

	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	Einsprüche bis 2007-10-31 Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3):2004-05 Entwurf Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde (IEC 73/140/CDV:2007); Deutsche Fassung prEN 60909-3:2007 Short-circuit currents in three phase ac systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short circuit currents flowing through earth (IEC 73/140/CDV:2007); German version prEN 60909-3:2007 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 73/140/CDV:2007); Version allemande prEN 60909-3:2007 Anwendungswarnvermerk Dieser Norm-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten – vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen. Gesamtumfang 107 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE	

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN 60909-3:2007 „Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 73/140/CDV:2007 „Short-circuit currents in three phase ac systems – Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short circuit currents flowing through earth“ unverändert in den Entwurf prEN 60909-3:2007 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 73 „Short-circuit currents“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

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

Änderungen

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

- a) Neuer Abschnitt 8 über die Berechnung der Stromverteilung und des Reduktionsfaktors bei Kabeln mit beidseitig geerdeten, metallischen Mänteln oder Schirmen
- b) Neuer Anhang C mit einem Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_1 und die Stromverteilung durch Erde bei einem Dreileiterkabel
- c) Neuer Anhang D mit einem Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung durch Erde bei drei Einleiterkabeln

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	DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07	VDE 0102
—	IEC TR 60909-2:1992	DIN EN 60909-0 Bbl. 4 (VDE 0102 Bbl. 4):2003-02	VDE 0102 Bbl. 4

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.*

Beiblatt 4 zu DIN EN 60909-0 (VDE 0102 Bbl. 4):2003-02, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen - Daten elektrischer Betriebsmittel für die Berechnungen von Kurzschlussströmen*

– **Entwurf** –

E DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3):2007-09

– Leerseite –

Deutsche Fassung

Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 3: Ströme bei Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	5
4 Formelzeichen	7
5 Berechnung der Ströme bei Doppelerdkurzschluss	9
5.1 Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	9
5.2 Stoßkurzschlussstrom, Ausschaltwechselstrom und Dauerkurzschlussstrom	11
5.3 Verteilung der über Erde fließenden Ströme bei Doppelerdkurzschluss	11
6 Berechnung der Teilkurzschlussströme über Erde bei unsymmetrischen Kurzschlüssen	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Erdkurzschluss innerhalb einer Station	12
6.3 Erdkurzschluss weit außerhalb einer Station	13
6.4 Erdkurzschluss in der Nähe einer Station	15
7 Reduktionsfaktor für Freileitungen mit Erdseilen	16
8 Berechnung der Stromverteilung und des Reduktionsfaktors bei Kabeln mit beidseitig geerdeten, metallischen Mänteln oder Schirmen	18
8.1 Dreileiterkabel	18
8.2 Drei Einleiterkabel	23
Anhang A (informativ) Beispiel zur Berechnung eines Doppelerdkurzschlussstromes	27
A.1 Daten	27
A.2 Berechnungen	28
Anhang B (informativ) Beispiele zur Berechnung von Teilkurzschlussströmen über Erde	29
B.1 Daten	29
B.2 Erdkurzschluss innerhalb einer Anlage	30
B.3 Erdkurzschluss außerhalb einer Anlage	32
B.4 Erdkurzschluss in der Nähe einer Station	34
Anhang C (informativ) Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_1 und die Stromverteilung durch Erde bei einem Dreileiterkabel	38
C.1 Erdkurzschluss am Ende des Kabels	38
C.1.1 Daten	38
C.1.2 Impedanzbeläge des Kabels	38
C.1.3 Kurzschlussströme	39
C.1.4 Reduktionsfaktor, Strom im Schirm und Strom durch die Erde	39
C.2 Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B	41

	Seite
C.2.1 Anordnung und Daten.....	41
C.2.2 Berechnungsergebnisse	41
Anhang D (informativ) Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors r_3 und die Stromverteilung durch Erde bei drei Einleiterkabeln	43
D.1 Erdkurzschluss am Ende des Kabels	43
D.1.1 Daten	43
D.1.2 Kabelimpedanzbeläge	43
D.1.3 Kurzschlussströme.....	44
D.1.4 Reduktionsfaktor und Stromverteilung.....	45
D.2 Erdkurzschluss auf einem der drei Einleiterkabel zwischen den Stationen A und B	46
D.2.1 Anordnung und Daten.....	46
D.2.2 Kurzschlussströme.....	47
D.2.3 Stromverteilung im Falle $R_{EF} \rightarrow \infty$	47
D.2.4 Stromverteilung im Falle $R_{EF} = 5 \Omega$	48
 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.....	 6
 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 Masten mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten und der Erdungsimpedanz Z_{EB} einer Anlage B nach Gleichung (29)	 7
 Bild 3 – Darstellung des Doppelerdkurzschlusses und der Ströme I''_{KEE}	9
 Bild 4 – Teilkurzschlussströme bei einem Erdkurzschluss innerhalb der Station B	12
 Bild 5 – Teilkurzschlussströme bei Erdkurzschluss an einem Freileitungsmast T	13
 Bild 6 – Verteilung des Erdersummenstromes I_{ETot}	14
 Bild 7 – Teilkurzschlussströme bei Erdkurzschluss an einem Mast n einer Freileitung in der Nähe der Anlage B	15
 Bild 8 – Reduktionsfaktor r für Freileitungen mit nichtmagnetischen Erdseilen abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ	18
 Bild 9 – Reduktionsfaktor von Dreileiterkabeln	20
 Bild 10 – Reduktionsfaktor für drei Einleiter-Energiekabel	24
 Bild A.1 – Doppelerdkurzschluss auf einer einfach gespeisten Stickleitung nach Tabelle 1	27
 Bild B.1 – Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B. Netzschaltplan mit den Anlagen A, B und C	30
 Bild B.2 – Erdkurzschluss innerhalb der Anlage B. Mit-, Gegen- und Nullsystem mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle F innerhalb der Anlage B.....	30
 Bild B.3 – Erdkurzschluss außerhalb der Anlagen A, B und C am Mast T einer Freileitung – Netzschaltplan mit den Anlagen A, B und C.....	32
 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	32

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.....	37
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	39
Bild C.2 – Kurzschlussströme und Teilkurzschlussströme im Schirm und durch Erde für das Beispiel im Bild C.1	40
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.1.1 und Bild C.1	41
Bild C.4 – Erdkurzschlussströme, Teilkurzschlussströme im Schirm und Teilkurzschlussströme durch Erde	42
Bild D.1 – Beispiel für die Berechnung des Reduktionsfaktors und der Stromverteilung bei drei Einleiterkabeln und einem Erdkurzschluss in der Station B.....	44
Bild D.2 – Mit-, Gegen- und Nullsystem des Netzes im Bild D.1 mit Verbindungen an der Kurzschlussstelle (Station B).....	44
Bild D.3 – Stromverteilung für das Netz nach Bild D.1, abhängig von der Länge ℓ der Einleiterkabel zwischen den Stationen A und B.....	46
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	46
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).....	47
Bild D.6 – Stromverteilung für das Kabel im Bild D.4 abhängig von ℓ_A , $R_{EF} = \infty$	48
Bild D.7 – Stromverteilung für das Kabel im Bild D.4 abhängig von ℓ_A ; $R_{EF} = 5 \Omega$	50
Tabelle 1 – Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes in einfachen Fällen	10
Tabelle 2 – Spezifischer Erdwiderstand und Erdstromtiefe.....	17
Tabelle C.1 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.1	40
Tabelle C.2 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 5$ km	42
Tabelle C.3 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 10$ km	42

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60909 beschreibt Verfahren zur Berechnung der zu erwartenden Kurzschlussströme bei unsymmetrischen Kurzschlüssen in Hochspannungs-Drehstromnetzen mit der Nennfrequenz 50 Hz oder 60 Hz, das sind: Doppelerdkurzschlussströme in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation; 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.

Verfahren werden angegeben für die Berechnung von Reduktionsfaktoren von Freileitungen mit einem oder zwei Erdseilen.

Neue Verfahren werden eingeführt für die Berechnung von Reduktionsfaktoren von Mänteln oder Schirmen und zusätzlich 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.

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. Dies 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 zitierte Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

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

IEC TR 60909-2: 1992, *Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculation*^{N1)}

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm 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)
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)
Effektivwert des durch die Erde fließenden Stromes in einem fiktiven Leiter in der Erdstromtiefe δ

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. Der Strom durch die Erde hängt 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_{ETot} **an der Kurzschlussstelle an einem Mast T einer Freileitung** (en: total current to earth 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 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 Leitern wie z. B. metallische Wasserrohre), siehe Bild 4

3.6

Erderstrom I_{ETn} (en: current to earth)
Effektivwert des Erderstromes, der zur Potentialerhöhung an einem Freileitungsmast n in der Nähe einer Anlage führt

^{N1)} Nationale Fußnote: Im Gegensatz zum IEC-Original, in dem hier die Jahreszahl 2005 angegeben ist, stellen wir fest, dass die letzte gültige Ausgabe von 1992 ist.

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

3.7

Erderstrom I_{EBn} (en: current to earth)

Effektivwert des Erderstromes, der zur Potentialanhebung U_{EBn} 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)

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)

für Dreileiterkabel mit an beiden Seiten geerdetem metallischem Mantel oder Schirm

3.10

Reduktionsfaktor r_3 (en: reduction factor)

Für drei Einleiterkabel mit an beiden Seiten geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen

3.11

Eingangsimpedanz $\underline{Z}_P$ einer unendlich langen Kette (en: Driving point impedance $\underline{Z}_P$ of an infinite chain)

gebildet aus der Erdseilimpedanz $\underline{Z}_Q$ zwischen zwei Masten mit Rückleitung über Erde und dem Ausbreitungswiderstand R_T eines Freileitungsmastes (Bild 1):

$$\underline{Z}_P = 0,5 \underline{Z}_Q = \sqrt{(0,5 \underline{Z}_Q)^2 + R_T \underline{Z}_Q} \quad (1)$$

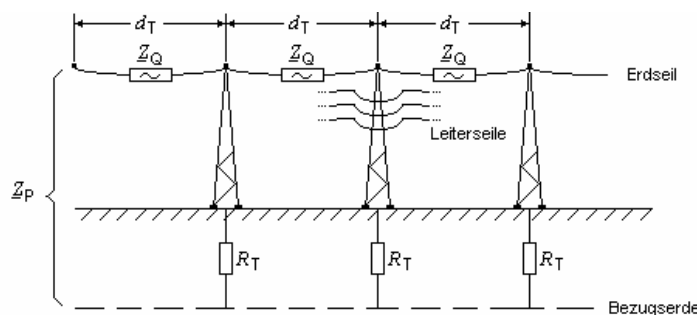


Bild 1 – Eingangsimpedanz $\underline{Z}_P$ einer unendlich langen Kette, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ und dem Ausbreitungswiderstand R_T der Masten mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten

Die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_P$ 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)

mit n Masten einer Freileitung, wie im Bild 2 angegeben, und mit der Impedanz $\underline{Z}_{EB}$ 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.

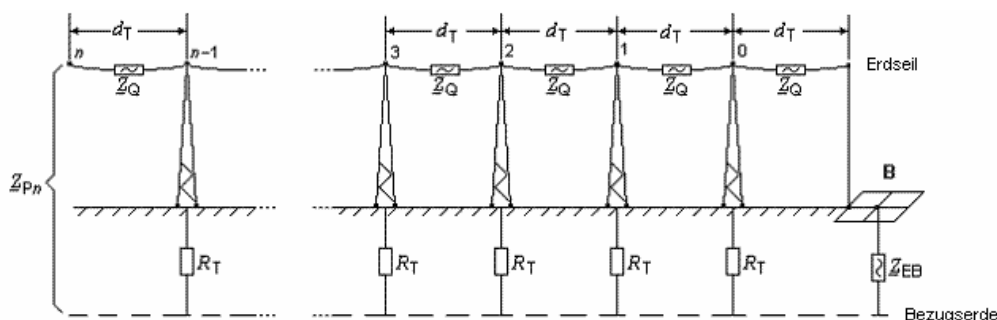


Bild 2 – Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{Pn}$ einer endlichen Kette von n Masten, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$, dem Ausbreitungswiderstand R_T der Maste mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten und der Erdungsimpedanz $\underline{Z}_{EB}$ einer 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 Erdseile 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}	Erderstrom 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}	Erderstrom 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)

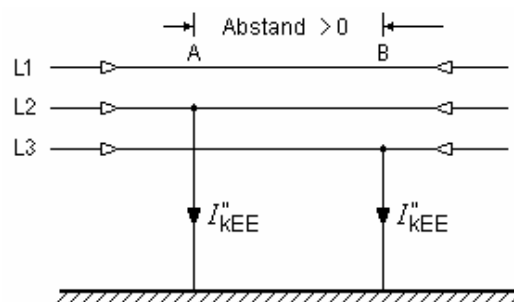
I_{kEE}''	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom bei Doppelerdkurzschluss
I_{kE2E}''	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom, der bei einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung über Erde fließt (IEC 60909-0)
$I_{E\delta}$	Teilkurzschlussstrom durch die Erde (zum Beispiel im Bild 4): $I_{E\delta A} = I_A \cdot 3I_{(0)A}$ oder in Bild 9b: Strom I_{ESA} fließt entsprechend Gleichung (45) zurück zur Station A.
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_{ET}	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:

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

ANMERKUNG Für die Ableitung der Gleichung (4) siehe CCITT – *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. Genova 1999.*

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

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

prEN 60909-3:2007

5.1.1 Bestimmung von $M_{(1)}$ und $M_{(2)}$

Die Koppelimpedanzen $M_{(1)}$ und $M_{(2)}$ im Mit- und Gegensystem werden wie folgt bestimmt:

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

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{U_{(1)B}}{I_{(1)A}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{U_{(2)B}}{I_{(2)A}} \quad (6)$$

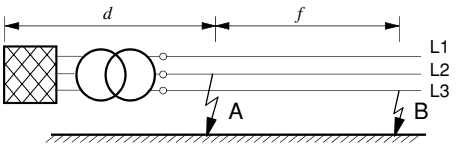
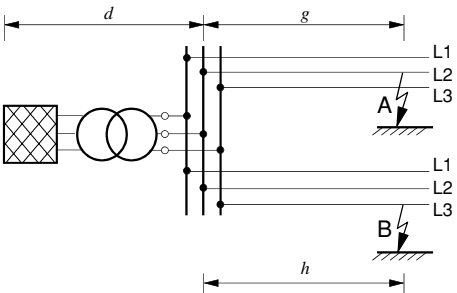
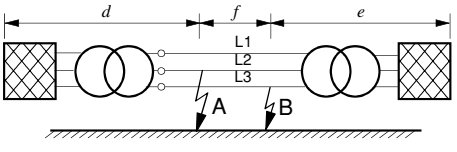
Die Koppelimpedanzen $\underline{M}_{(1)}$ und $\underline{M}_{(2)}$ können statt an der Kurzschlussstelle A auch an der Stelle B bestimmt werden unter Verwendung von:

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{U_{(1)A}}{I_{(1)B}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{U_{(2)A}}{I_{(2)B}} \quad (7)$$

5.1.2 Einfache Fälle des Doppelerdkurzschlusses

In einfachen Fällen kann der Doppelerdkurzschlussstrom 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)		Einfach gespeiste Stickleitung $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6\underline{Z}_{(1)d} + 2\underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(0)f} } \quad (8)$
b)		Zwei einfach gespeiste Stickleitungen $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6\underline{Z}_{(1)d} + 2(\underline{Z}_{(1)g} + \underline{Z}_{(1)h}) + \underline{Z}_{(0)g} + \underline{Z}_{(0)h} } \quad (9)$
c)		Zweifach gespeiste Einfachleitung $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left \frac{6\underline{Z}_{(1)d}\underline{Z}_{(1)e} + 2\underline{Z}_{(1)f}(\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)e})}{\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(1)e}} + \underline{Z}_{(0)f} \right } \quad (10)$
Der Spannungsfaktor c ist aus Tabelle 1 in IEC 60909-0 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 $r3I_{(0)} = rI_{kEE}''$ die einzige das Nullsystem in A und B speisende Stromquelle ist und alle anderen Quellen außer Acht bleiben.

Zum Beispiel wird für den Fall eines Doppelerdkurzschlusses an den Masten A und B einer Freileitung der über den entsprechenden stationsfernen Mast fließende Strom I_T zu:

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

Z_P 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 sowie Mäntel oder Schirme von Kabeln) bei einpoligen Erdkurzschlüssen. Diese Kurzschlussart stellt in Hochspannungsnetzen mit niederohmiger Sternpunktterdung den am häufigsten auftretenden unsymmetrischen Kurzschluss dar. I_{k1}'' führt zu den größten Kurzschlussströmen 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 für die Berechnungen in 6.2 und

6.3, 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.

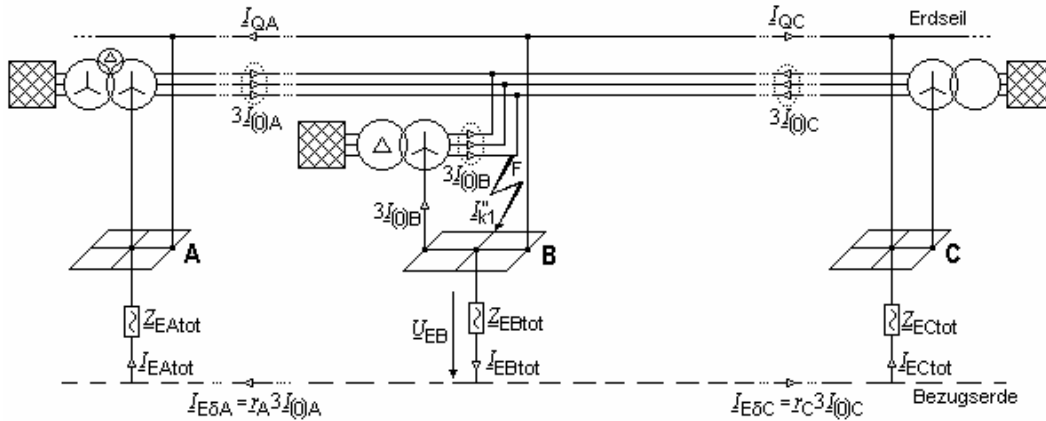


Bild 4 – Teilkurzschlussströme bei einem Erdkurzschluss innerhalb der Station B

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

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

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 stationsfernen Fall gilt (siehe Bild 4):

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

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

r_A und r_C sind 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 Gesamtterdungsimpedanz der Station B:

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

Der Erdkurzschlussstrom $\underline{I}_{k1}''$ in Bild 5 ist gleich den dreifachen Nullströmen, die zur Kurzschlussstelle F fließen:

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

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

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

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

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

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

r_A und r_C sind 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:

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

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

$$\underline{Z}_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{\underline{Z}_P}} \quad (23)$$

R_T ist der Mastausbreitungswiderstand und $\underline{Z}_P$ die Eingangsimpedanz nach Gleichung (1).

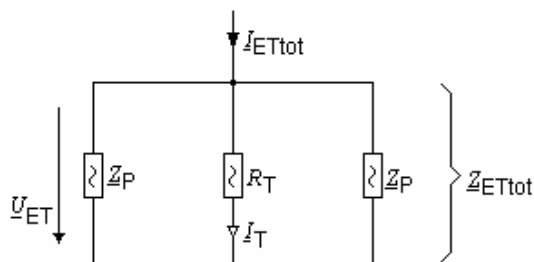


Bild 6 – Verteilung des Erdersummenstromes $\underline{I}_{ETtot}$

$\underline{I}_T$ findet man mit Gleichung (13), wenn $r \underline{I}_{kEE}''$ ersetzt wird durch $r_C \underline{I}_{k1}''$.

Der Strom durch $\underline{Z}_{ETtot}$ führt zur Erderspannung $\underline{U}_{ET}$ des kurzschlussbetroffenen Mastes (Bild 6):

$$\underline{U}_{ET} = \underline{Z}_{ETtot} \underline{I}_{ETtot} = R_T \underline{I}_T \quad (24)$$

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.

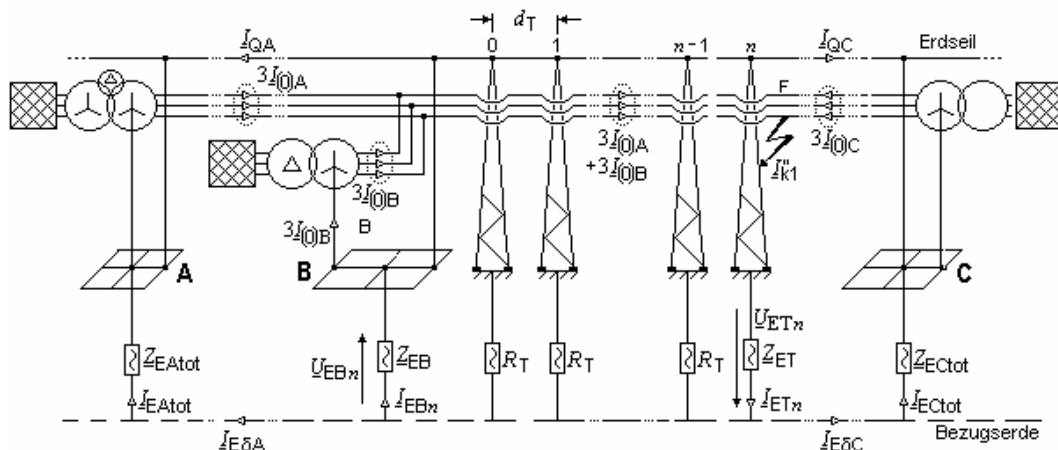


Bild 7 – Teilkurzschlussströme bei Erdkurzschluss an einem Mast n einer Freileitung in der Nähe der Anlage B

Entsprechend Bild 2 ist bei der Berechnung von I_{k1}'' und $3I_{(0)B}$ auf die Nummerierung der Masten zu achten.

Erderspannung U_{ETn} an einem Mast n außerhalb der Anlage B

Der Strom I_{ETn} (Bild 7) am kurzschlussbetroffenen Mast n in der Nähe der Anlage B, der über Z_{ET} nach Gleichung (28) fließt, wird durch die Überlagerung von zwei Anteilen gefunden, wobei der erste Teil von dem an der Kurzschlussstelle über Erde fließenden Strom $r_C I_{k1}''$ und der zweite vom Strom $3I_{(0)B}$, der zum Sternpunkt des Transformators in der Anlage B zurückfließt, abhängt.

$$I_{ETn} = r_C I_{k1}'' \frac{Z_{Pn}}{Z_{Pn} + Z_{ET}} - r_C 3I_{(0)B} \frac{Z_{EB}}{Z_{EB} + Z_P} \cdot \frac{1}{k^n} \quad (27)$$

mit

$$Z_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{Z_P}} \quad (28)$$

und

$$Z_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{Z_P}} \quad (29)$$

Die Eingangsimpedanz Z_P findet man nach Gleichung (1), Z_{Pn} nach Gleichung (2) und k nach Gleichung (3).

Die Erderspannung U_{ETn} des kurzschlussbetroffenen Mastes n ergibt sich nach:

$$U_{ETn} = Z_{ET} I_{ETn} \quad (30)$$

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:

$$I_{EBn} = r_C I_{k1}'' \frac{Z_{ET}}{Z_{ET} + Z_{Pn}} \cdot \frac{2Z_P - Z_Q}{(Z_{EB} + Z_P) \frac{1}{k^n} - (Z_{EB} - Z_P + Z_Q) \frac{1}{k^{-n}}} - r_C 3I_{(0)B} \frac{Z_P}{Z_{EB} + Z_P} \quad (31)$$

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}' sollen nach den Gleichungen (34) und (35) berechnet werden. 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	> 9 300	> 8 500
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:

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

und der Koppelimpedanzbelag zwischen Erdseil und den Leiterseilen mit Erdrückleitung

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

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
- 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: $\mu_r \approx 75$.

prEN 60909-3:2007

Wie aus den Gleichungen (32) bis (34) hervorgeht, hängt der Reduktionsfaktor bei üblichen Al/St-Erdseilen vom spezifischen Erdwiderstand ρ ab. Bild 8 zeigt Erdseilreduktionsfaktoren bei nichtmagnetischem 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.

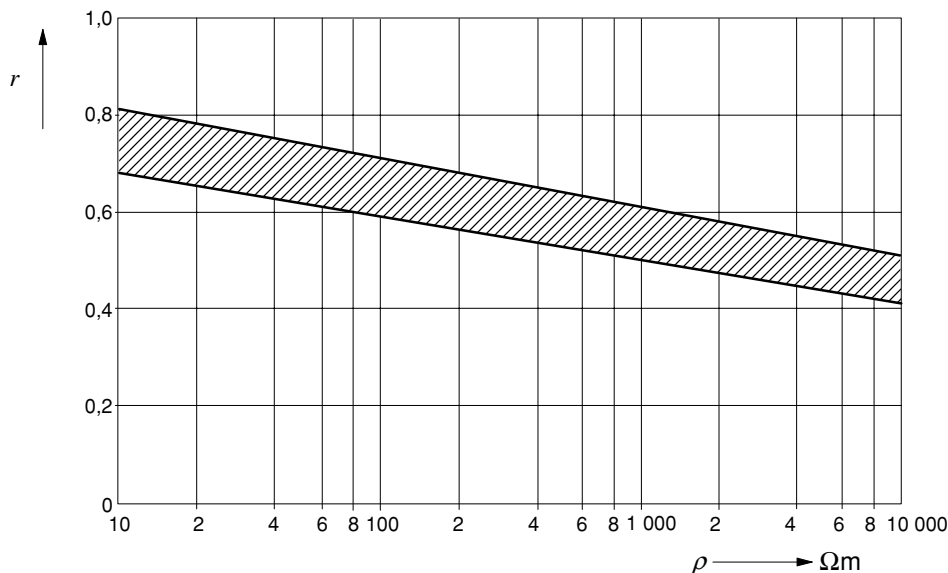


Bild 8 – Reduktionsfaktor r für Freileitungen mit nichtmagnetischen Erdseilen abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ

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

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, dem 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.

8.1 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.

8.1.1 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 durch die Erde zurückfließt bedingt durch Induktionswirkung.

$$r_1 = \frac{I_E \delta A}{3I_{(0)A}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{SL}}{\underline{Z}'_S} = \frac{R'_S}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S}} \quad (37)$$

$\underline{Z}'_S$ ist die 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 mittlerer 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.

$$I_{SA} = (1 - r_1) 3I_{(0)A} \quad (40)$$

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

$$I_{E\delta A} = r_1 3I_{(0)A} \quad (41)$$

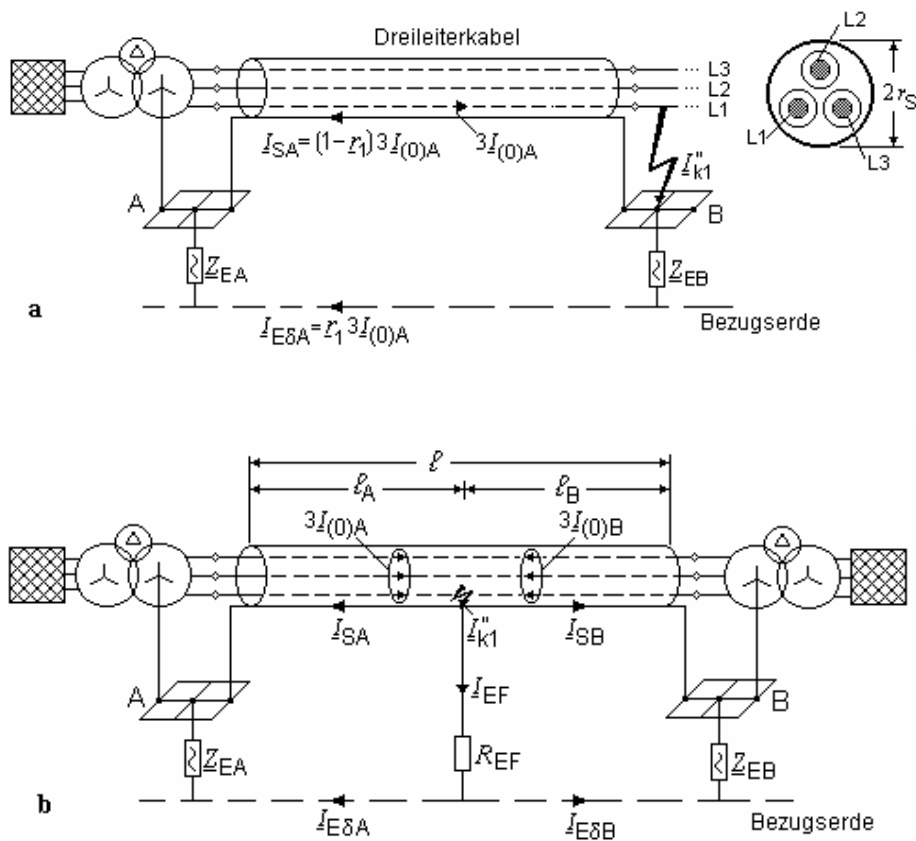


Bild 9 – Reduktionsfaktor von Dreileiterkabeln

- a Einspeisung nur von der Station A und Erdkurzschluss in der Station B.
b Einspeisung von Station A und B und Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B

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

8.1.2 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.

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

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

Der Erderstrom an der Kurzschlussstelle ergibt sich als:

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

Die Ströme durch die Erde in Bild 9b werden gefunden mit:

$$I_{E\delta A} = r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell B}} + r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} - r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell A}} \quad (45)$$

$$I_{E\delta B} = r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell A}} + r_1 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} - r_1 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell B}} \quad (46)$$

mit

$$Z_{EStot} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{S\ell A}} + \frac{1}{Z_{S\ell B}} + \frac{1}{R_{EF}}} = \frac{Z_{S\ell A} \ell_B}{\ell + \frac{Z_{S\ell A} \ell_B}{R_{EF}}} \quad (47)$$

Der Reduktionsfaktor r_1 ist in Gleichung (37) angegeben.

Die angegebenen Gleichungen gelten für eine Kabellänge von wenigstens $\ell \approx \delta/2$ ($\ell \approx 0,5\text{km}$ 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 8.1.2.2.

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 (Schirm) des Kabels und dem umgebenden Erdreich) und $R_{EF} \rightarrow \text{Min.}$ in Betracht gezogen werden.

8.1.2.1 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 berechnet werden mit dem Nullimpedanzbelag des Kabels $Z_{(0)S}$ bei einem Rückstrom nur durch den Mantel oder Schirm (siehe

prEN 60909-3:2007

IEC 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.

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

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

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

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

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

8.1.2.2 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 I_{k1}'' an der Kurzschlussstelle zwischen A und B mit der Nullimpedanz $Z_{(0)SE}'$ für eine Stromrückführung durch den Mantel oder den Schirm des Kabels und die Erde berechnet werden (siehe IEC 60909-2).

Die Ströme im Mantel oder Schirm und durch die Erde sollen mit den Gleichungen (42), (43) und (45), (46) berechnet werden.

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:

$$I_{E\delta A\max} = r_1 3I_{(0)A} \left(\frac{Z_{EStot}}{Z_S \ell_B} + \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} \right) \quad (45c)$$

$$I_{E\delta B\max} = r_1 3I_{(0)B} \left(\frac{Z_{EStot}}{Z_S \ell_A} + \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} \right) \quad (46c)$$

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 60909-2.

8.2 Drei Einleiterkabel

Wie unter 8.1 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).

8.2.1 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:

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

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:

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

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

$$I_{E\delta A} = r_3 3I_{(0)A} \quad (50)$$

8.2.2 Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und 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:

$$I_{SA} = (1 - r_3) \cdot 3I_{(0)A} + r_3 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell A}} + r_3 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell A}} \quad (51)$$

$$I_{SB} = (1 - r_3) \cdot 3I_{(0)B} + r_3 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell B}} + r_3 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell B}} \quad (52)$$

Der Erdstrom an der Kurzschlussstelle ist gegeben durch:

$$I_{EF} = r_3 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} + r_3 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} \quad (53)$$

Die Ströme durch die Erde findet man mit:

$$I_{E\delta A} = r_3 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell B}} + r_3 3I_{(0)A} \frac{Z_{EStot}}{R_{EF}} - r_3 3I_{(0)B} \frac{Z_{EStot}}{Z_{S\ell A}} \quad (54)$$

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

mit Z_{EStot} nach Gleichung (47). In diesem Fall ist Z_S der Selbstimpedanzbelag eines der drei Mäntel oder Schirme, berechnet nach Gleichung (38).

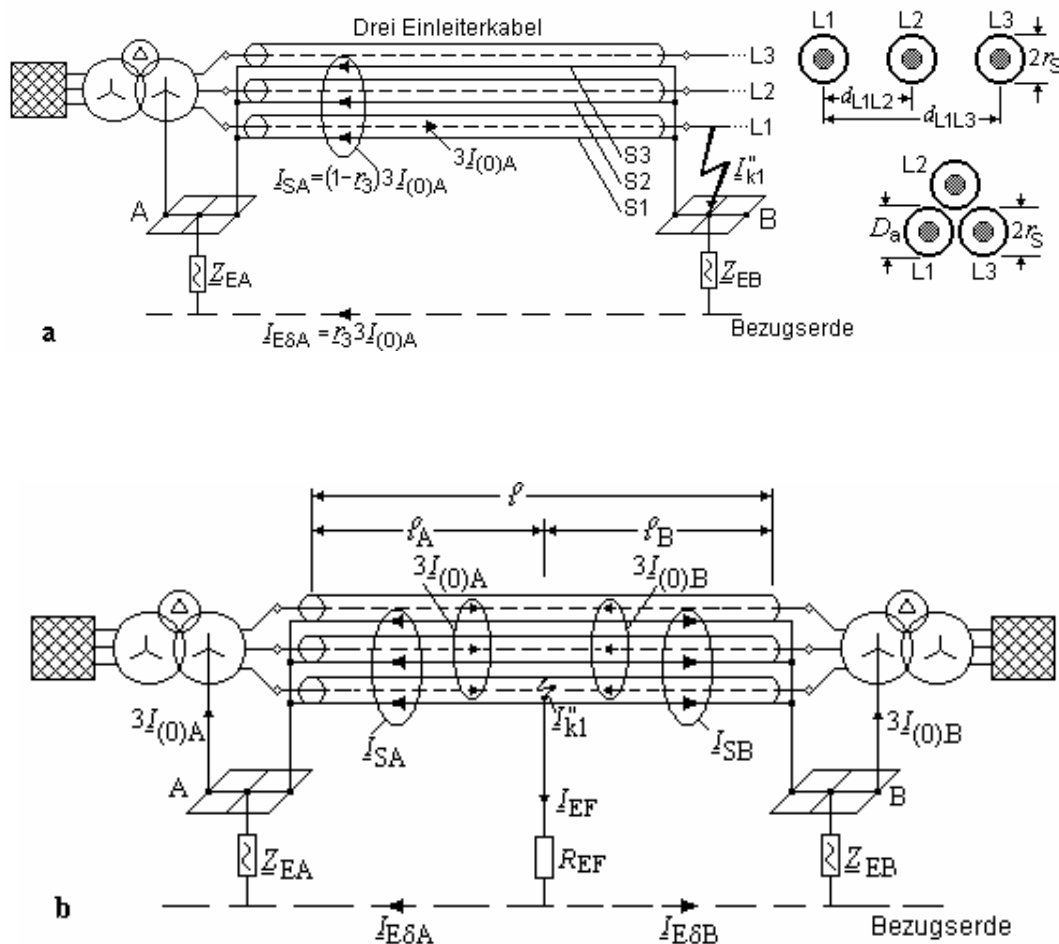


Bild 10 – Reduktionsfaktor für drei Einleiter-Energiekabel

- a Einspeisung nur von der Station A und Erdkurzschluss in der Station B.
- b Einspeisung von Station A und B und Erdkurzschluss auf dem Kabel zwischen den Stationen A und B

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

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.

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

Im Fall von $R_{EF} \rightarrow \infty$ 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 (51) und (52) abgeleitet:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Der Wert $R_{EF} = 5 \Omega$ ist als konservative Annahme anzusehen, siehe 8.1.2.2.

Der Erdkurzschlussstrom I''_{k1} an der Kurzschlussstelle zwischen A und B ist mit dem Nullimpedanzbelag $Z'_{(0)SE}$ für einen Rückstrom durch Mäntel oder Schirme der Kabel und der Erde zu berechnen (siehe IEC 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 kann mit den Gleichungen (51b) und (52b) gefunden werden.

prEN 60909-3:2007

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:

$$I_{E\delta A\max} = r_3 3I_{(0)A}(\ell_A = \ell) \left(\frac{Z_{EStot}(\ell_A = \ell)}{Z_S \ell_B} + \frac{Z_{EStot}(\ell_A = \ell)}{R_{EF}} \right) = r_3 3I_{(0)A}(\ell_A = \ell) \quad (54c)$$

$$I_{E\delta B\max} = r_3 3I_{(0)B}(\ell_B = \ell) \left(\frac{Z_{EStot}(\ell_B = \ell)}{Z_S \ell_A} + \frac{Z_{EStot}(\ell_B = \ell)}{R_{EF}} \right) = r_3 3I_{(0)B}(\ell_A = 0) \quad (55c)$$

ANMERKUNG Anhang D gibt ein Beispiel für die Berechnung der Ströme, die über die 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

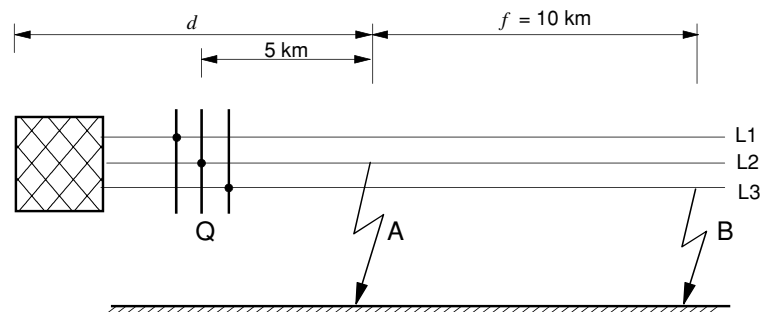


Bild A.1 – Doppelerdkurzschluss auf einer einfach gespeisten Stickleitung nach Tabelle 1

A.1 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: $\rho = 1000 \Omega\text{m}$

Erdstromtiefe: $\delta = 2950 \text{ m}$ nach Tabelle 2 oder Gleichung (36)

Mastausbreitungswiderstand: $R_T = 10 \Omega$

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

A.2 Berechnungen

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

$$\underline{Z}'_Q = 2,92 \frac{\Omega}{\text{km}} + 0,0493 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \left(\frac{75}{4} + \ln \frac{2950 \text{ m}}{4,5 \text{ mm}} \right) = (2,969 + j 2,020) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

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

$$\underline{Z}'_{QL} = 0,0493 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \ln \frac{2950 \text{ m}}{6 \text{ m}} = (0,049 + j 0,389) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Reduktionsfaktor für das Erdseil nach Gleichung (33):

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

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

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

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 Kurzschlussstelle A und B wird mit Gleichung (13) bestimmt.:

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

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

Anhang B (informativ)

Beispiele zur Berechnung von Teilkurzschlussströmen über Erde

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.1 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	$\rho = 1000 \Omega \text{ m}$
----------------------------	--------------------------------

Erdstromtiefe	$\delta = 2950 \text{ m}$ nach Tabelle 2
---------------	--

Erdseilimpedanzbelag	$\underline{Z}'_Q = (0,17 + j 0,801) \Omega/\text{km}$
----------------------	--

Erdseilreduktionsfaktor	$\underline{r}_A = \underline{r}_B = \underline{r}_C = \underline{r} = 0,6 - j 0,03 \approx 0,6$
-------------------------	--

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	$\ell_2 = 100 \text{ km}$
--	---------------------------