

	DIN EN 60909-3 (VDE 0102-3)	DIN
	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.	VDE
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 –

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
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)

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

© 2010 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 60909-3:2010 D

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_{ETot}	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

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 $U_{ET} = 1,912 \text{ kV}$ und $u_{EBn} = U_{EBn} / U_{EB}$ mit $U_{EB} = 0,972 \text{ kV}$, 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, $U_n = 10 \text{ kV}$; $c = 1,1$; $f = 50 \text{ Hz}$	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, $\ell = 5 \text{ km}$	46
Tabelle C.3 – Ergebnisse für das Beispiel im Bild C.3, $\ell = 10 \text{ km}$	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):

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

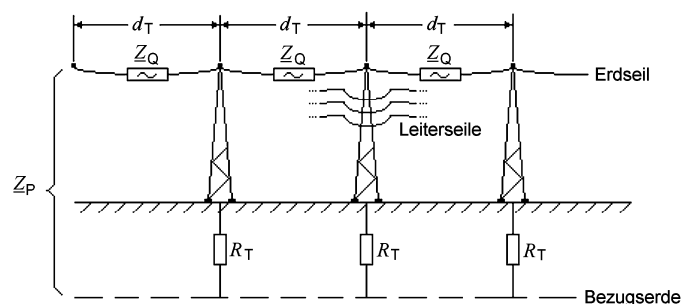


Bild 1 – Eingangsimpedanz Z_P einer unendlich langen Kette, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $Z_Q = Z_Q' d_T$ und dem Ausbreitungswiderstand R_T der Masten mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten

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 $\underline{Z}_{EB}$ 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.

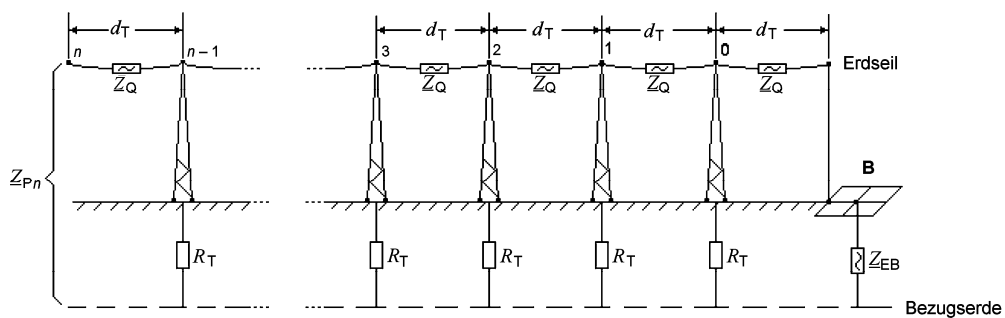


Bild 2 – Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{Pn}$ einer endlichen Kette von n Masten, zusammengesetzt aus der Erdseilimpedanz $\underline{Z}_Q = \underline{Z}_Q d_T$, dem Ausbreitungswiderstand R_T der Masten mit gleichem Abstand d_T zwischen den Masten und der Erdungsimpedanz $\underline{Z}_{EB}$ einer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

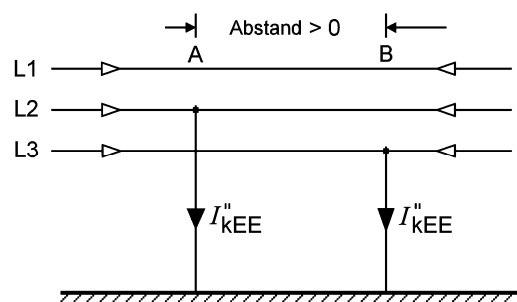
I_{EBn}	Erderstrom in der Station B, wenn der kurzschlussbetroffene Mast n in der Nähe der Station B steht (Bild 7)
I_{EBtot}	Erdersummenstrom in der Anlage B, wenn der Kurzschluss mit Erdberührung in der Station B auftritt (Bild 4)
I_{ETn}	Erderstrom am kurzschlussbetroffenen Mast n in der Nähe einer 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 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:

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

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:

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

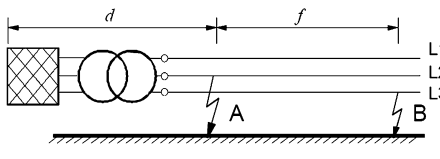
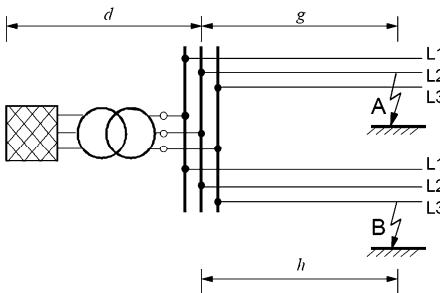
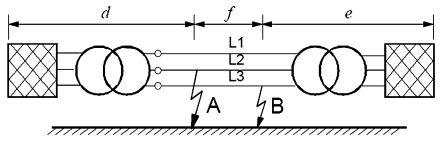
Die Koppelimpedanzen $\underline{M}_{(1)}$ und $\underline{M}_{(2)}$ können statt an der Kurzschlussstelle A auch an der Stelle B bestimmt werden unter Verwendung von:

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

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)		Einfach gespeiste Stichleitung $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6\underline{Z}_{(1)d} + 2\underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(0)f} } \quad (8)$
b)		Zwei einfach gespeiste Stichleitungen $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6\underline{Z}_{(1)d} + 2(\underline{Z}_{(1)g} + \underline{Z}_{(1)h}) + \underline{Z}_{(0)g} + \underline{Z}_{(0)h} } \quad (9)$
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 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 $\underline{I}_{E\delta} = r \underline{I}_{kEE}''$ gilt, mit $\underline{I}_{kEE}''$ 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 $\underline{I}_T$ durch den Mastausbreitungswiderstand R_T zu

$$\underline{I}_T = r \cdot \underline{I}_{kEE}'' \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_P + 2R_T} \quad (13)$$

$\underline{Z}_P$ 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.

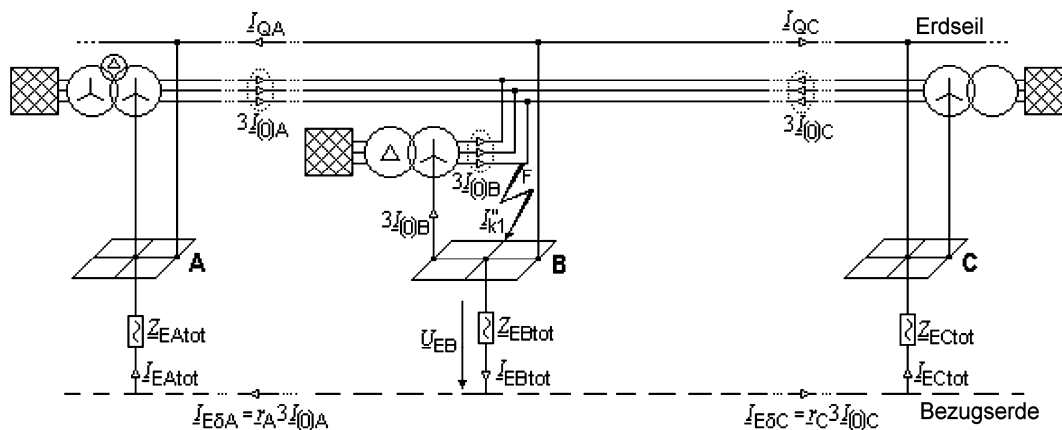


Bild 4 – Teilkurzschlussströme bei einem Erdkurzschluss innerhalb der Station B

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“.