

	DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3)	
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	

ICS 17.220.01

Ersatz für

**DIN EN 60909-3
(VDE 0102-3):2004-05**

Siehe jedoch Beginn der Gültigkeit

**Kurzschlussströme in Drehstromnetzen –
Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme
über Erde
(IEC 60909-3:2009);
Deutsche Fassung EN 60909-3:2010**

Short-circuit currents in three-phase a.c. systems –
Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short-circuits and
partial short-circuit currents flowing through earth
(IEC 60909-3:2009);
German version EN 60909-3:2010

Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif –
Partie 3: Courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés
à la terre et courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre
(CEI 60909-3:2009);
Version allemande EN 60909-3:2010

Gesamtumfang 60 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2010-03-01 angenommene EN 60909-3 gilt als DIN-Norm ab 2010-08-01.

Daneben darf **DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3):2004-05** noch bis 2013-03-01 angewendet werden.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3):2007-09.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium UK 121.1 „Kurzschluss-Strom-Berechnung“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 73 „Short-circuit currents“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (maintenance result date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Diese Norm muss in Verbindung mit **DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07** gelesen werden.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60909-3 (VDE 0102):2004-05** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) neue Verfahren zur Berechnung von Reduktionsfaktoren für metallische Schirme und Mäntel sowie zur Berechnung der Stromverteilung über Erde und Schirme bzw. Mäntel von dreiadrigen Kabeln sowie von drei einadrigen Kabeln mit metallischen, unmagnetischen Schirmen bzw. Mänteln bei beidseitiger Erdung;
- b) geänderte Berechnung für Reduktionsfaktoren von Freileitungen mit Erdseilen im neuen Abschnitt 7;
- c) neuer Abschnitt 8 über die Berechnung der Stromverteilung und des Reduktionsfaktors bei Kabeln mit beidseitig geerdeten, metallischen Mänteln oder Schirmen;
- d) neuer Anhang C mit einem Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_1 und die Stromverteilung durch Erde bei einem Dreileiterkabel;
- e) neuer Anhang D mit einem Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung durch Erde bei drei Einleiterkabeln.

Frühere Ausgaben

DIN IEC 60909-3 (VDE 0102-3): 1997-06

DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3): 2004-05

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60909-0:2001	IEC 60909-0:2001 + Corrigendum1:2002	DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07	VDE 0102
–	IEC/TR 60909-2:2008	DIN EN 60909-0 Bbl 4 (VDE 0102 Bbl 4):2009-08	VDE 0102

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0:2001); Deutsche Fassung EN 60909-0:2001*

DIN EN 60909-0 Bbl 4 (VDE 0102 Bbl 4):2009-08 Beiblatt 4, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Daten elektrischer Betriebsmittel für die Berechnung von Kurzschlussströmen (IEC/TR 60909-2:2008)*

– Leerseite –

Deutsche Fassung

**Kurzschlussströme in Drehstromnetzen –
Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde**
(IEC 60909-3:2009)

Short-circuit currents in three-phase
a.c. systems –
Part 3: Currents during two separate
simultaneous line-to-earth short-circuits
and partial short-circuit currents flowing
through earth
(IEC 60909-3:2009)

Courants de court-circuit dans les réseaux
triphases à courant alternatif –
Partie 3: Courants durant deux
courts-circuits monophasés simultanés
séparés à la terre et courants
de court-circuit partiels s'écoulant
à travers la terre
(CEI 60909-3:2009)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2010-03-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 73/148/FDIS, zukünftige 3. Ausgabe von IEC 60909-3, ausgearbeitet von dem IEC/TC 73 „Short-circuit currents“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2010-03-01 als EN 60909-3 angenommen.

Diese Norm muss in Verbindung mit EN 60909-0:2001 angewendet werden.

Diese Europäische Norm ersetzt EN 60909-3:2003.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zu EN 60909-3:2003 sind die folgenden:

- neue Verfahren werden eingeführt für die Berechnung von Reduktionsfaktoren der Mäntel oder Schirme und auch zur Berechnung der Stromverteilung durch Erde und Mäntel oder Schirme von Dreileiterkabeln oder von drei Einleiterkabeln mit metallischen nicht-magnetischen Mänteln oder Schirmen bei Erdung an beiden Enden;
- im neuen **Abschnitt 7** werden die Angaben für die Berechnung des Reduktionsfaktors von Freileitungen mit Erdseilen korrigiert;
- ein neuer **Abschnitt 8** wird eingeführt für die Berechnung der Stromverteilung und des Reduktionsfaktors von Dreileiterkabeln mit an beiden Enden geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen;
- die neuen **Anhänge C** und **D** geben Beispiele für die Berechnung von Reduktionsfaktoren und Stromverteilung bei Kabeln mit beidseitig geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN und CENELEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2010-12-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2013-03-01

Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60909-3:2009 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	2
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Formelzeichen	9
5 Berechnung der Ströme bei Doppelerdkurzschluss	11
5.1 Anfangs-Kurzschlusswechselstrom.....	11
5.2 Stoßkurzschlussstrom, Ausschaltwechselstrom und Dauerkurzschlussstrom	13
5.3 Verteilung der über Erde fließenden Ströme bei Doppelerdkurzschluss	13
6 Berechnung der Teilkurzschlussströme über Erde bei unsymmetrischen Kurzschlüssen.....	14
6.1 Allgemeines	14
6.2 Erdkurzschluss innerhalb einer Station	14
6.3 Erdkurzschluss weit außerhalb einer Station	16
6.4 Erdkurzschluss in der Nähe einer Station	17
7 Reduktionsfaktor für Freileitungen mit Erdseilen.....	19
8 Berechnung der Stromverteilung und des Reduktionsfaktors bei Kabeln mit beidseitig geerdeten, metallischen Mänteln oder Schirmen	21
8.1 Überblick.....	21
8.2 Dreileiterkabel.....	21
8.3 Drei Einleiterkabel	26
Anhang A (informativ) Beispiel zur Berechnung eines Doppelerdkurzschlussstromes.....	30
A.1 Überblick.....	30
A.2 Daten	30
A.3 Berechnungen	31
Anhang B (informativ) Beispiele zur Berechnung von Teilkurzschlussströmen über Erde	32
B.1 Überblick.....	32
B.2 Daten	32
B.3 Erdkurzschluss innerhalb einer Anlage	33
B.4 Erdkurzschluss außerhalb einer Anlage.....	35
B.5 Erdkurzschluss in der Nähe einer Station	38
Anhang C (informativ) Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_1 und die Stromverteilung durch Erde bei einem Dreileiterkabel	42
C.1 Überblick.....	42
C.2 Erdkurzschluss am Ende des Kabels	42
C.2.1 Daten	42
C.2.2 Impedanzbeläge des Kabels	42
C.2.3 Kurzschlussströme	43
C.2.4 Reduktionsfaktor, Strom im Schirm und Strom durch die Erde.....	43

	Seite
C.3 Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B	45
C.3.1 Anordnung und Daten.....	45
C.3.2 Berechnungsergebnisse	45
Anhang D (informativ) Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung durch Erde bei drei Einleiterkabeln	47
D.1 Überblick.....	47
D.2 Erdkurzschluss am Ende des Kabels	47
D.2.1 Daten	47
D.2.2 Kabelimpedanzbeläge	47
D.2.3 Kurzschlussströme.....	48
D.2.4 Reduktionsfaktor und Stromverteilung.....	49
D.3 Erdkurzschluss auf einem der drei Einleiterkabel zwischen den Stationen A und B	50
D.3.1 Anordnung und Daten.....	50
D.3.2 Kurzschlussströme.....	51
D.3.3 Stromverteilung im Falle $R_{EF} \rightarrow \infty$	51
D.3.4 Stromverteilung im Falle $R_{EF} = 5 \Omega$	53
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen.....	56
 Bilder	
Bild 1 – Eingangsimpedanz Z_P einer unendlich langen Kette, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $Z_Q = Z'_Q d_T$ und dem Ausbreitungswiderstand R_T der Maste mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten.....	8
Bild 2 – Eingangsimpedanz Z_{Pn} einer endlichen Kette von n Masten, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $Z_Q = Z'_Q d_T$, dem Ausbreitungswiderstand R_T der Maste mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten und der Erdungsimpedanz Z_{EB} einer Anlage B nach Gleichung (29)	9
Bild 3 – Darstellung des Doppelerdkurzschlusses und der Ströme I''_{KEE}	11
Bild 4 – Teilkurzschlussströme bei einem Erdkurzschluss innerhalb der Station B	14
Bild 5 – Teilkurzschlussströme bei Erdkurzschluss an einem Freileitungsmast T	16
Bild 6 – Verteilung des Erdersummenstromes I_{ETtot}	17
Bild 7 – Teilkurzschlussströme bei Erdkurzschluss an einem Mast n einer Freileitung in der Nähe der Anlage B	18
Bild 8 – Reduktionsfaktor r für Freileitungen mit nichtmagnetischen Erdseilen abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ	21
Bild 9 – Reduktionsfaktor von Dreileiterkabeln	23
Bild 10 – Reduktionsfaktor für drei Einleiter-Energiekabel	27
Bild A.1 – Doppelerdkurzschluss auf einer einfach gespeisten Freileitung	30
Bild B.1 – Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B. Netzschaltplan mit den Anlagen A, B und C	33

	Seite
Bild B.2 – Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B. Mit-, Gegen- und Nullsystem mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle F innerhalb der Anlage B	33
Bild B.3 – Erdkurzschluss außerhalb der Anlagen A, B und C am Mast T einer Freileitung – Netzschaltplan mit den Anlagen A, B und C	35
Bild B.4 – Erdkurzschluss außerhalb der Anlagen A, B und C am Mast T einer Freileitung – Mit-, Gegen- und Nullsystem mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle F	36
Bild B.5 – Erderspannungen $u_{ETn} = U_{ETn} / U_{ET}$ mit $U_{ET} = 1,912$ kV und $u_{EBn} = U_{EBn} / U_{EB}$ mit $U_{EB} = 0,972$ kV, wenn der Erdkurzschluss an den Masten $n = 1, 2, 3, \dots$ in der Nähe der Station B auftritt	41
Bild C.1 – Beispiel für die Berechnung des Kabelreduktionsfaktors und der Stromverteilung durch Erde in einem 10-kV-Netz, $U_n = 10$ kV; $c = 1,1$; $f = 50$ Hz	43
Bild C.2 – Kurzschlussströme und Teilkurzschlussströme im Schirm und durch Erde für das Beispiel im Bild C.1	44
Bild C.3 – Beispiel für die Berechnung der Stromverteilung in einem 10-kV-Netz mit einem Kurzschluss auf dem Kabel zwischen A und B (Daten nach C.2.1 und Bild C.1)	45
Bild C.4 – Erdkurzschlussströme, Teilkurzschlussströme im Schirm und Teilkurzschlussströme durch Erde	46
Bild D.1 – Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors und der Stromverteilung bei drei Einleiterkabeln und einem Erdkurzschluss in der Station B	48
Bild D.2 – Mit-, Gegen- und Nullsystem des Netzes im Bild D.1 mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle (Station B)	49
Bild D.3 – Stromverteilung für das Netz nach Bild D.1, abhängig von der Länge ℓ der Einleiterkabel zwischen den Stationen A und B	50
Bild D.4 – Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung bei drei Einleiterkabeln und einem Erdkurzschluss zwischen den Stationen A und B	51
Bild D.5 – Mit-, Gegen- und Nullsystem des Netzes im Bild D.4 mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle (irgendwo zwischen den Stationen A und B)	51
Bild D.6 – Stromverteilung für das Kabel im Bild D.4 abhängig von ℓ_A ; $R_{EF} = \infty$	53
Bild D.7 – Stromverteilung für das Kabel im Bild D.4 abhängig von ℓ_A ; $R_{EF} = 5 \Omega$	55
 Tabellen	
Tabelle 1 – Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes in einfachen Fällen	13
Tabelle 2 – Spezifischer Erdwiderstand und Erdstromtiefe	19
Tabelle C.1 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.1	44
Tabelle C.2 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 5$ km	46
Tabelle C.3 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 10$ km	46

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60909 legt Verfahren zur Berechnung der zu erwartenden Kurzschlussströme bei unsymmetrischen Kurzschlüssen in Hochspannungs-Drehstromnetzen mit der Nennfrequenz 50 Hz oder 60 Hz fest, das sind:

- a) Doppelerdkurzschlussströme in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation;
- b) Teilkurzschlussströme über Erde bei einpoligem Erdkurzschluss in Netzen mit starrer oder niederohmiger Sternpunktterdung.

Die mit diesem Verfahren berechneten Ströme sind zur Bestimmung der induzierten Spannungen oder der Berührungs- oder Schrittspannungen und des Anstiegs des Erdpotentials in einer Station (Kraftwerksanlage oder Unterstation) und an den Masten von Freileitungen zu verwenden.

Zudem werden Verfahren für die Berechnung von Reduktionsfaktoren von Freileitungen mit einem oder zwei Erdseilen angegeben.^{N1)}

Diese Norm gilt nicht für

- a) Kurzschlussströme, die unter kontrollierten Bedingungen erzeugt werden, wie sie in Prüffeldern herrschen; oder
- b) Kurzschlussströme in elektrischen Einrichtungen von Schiffen oder Flugzeugen; oder
- c) einpolige Leiter-Erde-Fehlerströme in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation.

Ziel dieser Norm ist es, praktische und kurze Verfahren einzuführen zur Berechnung der zwischen Leiter und Erde fließenden Ströme bei Doppelerdkurzschluss und der Teilkurzschlussströme über Erde, Erdseile von Freileitungen und Mäntel oder Schirme von Kabeln, die mit genügender Genauigkeit zu Ergebnissen auf der sicheren Seite führen. Zu diesem Zweck werden die Kurzschlussströme mit einer Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle berechnet, während alle anderen Spannungsquellen zu null gesetzt werden. Widerstände von Erdungsnetzen in Anlagen oder Ausbreitungswiderstände von Freileitungsmasten werden bei der Berechnung der Kurzschlussströme an der Kurzschlussstelle vernachlässigt.

Diese Norm ist eine Ergänzung von **IEC 60909-0**. Die allgemeinen Begriffe, Formelzeichen und Annahmen zur Berechnung beziehen sich auf diese Publikation. Nur spezielle Begriffe werden in diesem Dokument definiert und näher erklärt.

Die Berechnung der Kurzschlussströme aus den Bemessungsdaten der elektrischen Betriebsmittel und der Netztopologie hat den Vorteil, dass sie sowohl für bereits existierende Netze als auch für Netze im Planungsstadium durchgeführt werden kann. Dieses Verfahren ist anwendbar bei einer Berechnung mit manuellen Methoden oder Digitalprogrammen. Dies schließt nicht die Anwendung spezieller Verfahren aus, zum Beispiel des an besondere Gegebenheiten angepassten Überlagerungsverfahrens, wenn mindestens die gleiche Genauigkeit erreicht wird.

Wie in **IEC 60909-0** festgelegt, dürfen Kurzschlussströme und ihre Parameter auch durch Versuche im Netz bestimmt werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

^{N1)} Nationale Fußnote: Weiterhin werden neue Verfahren eingeführt für die Berechnung von Reduktionsfaktoren von Mänteln oder Schirmen und zusätzlich für die Stromverteilung durch das Erdreich und die Mäntel oder Schirme von Dreileiterkabeln oder drei Einleiterkabeln mit metallischen, unmagnetischen Mänteln oder Schirmen, die an beiden Enden geerdet sind.

IEC 60909-0:2001, *Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 0: Calculation of currents*

IEC/TR 60909-2:2008, *Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculation*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.^{N2)}

3.1

Doppelerdkurzschluss

(en: two separate simultaneous line-to-earth short circuits)

gleichzeitig an verschiedenen Stellen in unterschiedlichen Leitern auftretende Erdschlüsse eines Drehstromnetzes mit Erdschlusskompensation oder isoliertem Sternpunkt

3.2

Anfangs-Kurzschlusswechselströme bei Doppelerdkurzschluss I_{kEE}''

(en: Initial short-circuit currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits I_{kEE}'')

Effektivwert des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes, der in gleicher Höhe an beiden Stellen im Augenblick des Eintritts des Doppelerdkurzschlusses fließt

3.3

Teilkurzschlussstrom durch die Erde $I_{E\delta}$

(en: partial short-circuit current through earth $I_{E\delta}$)

Effektivwert des durch die Erde fließenden Stromes in einem fiktiven Leiter in der Erdstromtiefe δ

ANMERKUNG Im Fall von Freileitungen entfernt von der Kurzschlussstelle und der Erdungsanlage einer Station, wobei die Verteilung des Stromes auf die geerdeten Leiter und die Erde nahezu konstant ist, hängt der Strom durch die Erde vom Reduktionsfaktor der Freileitung ab (Bilder 4 und 5). Im Fall von Kabeln mit beidseitig in den Anlagen A und B geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen ist das der Strom durch Erde zwischen den Stationen A und B (Bilder 9a und 10a) bzw. zwischen der Kurzschlussstelle und den Stationen A und B (Bilder 9b und 10b).

3.4

Erdersummenstrom I_{ETtot} an der Kurzschlussstelle an einem Mast T einer Freileitung

(en: total current to earth I_{ETtot} at the short-circuit location on the tower T of an overhead line)

Effektivwert des Summenstromes, der zur Erde fließt über den Ausbreitungswiderstand eines Freileitungsmastes weit außerhalb einer Anlage, verbunden mit den Eingangsimpedanzen der Freileitung an beiden Seiten, siehe Bild 5

3.5

Erdersummenstrom I_{EBtot} an der Kurzschlussstelle in der Station B

(en: total current to earth I_{EBtot} at the short-circuit location in the station B)

Effektivwert des Stromes, der zur Erde fließt über die Erdungsanlage der Station B (Kraftwerkanlage oder Unterstation) und die mit dieser verbundenen geerdeten Leiter (Erdseile von Freileitungen oder Mäntel oder Schirme oder die Bewehrung von Kabeln oder andere geerdete Leiter wie z. B. metallische Wasserrohre), siehe Bild 4

3.6

Erderstrom I_{ETn}

(en: current to earth I_{ETn})

Effektivwert des Erderstromes, der zur Potentialerhöhung an einem Freileitungsmast n in der Nähe einer Anlage führt

^{N2)} Nationale Fußnote: Die englischsprachigen Begriffe werden in Klammern angegeben.

3.7

Erderstrom I_{EBn}

(en: current to earth I_{EBn})

Effektivwert des Erderstromes, der zur Potentialanhebung U_{EBn} in einer Anlage B im Falle eines Erdkurzschlusses an einem Freileitungsmast n in der Nähe der Anlage B führt

3.8

Reduktionsfaktor r

(en: reduction factor r)

Reduktionsfaktor für Freileitungen, welcher den Teil des zwischen Leiter und Erde fließenden Kurzschlussstromes bestimmt, der in größerer Entfernung von der Kurzschlussstelle und dem Erdungssystem einer Anlage über Erde fließt

3.9

Reduktionsfaktor r_1

(en: reduction factor r_1)

Reduktionsfaktor für Dreileiterkabel mit an beiden Seiten geerdetem metallischem Mantel oder Schirm

3.10

Reduktionsfaktor r_3

(en: reduction factor r_3)

Reduktionsfaktor für drei Einleiterkabel mit an beiden Seiten geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen

3.11

Eingangsimpedanz Z_P einer unendlich langen Kette

(en: Driving point impedance Z_P of an infinite chain)

aus der Erdseilimpedanz Z_Q zwischen zwei Masten mit Rückleitung über Erde und dem Ausbreitungswiderstand R_T eines Freileitungsmastes gebildete Eingangsimpedanz (Bild 1):

$$Z_P = 0,5 Z_Q = \sqrt{(0,5 Z_Q)^2 + R_T Z_Q} \tag{1}$$

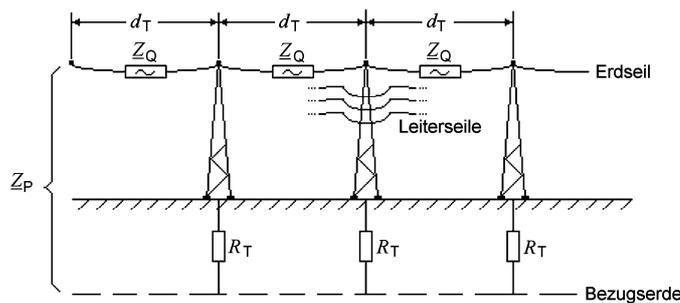


Bild 1 – Eingangsimpedanz Z_P einer unendlich langen Kette, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $Z_Q = Z'_Q d_T$ und dem Ausbreitungswiderstand R_T der Masten mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten

Die Eingangsimpedanz Z_P kann als konstant angenommen werden in einer Entfernung von der Kurzschlussstelle F, die größer ist als der Anlagenfernabstand D_F nach Gleichung (19).

3.12

Eingangsimpedanz \underline{Z}_{Pn} einer endlich langen Kette

(en: Driving point impedance \underline{Z}_{Pn} of a finite chain)

Eingangsimpedanz mit n Masten einer Freileitung, wie im Bild 2 angegeben, und mit der Impedanz Z_{EB} am Ende, berechnet nach Gleichung (2):

$$\underline{Z}_{Pn} = \frac{\underline{Z}_P (\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \underline{k}^n + (\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q) (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \underline{k}^{-n}}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \underline{k}^{-n}} \quad (2)$$

mit

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_P}{R_T} \quad (3)$$

ANMERKUNG Bei $n \rightarrow \infty$ führt Gleichung (2) auf Gleichung (1). In praktischen Fällen trifft dies bereits bei $n \approx 10 \dots 15$ zu.

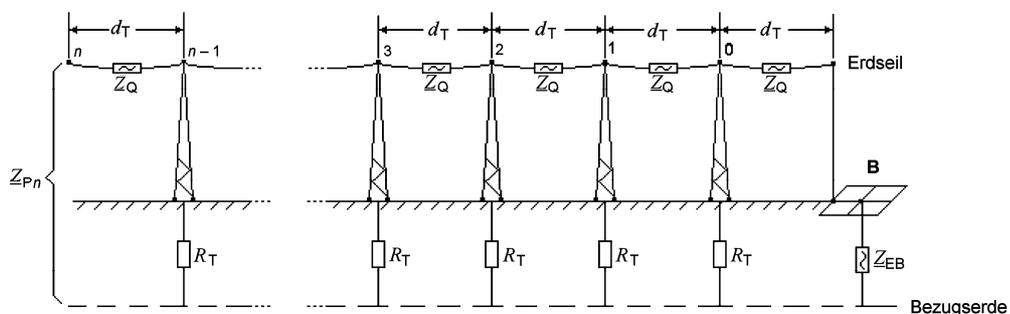


Bild 2 – Eingangsimpedanz \underline{Z}_{Pn} einer endlich langen Kette von n Masten, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$, dem Ausbreitungswiderstand R_T der Masten mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten und der Erdungsimpedanz \underline{Z}_{EB} einer Anlage B nach Gleichung (29)

4 Formelzeichen

Alle Gleichungen sind Größengleichungen, wobei die Formelzeichen physikalische Größen repräsentieren, die sowohl einen Zahlenwert als auch eine Einheit haben. Formelzeichen für komplexe Größen sind im Text und in den Gleichungen dieser Norm unterstrichen.

$cU_n / \sqrt{3}$	Ersatzspannungsquelle (IEC 60909-0)
D_F	Anlagenfernabstand (Gleichung (19))
d_T	Abstand zwischen zwei Masten
d_{L1L2}	Abstand zwischen den Leitern L1 und L2
d_{Q1Q2}	Abstand zwischen den Erdseilen Q1 und Q2
I_{bEE}	Ausschaltwechselstrom bei Doppelerdkurzschluss
I_E	Strom, der zur Erde fließt (I_{EA} , I_{EB} , I_{EC} und I_{ET} in den Bildern 4, 5, 7)

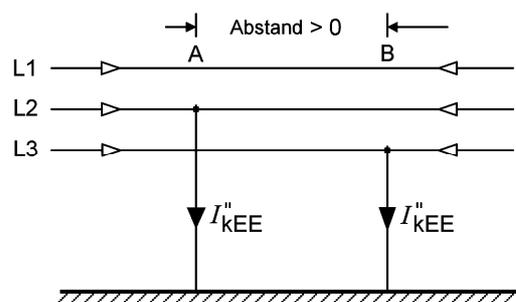
I_{EBn}	Erdersstrom in der Station B, wenn der kurzschlussbetroffene Mast n in der Nähe der Station B steht (Bild 7)
I_{EBtot}	Erdersummenstrom in der Anlage B, wenn der Kurzschluss mit Erdberührung in der Station B auftritt (Bild 4)
I_{ETn}	Erdersstrom am kurzschlussbetroffenen Mast n in der Nähe einer Station (Bild 7)
I_{ETtot}	Erdersummenstrom an einem kurzschlussbetroffenen Mast T weit entfernt von Stationen (Bild 5)
I_{kEE}''	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom bei Doppelerdkurzschluss
I_{kE2E}''	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom, der bei einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung über Erde fließt (IEC 60909-0)
$I_{E\delta}$	Teilkurzschlussstrom durch die Erde (zum Beispiel im Bild 4): $I_{E\delta A} = r_A \cdot 3I_{(0)A}$ oder im Bild 9b): Strom $I_{E\delta A}$, der entsprechend Gleichung (45) zur Station A zurückfließt
I_Q	Erdseilstrom
I_S	Strom im Mantel oder Schirm eines Kabels (bei drei Einleiterkabeln I_{S1} , I_{S2} und I_{S3})
I_T	Teilkurzschlussstrom durch den Ausbreitungswiderstand R_T eines Freileitungsmastes
i_{pEE}	Stoßkurzschlussstrom bei Doppelerdkurzschluss
$M_{(1)}, M_{(2)}$	Koppelimpedanzen im Mit- und Gegensystem
R_{EA}, R_{EB}	Widerstand des Maschenerders in der Station A oder B
R_{EF}	Erdwiderstand an der Kurzschlussstelle eines Kabels (Bilder 9b oder 10b)
R_T	Mastausbreitungswiderstand
r	Reduktionsfaktor einer Freileitung mit Erdseilen
r_1	Reduktionsfaktor des Mantels oder Schirms eines Dreileiterkabels (Bild 9a)
r_3	Reduktionsfaktor der Mäntel oder Schirme von drei Einleiterkabeln (Bild 10a)
r_Q	Erdseilradius
r_S	Radius des metallischen Mantels oder Schirms eines Kabels (Mittelwert)
$Z_{(1)A}, Z_{(1)B}$	Kurzschlussmitimpedanzen des Drehstromnetzes an den Verbindungspunkten A und B (Anhang B)
$Z_{(0)}$	Kurzschlussnullimpedanz des vollständigen Netzes zwischen den Kurzschlussstellen A und B (Admittanzen zwischen Leiter und Erde werden vernachlässigt)
Z_{EB}	Erdungsimpedanz einer Anlage B nach Gleichung (29)
Z_{EBtot}	Gesamterdungsimpedanz einer Anlage B nach Gleichung (17)
Z_{ET}	Erdungsimpedanz des kurzschlussbetroffenen Mastes nach Gleichung (28)
Z_{ETtot}	Gesamterdungsimpedanz eines kurzschlussbetroffenen Mastes T nach Gleichung (23)
Z_P	Eingangsimpedanz einer unendlich langen Kette (Gleichung (1) und Bild 1)

Z_{Pn}	Eingangsimpedanz einer endlich langen Kette (Gleichung (2) und Bild 2)
$Z_Q = Z'_Q \cdot d_T$	Erdseilimpedanz zwischen zwei Masten mit Erdrückleitung
Z'_Q	Erdseilimpedanzbelag mit Erdrückleitung
Z'_{QL}	Koppelimpedanzbelag zwischen Erdseil und Leiterseilen bei gemeinsamer Erdrückleitung
Z'_S	Impedanzbelag eines metallischen Mantels oder Schirms mit Erdrückleitung
Z'_{SL}	Koppelimpedanzbelag zwischen dem Mantel (oder Schirm) und einem Leiter innerhalb des Mantels (oder Schirms) eines Kabels mit Erdrückleitung
Z_U	Eingangsimpedanz von Mänteln, Schirmen oder der Bewehrung von Kabeln oder anderer metallischer Leiter oder Rohrleiter (Gleichung (17))
δ	Erdstromtiefe (Gleichung (36))
μ_0	Magnetische Konstante, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
ρ	Spezifischer Erdwiderstand
ω	Kreisfrequenz, $\omega = 2\pi f$ ($f = 50$ Hz oder 60 Hz)

5 Berechnung der Ströme bei Doppelerdkurzschluss

5.1 Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

Bild 3 zeigt den Strom I''_{kEE} bei Doppelerdkurzschluss in verschiedenen Leitern an den Stellen A und B mit einem endlichen Abstand zwischen ihnen. Es wird angenommen, dass die Stellen A und B weit entfernt sind von den Anlagen.



ANMERKUNG Die Richtung der Stromzählpfeile ist willkürlich gewählt.

Bild 3 – Darstellung des Doppelerdkurzschlusses und der Ströme I''_{kEE}

In Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation wird der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I''_{kEE} wie folgt berechnet:

$$I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{\left[Z_{(1)A} + Z_{(2)A} + Z_{(1)B} + Z_{(2)B} + \underline{M}_{(1)} + \underline{M}_{(2)} + Z_{(0)} \right]} \quad (4)$$

ANMERKUNG Für die Ableitung der Gleichung (4) siehe ITU-T – *Directives concerning protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines, Volume V: Inducing currents and voltages in power transmission and distribution systems, 1999.*

Bei generatorfernem Kurzschluss mit $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ und $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ gilt für den Anfangs-Kurzschlusswechselstrom:

$$I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left| 2\underline{Z}_{(1)A} + 2\underline{Z}_{(1)B} + 2\underline{M}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (5)$$

5.1.1 Bestimmung von $\underline{M}_{(1)}$ und $\underline{M}_{(2)}$

Die Koppelimpedanzen $\underline{M}_{(1)}$ und $\underline{M}_{(2)}$ im Mit- und Gegensystem werden wie folgt bestimmt:

An der Kurzschlussstelle A wird eine Spannungsquelle als einzige aktive Spannungsquelle des Netzes eingeführt. Wenn $\underline{I}_{(1)A}$ und $\underline{I}_{(2)A}$ die Ströme infolge dieser Spannungsquelle im Mit- und Gegensystem an der Kurzschlussstelle A sind und wenn $\underline{U}_{(1)B}$ und $\underline{U}_{(2)B}$ die sich im Mit- und Gegensystem ergebenden Spannungen an der Kurzschlussstelle B sind, gilt:

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \qquad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \quad (6)$$

Die Koppelimpedanzen $\underline{M}_{(1)}$ und $\underline{M}_{(2)}$ können statt an der Kurzschlussstelle A auch an der Stelle B bestimmt werden unter Verwendung von:

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \qquad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \quad (7)$$

5.1.2 Einfache Fälle des Doppelerdkurzschlusses

In einfachen Fällen kann der Doppelerdkurzschlussstrom I_{kEE}'' nach [Tabelle 1](#) berechnet werden, wenn $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ und $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ vorausgesetzt werden kann (generatorferner Kurzschluss). Mit diesen Voraussetzungen wurden die Gleichungen (8) bis (10) in [Tabelle 1](#) aus Gleichung (5) abgeleitet. Die Indizes in den Gleichungen (8) bis (10) beziehen sich auf die maßgebenden Impedanzen in den jeweiligen Netzen.

Tabelle 1 – Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes in einfachen Fällen

a)		<p>Einfach gespeiste Stichleitung</p> $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\sqrt{6Z_{(1)d} + 2Z_{(1)f} + Z_{(0)f}}} \quad (8)$
b)		<p>Zwei einfach gespeiste Stichleitungen</p> $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\sqrt{6Z_{(1)d} + 2(Z_{(1)g} + Z_{(1)h}) + Z_{(0)g} + Z_{(0)h}}} \quad (9)$
c)		<p>Zweifach gespeiste Einfachleitung</p> $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\sqrt{\frac{6Z_{(1)d}Z_{(1)e} + 2Z_{(1)f}(Z_{(1)d} + Z_{(1)e)} + Z_{(0)f}}{Z_{(1)d} + Z_{(1)f} + Z_{(1)e}} + Z_{(0)f}}} \quad (10)$

Der Spannungsfaktor c ist aus IEC 60909-0, Tabelle 1, zu entnehmen.

5.2 Stoßkurzschlussstrom, Ausschaltwechselstrom und Dauerkurzschlussstrom

Der Stoßkurzschlussstrom wird nach IEC 60909-0 berechnet:

$$i_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I_{kEE}'' \quad (11)$$

Für den Faktor κ wird der größere der beiden Werte wie beim dreipoligen Kurzschluss an der Stelle A oder B verwendet.

Wenn der Doppelerdkurzschluss als generatorfern angesehen werden kann, gilt:

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I_{kEE}'' \quad (12)$$

5.3 Verteilung der über Erde fließenden Ströme bei Doppelerdkurzschluss

Wenn ein Doppelerdkurzschluss an den Stellen A und B auftritt, kann die Stromverteilung über Erde berechnet werden unter der Annahme, dass $I_{E\delta} = r I_{kEE}''$ gilt, mit I_{kEE}'' als einziger aktiver Stromquelle und r als Reduktionsfaktor einer Freileitung mit Erdseil (Gleichung (33)). Für einen Kurzschluss an einem Mast (Kurzschlussstelle A oder B) entfernt von Stationen ergibt sich der Strom I_T durch den Mastausbreitungswiderstand R_T zu

$$I_T = r \cdot I_{kEE}'' \frac{Z_P}{Z_P + 2R_T} \quad (13)$$

Z_P ist die Eingangsimpedanz einer unendlich langen Kette nach Gleichung (1).

ANMERKUNG Gleichung (13) kann aus Bild 6 abgeleitet werden, wenn I_{ETot} durch $r \cdot I_{KEE}''$ ersetzt wird.

Bei einem Doppelerdkurzschluss auf Freileitungen ohne Erdseil (zum Beispiel in Mittelspannungsnetzen) ist der Strom durch die Erde genauso groß wie der Kurzschlussstrom I_{KEE}'' .

6 Berechnung der Teilkurzschlussströme über Erde bei unsymmetrischen Kurzschlüssen

6.1 Allgemeines

Die folgenden Unterabschnitte behandeln Teilkurzschlussströme über Erde und geerdete Leiter (wie Erdungsanlagen und Erdseile von Freileitungen)^{N3)} bei einpoligen Erdkurzschlüssen. Diese Kurzschlussart stellt in Hochspannungsnetzen mit niederohmiger Sternpunktterdung den am häufigsten auftretenden unsymmetrischen Kurzschluss dar. I_{k1}'' führt zu dem größten Kurzschlussstrom über Erde verglichen mit dem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung, wenn $Z_{(0)} > Z_{(1)}$ gilt (siehe Bild 10 in IEC 60909-0 im Falle von $Z_{(2)} = Z_{(1)}$). Bei $Z_{(0)} < Z_{(1)}$ ist der Strom über Erde I_{kE2E}'' bei zweipoligem Kurzschluss mit Erdberührung nach IEC 60909-0 zu berücksichtigen.

Bei der Berechnung der Kurzschlussströme nach IEC 60909-0 sollen die Mastausbreitungswiderstände ohne oder mit Erdseil und die Maschenerdimpedanzen sowie andere Erdverbindungen vernachlässigt werden.

Das Berechnungsverfahren wird an einem vereinfachten Netz mit den drei Anlagen A, B und C und Einfachfreileitungen mit einem Erdseil gezeigt. Angenommen wird weiterhin, dass die Anlagen A, B und C weiter als der doppelte Anlagenfernabstand D_F nach Gleichung (19) auseinander liegen.

6.2 Erdkurzschluss innerhalb einer Station

Bild 4 zeigt ein Umspannwerk B mit Leitungsverbindungen zu den benachbarten Stationen A und C.

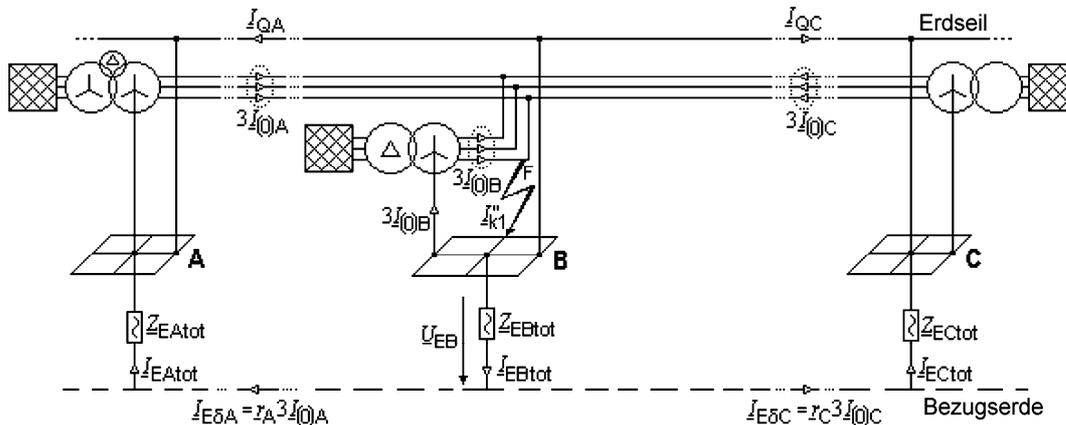


Bild 4 – Teilkurzschlussströme bei einem Erdkurzschluss innerhalb der Station B

Der Erdkurzschlussstrom I_{k1}'' in Bild 4 ist gleich der Summe der dreifachen Nullströme, die der Kurzschlussstelle F zufließen:

$$I_{k1}'' = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (14)$$

^{N3)} Nationale Fußnote: Ergänzung: „sowie über Mäntel oder Schirme von Kabeln“.

Der Strom $3I_{(0)B}$ fließt in der Erdungsanlage der Station B zurück zum Sternpunkt des Transformators und führt deshalb nicht zu einer Potentialanhebung in der Station B. Die Ströme $3I_{(0)A}$ und $3I_{(0)C}$ fließen durch die Erde zurück zu den Stationen A und C und durch die Erdseile zwischen der Station B und den Stationen A und C. Für den stationfernen Fall gilt (siehe Bild 4):

$$3I_{(0)A} = I_{E\delta A} + I_{QA} = r_A 3I_{(0)A} + (1 - r_A) 3I_{(0)A} \quad (15a)$$

$$3I_{(0)C} = I_{E\delta C} + I_{QC} = r_C 3I_{(0)C} + (1 - r_C) 3I_{(0)C} \quad (15b)$$

Dabei sind r_A und r_C die Reduktionsfaktoren der Erdseile zwischen B und A bzw. zwischen B und C.

Der Erdersummenstrom in der Station B (Kurzschlussstelle) ist:

$$I_{EBtot} = r_A 3I_{(0)A} + r_C 3I_{(0)C} \quad (16)$$

Der Strom I_{EBtot} fließt über die Gesamterdungsimpedanz der Station B:

$$Z_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \sum_i \frac{1}{Z_{Pi}} + \sum_i \frac{1}{Z_{Ui}}} \quad (17)$$

Dabei ist

R_{EB} der Widerstand des Maschenerders der Station B;

Z_P die Eingangsimpedanz nach Gleichung (1);

Z_U die Eingangsimpedanz von Mantel, Schirm und Bewehrung eines Kabels oder anderer metallischer Leiter oder Rohrleitungen.

Der Strom durch Z_{EBtot} führt zur Erderspannung U_{EB} der Station B:

$$U_{EB} = Z_{EBtot} I_{EBtot} \quad (18)$$

Der Anlagenfernabstand D_F (fern von der Kurzschlussstelle) wird wie folgt berechnet:

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\text{Re}\{\sqrt{Z_Q}\}} \quad (19)$$

Dabei ist

R_T der Mastausbreitungswiderstand;

d_T der Abstand zwischen zwei Masten;

$\text{Re}\{\sqrt{Z_Q}\}$ der Realteil der Wurzel der Erdseilimpedanz $Z_Q = Z_Q' d_T$ mit Z_Q' nach Gleichung (34).

ANMERKUNG 1 Wenn die Anlagen A oder C näher als D_F zur Anlage B liegen, wird der Erdersummenstrom I_{EBtot} durch einen zusätzlichen Anteil der Ströme $r_A 3I_{(0)A}$ oder $r_C 3I_{(0)C}$ reduziert, die über die Erdseile zu der nächstgelegenen Stationen A oder C zurückfließen.

ANMERKUNG 2 Besondere Überlegungen können notwendig werden im Fall von Doppelleitungen oder parallelen Leitungen mit gekoppelten Nullsystemen.

6.3 Erdkurzschluss weit außerhalb einer Station

Ein Erdkurzschluss an einem Mast einer Freileitung ist in Bild 5 dargestellt. Der Kurzschluss soll weit außerhalb von Stationen auftreten.

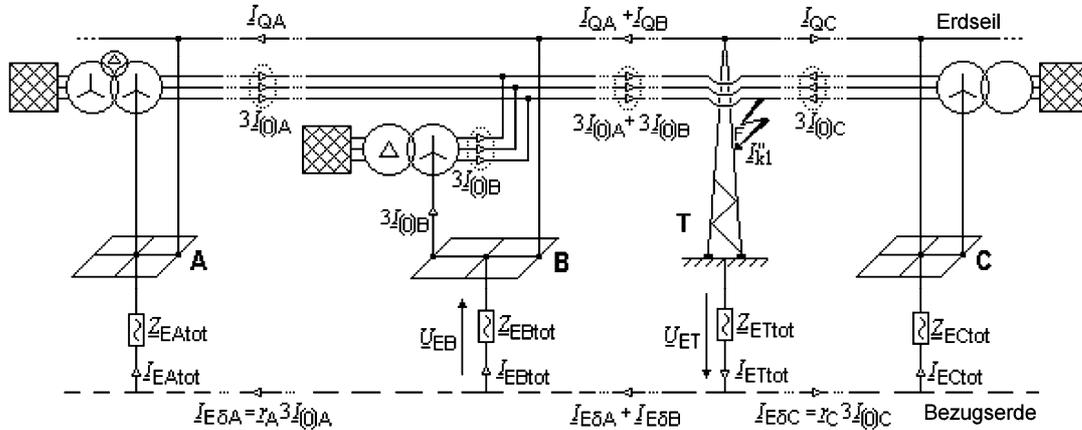


Bild 5 – Teilkurzschlussströme bei Erdkurzschluss an einem Freileitungsmast T

Der Erdkurzschlussstrom I_{k1}'' in Bild 5 ist gleich der Summe der dreifachen Nullströme, die zur Kurzschlussstelle F fließen:

$$I_{k1}'' = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (20)$$

Die drei Ströme $3I_{(0)A}$, $3I_{(0)B}$ und $3I_{(0)C}$ in Bild 5 fließen zurück zu den Stationen A, B und C durch die Erde und durch die Erdseile der Freileitungen zwischen den Stationen:

$$3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} = I_{E\delta A} + I_{E\delta B} + I_{QA} + I_{QB} = r_C(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}) + (1 - r_C)(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}) \quad (21)$$

und wie bereits aus Bild 4 und den Gleichungen (15) bekannt:

$$3I_{(0)A} = I_{E\delta A} + I_{QA} = r_A 3I_{(0)A} + (1 - r_A) 3I_{(0)A}$$

$$3I_{(0)C} = I_{E\delta C} + I_{QC} = r_C 3I_{(0)C} + (1 - r_C) 3I_{(0)C}$$

Dabei sind r_A und r_C die Reduktionsfaktoren der Erdseile zwischen B und A bzw. zwischen B und C.

Der Erdersummenstrom am Mast T (Kurzschlussstelle) weit entfernt von den Stationen B und C (Entfernung größer als D_F) ist:

$$I_{ETtot} = I_{E\delta A} + I_{E\delta B} + I_{E\delta C} = r_C(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C}) = r_C I_{k1}'' \quad (22)$$

Dieser Strom fließt über die Gesamterdungsimpedanz des kurzschlussbetroffenen Mastes T verbunden mit dem Erdseil der Freileitung BC entsprechend Bild 6:

$$Z_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} \quad (23)$$

Dabei ist R_T der Mastausbreitungswiderstand und Z_P die Eingangsimpedanz nach Gleichung (1).

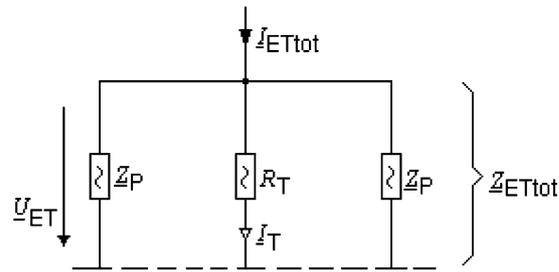


Bild 6 – Verteilung des Erdersummenstromes I_{ETtot}

I_T findet man mit Gleichung (13), wenn r_{kEE}'' ersetzt wird durch r_{Ck1}'' .

Der Strom durch Z_{ETtot} führt zur Erderspannung U_{ET} des kurzschlussbetroffenen Mastes (Bild 6):

$$U_{ET} = Z_{ETtot} I_{ETtot} = R_T I_T \quad (24)$$

Wenn der Erdkurzschluss an einem Mast in der Nähe einer Anlage B auftritt, kann die Erderspannung höher werden als nach Gleichung (24) berechnet. Eine Bestimmung bedarf besonderer Überlegungen, wie in 6.4 angegeben.

Den Erdersummenstrom in Anlage B bei einem Erdkurzschluss am Mast T (Abstand von der Station B größer als D_F) findet man nach Bild 5:

$$I_{EBtot} = r_C(3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}) - r_A 3I_{(0)A} \quad (25)$$

Die Erderspannung der Anlage B mit dem Strom I_{EBtot} nach Gleichung (25) wird in diesem Falle:

$$U_{EB} = Z_{EBtot} I_{EBtot} \quad (26)$$

Wenn der Erdkurzschluss an einem Mast in der Nähe der Station B auftritt, dann kann der Erdersummenstrom in der Station B höher sein als I_{EBtot} nach Gleichung (16) für den Fall eines Erdkurzschlusses in der Station B (Bild 4). Eine Bestimmung bedarf besonderer Überlegungen, wie in 6.4 angegeben.

6.4 Erdkurzschluss in der Nähe einer Station

Wenn der Erdkurzschluss an einem Mast in der Nähe (Abstand kleiner als D_F) einer Station (Bild 7) auftritt, kann die Erderspannung U_{EBn} (zusätzlicher Index n , um anzuzeigen, dass der Erdkurzschluss am Mast $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ außerhalb der Anlage auftritt) höher sein als die nach Gleichung (18) berechnete Spannung U_{EB} . In diesem Fall ist die Erderspannung U_{ETn} des kurzschlussbetroffenen Mastes n in der Nähe der Anlage B ebenfalls höher als die nach Gleichung (24) berechnete Erderspannung U_{ET} für einen Mast weit außerhalb einer Anlage.

6.4.2 Erderspannung der Anlage B bei einem Erdkurzschluss am Mast n

Den über Z_{EB} fließenden Strom I_{EBn} im Bild 7 bei einem Erdkurzschluss an einem Mast n in der Nähe der Anlage B findet man mit der folgenden Gleichung:

$$I_{EBn} = r_C I_{k1}'' \frac{Z_{ET}}{Z_{ET} + Z_{Pn}} \cdot \frac{2Z_P - Z_Q}{(Z_{EB} + Z_P) k^n - (Z_{EB} - Z_P + Z_Q) k^{-n}} - r_C 3I_{(0)B} \frac{Z_P}{Z_{EB} + Z_P} \quad (31)$$

Die Erderspannung der Anlage B bei einem Erdkurzschluss am Mast n in der Nähe der Anlage B ist:

$$U_{EBn} = Z_{EB} I_{EBn} \quad (32)$$

7 Reduktionsfaktor für Freileitungen mit Erdseilen

Der Reduktionsfaktor für Freileitungen mit Erdseilen kann wie folgt berechnet werden:

$$r = \frac{I_E \delta}{3I_{(0)}} = 1 - \frac{Z'_{QL}}{Z'_Q} \quad (33)$$

Z'_Q und Z'_{QL} sind nach den Gleichungen (34) und (35) zu berechnen. Die Ergebnisse hängen vom spezifischen Erdwiderstand ρ , dem Abstand d_{QL} zwischen dem Erdseil und den Leiterseilen und dem äquivalenten Erdseilradius r_{QQ} für ein oder mehrere Erdseile ab.

Tabelle 2 – Spezifischer Erdwiderstand und Erdstromtiefe

Bodenart	Spezifischer Erdwiderstand ρ Ωm	Erdstromtiefe δ m	
		bei 50 Hz	bei 60 Hz
		Granit	> 10 000
Fels	3 000 ... 10 000	5 100 ... 9 330	4 670 ... 8 520
steiniger Boden	1 000 ... 3 000	2 950 ... 5 110	2 690 ... 4 670
Kies, trockener Sand	200 ... 1 200	1 320 ... 3 230	1 200 ... 2 950
Kalkboden, nasser Sand	70 ... 200	780 ... 1 320	710 ... 1 200
Ackerboden	50 ... 100	660 ... 931	600 ... 850
Ton, Lehm	10 ... 50	295 ... 660	270 ... 600
Marschland	< 20	< 420	< 380

Der Erdseilimpedanzbelag mit Erdrückleitung ist

$$Z'_Q = \frac{R_Q}{\nu} + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4\nu} + \ln \frac{\delta}{r_{QQ}} \right) \quad (34)$$

und der Koppelimpedanzbelag zwischen Erdseil und den Leiterseilen mit Erdrückleitung

$$Z'_{QL} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{QL}} \quad (35)$$

Die Erdstromtiefe δ hängt von der Bodenart ab, wie in [Tabelle 2](#) angegeben, und kann wie folgt berechnet werden:

$$\delta = \frac{1,851}{\sqrt{\omega \frac{\mu_0}{\rho}}} \quad (36)$$

Es gelten die folgenden Definitionen:

- R_Q Widerstandsbelag des Erdseils
- d_{Q1Q2} Abstand zwischen den beiden Erdseilen Q1 und Q2
- r_Q Erdseilradius
- r_{QQ} Äquivalenter Erdseilradius
 - bei einem Erdseil: $r_{QQ} = r_Q$
 - bei zwei Erdseilen $r_{QQ} = \sqrt{r_Q d_{Q1Q2}}$
- ν Anzahl der Erdseile $\nu = 1, 2$
- d_{QL} Mittlerer geometrischer Abstand zwischen dem Erdseil und den Leiterseilen
 - bei einem Erdseil $d_{QL} = \sqrt[3]{d_{QL1} d_{QL2} d_{QL3}}$
 - bei zwei Erdseilen $d_{QL} = \sqrt[6]{d_{Q1L1} d_{Q1L2} d_{Q1L3} d_{Q2L1} d_{Q2L2} d_{Q2L3}}$
- μ_r Permeabilitätszahl des Erdseils:
 - Aluminium-Stahl-Seile (Al/St) mit einer Aluminiumlage: $\mu_r \approx 5 \dots 10$;
 - andere Aluminium-Stahl-Seile: $\mu_r \approx 1$;
 - Stahlseile: $\mu_r \approx 75$.

Wie aus den Gleichungen (34) bis (35) hervorgeht, hängt der Reduktionsfaktor bei üblichen Al/St-Erdseilen vom spezifischen Erdwiderstand ρ ab. [Bild 8](#) zeigt Erdseilreduktionsfaktoren bei nichtmagnetischen Erdseilen für unterschiedliche Freileitungen mit Nennspannungen von 60 kV bis 220 kV.

Bei Freileitungen mit einem oder mit zwei Stahlerdseilen liegt der Betrag des Reduktionsfaktors bei etwa 0,95 bzw. 0,90.

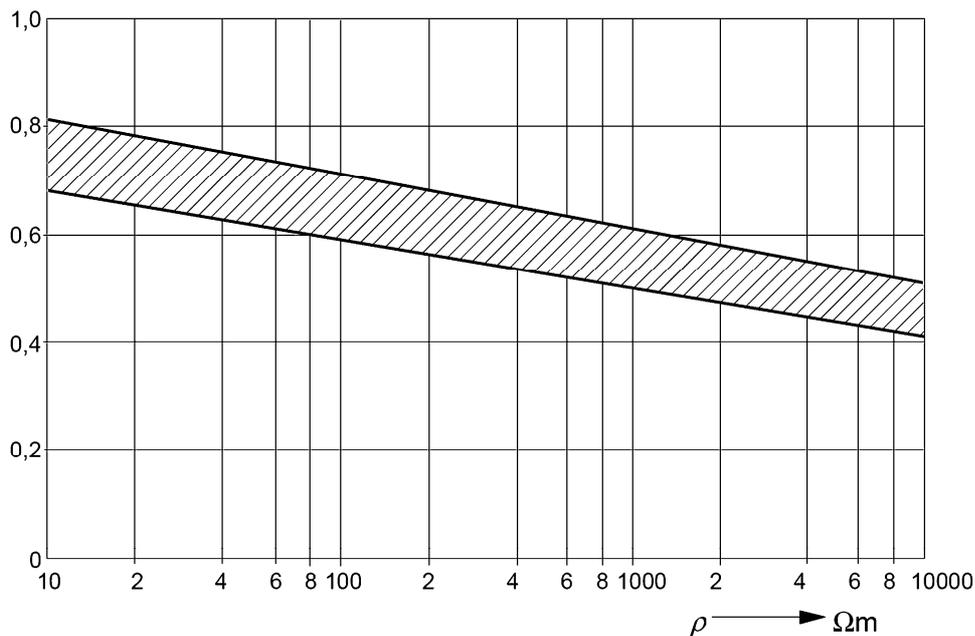


Bild 8 – Reduktionsfaktor r für Freileitungen mit nichtmagnetischen Erdseilen abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ

8 Berechnung der Stromverteilung und des Reduktionsfaktors bei Kabeln mit beidseitig geerdeten, metallischen Mänteln oder Schirmen

8.1 Überblick

Der Reduktionsfaktor von Energiekabeln mit beidseitig geerdetem, metallischen Mantel, Schirm und Bewehrung hängt vom Kabeltyp ab: Dreileiterkabel mit gemeinsamem Mantel, drei Einleiterkabel mit drei Mänteln oder Schirmen und in manchen Fällen mit zusätzlicher Bewehrung, Querschnitt des metallischen Mantels (der Mäntel) oder Schirms (der Schirme) in Übereinstimmung mit nationalen technischen Ausführungen und Normen.

Der Reduktionsfaktor von Kabeln mit Stahlbewehrung muss vom Hersteller angegeben werden (siehe [IEC/TR 60909-2](#)).

Es wird in dieser Norm vorausgesetzt, dass die Kabel einen äußeren thermoplastischen Mantel haben, siehe [IEC/TR 60909-2](#).

8.2 Dreileiterkabel

[Bild 9](#) zeigt die behandelte Anordnung bei einem Dreileiterkabel mit beidseitig geerdetem, metallischem Mantel oder Schirm und einem äußeren thermoplastischen Mantel, der das Kabel gegen das umgebende Erdreich isoliert.

8.2.1 Erdkurzschluss in der Station B

Im Fall nach [Bild 9a](#)), wenn das Kabel nur von der Seite A gespeist wird bei einem Erdkurzschlussstrom $I_{k1}'' = 3I_{(0)A}$ in der Station B, liefert der Reduktionsfaktor r_1 den Teil $I_{E\delta A} = r_1 3I_{(0)A}$ des Erdkurzschlussstromes, der bedingt durch Induktionswirkung durch die Erde zurückfließt.

$$\underline{r}_1 = \frac{\underline{I}_{E\delta A}}{3\underline{I}_{(0)A}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{SL}}{\underline{Z}'_S} = \frac{R'_S}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S}} \quad (37)$$

\underline{Z}'_S ist der Impedanzbelag mit Erdrückleitung des metallischen (nicht magnetischen) Mantels (oder Schirms):

$$\underline{Z}'_S = R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S} \quad (38)$$

\underline{Z}'_{SL} ist der Gegenimpedanzbelag mit Erdrückleitung zwischen dem Mantel und einer der Adern (innerhalb des Mantels unabhängig von der Lage):

$$\underline{Z}'_{SL} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S} \quad (39)$$

Dabei ist

R'_S der Widerstandsbelag des Mantels oder Schirms (Kupfer, Aluminium, Blei);

$R'_S = 1/(\kappa \cdot q_S)$ mit $q_S \approx 2\pi r_S d_S$, wobei d_S die Dicke des Mantels oder Schirms ist;

r_S der mittlere Radius des Mantels oder Schirms;

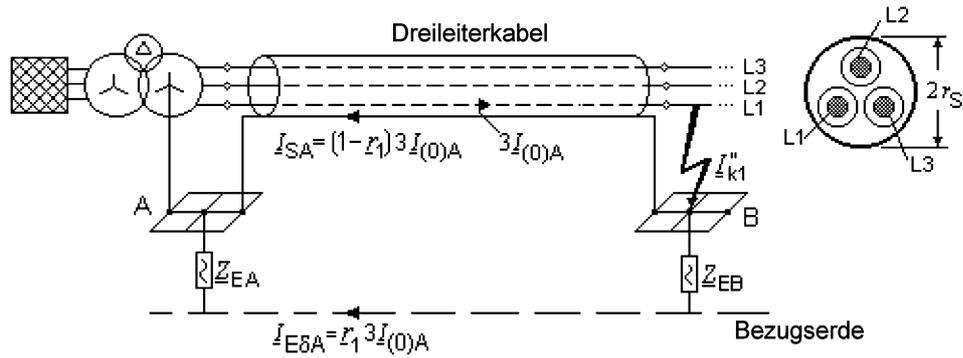
δ die Erdstromtiefe (Tabelle 2 oder Gleichung (36)).

Der Strom im Mantel oder Schirm im Bild 9a wird wie folgt berechnet:

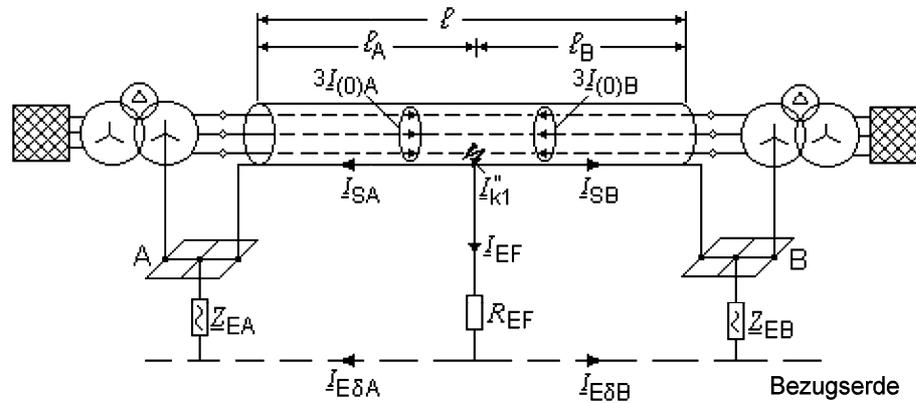
$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1) 3\underline{I}_{(0)A} \quad (40)$$

Den Strom durch die Erde im Bild 9a findet man mit:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A} \quad (41)$$



a) Einspeisung nur von der Station A und Erdkurzschluss in der Station B



$$(I_{k1}'' = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}; 3I_{(0)A} = I_{SA} + I_{E\delta A}; 3I_{(0)B} = I_{SB} + I_{E\delta B}).$$

b) Einspeisung von Station A und Station B und Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B

Bild 9 – Reduktionsfaktor von Dreileiterkabeln

8.2.2 Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen Station A und Station B

Bei einem Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B werden die Ströme im Mantel oder Schirm in Bild 9b wie folgt berechnet:

$$I_{SA} = (1-r_1) 3I_{(0)A} + r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_S l_A} + r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_S l_A} \quad (42)$$

$$I_{SB} = (1-r_1) 3I_{(0)B} + r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_S l_B} + r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_S l_B} \quad (43)$$

Der Erderstrom an der Kurzschlussstelle ergibt sich wie folgt:

$$I_{EF} = r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} + r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} \quad (44)$$

Die Ströme durch die Erde in [Bild 9b](#) werden gefunden mit:

$$I_{E\delta A} = r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{ES\text{tot}}}{Z_S \ell_B} + r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{ES\text{tot}}}{R_{EF}} - r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{ES\text{tot}}}{Z_S \ell_A} \quad (45)$$

$$I_{E\delta B} = r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{ES\text{tot}}}{Z_S \ell_A} + r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{ES\text{tot}}}{R_{EF}} - r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{ES\text{tot}}}{Z_S \ell_B} \quad (46)$$

mit

$$Z_{ES\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_S \ell_A} + \frac{1}{Z_S \ell_B} + \frac{1}{R_{EF}}} = \frac{Z_S \ell_A \ell_B}{\ell + \frac{Z_S \ell_A \ell_B}{R_{EF}}} \quad (47)$$

Der Reduktionsfaktor r_1 ist in Gleichung (37) angegeben.

Die angegebenen Gleichungen gelten für eine Kabellänge von wenigstens $\ell \approx \delta/2$ ($\ell \approx 0,5$ km bei $\rho = 100 \Omega\text{m}$) zwischen den Stationen A und B im [Bild 9a](#) und Entfernungen ℓ_A und ℓ_B zwischen der Kurzschlussstelle und den benachbarten Stationen A und B im [Bild 9b](#) für wenigstens $\ell \approx \delta/2$ im Fall 2 nach [8.2.2.2](#).

Weil der Widerstand R_{EF} an der Kurzschlussstelle gegen Bezugserde im Normalfall nicht bekannt ist, müssen die beiden Fälle $R_{EF} \rightarrow \infty$ (es gibt keine Verbindung an der Kurzschlussstelle zwischen dem metallischen Mantel (Schirm) des Kabels und dem umgebenden Erdreich) und $R_{EF} \rightarrow \text{Min.}$ in Betracht gezogen werden.

8.2.2.1 Fall 1: $R_{EF} \rightarrow \infty$

Im Falle $R_{EF} \rightarrow \infty$ wird angenommen, dass der äußere thermoplastische Mantel nicht zerstört wurde durch den Kurzschlussstrom oder durch den Lichtbogen an der Kurzschlussstelle. Die folgenden Ausdrücke wurden aus den Gleichungen (42) und (43) gewonnen:

$$I_{SA} = (1 - r_1) 3I_{(0)A} + r_1 3I_{(0)A} \frac{\ell_B}{\ell} + r_1 3I_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \quad (42a)$$

$$I_{SB} = (1 - r_1) 3I_{(0)B} + r_1 3I_{(0)B} \frac{\ell_A}{\ell} + r_1 3I_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \quad (43a)$$

In diesem Falle führen die Gleichungen (45) und (46) auf:

$$I_{E\delta A} = r_1 3I_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} - r_1 3I_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \quad (45a)$$

$$I_{E\delta B} = r_1 3I_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} - r_1 3I_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \quad (46a)$$

Der Erdkurzschlussstrom an der Kurzschlussstelle zwischen A und B muss mit dem Nullimpedanzbelag des Kabels $Z_{(0)S}$ bei einem Rückstrom nur durch den Mantel oder Schirm berechnet werden (siehe [IEC/TR 60909-2](#) und die Information über die Berechnung, die dort in den Gleichungen (30) und (31) gegeben ist).

Der höchste Strom durch den Mantel oder Schirm wird auftreten, wenn die Kurzschlussstelle nahe bei der Station A oder B liegt und wenn der Kurzschluss im Bild 9b von beiden Seiten gespeist wird.

$$\underline{I}_{SA\max} = 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = 0) + r_1 3\underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \quad (42b)$$

$$\underline{I}_{SB\max} = 3\underline{I}_{(0)B} (\ell_A = \ell) + r_1 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \quad (43b)$$

Der höchste Strom über Erde wird ebenfalls bei einem Kurzschluss nahe der Stationen A oder B gefunden.

$$\underline{I}_{E\delta A\max} = r_1 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \quad (45b)$$

$$\underline{I}_{E\delta B\max} = r_1 3\underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \quad (46b)$$

8.2.2.2 Fall 2: $R_{EF} = 5 \Omega$

Der Wert $R_{EF} = 5 \Omega$ ist als eine konservative Annahme anzusehen, weil die Ausdehnung der Verbindung zum umgebenden Erdreich klein ist, auch wenn der äußere thermoplastische Mantel zerstört ist. Bei der Festlegung dieses Wertes wurde angenommen, dass die Kurzschlussstelle außerhalb der Stationen A und B liegt und dass sich keine metallischen Drähte oder Rohre in der Nachbarschaft des Kurzschlussortes befinden.

In diesem Fall muss der Erdkurzschlussstrom \underline{I}_{k1}'' an der Kurzschlussstelle zwischen A und B mit dem Nullimpedanzbelag $\underline{Z}'_{(0)SE}$ für eine Stromrückführung durch den Mantel oder den Schirm des Kabels und die Erde berechnet werden (siehe IEC/TR 60909-2).

Die Ströme im Mantel oder Schirm und durch die Erde sind mit den Gleichungen (42), (43) und (45), (46) zu berechnen.

Der höchste Strom durch den Mantel oder den Schirm kann mit den Gleichungen (42b) und (43b) berechnet werden.

Wenn nach den höchsten Strömen durch die Erde gesucht wird, verwende man nur den höchsten von einer Seite des Kabels eingespeisten Erdkurzschlussstrom und vernachlässige den Strom von der anderen Seite. In diesem Falle führen die Gleichungen (45) und (46) auf:

$$\underline{I}_{E\delta A\max} = r_1 3\underline{I}_{(0)A} \left(\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_B} + \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \right) \quad (45c)$$

$$\underline{I}_{E\delta B\max} = r_1 3\underline{I}_{(0)B} \left(\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_A} + \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \right) \quad (46c)$$

Berechnungen mit den obigen Gleichungen können auf höhere Ströme durch die Erde führen als die mit den Gleichungen (45b) oder (46b) ermittelten.

ANMERKUNG Anhang C.2 gibt ein Beispiel für die Berechnungen in dem Fall, dass nach den größten Strömen durch die Erde gesucht wird.

Wenn das Kabel eine zusätzliche Eisenarmierung aufweist (zum Beispiel bei einem Bleimantel), muss der Hersteller den Reduktionsfaktor (abhängig vom Strom durch den Mantel) angeben, der zum Beispiel durch Messungen ermittelt wurde. Zur Information siehe IEC/TR 60909-2.

8.3 Drei Einleiterkabel

Wie unter 8.2 angegeben, muss auch in diesem Fall unterschieden werden zwischen einem Erdkurzschluss in der Station B, wenn der Kurzschlussstrom von der Station A eingespeist wird (Bild 10a), und dem Fall mit einem Kurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B (Bild 10b).

8.3.1 Erdkurzschluss in der Station B

Im Falle von drei Einleiterkabeln im Bild 10a mit drei beidseitig geerdeten Mänteln (Schirmen) muss der Reduktionsfaktor r_3 wie folgt berechnet werden:

$$r_3 = 1 - \frac{\underline{I}_{S1} + \underline{I}_{S2} + \underline{I}_{S3}}{3\underline{I}_{(0)}} = \frac{R'_S}{R'_S + 3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{8} + j 3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_S d_{L1L2} d_{L1L3}}}} \quad (48)$$

Die Abstände d_{L1L2} und d_{L1L3} nach Bild 10a müssen für eine Dreiecksanordnung und eine Einebenenanordnung verwendet werden. Das Ergebnis nach Gleichung (48) ist das exakte Ergebnis für eine Dreiecksanordnung. Für eine Einebenenanordnung kann das Ergebnis nach Gleichung (48) als eine ausreichende Näherung für diese Norm verwendet werden, unabhängig davon, ob der Erdkurzschluss in einem außen liegenden Kabel oder dem in der Mitte der Einebenenanordnung liegenden Kabel auftreten wird.

Die Summe der Ströme durch die drei Mäntel oder Schirme wird entsprechend Bild 10a wie folgt berechnet:

$$\underline{I}_{SA} = \underline{I}_{S1A} + \underline{I}_{S2A} + \underline{I}_{S3A} = (1 - r_3) 3\underline{I}_{(0)A} \quad (49)$$

Den Strom durch die Erde, der nach Bild 10a zur Station A zurückfließt, findet man mit dem Reduktionsfaktor r_3 nach Gleichung (48):

$$\underline{I}_{E\delta A} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} \quad (50)$$

8.3.2 Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen Station A und Station B

Im Falle eines Erdkurzschlusses auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B, gespeist von beiden Seiten in Bild 10b, fließen Ströme in den drei Leitern und in den drei Mänteln oder Schirmen der Einleiterkabel.

Die Summe der Ströme in den drei Mänteln oder Schirmen wird wie folgt berechnet:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - r_3) 3\underline{I}_{(0)A} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_A} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_A} \quad (51)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - r_3) 3\underline{I}_{(0)B} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_B} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_B} \quad (52)$$

Der Erdstrom an der Kurzschlussstelle ist gegeben durch:

$$\underline{I}_{EF} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \quad (53)$$

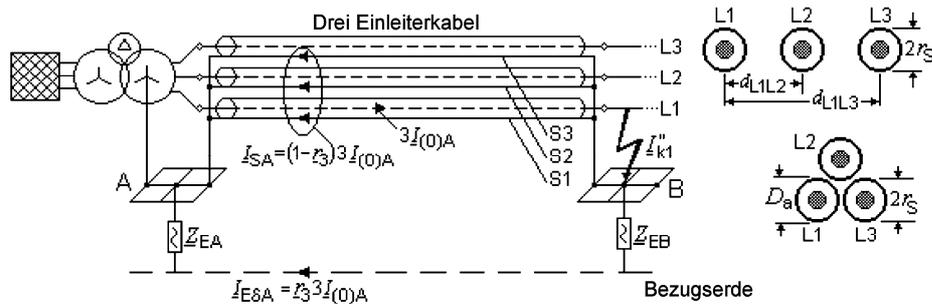
Die Ströme durch die Erde findet man mit:

$$\underline{I}_{E\delta A} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_B} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}_S \ell_A} \quad (54)$$

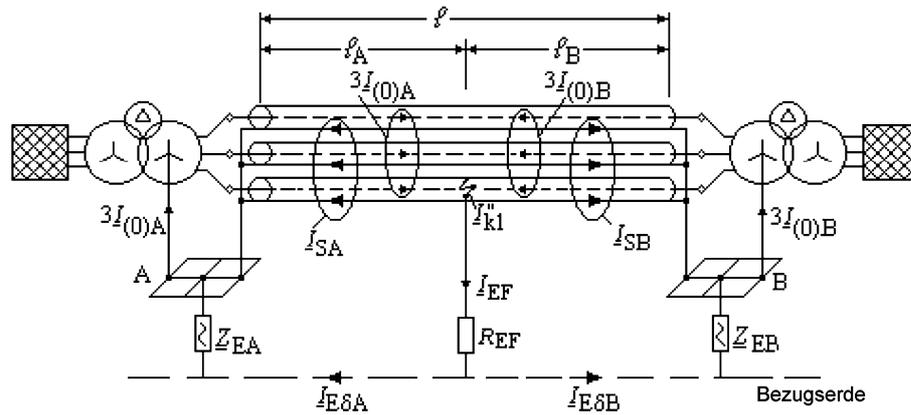
$$I_{E\delta B} = r_3 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_S' \ell_A} + r_3 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} - r_3 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_S' \ell_B} \quad (55)$$

mit Z_{EStot} nach Gleichung (47).

In diesem Fall ist Z_S' der Selbstimpedanzbelag eines der drei Mäntel oder Schirme, berechnet nach Gleichung (38).



a) Einspeisung nur von der Station A und Erdkurzschluss in der Station B



$$(I_{k1}'' = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}; 3I_{(0)A} = I_{SA} + I_{E\delta A}; 3I_{(0)B} = I_{SB} + I_{E\delta B}).$$

b) Einspeisung von Station A und Station B und Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B

Bild 10 – Reduktionsfaktor für drei Einleiter-Energiekabel

Weil im Normalfall der Widerstand R_{EF} an der Kurzschlussstelle gegen Bezugserde nicht bekannt ist, müssen die beiden Fälle $R_{EF} \rightarrow \infty$ (es gibt keine Verbindung an der Kurzschlussstelle zwischen dem metallischen Mantel oder Schirm des Kabels und dem umgebenden Erdreich) und $R_{EF} \rightarrow \text{Min.}$ in Betracht gezogen werden.

8.3.2.1 Fall 1: $R_{EF} \rightarrow \infty$

Im Fall von $R_{EF} \rightarrow \infty$ wird angenommen, dass der äußere thermoplastische Mantel nicht durch den Kurzschlussstrom oder durch den Lichtbogen an der Kurzschlussstelle zerstört wurde. Die folgenden Ausdrücke werden aus den Gleichungen (51) und (52) abgeleitet:

$$\underline{I}_{SA} = (1-r_3) 3\underline{I}_{(0)A} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_B}{\ell} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \quad (51a)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1-r_3) 3\underline{I}_{(0)B} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_A}{\ell} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \quad (52a)$$

In diesem Falle führen die Gleichungen (54) und (55) auf:

$$\underline{I}_{E\delta A} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} - r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \quad (54a)$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} - r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \quad (55a)$$

Der Erdkurzschlussstrom an der Kurzschlussstelle zwischen A und B muss mit dem Nullimpedanzbelag $\underline{Z}'_{(0)S}$ des Kabelsystems bei einem Rückstrom nur durch die Mäntel oder Schirme berechnet werden (siehe [IEC/TR 60909-2](#)).

Der höchste Strom durch den Mantel oder Schirm S1 wird auftreten, wenn die Kurzschlussstelle nahe der Station A oder B liegt und wenn der Kurzschluss im [Bild 10b](#) von beiden Seiten gespeist wird.

$$\underline{I}_{S1Amax} \approx 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = 0) + (2+r_3) \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \quad (51b)$$

$$\underline{I}_{S1Bmax} \approx 3\underline{I}_{(0)B} (\ell_A = \ell) + (2+r_3) \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \quad (52b)$$

Die höchsten Ströme über Erde werden ebenfalls bei einem Kurzschluss nahe der Station A oder B gefunden.

$$\underline{I}_{E\delta Amax} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \quad (54b)$$

$$\underline{I}_{E\delta Bmax} = r_3 3\underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \quad (55b)$$

8.3.2.2 Fall 2: $R_{EF} = 5\Omega$

Der Wert $R_{EF} = 5\Omega$ ist als konservative Annahme anzusehen, siehe [8.2.2.2](#).

Der Erdkurzschlussstrom \underline{I}_{k1}'' an der Kurzschlussstelle zwischen A und B ist mit dem Nullimpedanzbelag $\underline{Z}'_{(0)SE}$ für einen Rückstrom durch Mäntel oder Schirme der Kabel und der Erde zu berechnen (siehe [IEC/TR 60909-2](#)).

Die Summe der Ströme in den Mänteln oder Schirmen und die Ströme durch die Erde müssen mit den Gleichungen (51), (52) und (54), (55) berechnet werden.

Die höchsten Ströme durch den Mantel oder den Schirm S1 können mit den Gleichungen (51b) und (52b) gefunden werden.

Wenn die höchsten Ströme durch die Erde gesucht werden, verwende man nur den höchsten von einer Seite des Kabels eingespeisten Erdkurzschlussstrom und vernachlässige den Strom von der anderen Seite. In diesem Falle führen die Gleichungen (54) und (55) auf:

$$\underline{I}_{E\delta Amax} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \left(\frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_A = \ell)}{\underline{Z}'_S \ell_B} + \frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_A = \ell)}{R_{EF}} \right) = r_3 3\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \quad (54c)$$

$$\underline{I}_{E\delta Bmax} = r_3 3 \underline{I}_{(0)B}(\ell_B = \ell) \left(\frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_B = \ell)}{\underline{Z}_S \ell_A} + \frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_B = \ell)}{R_{EF}} \right) = r_3 3 \underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) \quad (55c)$$

ANMERKUNG [Anhang D](#) gibt ein Beispiel für die Berechnung der Ströme, die über Erde fließen.

Wenn die Kabel zusätzliche Eisenarmierung haben, muss der Hersteller den Reduktionsfaktor und die Stromverteilung angeben.

Anhang A (informativ)

Beispiel zur Berechnung eines Doppelerdkurzschlussstromes

A.1 Überblick

Bild A.1 zeigt einen Doppelerdkurzschluss auf einer einfach gespeisten Freileitung.

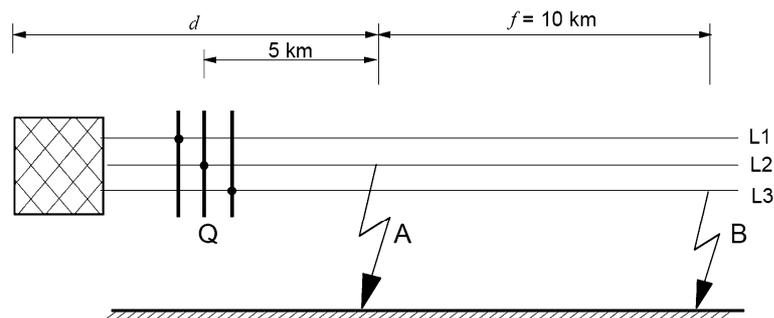


Bild A.1 – Doppelerdkurzschluss auf einer einfach gespeisten Freileitung (siehe [Tabelle 1](#))

A.2 Daten

Nennspannung: $U_n = 66 \text{ kV}$

Nennfrequenz: 50 Hz

Netz mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation

Netzzinnenimpedanz am Anschlusspunkt Q: $\underline{Z}_{(1)Q} = (1,5 + j 15) \Omega$

Anfangs-Kurzschlusswechselstrom am Anschlusspunkt Q des Netzes (siehe [IEC 60909-0](#))

$$I''_{kQ} = \frac{1,1 \cdot 66 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot |1,5 + j 15| \Omega} = 2,8 \text{ kA}$$

Freileitung:

Leiterseile: $3 \times 1 \times 166/88 \text{ mm}^2 \text{ Al/St}$

Erdseil: $1 \times 49 \text{ mm}^2 \text{ Stahl}$, $r_Q = 4,5 \text{ mm}$, $R'_Q = 2,92 \Omega/\text{km}$, $\mu_r = 75$

Mittlerer geometrischer Abstand zwischen dem Erdseil und den Leiterseilen: $d_{QL} = 6 \text{ m}$

Leitungsimpedanzbelag:

Mitsystem $\underline{Z}'_{(1)} = (0,17 + j 0,40) \Omega/\text{km}$

Nullsystem $\underline{Z}'_{(0)} = (0,32 + j 1,40) \Omega/\text{km}$

Spezifischer Erdwiderstand bei steinigem Boden: $\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$

Erdstromtiefe: $\delta = 2\,950 \text{ m}$ nach [Tabelle 2](#) oder Gleichung (36)

Mastausbreitungswiderstand: $R_T = 10 \Omega$

Mastabstand: $d_T = 300 \text{ m}$

A.3 Berechnungen

Erdseilimpedanzbelag mit Erdrückleitung nach Gleichung (34) mit $\nu = 1$:

$$\underline{Z}'_Q = 2,92 \frac{\Omega}{\text{km}} + 0,0493 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \left(\frac{75}{4} + \ln \frac{2\,950 \text{ m}}{4,5 \text{ mm}} \right) = (2,969 + j 2,020) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Koppelimpedanzbelag zwischen Erdseil und Leiterseilen mit Erdrückleitung nach Gleichung (35):

$$\underline{Z}'_{QL} = 0,0493 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \ln \frac{2\,950 \text{ m}}{6 \text{ m}} = (0,049 + j 0,389) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Reduktionsfaktor für das Erdseil nach Gleichung (33):

$$r = 1 - \frac{\underline{Z}'_{QL}}{\underline{Z}'_Q} = 1 - \frac{(0,049 + j 0,389) \Omega/\text{km}}{(2,969 + j 2,020) \Omega/\text{km}} = 0,928 - j 0,082; \quad r = 0,931$$

Eingangsimpedanz nach Gleichung (1) mit $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T = (2,97 + j 2,02) (\Omega/\text{km}) \cdot 0,3 \text{ km}$:

$$\underline{Z}_P = 0,5 \cdot (0,891 + j 0,606) \Omega + \sqrt{[0,5 \cdot (0,891 + j 0,606)]^2 + 10 \cdot (0,891 + j 0,606)} \Omega = (3,610 + j 1,303) \Omega$$

Gleichung (8) aus [Tabelle 1](#) führt auf

$$\underline{I}''_{kEE} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 66 \text{ kV}}{(14,1 + 3,4 + 3,2) \Omega + j (102 + 8 + 14) \Omega} = (0,285 - j 1,709) \text{ kA}; \quad I''_{kEE} = 1,732 \text{ kA}$$

mit

$$6\underline{Z}_{(1)d} = 6 \cdot \left((1,5 + j 15) \Omega + 5 \text{ km} \cdot (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}} \right) = (14,1 + j 102) \Omega$$

$$2\underline{Z}_{(1)f} = 2 \cdot 10 \text{ km} (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3,4 + j 8) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)f} = 10 \text{ km} (0,32 + j 1,4) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3,2 + j 14) \Omega$$

Der nach Erde fließende Strom über die Mastausbreitungswiderstände R_T an den Kurzschlussstellen A und B wird mit Gleichung (13) bestimmt:

$$I_T = (0,928 - j 0,082) (0,285 - j 1,709) \text{ kA} \frac{(3,610 + j 1,303) \Omega}{(3,610 + j 1,303) \Omega + 2 \cdot 10 \Omega} = (0,094 - j 0,244) \text{ kA};$$

$$I_T = 0,262 \text{ kA}$$

Anhang B (informativ)

Beispiele zur Berechnung von Teilkurzschlussströmen über Erde

B.1 Überblick

In den [Bildern B.1](#) und [B.3](#) ist ein Netz mit 132 kV bei 50 Hz dargestellt. Die Abstände sind 40 km zwischen den Stationen A und B und 100 km zwischen den Stationen B und C.

B.2 Daten

Station A:

Kurzschlussimpedanz	$\underline{Z}_A = (0 + j 6,4) \Omega$
Nullimpedanz des Transformators	$\underline{Z}_{(0)A} = (0 + j 12) \Omega$

Station B:

Kurzschlussimpedanz	$\underline{Z}_B = (0 + j 7,6) \Omega$
Nullimpedanz des Transformators	$\underline{Z}_{(0)B} = (0 + j 7) \Omega$
Widerstand des Maschenerders	$R_{EB} = 5 \Omega$

Station C:

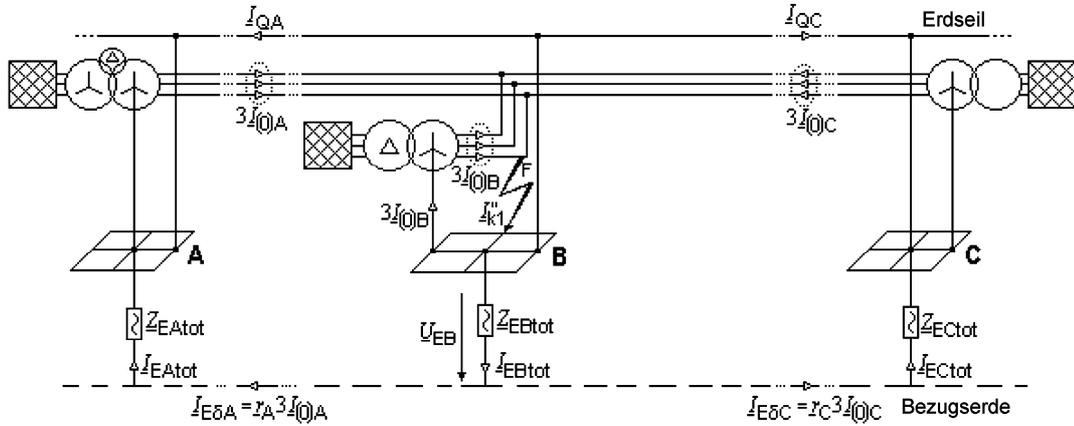
Kurzschlussimpedanz	$\underline{Z}_C = (0 + j 21) \Omega$
Nullimpedanz des Transformators	$\underline{Z}_{(0)C} = (0 + j 20,3) \Omega$

Freileitung:

Leiterseile	$3 \times 2 \times 240 / 40 \text{ mm}^2 \text{ Al/St}$
Erdseil	$1 \times 240 / 40 \text{ mm}^2 \text{ Al/St}$
Mitimpedanzbelag	$\underline{Z}'_{(1)L} = \underline{Z}'_L = (0,06 + j 0,298) \Omega/\text{km}$
Nullimpedanzbelag	$\underline{Z}'_{(0)L} = (0,272 + j 1,48) \Omega/\text{km}$
Spezifischer Erdwiderstand	$\rho = 1\,000 \Omega \text{ m}$
Erdstromtiefe	$\delta = 2\,950 \text{ m}$ nach Tabelle 2
Erdseilimpedanzbelag	$\underline{Z}'_Q = (0,17 + j 0,801) \Omega/\text{km}$
Erdseilreduktionsfaktor	$r_A = r_B = r_C = r_{\underline{}} = 0,6 - j 0,03 \approx 0,6$
Mastausbreitungswiderstand	$R_T = 10 \Omega$
Mastabstand	$d_T = 400 \text{ m}$
Länge der Freileitung zwischen A und B	$\ell_1 = 40 \text{ km}$
Länge der Freileitung zwischen B und C	$\ell_2 = 100 \text{ km}$

B.3 Erdkurzschluss innerhalb einer Anlage

Wie in Bild B.1 gezeigt, tritt ein Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B auf.



**Bild B.1 – Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B.
Netzschaltplan mit den Anlagen A, B und C**

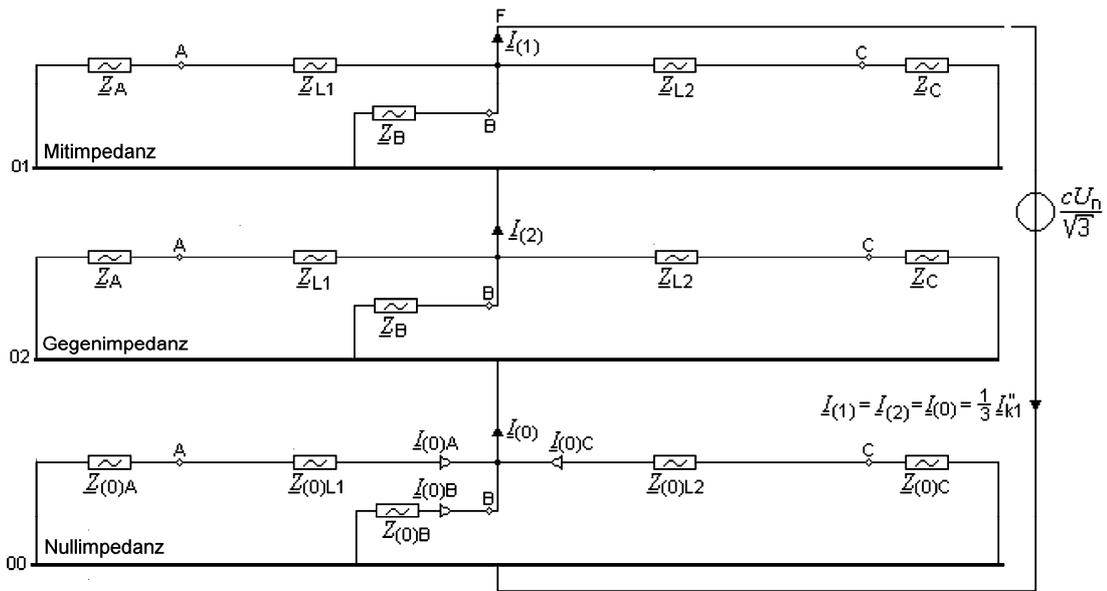


Bild B.2 – Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B. Mit-, Gegen- und Nullsystem mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle F innerhalb der Anlage B

Der Erdkurzschlussstrom kann bei Verwendung des Bildes B.2 nach IEC 60909-0, Gleichung (52) berechnet werden:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 132 \text{ kV}}{2 \cdot (0,222 + j 4,876) \Omega + (0,115 + j 6,157) \Omega} = (0,555 - j 15,789) \text{ kA};$$

$$I_{k1}'' = 15,799 \text{ kA}$$

mit

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_{L2}}} = (0,222 + j 4,876) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}_{(0)L2}}} = (0,115 + j 6,157) \Omega$$

Der Nullstrom an der Kurzschlussstelle ist gegeben durch:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{k1}'' = (0,1850 - j 5,2630) \text{ kA}$$

Die Teilkurzschlussströme im Nullsystem des Bildes B.2 sind:

$$\underline{I}_{(0)A} = (0,0753 - j 0,4439) \text{ kA} ; I_{(0)A} = 0,450 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = (0,0763 - j 4,6319) \text{ kA} ; I_{(0)B} = 4,633 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)C} = (0,0334 - j 0,1872) \text{ kA} ; I_{(0)C} = 0,190 \text{ kA}$$

Der Erdersummenstrom \underline{I}_{EBtot} , der über \underline{Z}_{EBtot} an der Kurzschlussstelle in der Station B fließt (Bild B.1), wird nach Gleichung (16) berechnet, wenn $r_A = r_C = r$:

$$\underline{I}_{EBtot} = r \cdot 3 \cdot (\underline{I}_{(0)A} + \underline{I}_{(0)C}) = 0,6 \cdot 3 \cdot (0,1088 - j 0,6311) \text{ kA} = (0,1958 - j 1,1360) \text{ kA};$$

$$I_{EBtot} = 1,1528 \text{ kA}$$

Die Eingangsimpedanz zur Berechnung von \underline{Z}_{EBtot} findet man mit $\underline{Z}_Q = \underline{Z}_Q' d_T$ nach Gleichung (1):

$$\underline{Z}_P = 0,5 \cdot (0,068 + j 0,3204) \Omega + \sqrt{[0,5 \cdot (0,068 + j 0,3204)]^2 + 10 \cdot (0,068 + j 0,3204) \Omega} = (1,4369 + j 1,306) \Omega$$

Die Gesamterdungsimpedanz \underline{Z}_{EBtot} der Anlage B mit zwei abgehenden Freileitungen wird mit Gleichung (17) berechnet:

$$\underline{Z}_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{5 \Omega} + \frac{2}{(1,4369 + j 1,306) \Omega}} = (0,6845 + j 0,4928) \Omega$$

Die Erderspannung der Anlage B findet man mit Gleichung (18):

$$\underline{U}_{EB} = (0,6845 + j 0,4928) \Omega (0,1958 - j 1,1360) \text{ kA} = (0,6938 - j 0,6811) \text{ kV};$$

$$U_{EB} = 0,9722 \text{ kV}$$

Der Anlagenfernabstand D_F (Gleichung (19)) ist:

$$D_F = 3 \sqrt{R_T} \frac{d_T}{\text{Re}\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\}} = 3 \sqrt{10 \Omega} \frac{0,4 \text{ km}}{\text{Re}\{\sqrt{(0,068 + j 0,3204) \Omega}\}} = 8,53 \text{ km}$$

In einem Abstand größer als D_F , d. h. in einem Abstand weit außerhalb der Stationen, findet man für die Erdseilströme mit den in Gleichung (15) gegebenen Beziehungen:

$$I_{QA} = (1-r)3I_{(0)A} = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0753 - j 0,4439) \text{ kA} = (0,0904 - j 0,5327) \text{ kA};$$

$$I_{QA} = 0,540 \text{ kA}$$

$$I_{QC} = (1-r)3I_{(0)C} = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0334 - j 0,1873) \text{ kA} = (0,0401 - j 0,2247) \text{ kA};$$

$$I_{QC} = 0,288 \text{ kA}$$

Die Ströme durch die Erde weit entfernt von den Stationen A und B sowie B und C sind:

$$I_{E\delta A} = r \cdot 3I_{(0)A} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,450 \text{ kA} = 0,810 \text{ kA}$$

$$I_{E\delta C} = r \cdot 3I_{(0)C} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,190 \text{ kA} = 0,342 \text{ kA}$$

B.4 Erdkurzschluss außerhalb einer Anlage

Der Erdkurzschluss soll weit außerhalb der Stationen an einem Freileitungsmast T zwischen den Stationen B und C in Bild B.3 auftreten. Entfernungen $\ell_{2a} = 60 \text{ km}$ und $\ell_{2b} = 40 \text{ km}$.

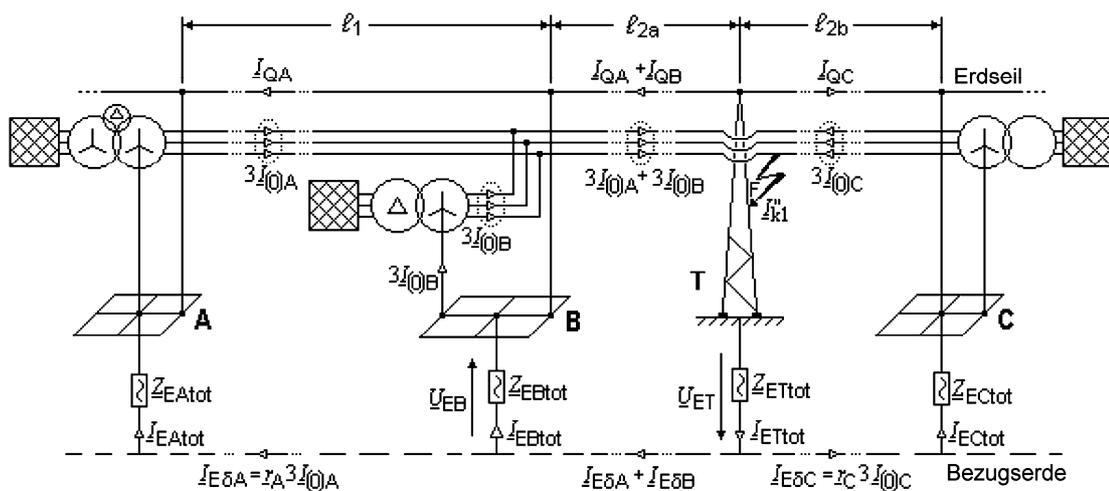


Bild B.3 – Erdkurzschluss außerhalb der Anlagen A, B und C am Mast T einer Freileitung – Netzschaltplan mit den Anlagen A, B und C

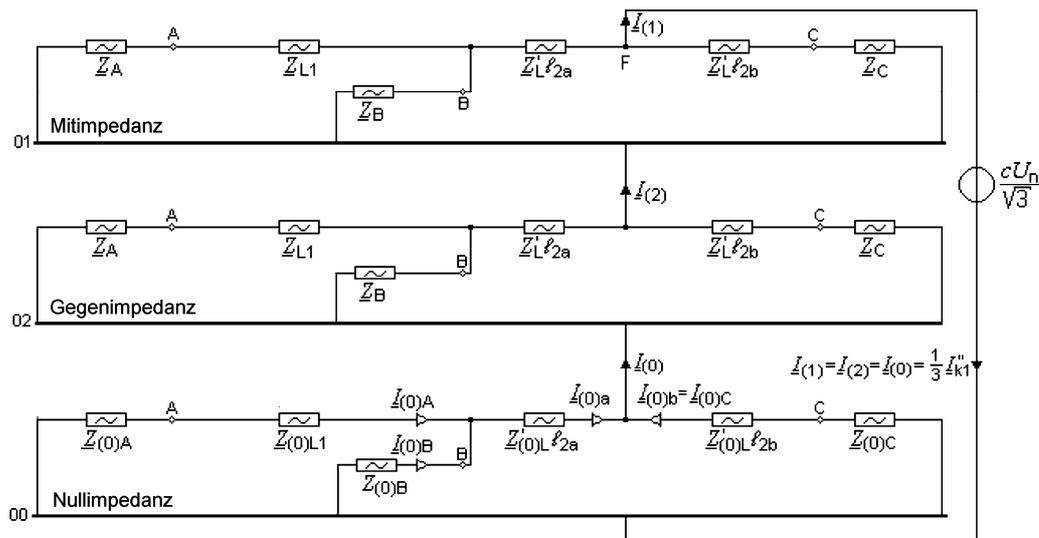


Bild B.4 – Erdkurzschluss außerhalb der Anlagen A, B und C am Mast T einer Freileitung – Mit-, Gegen- und Nullsystem mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle F

Der Erdkurzschlussstrom kann bei Verwendung des Bildes B.4 nach IEC 60909-0, Gleichung (52) berechnet werden:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 132 \text{ kV}}{2(1,7145 + j 13,6602) \Omega + (6,6262 + j 43,3324) \Omega} = (0,4965 - j 3,4889) \text{ kA}$$

mit

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{L'2b} + Z_C} + \frac{1}{Z_{L'2a} + \frac{1}{\frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_{L1} + Z_A}}} = (1,7145 + j 13,6602) \Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)L'2b} + Z_{(0)C}} + \frac{1}{Z_{(0)L'2a} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)B}} + \frac{1}{Z_{(0)L1} + Z_{(0)A}}} = (6,6262 + j 43,3324) \Omega$$

Der Nullstrom an der Kurzschlussstelle ist gegeben durch:

$$I_{(0)} = \frac{1}{3} I_{k1}'' = (0,1655 - j 1,1630) \text{ kA}$$

Die Teilströme im Nullsystem $I_{(0)a}$ und $I_{(0)b}$ auf der linken und der rechten Seite des Mastes T im Bild B.4 findet man wie folgt:

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}'_{(0)L\ell_{2b}} + \underline{Z}_{(0)C}}{\underline{Z}'_{(0)L\ell_{2b}} + \underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}'_{(0)L\ell_{2a}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}} = (0,0851 - j 0,5263) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0,0804 - j 0,6367) \text{ kA} = \underline{I}_{(0)C}; \quad I_{(0)C} = 0,6417 \text{ kA}$$

Die Teilströme im Nullsystem $\underline{I}_{(0)A}$ und $\underline{I}_{(0)B}$ ergeben sich ausgehend von $\underline{I}_{(0)a}$:

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0,0139 - j 0,0452) \text{ kA};$$

$$I_{(0)A} = 0,0473 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0,0712 - j 0,4811) \text{ kA};$$

$$I_{(0)B} = 0,4864 \text{ kA}$$

Der Erdersummenstrom am kurzschlussbetroffenen Mast im [Bild B.3](#) ergibt sich nach Gleichung (22):

$$\underline{I}_{ETtot} = r \underline{I}_{k1}'' = 0,6 \cdot (0,4965 - j 3,4889) \text{ kA} = (0,2979 - j 2,0933) \text{ kA};$$

$$I_{ETtot} = 2,114 \text{ kA}$$

Mit dem Mastausbreitungswiderstand R_T und der wie in [Abschnitt B.3](#) ermittelten Eingangsimpedanz \underline{Z}_P findet man die Gesamterdungsimpedanz \underline{Z}_{ETtot} nach Gleichung (23):

$$\underline{Z}_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{10 \Omega} + \frac{2}{(1,437 + j 1,306) \Omega}} = (0,7048 + j 0,5663) \Omega;$$

$$\underline{Z}_{ETtot} = 0,9041 \Omega$$

Die Erderspannung des Mastes wird mit Gleichung (24) berechnet:

$$\underline{U}_{ET} = \underline{Z}_{ETtot} \underline{I}_{ETtot} = (0,7048 + j 0,5653) \Omega (0,2979 - j 2,0933) \text{ kA} = (1,3954 - j 1,3067) \text{ kV};$$

$$U_{ET} = 1,912 \text{ kV}$$

Die Ströme in den Stationen A, B und C sind:

$$\underline{I}_{EAtot} = r 3 \underline{I}_{(0)A} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,0473 \text{ kA} = 0,0851 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{EBtot} = r 3 \underline{I}_{(0)B} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,4864 \text{ kA} = 0,8754 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{ECtot} = r 3 \underline{I}_{(0)C} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,6417 \text{ kA} = 1,1551 \text{ kA}$$

Die Erderspannung der Station B zum Beispiel wird wie folgt gefunden:

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EB\text{tot}} \cdot r \cdot 3 \underline{I}_{(0)B} = (0,6845 + j 0,4928) \Omega \cdot 0,6 \cdot 3 \cdot (0,0712 - j 0,4811) \text{ kA} = (0,5145 - j 0,5296) \text{ kV}$$

$$U_{EB} = 0,7383 \text{ kV}$$

Die Ströme in den Erdseilen und durch die Erde bei größerer Entfernung zwischen den Stationen und dem kurzschlussbetroffenen Mast (Bild B.3) sind:

$$\underline{I}_{QA} = (1-r) 3 \underline{I}_{(0)A} = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0139 - j 0,0452) \text{ kA} = (0,0167 - j 0,0542) \text{ kA};$$

$$I_{QA} = 0,0567 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{QA} + \underline{I}_{QB} = (1-r) 3 (\underline{I}_{(0)A} + \underline{I}_{(0)B}) = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0851 - j 0,5263) \text{ kA} = (0,1021 - j 0,6316) \text{ kA};$$

$$|\underline{I}_{QA} + \underline{I}_{QB}| = 0,6397 \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{QC} = (1-r) 3 \underline{I}_{(0)C} = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0804 - j 0,6367) \text{ kA} = (0,0965 - j 0,7640) \text{ kA};$$

$$I_{QC} = 0,7701 \text{ kA}$$

$$I_{E\delta A} = r 3 \underline{I}_{(0)A} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,0473 \text{ kA} = 0,0851 \text{ kA}$$

$$I_{E\delta A} + I_{E\delta B} = r 3 |\underline{I}_{(0)A} + \underline{I}_{(0)B}| = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,5331 \text{ kA} = 0,9596 \text{ kA}$$

$$I_{E\delta C} = r 3 \underline{I}_{(0)C} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,6417 \text{ kA} = 1,1551 \text{ kA}$$

B.5 Erdkurzschluss in der Nähe einer Station

Als Beispiel sollen der Erdkurzschlussstrom und die Erderspannungen für den Fall berechnet werden, dass der Kurzschluss am Mast T mit der Nr. 10 auf der Freileitung zwischen den Stationen B und C in einem Abstand von 4,4 km von der Station B (siehe Bild 7) auftritt.

Der Erdkurzschlussstrom wird unter Verwendung von Bild B.4 bei veränderten Leitungslängen nach IEC 60909-0, Gleichung (52) berechnet.

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 132 \text{ kV}}{2(0,4449 + j 5,9037) \Omega + (1,2412 + j 11,9481) \Omega} = (0,9421 - j 10,5022) \text{ kA};$$

$$I_{k1}'' = 10,5444 \text{ kA}$$

mit

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_L(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_C} + \frac{1}{\underline{Z}_L 11 \cdot d_T + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_A}}}} = (0,4449 + j 5,9037) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C}} + \frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}}} = (1,2412 + j 11,9481) \Omega$$

Der Nullstrom an der Kurzschlussstelle ist gegeben durch:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{k1}'' = (0,3141 - j 3,5007) \text{ kA}$$

Die Teilströme im Nullsystem $\underline{I}_{(0)a}$ und $\underline{I}_{(0)b}$ auf der linken und rechten Seite des Mastes T ($n = 10$) werden wie folgt gefunden:

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C}}{\underline{Z}'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}} = (0,2767 - j 3,2458) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0,03731 - j 0,2549) \text{ kA} = \underline{I}_{(0)c};$$

$$\underline{I}_{(0)c} = 0,2577 \text{ kA}$$

Die Nullstromanteile $\underline{I}_{(0)A}$ und $\underline{I}_{(0)B}$ werden ausgehend von $\underline{I}_{(0)a}$ gefunden:

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0,0640 - j 0,2817) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{(0)A} = 0,2888 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0,2128 - j 2,9642) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{(0)B} = 2,9718 \text{ kA}$$

Der Faktor \underline{k} kann nach Gleichung (3) berechnet werden:

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_P}{R_T} = 1 + \frac{(1,4369 + j 1,3060) \Omega}{10 \Omega} = (1,1437 + j 0,1306)$$

Die Erdungsimpedanz der Station B wird in diesem Falle mit Gleichung (29) berechnet:

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} = \frac{1}{\frac{1}{5 \Omega} + \frac{1}{(1,4370 + j 1,3060) \Omega}} = (1,2698 + j 0,7568) \Omega$$

Die Eingangsimpedanz der endlichen Kette für $n = 10$ findet man nach Gleichung (2):

$$\underline{Z}_{P10} = (1,4294 + j 1,3200) \Omega; \quad \underline{Z}_{P10} = 1,9457 \Omega$$

Die Erdungsimpedanz des kurzschlussbetroffenen Mastes ist mit Gleichung (28) zu berechnen:

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} = \frac{1}{\frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{(1,437 0 + j 1,306 0) \Omega}} = (1,369 0 + j 0,985 6) \Omega$$

Den über \underline{Z}_{ET} fließenden Strom I_{ET10} am Mast $n = 10$ findet man mit Gleichung (27):

$$I_{ET10} = r I_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{P10}}{\underline{Z}_{P10} + \underline{Z}_{ET}} - r 3 I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{\underline{k}^{10}} = 0,6 (0,942 1 - j 10,502 2) \text{ kA} \frac{(1,429 4 + j 1,320 0) \Omega}{(2,798 + j 2,306) \Omega}$$

$$- 0,6 \cdot 3 \cdot (0,212 8 - j 2,964 2) \text{ kA} \frac{(1,269 7 + j 0,756 8) \Omega}{(2,706 7 + j 2,062 8) \Omega} \cdot \frac{1}{(1,143 7 + j 0,130 6)^{10}} = (1,019 4 - j 3,141 7) \text{ kA}$$

$$I_{ET10} = 3,302 9 \text{ kA}$$

Die Erderspannung am kurzschlussbetroffenen Mast ist nach Gleichung (30):

$$\underline{U}_{ET10} = \underline{Z}_{ET} I_{ET10} = (4,491 8 - j 3,296 1) \text{ kV}; \quad U_{ET10} = 5,571 4 \text{ kV}$$

Den über \underline{Z}_{EB} fließenden Strom findet man in diesem Falle des Erdkurzschlusses am Mast ($n = 10$) in der Nähe der Station B mit Gleichung (31):

$$I_{EB10} = r I_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{P10}} \cdot \frac{2\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \underline{k}^{10} - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \underline{k}^{-10}} - r 3 I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P}$$

$$= 0,6 (0,942 1 - j 10,502 2) \text{ kA} \frac{(1,369 0 + j 0,985 6) \Omega}{(2,798 4 + j 2,305 6) \Omega} (0,118 5 - j 0,232 3)$$

$$- 0,6 \cdot 3 \cdot (0,212 8 - j 2,964 2) \text{ kA} \frac{(1,437 0 + j 1,306 0) \Omega}{(2,706 7 + j 2,062 8) \Omega} = (1,155 7 - j 2,648 7) \text{ kA};$$

$$I_{EB10} = 2,889 9 \text{ kA}$$

Die Erderspannung der Station B wird nach Gleichung (32) berechnet:

$$\underline{U}_{EB10} = \underline{Z}_{EB} I_{EB10} = (-3,472 0 + j 2,488 4) \text{ kV};$$

$$U_{EB10} = 4,272 \text{ kV}$$

Bild B.5 zeigt die Erderspannungen U_{ETn} bezogen auf $U_{ET} = 1,912 \text{ kV}$ nach **Abschnitt B.4** und U_{EBn} bezogen auf die Erderspannung $U_{EB} = 0,972 \text{ kV}$ nach **Abschnitt B.3**.

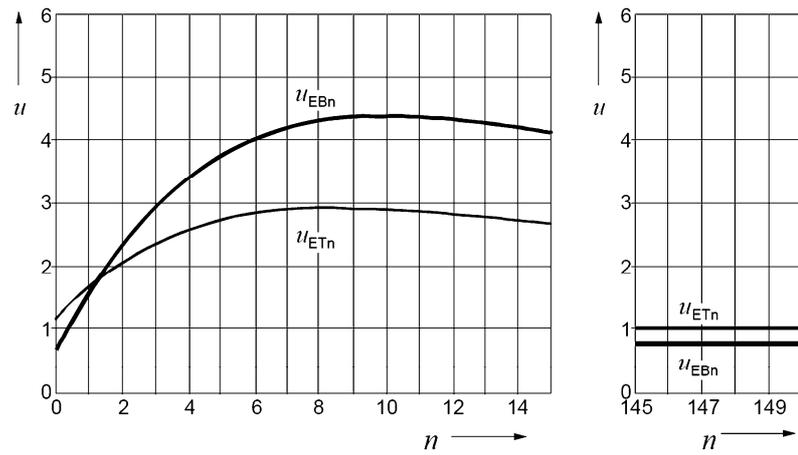


Bild B.5 – Erderspannungen $u_{ETn} = U_{ETn}/U_{ET}$ mit $U_{ET} = 1,912$ kV und $u_{EBn} = U_{EBn}/U_{EB}$ mit $U_{EB} = 0,972$ kV, wenn der Erdkurzschluss an den Masten $n = 1, 2, 3, \dots$ in der Nähe der Station B auftritt

Anhang C (informativ)

Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_1 und die Stromverteilung durch Erde bei einem Dreileiterkabel

C.1 Überblick

Eine 10-kV-Kabelverbindung zwischen den Stationen A und B ist hergestellt durch ein Dreileiterkabel mit einem beidseitig geerdeten Kupferschirm in einem 10-kV-Netz mit direkter Erdung (der Sternpunkt des Einspeisetransformators ist auf der Mittelspannungsseite geerdet).

C.2 Erdkurzschluss am Ende des Kabels

C.2.1 Daten

Kabel: 6/10 kV NA2XS2Y 3 × 150/25

Aluminiumadern: $q_L = 150 \text{ mm}^2$; $r_L = 6,91 \text{ mm}$; $R'_L = 0,206 \text{ } \Omega/\text{km}$;

Kupferschirm: $q_S = 25 \text{ mm}^2$; $r_S = 23,6 \text{ mm}$; $R'_S = 0,714 \text{ } \Omega/\text{km}$;

Abstand zwischen den Adern des Kabels $d = 22,38 \text{ mm}$;

Außendurchmesser des Kabels $D_a = 53 \text{ mm}$

Erdungsimpedanzen: $Z_{EA} = 0,5 \text{ } \Omega$; $Z_{EB} = 0,5 \text{ } \Omega$;

Spezifischer Erdwiderstand: $\rho = 100 \text{ } \Omega \text{ m}$

C.2.2 Impedanzbeläge des Kabels

Mit den in IEC/TR 60909-2 angegebenen Gleichungen (30) und (32) findet man die folgenden Ergebnisse:

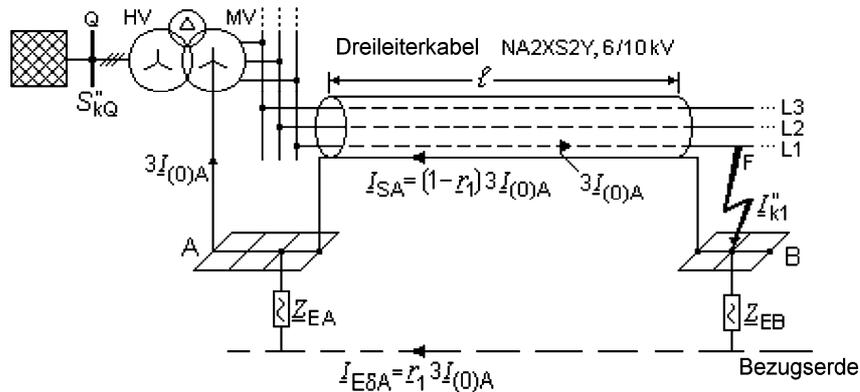
Mitimpedanzbelag:

$$\underline{Z}'_{(1)L} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) = (0,206 + j 0,089 6) \text{ } \Omega/\text{km}$$

Nullimpedanzbelag, wenn der Strom über den Schirm (S) und die Erde (E) zurückfließt:

$$\underline{Z}'_{(0)LSE} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3 \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) - \frac{3 \cdot \left(\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S} \right)^2}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S}} = (1,209 + j 1,092) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

C.2.3 Kurzschlussströme



Netzeinspeisung: $S_{kQ}'' = 3\,000\text{ MVA}$; $U_{nQ} = 110\text{ kV}$; $R_Q/X_Q = 0,1$

Transformator: $S_{rT} = 31,5\text{ MVA}$; $U_{rTHV} = 115\text{ kV}$; $U_{rTLV} = 10,5\text{ kV}$; $u_{kr} = 12\%$; $u_{Rr} = 1\%$; $Z_{(0)T} = 1,6 \cdot Z_{(1)T}$

Bild C.1 – Beispiel für die Berechnung des Kabelreduktionsfaktors und der Stromverteilung durch Erde in einem 10-kV-Netz, $U_n = 10\text{ kV}$; $c = 1,1$; $f = 50\text{ Hz}$

Nach 6.1 werden die Impedanzen Z_{EA} und Z_{EB} bei der Berechnung der Kurzschlussströme mit Erdberührung vernachlässigt.

Kurzschlussströme:

$$I_k'' = I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}(Z_{Qt} + Z_{TLV} + Z'_{(1)L}\ell)};$$

$$I_k''(\ell = 0) = (1,186 + j\,13,844)\text{ kA}$$

Erdkurzschlussstrom mit Rückfluss über Schirm und Erde:

$$I_{k1SE}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{2Z_{Qt} + 2Z_{TLV} + Z_{(0)TLV} + (2Z'_{(1)L} + Z'_{(0)LSE}) \cdot \ell}$$

$$I_{k1SE}''(\ell = 0) = (1,015 - j\,11,968)\text{ kA}$$

C.2.4 Reduktionsfaktor, Strom im Schirm und Strom durch die Erde

Der Strom im Schirm wird mit Gleichung (40) berechnet:

$$I_{SA} = (1-r_1)3I_{(0)A} = (1-r_1)I_{k1SE}''$$

Den Teilkurzschlussstrom über Erde findet man mit Gleichung (41):

$$I_{E\delta A} = r_1 3I_{(0)A} = r_1 I_{k1SE}''$$

Der Reduktionsfaktor r_1 folgt aus Gleichung (37):

$$r_1 = \frac{R'_S}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r'_S}} = \frac{0,714 \frac{\Omega}{\text{km}}}{\left(0,714 + 0,04935 + j \cdot 0,06283 \cdot \ln \frac{931 \text{ m}}{23,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \right) \frac{\Omega}{\text{km}}}$$

$$r_1 = 0,5318 - j 0,4633 ; \quad r_1 = 0,7053$$

Bild C.2 zeigt die berechneten Kurzschlussströme, die Ströme im Schirm und die Ströme durch Erde abhängig von der Länge $\ell \geq 1 \text{ km}$ des Kabels zwischen den Stationen A und B.

Erderspannung in der Station A wird bei $\ell = 5 \text{ km}$ und $I_{E\delta A} = 1,175 \text{ kA}$ (siehe Tabelle C.1):

$$U_{EA} = Z_{EA} I_{E\delta A} = 0,5 \Omega \cdot 1,175 \text{ kA} = 588 \text{ V}$$

Tabelle C.1 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.1

ℓ	I''_{k1SE}	I''_{k1SE}	I_{SA}	I_{SA}	$I_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA
1	2,983 - j 4,846	5,690	3,641 - j 0,887	3,748	-0,659 - j 3,959	4,014
5	1,200 - j 1,156	1,666	1,097 + j 0,015	1,097	0,103 - j 1,170	1,175
10	0,661 - j 0,578	0,878	0,577 + j 0,036	0,578	0,084 - j 0,613	0,619

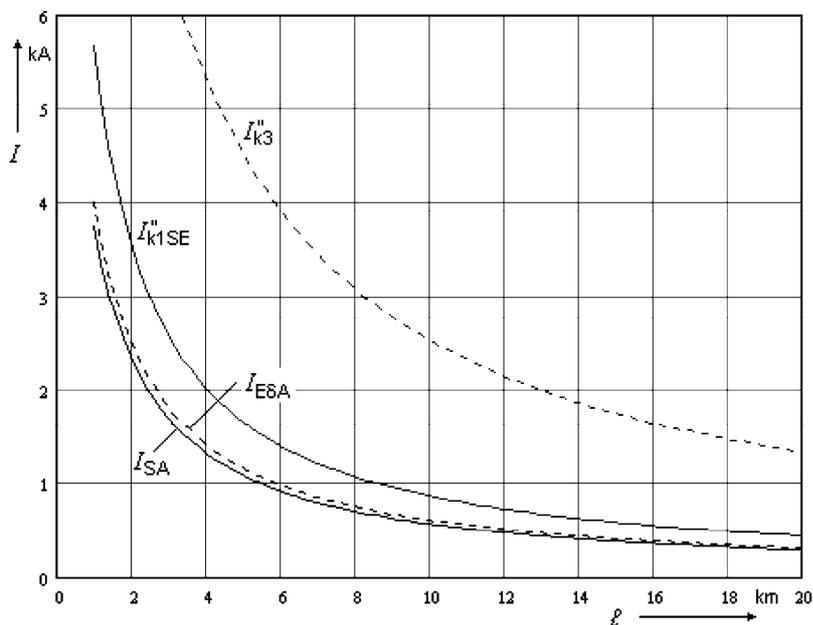


Bild C.2 – Kurzschlussströme und Teilkurzschlussströme im Schirm und durch Erde für das Beispiel im Bild C.1

C.3 Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B

C.3.1 Anordnung und Daten

Die Anordnung ist im Bild C.3 gegeben.

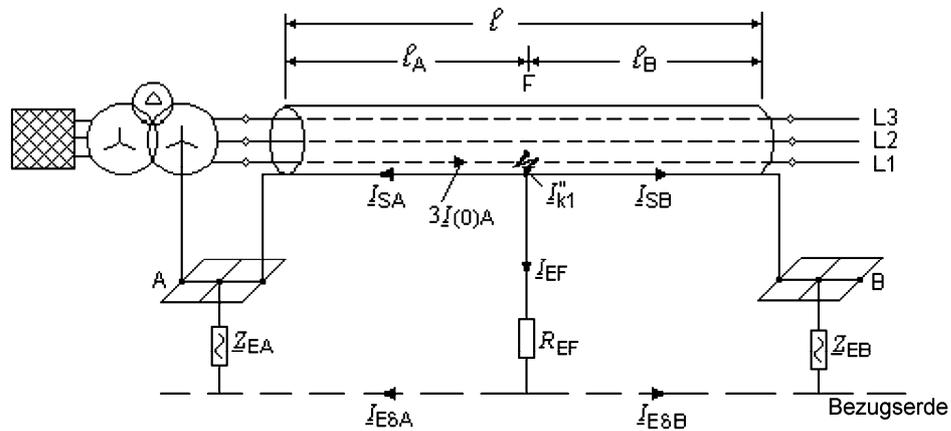


Bild C.3 – Beispiel für die Berechnung der Stromverteilung in einem 10-kV-Netz mit einem Kurzschluss auf dem Kabel zwischen A und B (Daten nach C.2.1 und Bild C.1)

Der Erdkurzschluss im Bild C.3 wird nur von der Station A gespeist. Für den Erdkurzschluss wird an der Kurzschlussstelle F eine Erdverbindung angenommen mit $R_{EF} = 5 \Omega$ (siehe 8.2.2.2).

C.3.2 Berechnungsergebnisse

Der Reduktionsfaktor $r_1 = 0,5318 - j 0,4633$ wurde bereits mit Gleichung (37) berechnet.

Die Ströme I_{SA} und $I_{E\delta A}$ auf der linken Seite der Kurzschlussstelle werden mit den Gleichungen (42) und (45) und die Ströme auf der rechten Seite der Kurzschlussstelle mit den Gleichungen (43) und (46) berechnet. Im Falle von $3I_{(0)B} = 0$ entsprechend Bild C.3 ist die folgende Beziehung gültig: $I_{E\delta B} = -I_{SB}$.

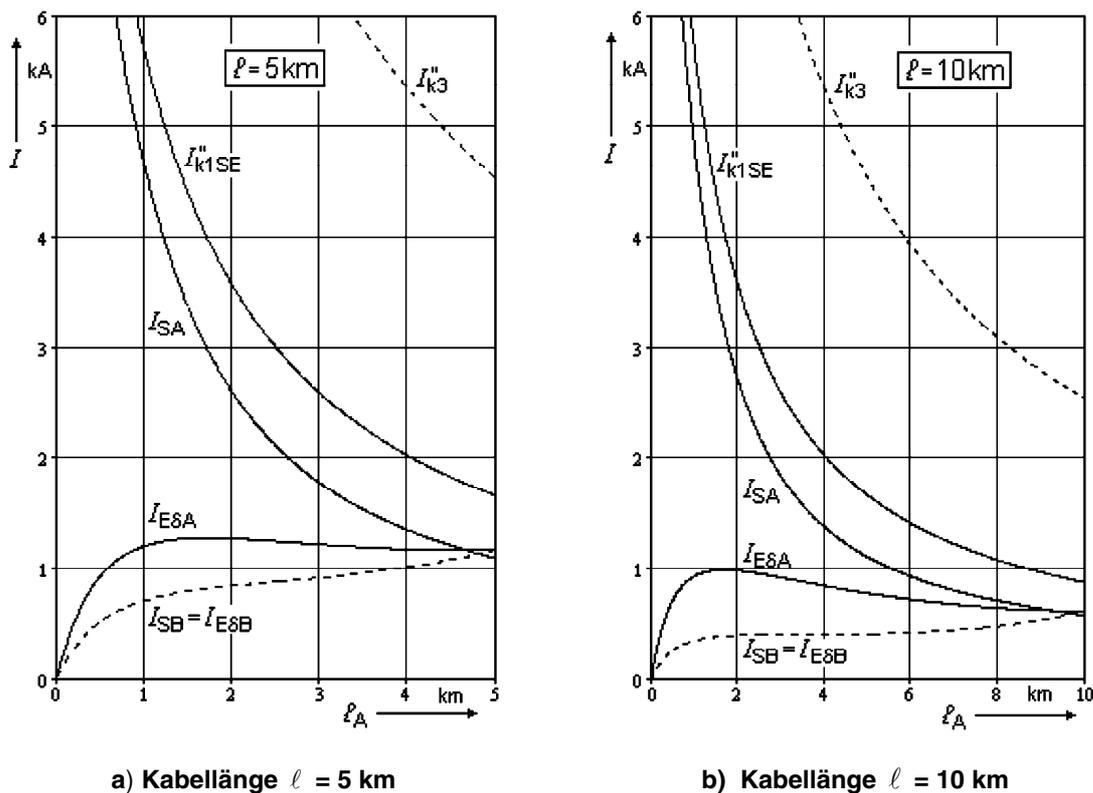


Bild C.4 – Erdkurzschlussströme, Teilkurzschlussströme im Schirm und Teilkurzschlussströme durch Erde

Tabelle C.2 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 5 \text{ km}$

ℓ_A	I_{k1SE}''	\underline{I}_{SA}	I_{SA}	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\delta B}$	I_{SB}	$\underline{I}_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0	12,000	1,016 – j 11,967	12,000	0	0	0	0
1	5,090	2,911 – j 3,640	4,661	–0,183 – j 0,688	0,712	0,072 – j 1,206	1,208
2,5	3,006	1,858 – j 1,011	2,115	–0,188 – j 0,874	0,882	0,128 – j 1,246	1,253
5	1,666	1,097 + j 0,015	1,097	0,103 – j 1,170	1,175	0,103 – j 1,170	1,175

Tabelle C.3 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 10 \text{ km}$

ℓ_A	I_{k1SE}''	\underline{I}_{SA}	I_{SA}	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\delta B}$	I_{SB}	$\underline{I}_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0	12,000	1,016 – j 11,967	12,000	0	0	0	0
1	5,690	2,800 – j 3,931	4,826	–0,094 – j 0,338	0,351	0,183 – j 0,915	0,933
2,5	3,006	1,750 – j 1,330	2,198	–0,075 – j 0,309	0,405	0,236 – j 0,928	0,957
5	1,666	1,036 – j 0,394	1,108	–0,061 – j 0,409	0,413	0,164 – j 0,762	0,779
10	0,878	0,577 – j 0,036	0,578	0,084 – j 0,613	0,619	0,084 – j 0,613	0,619

Anhang D (informativ)

Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung durch Erde bei drei Einleiterkabeln

D.1 Überblick

Eine 110-kV-Kabelverbindung zwischen den Stationen A und B besteht aus drei Einleiterkabeln mit beidseitig geerdeten Bleimänteln in einem 110-kV-Netz mit direkt geerdetem Sternpunkt.

D.2 Erdkurzschluss am Ende des Kabels

D.2.1 Daten

Einleiterkabel 64/110 kV, 2XK2Y: $3 \times 1 \times 630$ rm, Cu, in Dreiecksanordnung.

Kupferadern: $q_L = 630 \text{ mm}^2$; $r_L = 15,6 \text{ mm}$; $R'_L = 0,0283 \text{ } \Omega/\text{km}$;

Bleimantel: $q_S = 550 \text{ mm}^2$; $r_S = r_{Sm} = 39,8 \text{ mm}$; $R'_S = 0,379 \text{ } \Omega/\text{km}$;

Außendurchmesser des Kabels $D_a = 85 \text{ mm}$;

Abstand zwischen den Adern des Kabels $d = 1,06 \cdot D_a = 90,1 \text{ mm}$;

spezifischer Erdwiderstand $\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m}$.

D.2.2 Kabelimpedanzbeläge

Mitimpedanzbelag (IEC/TR 60909-2, Gleichung (15)):

$$\underline{Z}'_{(1)LS} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r_L} \right) + \frac{\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{Sm}} \right)^2}{R'_S + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{Sm}}} = (0,0351 + j 0,125) \text{ } \Omega/\text{km}$$

ANMERKUNG 1 Bei Berücksichtigung der Ströme in den Mänteln während des Normalbetriebes (kein Auskreuzen der Mäntel) ist der Realteil von $\underline{Z}'_{(1)LS}$ höher als der Realteil von $\underline{Z}'_{(1)L}$; wegen der Verluste in den Mänteln siehe IEC/TR 60909-2, Tabelle 5.

Nullimpedanzbelag, wenn der Strom nur durch die Mäntel zurückfließt:

$$\underline{Z}'_{(0)LS} = R'_L + R'_S + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{r_S}{r_L} \right) = (0,4073 + j 0,0746) \text{ } \Omega/\text{km}$$

Nullimpedanzbelag, wenn der Strom durch die Mäntel und die Erde zurückfließt (IEC/TR 60909-2, Gleichung (16)):

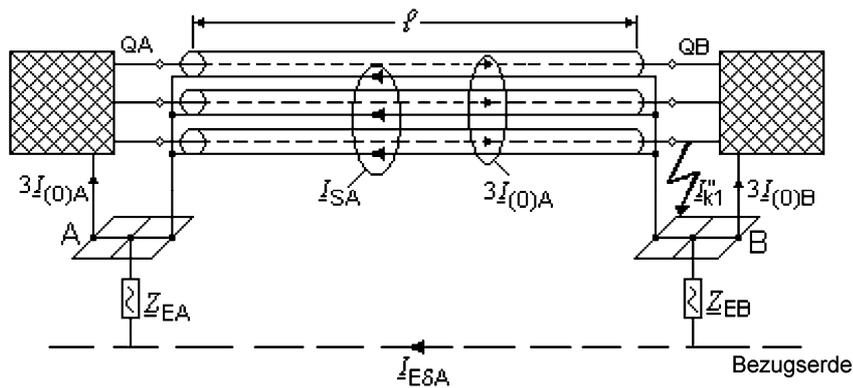
$$\underline{Z}'_{(0)LSE} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3 \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{\eta_L d^2}} \right) - \frac{\left(3\omega \frac{\mu_0}{8} + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{\eta_L d^2}} \right)^2}{R'_S + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{\eta_L d^2}}} = (0,3856 + j0,1483) \Omega/\text{km}$$

ANMERKUNG 2 Die Nullimpedanz $\underline{Z}'_{(0)LS} = 0,4141 \Omega/\text{km}$ unterscheidet sich für den Fall, dass der Strom nur durch die Mäntel zurückfließt, nur um etwa 0,2 % von $\underline{Z}'_{(0)LSE} = 0,4131 \Omega/\text{km}$.

D.2.3 Kurzschlussströme

Aus dem Netzaufbau und den in Bild D.1 gegebenen Daten können die folgenden Kurzschlussströme für einen Erdkurzschluss in der Station B ermittelt werden.

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}$$



Netzeinspeisung QA: $\underline{Z}_{(1)QA} = (0,442 + j4,418) \Omega$; $\underline{Z}_{(0)QA} = (1,768 + j8,836) \Omega$

Netzeinspeisung QB: $\underline{Z}_{(1)QB} = (1,350 + j8,000) \Omega$; $\underline{Z}_{(0)QB} = (4,050 + j12,800) \Omega$

Bild D.1 – Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors und der Stromverteilung bei drei Einleiterkabeln und einem Erdkurzschluss in der Station B

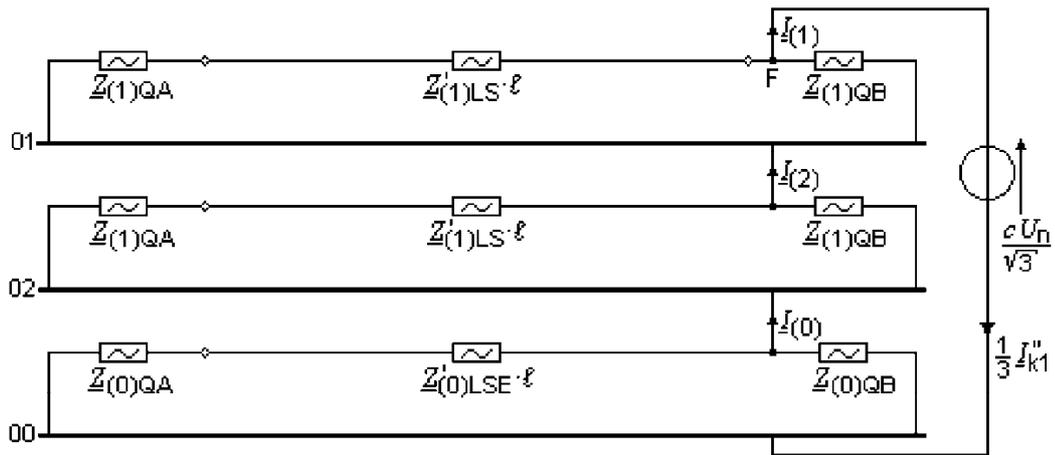


Bild D.2 – Mit-, Gegen- und Nullsystem des Netzes im Bild D.1 mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle (Station B)

Im Falle einer Kabellänge $\ell = 5$ km (zum Beispiel) findet man den Erdkurzschlussstrom an der Kurzschlussstelle in Station B ausgehend von Bild D.2:

$$I_{k1}'' = 3I_{(0)} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2Z_{(1)} + Z_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \text{ kV}}{2(0,4339 + j 3,0947) \Omega + (1,9492 + j 5,4842) \Omega} = (4,0939 - j 16,9654) \text{ kA}$$

mit

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(1)QA} + Z'_{(1)LS} \ell} + \frac{1}{Z_{(1)QB}}} = (0,4339 + j 3,0947) \Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)QA} + Z'_{(0)LSE} \ell} + \frac{1}{Z_{(0)QB}}} = (1,9492 + j 5,4841) \Omega$$

Ausgehend von diesem Ergebnis findet man die Teilkurzschlussströme $3I_{(0)A}$ und $3I_{(0)B}$:

$$3I_{(0)A} = I_{k1}'' \frac{Z_{(0)QB}}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LSE} \ell} = (2,5780 - j 9,5528) \text{ kA}$$

$$3I_{(0)B} = I_{k1}'' \frac{Z_{(0)QA} + Z'_{(0)LSE} \ell}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LSE} \ell} = (1,5160 - j 7,4126) \text{ kA}$$

D.2.4 Reduktionsfaktor und Stromverteilung

Der Reduktionsfaktor nach Gleichung (48) für eine Dreiecksanordnung der Einleiterkabel ist:

$$r_3 = \frac{R'_S}{R'_S + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j3\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_S d^2}}} = 0,0572 - j 0,1945;$$

$$r_3 = 0,2027$$

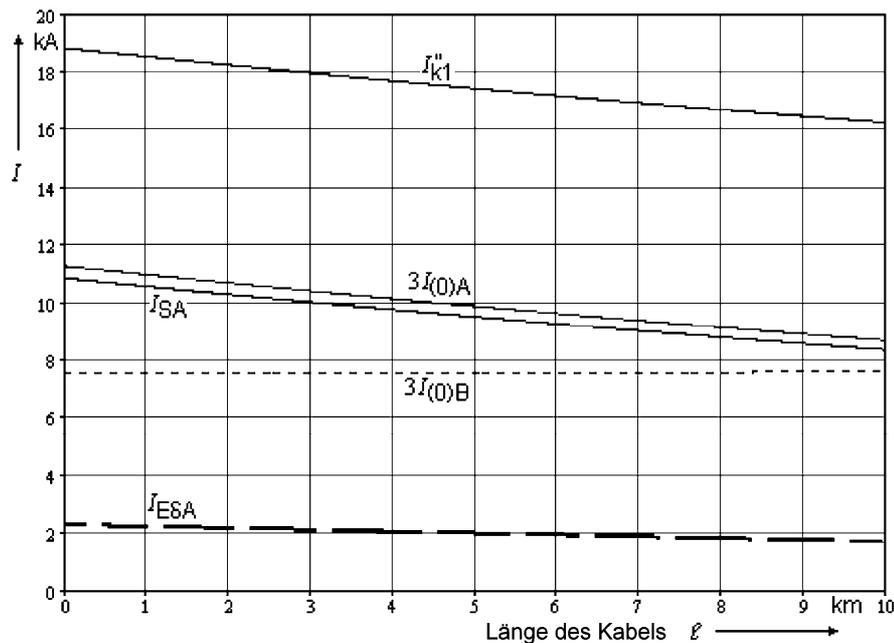
Summe der Ströme in den drei Mänteln nach Gleichung (48) bei $\ell = 5$ km:

$$I_{SA} = (1 - r_3) 3I_{(0)A} = (1 - 0,0572 + j 0,1945) \cdot (2,5780 - j 9,5528) \text{ kA} = (4,2887 - j 8,5054) \text{ kA}$$

Strom durch die Erde nach Gleichung (50) bei $\ell = 5$ km:

$$I_{E\delta A} = r_3 3I_{(0)A} = (0,0572 - j 0,1945) \cdot (2,5780 - j 9,5528) \text{ kA} = (-1,7108 - j 1,0474) \text{ kA}$$

Bild D.3 zeigt die Stromverteilung abhängig von der Länge ℓ der Kabel zwischen den Stationen A und B.



$$\text{Erdkurzschluss in B: } I_{k1}'' = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B}; \quad 3I_{(0)A} = I_{SA} + I_{E\delta A}$$

Bild D.3 – Stromverteilung für das Netz nach Bild D.1, abhängig von der Länge ℓ der Einleiterkabel zwischen den Stationen A und B

D.3 Erdkurzschluss auf einem der drei Einleiterkabel zwischen den Stationen A und B

D.3.1 Anordnung und Daten

Die Anordnung ist im Bild D.4 gegeben. Der Erdkurzschluss wird von den Stationen A und B gespeist. Die Daten sind in D.2.1 und im Bild D.1 angegeben. Eine Erdverbindung an der Kurzschlussstelle wird angenommen mit $R_{EF} \rightarrow \infty$ oder $R_{EF} = 5 \Omega$ (siehe 8.2.2).

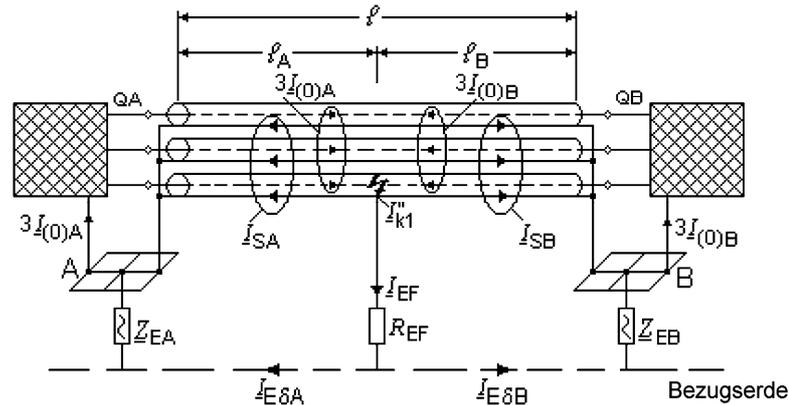


Bild D.4 – Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung bei drei Einleiterkabeln und einem Erdkurzschluss zwischen den Stationen A und B

Netzeinspeisungen QA und QB wie in Bild D.1 angegeben.

D.3.2 Kurzschlussströme

Bild D.5 zeigt das Mit-, Gegen- und Nullsystem passend zum Netzaufbau in Bild D.4.

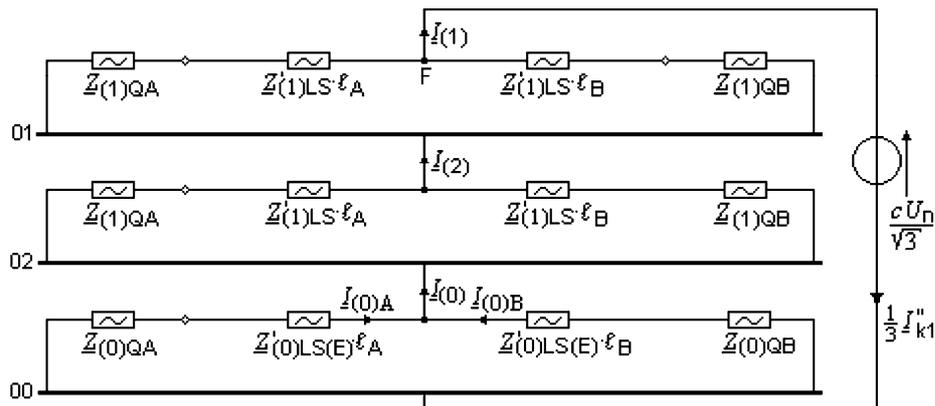


Bild D.5 – Mit-, Gegen- und Nullsystem des Netzes im Bild D.4 mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle (irgendwo zwischen den Stationen A und B)

D.3.3 Stromverteilung im Falle $R_{EF} \rightarrow \infty$

Für den Fall $l_A = 5$ km (zum Beispiel) zwischen der Station A und der Kurzschlussstelle bei einer Gesamtlänge des Kabels $l = 10$ km ($l = l_A + l_B$) findet man den Erdkurzschlussstrom wie folgt:

$$I_{k1}'' = 3I_{(0)} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2Z_{(1)} + Z_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \text{ kV}}{2(0,453 \text{ } 3 + j \text{ } 3,184 \text{ } 4) \Omega + (2,347 \text{ } 1 + j \text{ } 5,422 \text{ } 5) \Omega} = (4,557 \text{ } 3 - j \text{ } 16,516 \text{ } 3) \text{ kA mit}$$

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(1)QA} + Z_{(1)LS} l_A} + \frac{1}{Z_{(1)QB} + Z_{(1)LS} l_B}} = (0,453 \text{ } 2 + j \text{ } 3,184 \text{ } 3) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_A} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_B}} = (2,347\ 1 + j\ 5,422\ 5)\ \Omega$$

Mit diesen Ergebnissen findet man die Teilkurzschlussströme $\underline{I}_{(0)A}$ und $\underline{I}_{(0)B}$:

$$\underline{I}_{(0)A} = \frac{1}{3} \underline{I}_{k1} \frac{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_B}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell} = (0,846\ 2 - j\ 3,279\ 4)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \frac{1}{3} \underline{I}_{k1} \frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_A}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell} = (0,672\ 9 - j\ 2,226\ 0)\ \text{kA}$$

Ströme in den Mänteln nach den Gleichungen (51a) und (52a) mit $r_3 = 0,057\ 2 - j\ 0,194\ 5$ für das numerische Beispiel $\ell_A = 5\ \text{km}$:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - r_3) 3\underline{I}_{(0)A} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_B}{\ell} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} = (2,831\ 0 - j\ 9,697)\ \text{kA};$$

$$I_{SA} = 10,102\ 2\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - r_3) 3\underline{I}_{(0)B} + r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_A}{\ell} + r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} = (1,726\ 3 - j\ 6,818\ 9)\ \text{kA};$$

$$I_{SB} = 7,034\ 1\ \text{kA}$$

Ströme durch die Erde nach den Gleichungen (54a) und (55a) für das numerische Beispiel $\ell_A = 5\ \text{km}$:

$$\underline{I}_{E\delta A} = r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} - r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} = (-0,292\ 5 - j\ 0,140\ 9)\ \text{kA};$$

$$I_{E\delta A} = 0,324\ 6\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = r_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} - r_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} = (0,292\ 5 + j\ 0,140\ 9)\ \text{kA};$$

$$I_{E\delta B} = 0,324\ 6\ \text{kA}$$

Der höchste Strom durch den Mantel S1 kann mit Gleichung (51b) oder Gleichung (52b) gefunden werden:

$$\underline{I}_{S1A\max} = 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = 0) + (2 + r_3)\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) = (2,328\ 2 - j\ 16,345\ 4)\ \text{kA};$$

$$I_{S1A\max} = 16,510\ 4\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{S1B\max} = 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = \ell) + (2 + r_3)\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (2,918\ 3 - j\ 13,280\ 5)\ \text{kA};$$

$$I_{S1B\max} = 13,597\ 3\ \text{kA}$$

Der höchste Strom durch die Erde findet man mit Gleichung (54b) oder Gleichung (55b):

$$I_{E\delta A \max} = I_3 3I_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (-1,4191 - j 1,1557) \text{ kA};$$

$$I_{E\delta A \max} = 1,8302 \text{ kA}$$

$$I_{E\delta B \max} = I_3 3I_{(0)B}(\ell_A = 0) = (-0,9915 - j 0,8810) \text{ kA};$$

$$I_{E\delta B \max} = 1,3264 \text{ kA}$$

Bild D.6 zeigt die Stromverteilung abhängig von der Länge ℓ_A zwischen der Station A und der Kurzschlussstelle auf dem Kabel.

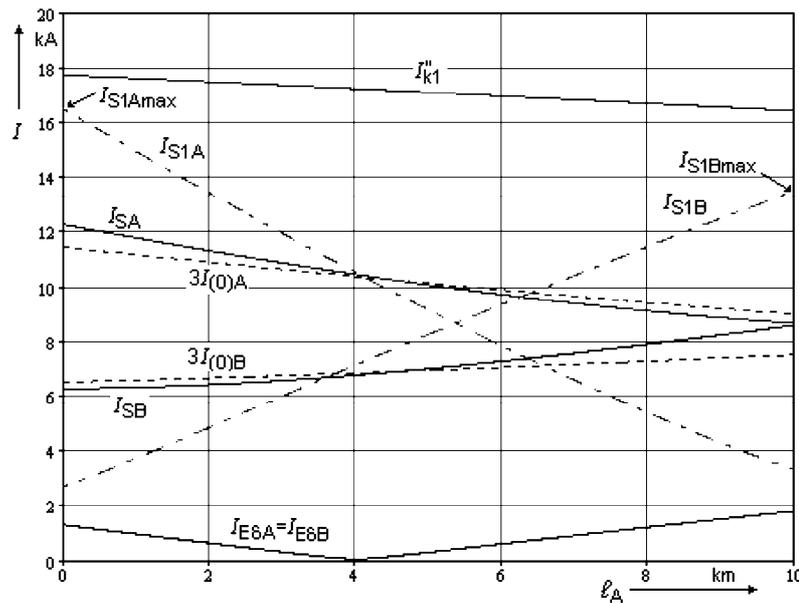


Bild D.6 – Stromverteilung für das Kabel im Bild D.4 abhängig von ℓ_A ; $R_{EF} = \infty$

D.3.4 Stromverteilung im Falle $R_{EF} = 5 \Omega$

Im Falle $\ell_A = 5 \text{ km}$ (zum Beispiel) für das Kabel zwischen der Station A und der Kurzschlussstelle F bei einer Gesamtlänge des Kabels $\ell = 10 \text{ km}$ ($\ell = \ell_A + \ell_B$) findet man für den Erdkurzschlussstrom:

$$I_{k1}'' = 3I_{(0)} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2Z_{(1)} + Z_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 110 \text{ kV}}{2(0,4532 + j 3,1843) \Omega + (2,2925 + j 5,6134) \Omega} = (4,3588 - j 16,3269) \text{ kA}$$

mit

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(1)QA} + Z_{(1)LS} \ell_A} + \frac{1}{Z_{(1)QB} + Z_{(1)LS} \ell_B}} = (0,4532 + j 3,1843) \Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)LS} \ell_A} + \frac{1}{Z_{(0)QB} + Z_{(0)LS} \ell_B}} = (2,2925 + j 5,6134) \Omega$$

Hiermit findet man die Teilkurzschlussströme $3I_{(0)A}$ und $3I_{(0)B}$:

$$3I_{(0)A} = I_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE} \ell_B}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE} \ell} = (2,3867 - j 9,6916) \text{ kA}$$

$$3I_{(0)B} = I_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LSE} \ell_A}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE} \ell} = (1,9721 - j 6,6354) \text{ kA}$$

Gesamterdungsimpedanz des Mantels mit $R_{EF} = 5 \Omega$ (Gleichung (47)):

$$\underline{Z}_{EStot} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_S \cdot 5 \text{ km}} + \frac{1}{\underline{Z}'_S \cdot 5 \text{ km}} + \frac{1}{5 \Omega}} = (1,1433 + j 1,0039) \Omega$$

Ströme in den Mänteln mit den Gleichungen (51) und (52) bei $r_3 = 0,0573 - j 0,1945$ für das numerische Beispiel $\ell_A = 5 \text{ km}$:

$$I_{SA} = (1 - r_3)3I_{(0)A} + r_3 3I_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + r_3 3I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} = (2,8279 - j 9,0665) \text{ kA}$$

$$I_{SB} = (1 - r_3)3I_{(0)B} + r_3 3I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + r_3 3I_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} = (1,8425 - j 6,2656) \text{ kA}$$

Ströme durch die Erde nach den Gleichungen (54) und (55) für das numerische Beispiel $\ell_A = 5 \text{ km}$:

$$I_{E\delta A} = r_3 3I_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + r_3 3I_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - r_3 3I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} = (-0,4412 - j 0,6250) \text{ kA}$$

$$I_{E\delta B} = r_3 3I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + r_3 3I_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{FE}} - r_3 3I_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} = (0,1296 - j 0,3697) \text{ kA}$$

Höchste Ströme durch den Mantel S1 wie in [D.3.3](#) angegeben.

Der höchste Strom durch Erde wird mit Gleichung (54c) gefunden, wenn der Kurzschlussstrom nur von der Station A mit $3I_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (2,5146 - j 10,0276) \text{ kA}$ eingespeist wird:

$$I_{E\delta Amax} = r_3 3I_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (-1,5287 - j 1,0621) \text{ kA};$$

$$I_{E\delta Amax} = 1,8614 \text{ kA}$$

Wenn der Kurzschlussstrom von beiden Seiten gespeist wird wie in [Bild D.4](#), wird als Ergebnis $I_{E\delta Amax} = 1,7644 \text{ kA}$ gefunden (siehe [Bild D.7](#)).

[Bild D.7](#) zeigt die Stromverteilung abhängig von der Länge ℓ_A zwischen der Station A und der Kurzschlussstelle.

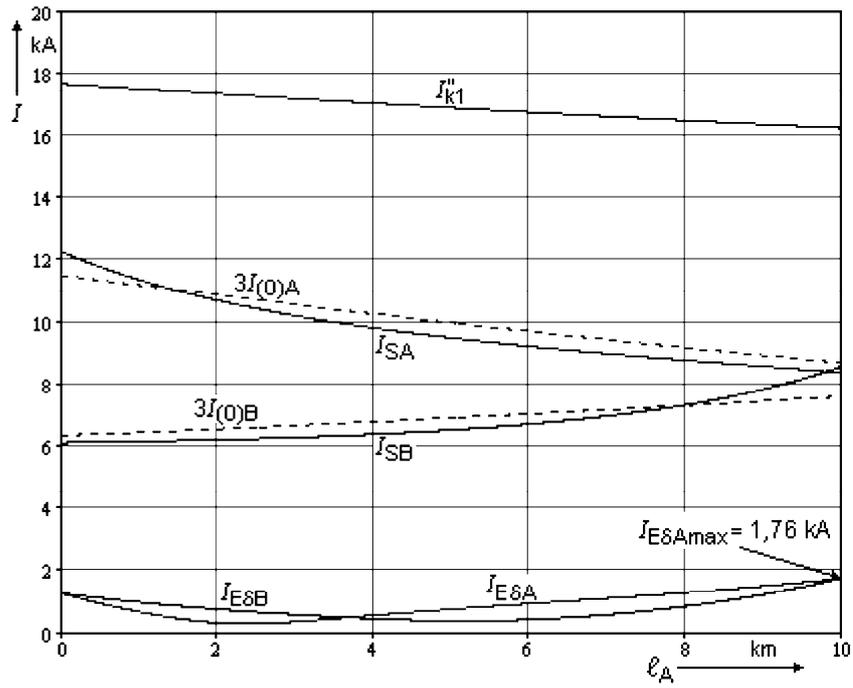


Bild D.7 – Stromverteilung für das Kabel im Bild D.4 abhängig von l_A ; $R_{EF} = 5 \Omega$

Anhang ZA (normativ)

Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ANMERKUNG Wenn internationale Publikationen durch gemeinsame Abänderungen geändert wurden, durch (mod.) angegeben, gelten die entsprechenden EN/HD.

<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
IEC 60909-0	2001	Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents	IEC 60909-0	2001
IEC/TR 60909-2	2008	Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations	–	–