

5 Doppelerdschluss und Teilkurzschlussströme über Erde

5.1 Allgemeines

VDE 0102-3 enthält Aussagen und Berechnungsverfahren für Kurzschlussströme bei Doppelerdkurzschlüssen sowie zu Teilkurzschlussströmen über Erde. Ein Doppelerdkurzschluss ist dabei definiert als „...gleichzeitig auftretende Erdkurzschlüsse an verschiedenen Stellen in unterschiedlichen Außenleitern eines Drehstromnetzes mit Erdschlusskompensation oder mit isoliertem Sternpunkt“. Da der einpolige Fehler mit Erdberührung in einem Netz mit Erdschlusskompensation bzw. mit isoliertem Sternpunkt als Erdschluss bezeichnet wird [3], wäre es korrekter beim Doppelerdkurzschluss als von zwei gleichzeitig auftretenden Erdschlüssen an verschiedenen Stellen zu sprechen, um Verwechslungen mit einpoligen Doppelfehlern in Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung [2] zu vermeiden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird daher stets vom Doppelerdschluss gesprochen. Da der beim Doppelerdschluss an den Fehlerstellen fließende Strom nach Höhe und Phasenlage ein Kurzschlussstrom ist, wird der im Fall eines Doppelerdschlusses fließende Strom als Doppelerdkurzschlussstrom in Anlehnung an VDE 0102-3 bezeichnet.

5.2 Doppelerdkurzschlussströme

5.2.1 Impedanzen und Anfangskurzschlusswechselstrom I''_k

Die Berechnung des Doppelerdkurzschlussstromes I''_{KEE} setzt die Kenntnis der Koppelimpedanzen der Mit- und Nullkomponente zwischen den beiden Fußpunkten voraus und ist deshalb nur für spezielle Netzanordnungen in einfacher Weise zu berechnen. Zu unterscheiden ist hier zwischen folgenden Fällen:

- Beide Fußpunkte des Doppelerdschlusses auf der selben Leitung
- Fußpunkte des Doppelerdschlusses auf unterschiedlichen Leitungen
- Einfache Speisung
- Zweifache Speisung

Befinden sich beide Fußpunkte auf der selben Leitung und ist diese einfach gespeist, so wirkt der Doppelerdschluss für die Leitung wie ein zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung. Im Falle der zweifachen Speisung ändern sich zwischen den beiden Fußpunkten die Außenleiter-Erd-Spannungen sehr stark, während die Außenleiter-Spannungen weitgehend konstant bleiben. Näheres hierzu ist in [3] erläutert.

Allgemein berechnet sich der Doppelerdkurzschlussstrom nach [4] nach Gl.(5.1),

$$I''_{KEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\left| \underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{2A} + \underline{Z}_{1B} + \underline{Z}_{2B} + \underline{M}_1 + \underline{M}_2 + \underline{Z}_0 \right|} \quad (5.1)$$

wobei die Indizes 1,2,0 jeweils für die Mit-, Gegen- und Nullkomponente stehen. Die Indizes A und B bezeichnen die Kurzschlussimpedanzen an den Fehlerstellen A und B. Die Impedanz \underline{Z}_0 ist die Nullimpedanz des Gesamtnetzes zwischen den Fehlerstellen A und B.

Mit \underline{M} wird die Koppelimpedanz der Mit- bzw. Gegenkomponente zwischen den beiden Fehlerstellen bezeichnet. Die Koppelimpedanzen \underline{M}_1 und \underline{M}_2 der Mit- und Gegenkomponente können ermittelt werden, wenn man alle treibenden Spannungsquellen des Netzes kurzschließt und an der Fehlerstelle A eine Spannung \underline{U}_{1A} (für die Messung der Mitkomponente) bzw. \underline{U}_{2A} (für die Messung der Gegenkomponente) einspeist. Die Koppelimpedanzen \underline{M}_1 und \underline{M}_2 ergeben sich dann nach Gln.(5.2) als Quotient der Spannung an der Fehlerstelle B und dem Strom an der Fehlerstelle A für die jeweilige Komponente.

$$\underline{M}_1 = \frac{\underline{U}_{1B}}{I_{-1A}} \quad (5.2a)$$

$$\underline{M}_2 = \frac{\underline{U}_{2B}}{I_{-2A}} \quad (5.2b)$$

bzw. für Speisung an der Fehlerstelle B nach Gln.(5.3)

$$\underline{M}_1 = \frac{\underline{U}_{1A}}{I_{-1B}} \quad (5.3a)$$

$$\underline{M}_2 = \frac{\underline{U}_{2A}}{I_{-2B}} \quad (5.3b)$$

Doppelerdschlüsse lassen sich nur für bestimmte Anordnungen in einfacher Weise berechnen.

5.2.2 Einfache Netzanordnungen

Für den Fall des generatorfernen Kurzschlusses gilt $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ und $\underline{M}_1 = \underline{M}_2$. Die in Tabelle 5.1 aufgeführten einfachen Anordnungen für die Berechnung der Doppelerdkurzschlussströme beziehen sich auf Tabelle 1 aus VDE 0102-3.

5.2.3 Stoßkurzschlussstrom i_p

Die Berechnung des Stoßkurzschlussstromes erfolgt in der selben Weise wie in Kapitel 3.3.2.3 beschrieben. Der Stoßkurzschlussstrom berechnet sich nach Gl.(5.4),

$$i_{pEE} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{KEE} \quad (5.4)$$

wobei nach Gl.(5.5) für den Faktor κ der größte Wert des Stoßfaktors bei dreipoligem Kurzschluss an den Fehlerstellen A und B einzusetzen ist.

$$\kappa = \text{MAX} \{ \kappa_A; \kappa_B \} \quad (5.5)$$

5.2.4 Symmetrischer Ausschaltwechselstrom I_b und Dauerkurzschlussstrom I_k

Für generatorferne Kurzschlüsse sind der symmetrische Ausschaltwechselstrom I_b und der Dauerkurzschlussstrom I_k gleich dem Anfangskurzschlusswechselstrom I''_k .

5.3 Teilkurzschlussströme über Erde

5.3.1 Einführung

Teilkurzschlussströme über Erde treten bei einpoligen Kurzschlüssen und zweipoligen Kurzschlüssen mit Erdberührung auf. Einpolige Kurz-

Tabelle 5.1 Netzanordnungen und Berechnungsgleichungen für Doppelerdkurzschlussströme

<p>Eine einfach gespeiste Stichleitung</p> <p>Beide Fußpunkte des Doppelerdschlusses auf der selben Leitung</p>	
	$I''_{KEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\left 6 \cdot \underline{Z}_{1d} + 2 \cdot \underline{Z}_{1f} \cdot \underline{Z}_{0f} \right }$ <p>d: Impedanz bis zur Fehlerstelle A f: Impedanz zwischen den Fehlerstellen A und B</p>
<p>Zwei einfach gespeiste Stichleitungen</p> <p>Fußpunkte des Doppelerdschlusses auf unterschiedlichen Leitungen</p>	
	$I''_{KEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\left 6 \cdot \underline{Z}_{1d} + 2 \cdot \underline{Z}_{1g} + \underline{Z}_{1h} + \underline{Z}_{0g} + \underline{Z}_{0h} \right }$ <p>d: Impedanz der Einspeisung bis zur Sammelschiene g: Impedanz zwischen Sammelschiene und Fehlerstelle A h: Impedanz zwischen Sammelschiene und Fehlerstelle B</p>
<p>Zweifach gespeiste Leitung</p> <p>Beide Fußpunkte des Doppelerdschlusses auf der selben Leitung</p>	
	$I''_{KEE} = \frac{3 \cdot c \cdot U_n}{\left \frac{6 \cdot \underline{Z}_{1d} \cdot \underline{Z}_{1e} + 2 \cdot \underline{Z}_{1f} (\underline{Z}_{1d} + \underline{Z}_{1e})}{\underline{Z}_{1d} + \underline{Z}_{1f} + \underline{Z}_{1e}} + \underline{Z}_{0f} \right }$ <p>d: Impedanz der linken Einspeisung bis zur Fehlerstelle A e: Impedanz der rechten Einspeisung bis zur Fehlerstelle B f: Impedanz zwischen den Fehlerstellen A und B</p>
<p>Für die Berechnung des maximalen Kurzschlussstromes sind die Erdungsimpedanzen bei Kurzschluss in einer Anlage oder an einem Mast zu vernachlässigen. Für c ist der Spannungsfaktor nach Tabelle 3.1 einzusetzen.</p>	

schlüsse stellen in Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung die häufigste Fehlerart dar und führen mit wenigen Ausnahmen zu den größten Teilkurzschlussströmen. Der Erdkurzschlussstrom I''_{k1} ist dabei stets gleich dem zur Kurzschlussstelle fließenden dreifachen Strom des Nullsystems. Welcher Anteil dabei über die Erdungsanlagen fließt, hängt von der Anzahl und Erdung der Erdseile bzw. der Kabelmäntel und -bewehrungen ab, die in den Anlagen angeschlossen sind. Dies wird durch den Reduktionsfaktor \underline{p}_E ausgedrückt, welcher definiert ist als Verhältnis des Fehlerstromanteils im Erdreich zum Fehlerstrom (dreifacher Strom des Nullsystems), ausgedrückt durch das Verhältnis der Koppelimpedanz zweier Schleifen mit Rückleitung über Erde zur Schleifenimpedanz \underline{Z}_v eines Leiters mit Rückleiter über Erde nach Gl. (5.6).

$$\underline{p}_E = 1 - \frac{\sum_{\nu \mu} \underline{Z}_{\nu \mu}}{\underline{Z}_v} \quad (5.6)$$

Der Index ν steht dabei für das oder die Erdseile sowie u.U. vorhandene Bodenseile, der Index μ steht für einen oder alle Leiter des Drehstromsystems. Berechnungsgleichungen für die Schleifenimpedanzen sind in [1] und [6] angegeben.

Merke: *Teilkurzschlussströme über Erde sind von Anzahl und Erdung der Erdseile, Kabelmäntel und -bewehrungen der abgehenden Leitungen abhängig.*

5.3.2 Kurzschluss innerhalb einer Anlage

Nachfolgend wird zunächst der Erdkurzschluss innerhalb einer Schaltanlage nach Bild 5.1 betrachtet.

Der Erdkurzschlussstrom berechnet sich nach Gl.(5.7)

$$I''_{k1} = 3 \cdot I_{0A} + 3 \cdot I_{0B} + 3 \cdot I_{0C} \quad (5.7)$$

Der Summenstrom über die Erdungsanlage in B bei Erdkurzschlüssen innerhalb der Anlage B nach Bild 5.1 berechnet sich nach Gl.(5.8)

$$I_{ZB} = \underline{p}_A \cdot 3 \cdot I_{0A} + \underline{p}_C \cdot 3 \cdot I_{0C} \quad (5.8)$$

Damit wird die Erderspannung nach Gl.(5.9)

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EB} \cdot I_{ZB} \quad (5.9)$$

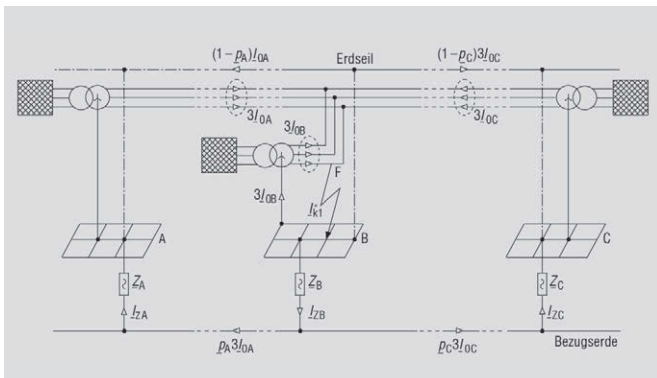


Bild 5.1 Erdkurzschluss innerhalb der Schaltanlage B
Nach VDE 0102-3

Mit der Erdungsimpedanz \underline{Z}_{EB} bzw. \underline{Z}_B an der Anlage B nach Gl.(5.10).

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{1/R_E + \sum 1/\underline{Z}_p} \quad (5.10)$$

R_E Widerstand der Erdungsanlage (Maschenerder, Tiefenerder, etc.)
 \underline{Z}_p Eingangserdungsimpedanz der Freileitung (Impedanz der Erdseile mit Rückleitung über Erde und Mastausbreitungswiderstand)

Die oben genannten Überlegungen gelten nur für große Entfernungen der betroffenen Anlage B von anderen Anlagen (A und C in Bild 5.1). Ist der Abstand kleiner als der Anlagenfernabstand d_F nach Gl.(5.11)

$$d_F = 3 \cdot \sqrt{R_T} \cdot \frac{d_{Mast}}{\text{Re}\{\sqrt{\underline{Z}_W}\}} \quad (5.11)$$

so reduziert sich der Strom über die Erdungsanlage.

Es bedeuten

R_T Mastausbreitungswiderstand

d_{Mast} Mastabstand

$\text{Re}\{\sqrt{\underline{Z}_W}\}$ Realteil der Wurzel der Erdseilimpedanz (mit Erdrückleitung)

5.3.3 Kurzschluss an einem Freileitungsmast

Für Erdkurzschlüsse an einem Freileitungsmast in großer Entfernung von den Schaltanlagen gemäß Bild 5.2 berechnet sich der Erdkurzschlussstrom nach Gl.(5.12)

$$I''_{k1} = 3 \cdot I_{0A} + 3 \cdot I_{0B} + 3 \cdot I_{0C} \quad (5.12)$$

Der Strom über die Masterdung des kurzschlussbetroffenen Mastes F berechnet sich nach Gl.(5.13).

$$I_{ZF} = p_C \cdot (3 \cdot I_{0A} + 3 \cdot I_{0C}) + p_C \cdot 3 \cdot I_{0C} = p_C \cdot I''_{k1} \quad (5.13)$$

Damit wird die Erderspannung am Mast nach Gl.(5.14)

$$U_{EF} = Z_{EF} \cdot I_{ZF} \quad (5.14)$$

Mit der Erdungsimpedanz Z_{EF} bzw. Z_F am Mast nach Gl.(5.15)

$$Z_{EF} = \frac{1}{1/R_T + 2/Z_P} \quad (5.15)$$

R_T Mastausbreitungswiderstand

Z_P Eingangserdungsimpedanz der Freileitung (Impedanz der Erdseils mit Rückleitung über Erde und Mastausbreitungswiderstand)

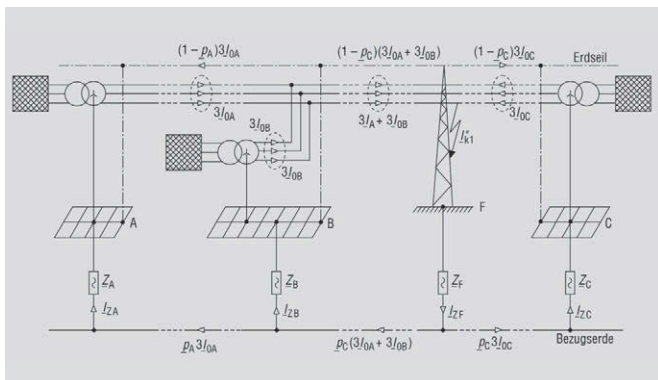


Bild 5.2 Erdkurzschluss an einem Freileitungsmast
Nach VDE 0102-3

Für Erdkurzschlüsse an einem Mast in der Nähe der Schaltanlage kann ein großer Teil des Erdkurzschlussstromes über das Erdseil zur Anlage zurückfließen. Der über Erde zurückfließende Anteil wird dann kleiner als nach Gl.(5.13) berechnet.

Der Strom über die Erdungsanlage B bei Kurzschluss am Mast in F berechnet sich nach Gl.(5.16).

$$I_{ZB} = \underline{p}_C \cdot (3 \cdot I_{0A} + 3 \cdot I_{0C}) - \underline{p}_A \cdot 3 \cdot I_{0A} \quad (5.16)$$

Es hängt von den jeweiligen Netzgegebenheiten ab, ob der Strom über die Erdungsanlage bei Kurzschlüssen auf der Freileitung größer oder kleiner als derjenige bei Kurzschlüssen innerhalb der Schaltanlage wird.

VDE 0102-3 enthält in Kapitel 3.1.4 Angaben über die Berechnung von Reduktionsfaktoren bei Freileitungen. Im Rahmen dieses Buches wird nicht näher darauf eingegangen. Weitere Angaben hierzu finden sich auch in [2], [3], [5] und [6].

5.4 Berechnungsbeispiele

Ein Beispiel zur Berechnung des Doppelerdkurzschlussstromes ($U_n = 66 \text{ kV}$) ist in VDE 0102-3 im informativen Anhang A, zwei Beispiele zur Berechnung der Teilkurzschlussströme über Erde sind in VDE 0102-3 im informativen Anhang B enthalten. Dabei sind Anordnungen wie in Bild 5.1 und Bild 5.2 mit einer Netznominalspannung $U_n = 132 \text{ kV}$ zugrunde gelegt.

5.4.1 Doppelerdschluss in einem 20-kV-Netz

In einem 20-kV-Freileitungsnetz nach Bild 5.3 soll der Strom bei einem Doppelerdschluss wie dargestellt berechnet werden. Die Daten der Betriebsmittel sind nachstehend angegeben:

Netz: $S''_{kQ} = 1 \text{ GVA}; U_n = 110 \text{ kV}$
 Transformator: $S_{rT} = 40 \text{ MVA}; u_{krT} = 14\%; \ddot{u}_{rT} = 110 \text{ kV}/20 \text{ kV}$
 Leitungen: $Al/St \text{ 95}/15; R'_1 = 0,384 \text{ } \Omega/\text{km}; X'_1 = 0,35 \text{ } \Omega/\text{km};$
 $R'_0 = 1,35 \text{ } \Omega/\text{km}; X'_0 = 0,6 \text{ } \Omega/\text{km}$

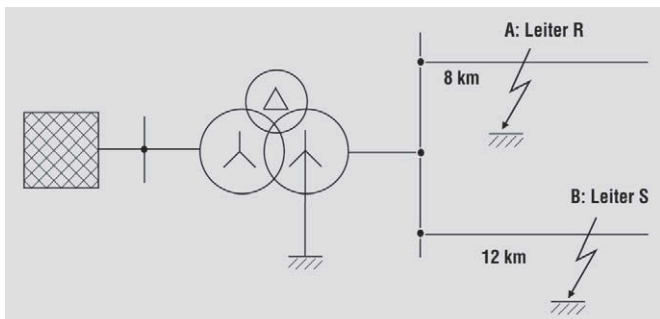


Bild 5.3 20-kV-Freileitungsnetz zur Berechnung des Doppelerdkurzschlussstromes (siehe auch Tabelle 5.1)

Man berechnet mit den Gleichungen nach Kapitel 2 die Impedanzen nach Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Kurzschlussstromberechnung, siehe Bild 5.3

Betriebsmittel	Mitimpedanz	Nullimpedanz
Netz	$(0,044 + j0,438) \Omega$	–
Transformator	$(0,0 + j1,35) \Omega$	–
Leitung zur Fehlerstelle A	$(3,07 + j2,8) \Omega$	$(10,08 + j3,07) \Omega$
Leitung bis zur Fehlerstelle B	$(4,61 + j4,2) \Omega$	$(16,2 + j4,61) \Omega$
Gesamtimpedanz (Tabelle 5.1)	$(42,624 + j32,408) \Omega$	

Der Doppelerdkurzschlussstrom berechnet sich damit (siehe Tabelle 5.1) zu $I''_{KE} = 1,233 \text{ kA}$. Da die Fußpunkte üblicherweise an einem Mast auftreten, fließt ein Teil des Erdkurzschlussstromes über den Mast und den Mastausbreitungswiderstand. Nach Maßgabe des spezifischen Erdbodenwiderstandes, des Mastausbreitungswiderstandes und des Wellenwiderstandes der Freileitung ist dieser Anteil mit ca. 10% bis 25% erheblich kleiner als der Doppelerdkurzschlussstrom.

5.4.2 Einpoliger Kurzschluss in einem 110-kV-Netz

Für ein 110-kV-Netz nach Bild 5.4 sollen der einpolige Kurzschlussstrom, die Teilkurzschlussströme über Erde und die Erderspannung in