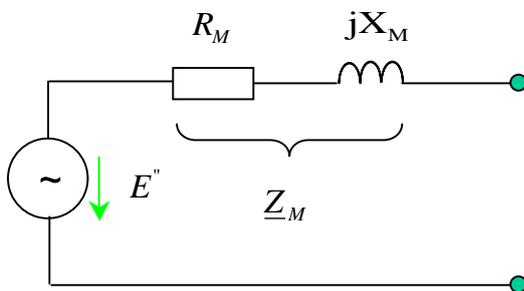


Bild 6: Ersatzschaltbild des ASM

Asynchronmotoren brauchen nur bei der Berechnung der maximalen Kurzschlussströme berücksichtigt werden. NS-Asynchronmotoren (Gruppen von Motoren) sind in Industrienetzen zu berücksichtigen.

$$Z_{(1)M} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{\sqrt{3} \cdot S_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} \quad (23)$$

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cdot \cos \varphi_{rM}} \quad (24)$$

$$X_{(1)M} = \frac{Z_{(1)M}}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (25)$$

$$R_{(1)M} = X_{(1)M} \cdot (R_M/X_M) \quad (26)$$

Dabei ist

U_{rM} die Bemessungsspannung des Motors;

S_{rM} die Bemessungsscheinleistung des Motors;

P_{rM} die Bemessungswirkleistung des Motors;

I_{rM} der Bemessungsstrom des Motors;

$\cos \varphi_{rM}$ der Nennleistungsfaktor des Motors;

η_{rM} der Nennwirkungsgrad des Motors;

I_{LR}/I_{rM} das Verhältnis Anzugsstrom / Bemessungsstrom des Motors;

$Z_{(1)M}$ die Impedanz des Motors im Mitsystem;

$R_{(1)M}$ die Resistanz des Motors im Mitsystem;

$X_{(1)M}$ die Reaktanz des Motors im Mitsystem;

R_M/X_M das R/X -Verhältnis des Motors.

Ist R_M/X_M nicht bekannt, so kann für NS-Asynchronmotorgruppen einschließlich Anschlusskabel folgende Annahme mit hinreichender Genauigkeit getroffen werden:

$R_M/X_M = 0,42$ mit $x_M = 0,922 \cdot z_M$ Motoren mit $U_n \leq 1\,000\text{ V}$

Für Mittelspannungsmotoren gilt in diesem Falle:

$R_M/X_M = 0,15$ mit $x_M = 0,989 \cdot z_M$ Motoren mit $U_n > 1\text{ kV}$ und P_n je Polpaar $< 1\text{ MW}$;

$R_M/X_M = 0,10$ mit $x_M = 0,995 \cdot z_M$ Motoren mit $U_n > 1\text{ kV}$ und P_n je Polpaar $\geq 1\text{ MW}$

5.1.2 Berechnung der Kurzschlussströme auf Basis der Kurzschlussimpedanzen im Drehstromnetz nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102)

Für die Planung und Projektierung von elektrischen Anlagen müssen die größtmöglichen Kurzschlussströme bei dreipoligem (symmetrischem) Kurzschluss und minimaler einpoliger (unsymmetrischen) Kurzschlussstrom beim einpoligen Kurzschluss berechnet werden. Die Berechnung der Kurzschlussströme erfolgt über die einschlägige Methode der symmetrischen Komponenten (Mit-, Gegen-, Nullsystem). Hierbei wird zunächst das Netz mit seinen Betriebsmitteln und deren Kurzschlussimpedanzen in Abhängigkeit von Fehlerort und Fehlerart separat im Mit-, Gegen- und Nullsystem nachgebildet. Je nach Fehlerart erfolgt dann die „Verschaltung“ der Systeme. Im Allgemeinen kann dabei das Gegensystem dem Mitsystem gleichgesetzt werden. Die Kurzschlussströme werden heute mit modernen Softwareprogrammen berechnet. Hier werden die Berechnungsgrundlagen für die Kurzschlussströme auf Basis der DIN EN 60909-0 (VDE 0102) zusammengestellt.

Für die Berechnung der jeweiligen Kurzschlussströme ergeben sich damit:

1. Dreipoliger Kurzschlussstrom I_{k3}''

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{(1)}^2 + X_{(1)}^2}} \quad (27)$$

2. Zweipoliger Kurzschlussstrom (ohne Erdberührung) I_{k2}''

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' \quad (28)$$

3. Einpoliger Kurzschlussstrom I_{k1}''

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\sqrt{(R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)})^2 + (X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)})^2}} \quad (29)$$

Mit $R_{(1)} = R_{(2)}$ und $X_{(1)} = X_{(2)}$ ergibt sich

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\sqrt{(2 \cdot R_{(1)} + R_{(0)})^2 + (2 \cdot X_{(1)} + X_{(0)})^2}} \quad (30)$$

U_n die Netznennspannung;

c der Spannungsfaktor;

$Z_{(1)}$ die Impedanz des Mitsystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

$Z_{(2)}$ die Impedanz des Gegensystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

$R_{(1)}$ die Resistanz des Mitsystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

$R_{(2)}$ die Resistanz des Gegensystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

$X_{(1)}$ die Reaktanz des Mitsystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

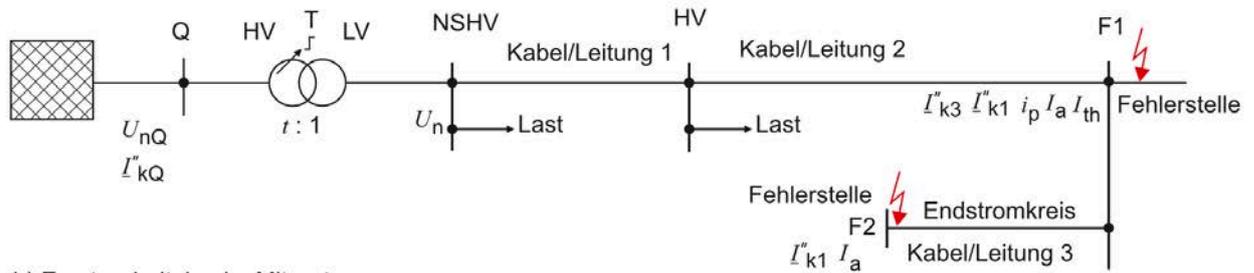
$X_{(2)}$ die Reaktanz des Gegensystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

$R_{(0)}$ die Resistanz des Nullsystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort;

$X_{(0)}$ die Reaktanz des Nullsystems von der Einspeisung bis zum Fehlerort.

Bild 7 zeigt einen Netzschaltplan mit Einspeisung, einem Transformator, Kabel und Leitungen und einem Verbraucher wie sie im Niederspannungsnetz vorkommen können. Der dreipolige- und einpolige Kurzschluss ist beispielhaft gezeigt (Bild 7, Bild 8).

a) Aufbau des Netzschaltplans



b) Ersatzschaltplan im Mitsystem

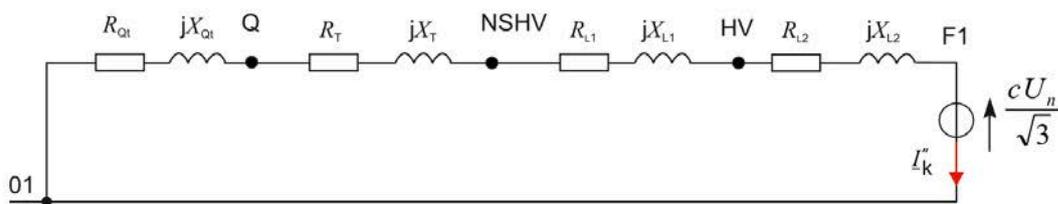


Bild 7: Nachbildung und Berechnung des 3-poligen Kurzschlussstroms in der NS-Hauptverteilung

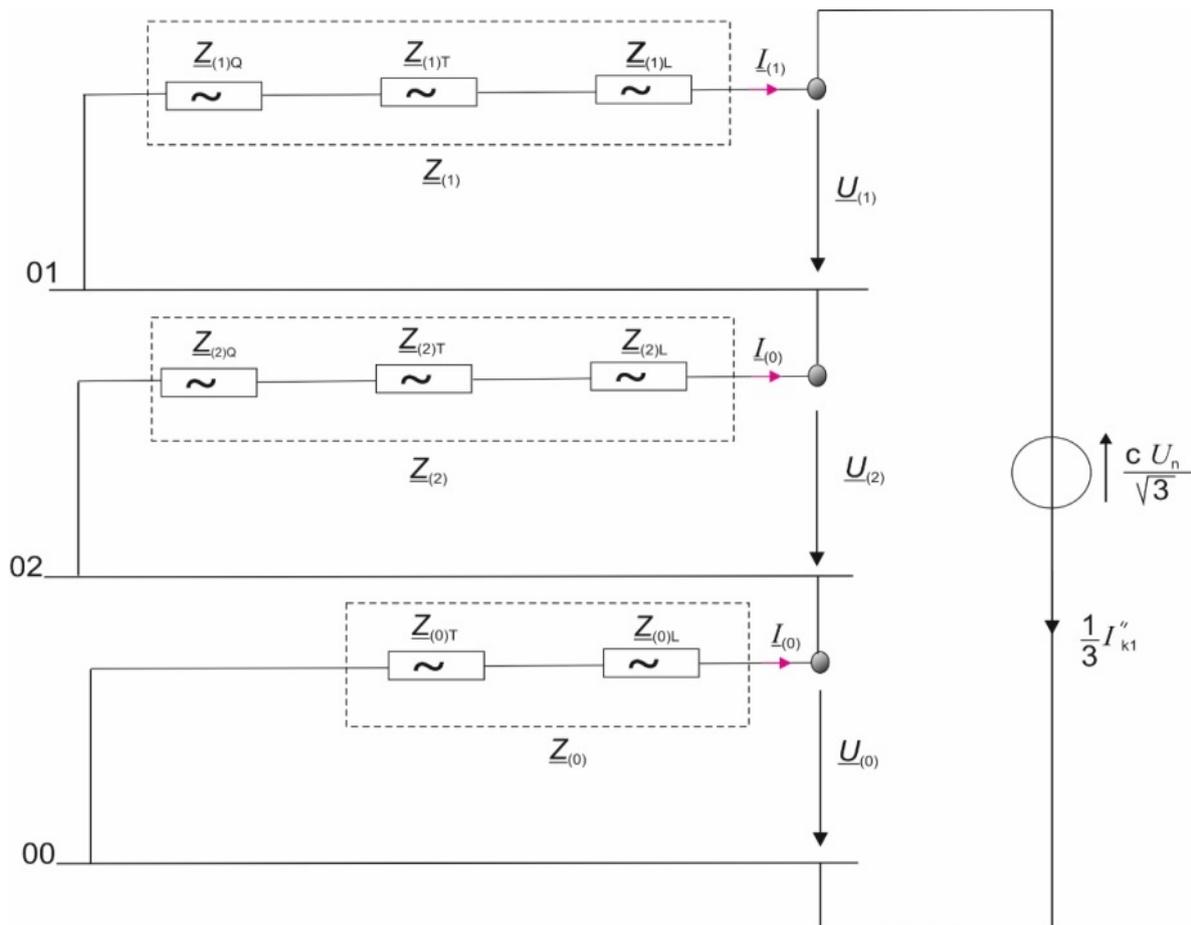


Bild 8: Nachbildung und Berechnung des 1-poligen Kurzschlussstroms in der NS-Hauptverteilung

5.1.3 Bestimmung der Schleifenimpedanz am Anschlusspunkt A des Stromkreises

In DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410), 411.4.4 (TN-System) und 411.5.4 (TT-System) ist der Begriff der Impedanz der Fehlerschleife (allgemein Schleifenimpedanz) für die Überprüfung des Fehlerschutzes eingeführt. Bild 9 zeigt das Ersatzschaltbild für die Schleifenimpedanz.

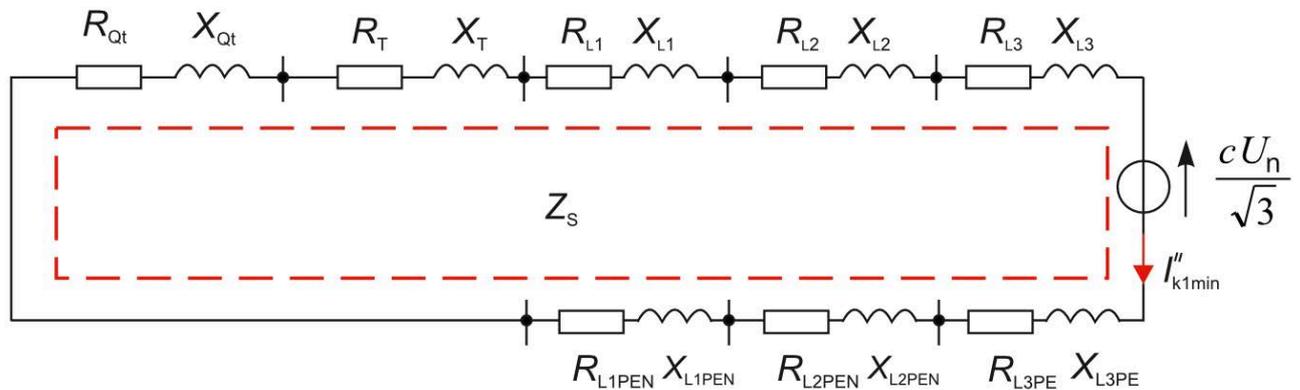


Bild 9: Ersatzschaltbild für die Schleifenimpedanz

Dabei muss folgende Bedingung erfüllt werden:

$$Z_s \leq \frac{U_0}{I_a} \quad (31)$$

Dabei ist

Z_s im TN-System: die Impedanz der Fehlerschleife (der Stromquelle, Außenleiter bis Fehlerort, Rückleiter Fehlerort bis Stromquelle);

im TT-System: die Impedanz der Fehlerschleife, bestehend aus

- der Stromquelle,
- dem Außenleiter bis zum Fehlerort,
- dem Schutzleiter der Körper,
- dem Erdungsleiter,
- dem Anlagenerder und
- dem Erder der Stromquelle;

U_0 die Nennwechselspannung zwischen Außenleiter und Erde;

I_a der das automatische Abschalten der Schutzeinrichtung in der vorgeschriebenen Zeit bewirkende Strom.

Die Werte für die Schleifenimpedanz des vorgeordneten Netzes Z_v am Anschlusspunkt A nach Bild 1 kann

- nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) mit Hilfe der symmetrischen Komponenten berechnet,

- mit Schleifenimpedanzmessgeräten gemessen (bis 16 mm² Cu/25 mm² Al),
- beim zuständigen Netzbetreiber erfragt werden.

a) Berechnen nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102)

Statt mit den symmetrischen Komponenten des Mit- und Nullsystems kann für das vorgeschaltete Netz am Knotenpunkt A (Bild 1) auch die Schleifenimpedanz des vorgeordneten Netzes Z_V in der Berechnung verwendet werden. Sie definiert sich wie folgt:

$$\underline{Z}_V = R_V + jX_V = \frac{2 \cdot R_{(1)N} + R_{(0)N}}{3} + j \frac{2 \cdot X_{(1)N} + X_{(0)N}}{3} \quad (32)$$

$$\text{ohmsche Komponente: } 2 \cdot R_{(1)N} + R_{(0)N} = 3 \cdot R_V \quad (33)$$

$$\text{induktive Komponente: } 2 \cdot X_{(1)N} + X_{(0)N} = 3 \cdot X_V \quad (34)$$

Setzt man den ohmschen Teil ($3 R_V$) und den induktiven Teil ($3 X_V$) der Netzvorimpedanz statt ($2 R_{(1)N} + R_{(0)N}$) bzw. ($2 X_{(1)N} + X_{(0)N}$) in Gleichung (32) ein, ändert sie sich in:

$$I_{k1min}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{(3 \cdot R_V + 2 \cdot R_{(1)L} + R_{(0)L})^2 + (3 \cdot X_V + 2 \cdot X_{(1)L} + X_{(0)L})^2}} \quad (35)$$

Dabei ist

$Z_V = Z_S$ die Impedanz der Fehlerschleife;

$R_V = R_S$ die Resistanz der Fehlerschleife;

$X_V = X_S$ die Reaktanz der Fehlerschleife.

Für die Berechnung nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) können die in 2.1.1 gemachten Überlegungen berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass die minimalen einpoligen Kurzschlussströme

- mit c_{min} ,
- ohne Impedanzkorrekturfaktor für Transformatoren und Generatoren,
- für die Einspeisung mit dem kleinsten Kurzschlussstrom,
- ohne motorische Anteile,
- ohne abschaltbare parallele Betriebsmittel und
- bei Leitertemperatur am Ende der Fehlerdauer

zu berechnen sind.

b) Messen mit einem Schleifenimpedanzmessgerät

Bei der Messung der Schleifenimpedanz mit einem Schleifenimpedanzmessgerät ist ein Korrekturfaktor für

- den Messfehler und die Eignung des Messgerätes (Erfassung auch des induktiven Spannungsfalls bei größeren Leiterquerschnitten $>16 \text{ mm}^2 \text{ Cu} / 25 \text{ mm}^2 \text{ Al}$),
- die Umrechnung auf die Leitertemperatur am Ende der Fehlerdauer,
- sowie die Erhöhung der Impedanzwerte durch das Abschalten paralleler Betriebsmittel bei Schwachlastbetrieb

zu berücksichtigen.

5.1.4 Beispiel: Kurzschlussberechnung

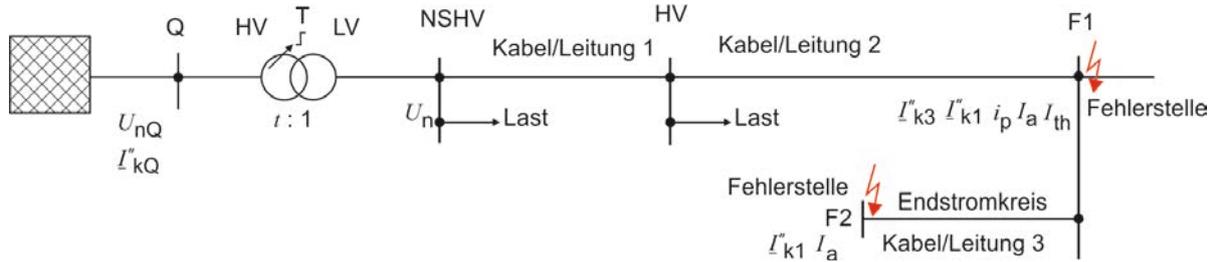


Bild 10: Schaltplan

Von einer Verteilungsanlage 20/0,4 kV, 400 / 230 V, 50 Hz wird eine Niederspannungs-Hauptverteilung (NSHV) über ein Kabel versorgt. Die Anlage enthält weitere Haupt- und Unterverteilungen (Bild 10). Der größte und kleinste Kurzschlussstrom ist an allen Knotenpunkten zu berechnen. Um den Unterschied zeigen zu können, wird der Spannungsfaktor c mit 0,95 und 0,9 und die Temperaturerhöhung für den ohmschen Widerstand bei 80°C und 160°C genommen.

Bei diesem Beispiel werden alle drei Anwendungsbereiche berechnet und die Ergebnisse mit namhaften Softwareprogrammen verglichen.

Folgende Daten des Netzse sind bekannt:

Tabelle 1: Daten des Netzes

Einspeisung Q	$U_{nQ} = 20 \text{ kV}, S''_{kQ} = 346,41 \text{ MVA}, I''_{kQ} = 10 \text{ kA},$ $c_{Q\max} = 1,1$ $R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad X_Q = 0,995 \cdot Z_Q$
Transformator T	$S_{rT} = 630 \text{ kVA}, U_{rTHV} = 20 \text{ kV}, U_{rTLV} = 400 \text{ V},$ $P_{krT} = 6,5 \text{ kW}, u_{kr} = 4\%, \text{Dyn5}, c_Q = 1,1$ $R_{(0)T} / R_T = 1,0 \quad X_{(0)T} / X_T = 0,95$
Kabel-1 K1 NSHV	NYY-J, 4x240 mm ² , Cu, $l_1 = 4\text{m}$ $R'_L = 0,077 \text{ } \Omega/\text{km}, X'_L = 0,079 \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 4 \cdot R_L, X_{(0)L} = 3,67 \cdot X_L$
Kabel-2 K2 HV	NYY-J, 4x70 mm ² , Cu, $l_2 = 50\text{m}$ $R'_L = 0,263 \text{ } \Omega/\text{km}, X'_L = 0,082 \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 4 \cdot R_L, X_{(0)L} = 3,66 \cdot X_L$
Kabel-2 K3 UV (Endstromkreis)	NYM-J, 3x2,5 mm ² , Cu, $l_2 = 35\text{m}$ $R'_L = 7,410 \text{ } \Omega/\text{km}, X'_L = 0,11 \text{ } \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 4 \cdot R_L, X_{(0)L} = 3,66 \cdot X_L$

I. Berechnung für den Anwendungsbereich 1

Lösungen:

In der Formel $I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$ ist die Kurzschlussimpedanz Z_k unbekannt. Wie immer müssen zuerst alle Resistenzen und Reaktanzen der Betriebsmittel ermittelt werden. Die Zusammensetzung dieser Kurzschlussimpedanz ändert sich abhängig von der Art des Kurzschlussstromes. Die Anwendung der symmetrischen Komponenten ist unumgänglich. An der Fehlerstelle wird nur die Ersatzspannungsquelle eingesetzt, d.h. alle anderen Spannungsquellen werden hinter ihren Innenimpedanzen kurzgeschlossen. Die Kurzschlussimpedanz ist dann die Summe der Impedanzen aller Betriebsmittel von Spannungsquelle bis zur Fehlerstelle. Dabei ist die Anwendung der komplexen Rechenmethode erforderlich. Die Kennzeichnung der komplexen Größe wird durch Unterstreichen dargestellt.

Berechnung der Mitimpedanzen:

A) Netzeinspeisung

Die Kurzschlussimpedanz des Netzes wird auf die Niederspannungseite umgerechnet:

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kA}} \cdot \left(\frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = 0,508 \text{ m}\Omega \quad \text{oder}$$

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{kQ}''} = \frac{1,1 \cdot (0,4 \text{ kV})^2}{346,41 \text{ MVA}} = 0,508 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Qt} = 0,995 \cdot Z_{Qt} = 0,505 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,1 \cdot X_Q = 0,1 \cdot 0,505 \text{ m}\Omega = 0,0505 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{Qt} = (0,0505 + j0,505) \text{ m}\Omega$$

B) Impedanzen des Transformators

Die Transformatorimpedanz wird mit den Daten des jeweiligen Transformators ermittelt.

$$Z_T = \frac{u_{krT} \cdot U_{rTLV}^2}{100\% \cdot S_{rT}} = \frac{4\% \cdot (400 \text{ V})^2}{100\% \cdot 630 \text{ kVA}} = 10,15 \text{ m}\Omega$$

$$R_T = \frac{P_{krT} \cdot U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = \frac{6,5 \text{ kW} \cdot (400 \text{ V})^2}{(630 \text{ kVA})^2} = 2,62 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(10,15^2 - 2,62) \text{ m}\Omega} = 9,8 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_T = (2,62 + j9,8) \text{ m}\Omega$$

C) Impedanzen der Kabel und Leitungen

Die Impedanz der Kabel und Leitungen kann aus Datenblättern der Hersteller oder aus Leiterdaten nach Formeln berechnet werden. Man soll dabei beachten, dass in der Literatur abweichende Angaben vorkommen können. Dadurch können Hand- und Softwareergebnisse unterschiedliche Werte aufweisen.

Für den dreipoligen Kurzschlussstrom wird der Temperatureinfluss auf die Leitungsresistenz (Ohmscher Widerstand) bei 20°C und für den einpoligen minimalen Kurzschlussstrom 80°C eingesetzt.

1) Kabel 1 für 20°C

$$\underline{Z}_{K1} = (R + jX) \cdot l = (0,077 + j0,079) \Omega / \text{km} \cdot 4 \text{ m}, \underline{Z}_{K1} = (0,308 + j0,316) \text{ m}\Omega$$

2) Kabel 2 für 20°C :

$$\underline{Z}_{K2} = (R + jX) \cdot l = (0,263 + j0,082) \Omega / \text{km} \cdot 50 \text{ m}$$

$$\underline{Z}_{K2} = (13,15 + j4,1) \text{ m}\Omega$$

Bei 80°C

$$R_L = \left[1 + \alpha(\Theta_e - 20^\circ \text{C}) \right] \cdot R_{L20} = \left[1 + 0,004 / \text{K} \cdot (80^\circ \text{C} - 20^\circ \text{C}) \right] \cdot R_{L20}$$

$$R_L = 1,24 \cdot R_{L20}$$

1) Kabel 1 für 80°C

$$\underline{Z}_{K1} = (0,308 \cdot 1,24 + j0,316) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{K1} = (0,382 + j0,316) \text{ m}\Omega$$

2) Kabel 2 für 80°C

$$\underline{Z}_{K2} = (R + jX) \cdot l = (0,326 + j0,082) \text{ } \Omega / \text{ km} \cdot 50 \text{ m},$$

$$\underline{Z}_{K2} = (16,3 + j4,1) \text{ m}\Omega$$

3) Kabel 3 für 80°C

$$R_{K3} = 1,24 \cdot R'_L \cdot l_3 = 1,24 \cdot 7,41 \frac{\Omega}{\text{ km}} \cdot 35 \text{ m} = 322 \text{ m}\Omega$$

$$X_{K3} = X'_L \cdot l_3 = 0,11 \frac{\Omega}{\text{ km}} \cdot 35 \text{ m} = 3,85 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{K3} = (322 + j3,85) \text{ m}\Omega$$

Alternative Berechnung bei 160°C

1) Kabel 1 für 160°C

$$R_{K1} = 1,56 \cdot R_{L1} = 1,56 \cdot 308 \text{ m}\Omega = 0,480 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{K1} = (0,480 + j0,316) \text{ m}\Omega$$

2) Kabel 2 für 160°C

$$R_{K2} = 1,56 \cdot R_{L2} = 1,56 \cdot 13,15 \text{ m}\Omega = 20,514 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{K2} = (20,514 + j0,316) \text{ m}\Omega$$

3) Kabel 3 für 160°C

$$R_{K3} = 1,56 \cdot R'_L \cdot l_3 = 1,56 \cdot 7,41 \frac{\Omega}{\text{ km}} \cdot 35 \text{ m} = 405 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{K3} = (405 + j3,85) \text{ m}\Omega$$

E) Nullimpedanzen

1) Transformator

Das Nullsystem tritt nur dann auf wenn die Transformatoren in der Niederspannung direkt geerdet werden (z.B. Dyn5). In einem einpoligen Fehler fließt der Kurzschlussstrom über den Schutzleiter/Neutralleiter (PEN, PE) oder Erdreich zur Quelle und dann über den Außenleiter wieder zur Fehlerstelle zurück. Das Verhältnis von Null- Mitimpedanzen in Abhängigkeit von der Schaltgruppe ist im Beiblatt Tabelle A.1 enthalten.

$$R_{(0)T} = R_T, R_{(0)T} = 2,62 \text{ m}\Omega$$

$$X_{(0)T} = 0,95 \cdot X_T, X_{(0)T} = 0,95 \cdot 9,8 \text{ m}\Omega = 9,31 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)T} = (2,62 + j9,31) \text{ m}\Omega$$

2) Kabel und Leitungen

Nullimpedanzen von Kabeln und Leitungen mit den Nullwiderstandsbelägen sind im Beiblatt 5 Tabelle A.8 oder in DIN EN 60909-0: Beiblatt 4 enthalten. Wie zuvor erwähnt, findet man in der Lietartur unterschiedliche Angaben über Nullimpedanzen.

a) Kabel-1 bei 80°C

$$R_{(0)L} = 4 \cdot R_L = 1,568 \text{ m}\Omega,$$

$$X_{(0)L} = 3,67 \cdot X_L = 1,16 \text{ m}\Omega,$$

$$\underline{Z}_{(0)L1} = (1,568 + j1,16) \text{ m}\Omega$$

b) Kabel-2 bei 80°C

$$R_{(0)L2} = 4 \cdot R_{L2} = 4 \cdot 16,3 = 65,2 \text{ m}\Omega, \quad X_{(0)L2} = 3,67 \cdot X_{L2} = 3,66 \cdot 4,1 = 15 \text{ m}\Omega,$$

$$\underline{Z}_{(0)L2} = (65,2 + j15) \text{ m}\Omega$$

c) Kabel-3 bei 80°C

$$R_{(0)K3} = 4 \cdot R_{L2} = 4 \cdot 322m\Omega = 1288m\Omega$$

$$X_{(0)K3} = 3,66 \cdot X_{L2} = 3,66 \cdot 3,85m\Omega = 14,09m\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)K3} = (1288 + j14,09)m\Omega$$

e) Kabel-1 bei 160°C

$$R_{(0)K1} = 4 \cdot R_{L1} = 4 \cdot 0,480m\Omega = 12,92m\Omega$$

$$X_{(0)K1} = 3,67 \cdot X_{L1} = 3,67 \cdot 0,316m\Omega = 1,160m\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)K1} = (12,92 + j1,160)m\Omega$$

f) Kabel-2 bei 160°C

$$R_{(0)K2} = 4 \cdot R_{L2} = 4 \cdot 20,514m\Omega = 82,056m\Omega$$

$$X_{(0)K2} = 3,66 \cdot X_{L2} = 3,66 \cdot 4,1m\Omega = 15,066m\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)K2} = (82,056 + j15,066)m\Omega$$

g) Kabel-3 bei 160°C

$$R_{(0)K3} = 4 \cdot R_{L3} = 4 \cdot 405m\Omega = 1620m\Omega$$

$$X_{(0)K3} = 3,66 \cdot X_{L3} = 3,66 \cdot 3,85m\Omega = 14,09m\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)K3} = (1620 + j14,09)m\Omega$$

F) Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstromes I''_{k3} :

Der dreipolige Kurzschluss ist ein symmetrischer Fehler. In allen der drei Außenleitern (L1-L2-L3) tritt der gleiche Kurzschlussbetrag auf, die Phasenlage ist um jeweils 120° gedreht. Deshalb kann der Kurzschlussstrom nur für einen Leiter im Mitsystem im Prinzip mit dem Ohmschen Gesetz berechnet werden. Alle anderen Kurzschlüsse sind unsymmetrisch und die Ströme in den Leitern sind unterschiedlich. Für die Berechnung dieser Ströme wird das Verfahren der Symmetrischen Komponenten eingesetzt.

1) Berechnung I''_{k3} an Knoten NSHV

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{KNSHV} &= \underline{Z}_{QT} + \underline{Z}_T = (0,0505 + j0,505)m\Omega + (2,62 + j9,86)m\Omega \\ &= (2,67 + j10,365)m\Omega\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{KNSHV} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(2,67^2 + 10,365^2)}m\Omega = 10,708m\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot Z_{KNSHV}} = \frac{1,1 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 10,708m\Omega} = 23,724kA$$

2) Berechnung I''_{k3} an Knoten HV

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{KHV} &= \underline{Z}_{KNSHV} + \underline{Z}_{K1} = (2,67 + j10,365)m\Omega + (0,308 + j0,316)m\Omega \\ &= (2,98 + j10,681)m\Omega\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{KHV} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(2,98^2 + 10,681^2)}m\Omega = 11,148m\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot Z_{KHV}} = \frac{1,1 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 11,148m\Omega} = 22,787kA$$

3) Berechnung I''_{k3} an Knoten F1

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{F1} &= \underline{Z}_{KHV} + \underline{Z}_{K2} = (2,98 + j10,681)m\Omega + (13,15 + j4,1)m\Omega \\ &= (16,13 + j14,781)m\Omega\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{KF1} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(16,13^2 + 14,781^2)}m\Omega = 21,878m\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot Z_{KF1}} = \frac{1,1 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 21,878m\Omega} = 10,195kA$$

(Werte weichen etwas von den obigen ab)

$$\underline{Z}_K = \underline{Z}_{Qt} + \underline{Z}_T + \underline{Z}_{K1} + \underline{Z}_{K2} = (16,128 + j14,721) \text{ m}\Omega$$

$$Z_K = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{16,128m\Omega^2 + 14,721m\Omega^2} = 21,836 \text{ m}\Omega$$

$$Z_K = 21,836 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = \frac{1,1 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 21,836 \text{ m}\Omega} = 11,63 \text{ kA}$$

Berechnung des Stoßkurzschlussstromes:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3} \text{ und } \kappa = 1,02 + 0,98e^{(-3R/X)}$$

1) Berechnung am Knoten NSHV

$$I_p = [1,02 + 0,98e^{-3(0,258)}] \cdot \sqrt{2} \cdot 23,724kA = 49,38kA$$

2) Berechnung am Knoten HV

$$I_p = [1,02 + 0,98e^{-3(0,279)}] \cdot \sqrt{2} \cdot 22,787kA = 46,55kA$$

3) Berechnung am Knoten F1

$$I_p = [1,02 + 0,98e^{-3(1,09)}] \cdot \sqrt{2} \cdot 10,195kA = 15,24kA$$

$$i_p = 1,05 \cdot \sqrt{2} \cdot 11,63 \text{ kA} = 17,27 \text{ kA}$$

G) Berechnung des zweipoligen Kurzschlussstromes I''_{k2} :

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 11,63 \text{ kA} = 10,07 \text{ kA}$$

H) Berechnung des minimalen Kurzschlussstromes $I''_{k1\min}$

Berechnung des $I''_{k1\min}$ bei 80°C

1) Berechnung an Knoten NSHV

$$\begin{aligned} R_{NSHV} &= 2 \cdot (R_{QT} + R_T) + R_{(0)T} \\ &= (2 \cdot (0,0505 + 2,62) + 2,62) \text{ m}\Omega = 7,961 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{NSHV} &= 2 \cdot (X_{QT} + X_T) + X_{(0)T} \\ &= (2 \cdot (0,505 + 9,86) + 9,37) \text{ m}\Omega = 30,1 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$Z_{NSHV} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(30,1^2 + 7,961^2)} \text{ m}\Omega = 31,135 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}}{Z_{NSHV}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}}{31,135 \text{ m}\Omega} = 21,14 \text{ kA}$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}}{Z_{NSHV}} = \frac{0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}}{31,135 \text{ m}\Omega} = 20 \text{ kA}$$

3) Berechnung an Knoten HV

$$\begin{aligned} R_{HV} &= R_{NSHV} + 2 \cdot R_{K1} + R_{(0)K1} \\ &= (7,961 + 2 \cdot 0,308 + 1,528) \text{ m}\Omega = 10,105 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{HV} &= X_{NSHV} + 2 \cdot X_{K1} + X_{(0)X1} \\ &= (30,1 + 2 \cdot 0,316 + 1,159) \text{ m}\Omega = 31,891 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$Z_{HV} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(10,105^2 + 31,891^2)} \text{ m}\Omega = 33,454 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{HV}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{33,454m\Omega} = 19,67kA$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{HV}} = \frac{0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{33,454m\Omega} = 18,63kA$$

$$\begin{aligned} \sum R_k &= 2R_Q + 2R_T + 2R_{L1} + 2R_{L2} + R_{0T} + R_{0L1} + R_{0L2} \\ &= 2 \cdot 0,0505m\Omega + 2 \cdot 2,62m\Omega + 2 \cdot 0,392m\Omega + 2 \cdot 21,1m\Omega + 2,62m\Omega + 1,568m\Omega + 65,2m\Omega = 117,713 m\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum X_k &= 2X_Q + 2X_T + 2X_{L1} + 2X_{L2} + X_{0T} + X_{0L1} + X_{0L2} \\ &= 2 \cdot 0,505m\Omega + 2 \cdot 2,98m\Omega + 2 \cdot 0,316m\Omega + 2 \cdot 4,1m\Omega + 9,31m\Omega + 1,16m\Omega + 15m\Omega = 41,27 m\Omega \end{aligned}$$

$$Z_K = \sqrt{\sum R_L^2 + \sum X_L^2} = \sqrt{117,713m\Omega^2 + 41,27m\Omega^2} = 124,74m\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{Z_k} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot 400 V}{124,74 m\Omega} = 5,27 kA$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{Z_k} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 400 V}{124,74 m\Omega} = 4,99 kA$$

4) Berechnung an Knoten F1

$$\begin{aligned} R_{F1} &= R_{HV} + 2 \cdot R_{K2} + R_{(0)K2} \\ &= (10,105 + 2 \cdot 16,306 + 65,224)m\Omega = 107,941m\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{F1} &= X_{HV} + 2 \cdot X_{K2} + X_{(0)X2} \\ &= (31,891 + 2 \cdot 4,1 + 15,066)m\Omega = 55,157m\Omega \end{aligned}$$

$$Z_{F1} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(107,941^2 + 55,157^2)m\Omega} = 121,217m\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F1}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{121,217m\Omega} = 5,43kA$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F1}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{121,217m\Omega} = 5,14kA$$

5) Berechnung an Knoten F2

$$\begin{aligned} R_{F2} &= R_{F1} + 2 \cdot R_{K3} + R_{(0)K3} \\ &= (107,941 + 2 \cdot 322 + 1288)m\Omega = 2039,94m\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{F2} &= X_{F1} + 2 \cdot X_{K3} + X_{(0)X3} \\ &= (55,157 + 2 \cdot 3,85 + 14,09)m\Omega = 76,947m\Omega \end{aligned}$$

$$Z_{F2} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(2039,94^2 + 76,947^2)m\Omega} = 2041,39m\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F2}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{2041,39m\Omega} = 322A$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F2}} = \frac{0,90 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{2041,39m\Omega} = 305,44 A$$

Berechnung des I''_{k1min} bei 160°C

1) Berechnung an Knoten HV

$$\begin{aligned} R_{HV} &= R_{NSHV} + 2 \cdot R_{K1} + R_{(0)K1} \\ &= (7,961 + 2 \cdot 0,480 + 1,92)m\Omega = 10,841m\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{HV} &= X_{NSHV} + 2 \cdot X_{K1} + X_{(0)X1} \\ &= (30,1 + 2 \cdot 0,316 + 1,16)m\Omega = 31,892m\Omega \end{aligned}$$

$$Z_{HV} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(10,841^2 + 31,892^2)m\Omega} = 33,684m\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{HV}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{33,684m\Omega} = 19,54kA$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{HV}} = \frac{0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{33,684m\Omega} = 18,51 kA$$

2) Berechnung an Knoten F1

$$R_{F1} = R_{HV} + 2 \cdot R_{K2} + R_{(0)K2}$$
$$= (10,841 + 2 \cdot 20,514 + 82,056) \text{m}\Omega = 133,925 \text{m}\Omega$$

$$X_{F1} = X_{HV} + 2 \cdot X_{K2} + X_{(0)X2}$$
$$= (33,684 + 2 \cdot 4,1 + 15,066) \text{m}\Omega = 55,157 \text{m}\Omega$$

$$Z_{F1} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(133,925^2 + 55,157^2)} \text{m}\Omega = 144,839 \text{m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F1}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{144,839 \text{m}\Omega} = 4,54 \text{kA}$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F1}} = \frac{0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{144,839 \text{m}\Omega} = 4,3 \text{kA}$$

3) Berechnung an Knoten F2

$$R_{F2} = R_{F1} + 2 \cdot R_{K3} + R_{(0)K3}$$
$$= (133,925 + 2 \cdot 405 + 1620) \text{m}\Omega = 2563,925 \text{m}\Omega$$

$$X_{F2} = X_{F1} + 2 \cdot X_{K3} + X_{(0)X3}$$
$$= (55,157 + 2 \cdot 3,85 + 14,091) \text{m}\Omega = 76,948 \text{m}\Omega$$

$$Z_{F2} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(2563,925^2 + 76,948^2)} \text{m}\Omega = 2565,079 \text{m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F2}} = \frac{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{2565,079 \text{m}\Omega} = 256,6 \text{A}$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{Z_{F2}} = \frac{0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 400V}{2565,079 \text{m}\Omega} = 243 \text{A}$$

II. Anwendungsbereich 2

Für den Anwendungsbereich II werden einige Vereinfachungen getroffen. Auch hier wird geprüft, ob der berechnete Kurzschlussstrom kleiner ist als der tatsächlich fließende Kurzschlussstrom. Bei dieser Methode wird auf die komplexe Rechnung verzichtet. Es werden nur einzelne Beträge der Impedanzen von Betriebsmitteln bestimmt.

1) Einspeisung:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}^2}{S_{kQ}''} = \frac{1,1 \cdot (400 \text{ V})^2}{346,41 \text{ MVA}} = 0,508 \text{ m}\Omega$$

2) Transformator:

$$Z_T = \frac{u_{kr} \cdot U_{rT}^2}{100\% \cdot S_{rT}} = \frac{4\% \cdot (400 \text{ V})^2}{100\% \cdot 630 \text{ kVA}} = 10,15 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{kNSHV}} = \frac{1,1 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 10,658 \text{ m}\Omega} = 23,83 \text{ kA}$$

3) Kabel 1 bei 20 °C

$$\underline{Z}_{K1} = (0,308 + j0,316) \text{ m}\Omega$$

$$Z = 0,441 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{kHV}} = \frac{1,1 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 11,099 \text{ m}\Omega} = 22,88 \text{ kA}$$

4) Kabel 2 bei 20 °C

$$\underline{Z}_{K2} = (13,15 + j4,1) \text{ m}\Omega$$

$$Z = 13,77 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUV}} = \frac{1,1 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 24,869 \text{ m}\Omega} = 10,21 \text{ kA}$$

5) Kabel 1 bei 80 °C

$$Z_{L1} = 2 \cdot Z'_{L1} \cdot l = 2 \cdot 0,124 \Omega / \text{km} \cdot 0,004 \text{ km} = 0,992 \text{ m}\Omega$$

6) Kabel 2 bei 80 °C

$$Z_{L2} = 2 \cdot Z'_{L2} \cdot l = 2 \cdot 0,346 \Omega / \text{km} \cdot 0,050 \text{ km} = 34,6 \text{ m}\Omega$$

8) Gesamtimpedanz für I'k3

$$Z_K = Z_Q + Z_T + Z_{K1} + Z_{K2} = 0,508 \text{ m}\Omega + 10,15 \text{ m}\Omega + 0,441 \text{ m}\Omega + 13,77 \text{ m}\Omega = 24,87 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = \frac{1,1 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 24,87 \text{ m}\Omega} = 10,21 \text{ kA}$$

7) Gesamtimpedanz I'k1

$$Z_K = Z_Q + Z_T + Z_{K1} + Z_{K2} = 0,508 \text{ m}\Omega + 10,15 \text{ m}\Omega + 0,99 \text{ m}\Omega + 33,6 \text{ m}\Omega = 45,248 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 45,248 \text{ m}\Omega} = 4,84 \text{ kA}$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = \frac{0,9 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 45,248 \text{ m}\Omega} = 4,6 \text{ kA}$$

III. Anwendungsbereich 3

In Wohngebäuden werden elektrische Anlagen ab dem Hausanschlusskasten ausgeführt. Dafür stehen umfangreiche DIN Normen zur Verfügung. Außerdem schreibt TAB vor welche Art der Erdverbindung, Schutzeinrichtungen, Kabel und Leitungen und Betriebsmittel installiert werden. Man kann also nicht falsch machen, da für die Sicherheit der elektrischen Anlage maximale Leitungslängen angegeben sind.

Für die Auslegung von Kabel- und Leitungsanlagen sowie den Überstrom-Schutzeinrichtungen für Industrieanlagen, Wohngebäude und ähnlich genutzte Gebäude steht das Beiblatt 2 zu DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520) zur Verfügung.

Hier müssen Auswahltabellen für die Grenzlängen von Kabeln und Leitungen und Gerätekenngößen mit spezifizierten Randparametern benutzt werden.

An der Unterverteilung wird ein Steckdosenstromkreis installiert. Es soll überschlägig überprüft werden, ob der Leitungsquerschnitt und die Auswahl der Überstromschutzeinrichtung richtig durchgeführt sind und die Schutzmaßnahme „Schutz durch Abschaltung“ eingehalten wird.

Nach DIN VDE 0100-600 werden die Endstromkreise gemessen. In heutiger Zeit ist es möglich mit teuren Messgeräten die ohmschen und induktiven Widerstände und daraus resultierenden alle Kurzschlussarten zu ermitteln. Bei der Messung muss es klar sein, dass die Einflussfaktoren auf den Widerstand noch berücksichtigt werden müssen.

An der Unterverteilung beträgt die Vorimpedanz 45,248 mΩ.

Zuerst werden die Daten der Leitung (Endstromkreis) ermittelt.

a) Widerstand des Leiters:

$$R_{L+PE} = 1,24 \cdot \frac{2 \cdot l_3}{\kappa \cdot S} = 1,24 \cdot \frac{2 \cdot 35 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} \cdot 2,5 \text{ mm}^2} = 620 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L+PE} \approx x' \cdot 2l_3 = 0,082 \text{ m}\Omega / \text{m} \cdot 2 \cdot 35 \text{ m} = 5,74 \text{ m}\Omega$$

b) Reaktanz wird vernachlässigt, da 620 mΩ > 5,74 mΩ

c) Gesamtimpedanz:

$$Z_S = Z_V + R_{L+PE}$$

$$Z_S = 45,248 \text{ m}\Omega + 620 \text{ m}\Omega = 665,248 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1\min} = I_F = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_S} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 665,248 \text{ m}\Omega} = 329,8 \text{ A}$$

$$I''_{k1\min} = I_F = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_S} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 665,248 \text{ m}\Omega} = 312,43 \text{ A}$$

Mit der Abschaltbedingung:

$$I''_{k1\min} > I_a$$

und Abschaltstrom des Leitungsschutzschalters B16A

$$I_a = 5 \cdot I_n = 5 \cdot 16 \text{ A} = 80 \text{ A}$$

Erhält man

$$329,8 \text{ A} (312,43 \text{ A}) > 80 \text{ A}$$

Damit ist die Schutzmaßnahme „Schutz durch Abschaltung“ erfüllt.