



ESTI-Mitteilung Nr. 2025-0501
16. Mai 2025

Korrekte Dimensionierung der Erdungsleiter von Transformatorenstationen im Fehlerfall

1. Einleitung

Bei Erdschlüssen in Transformatorenstationen (TS) der Netzebene 5-7 können sehr grosse Fehlerströme auftreten. Die Fehlerströme müssen über korrekt ausgelegte Erdungsleiter so zurückgeführt werden, dass die Überstromschutzorgane wirksam sind. Zusätzlich muss für die Auslegung der Erdungsleiter bei Leistungserhöhungen, wie Einbau von grösseren Transformatoren oder beim Parallelbetrieb von 2 oder mehr Transformatoren berücksichtigt werden. Das ESTI hat anlässlich seiner Aufsichtsinspektionen festgestellt, dass die Erdungsleiter oft nicht korrekt dimensioniert sind. Mit vorliegender Mitteilung werden die Anforderungen und Handhabung detailliert beschrieben.

1.1 Erforderliche Kenndaten zur Auslegung der Erdungsleiter

Die Erdungsleiter müssen für Betriebs- wie auch für mögliche Erdfehlerströme ausgelegt sein. In einer TS werden die Erdungsleiter und -anlagen sowohl von den Mittelspannungs-, als auch von den Niederspannungsanlagen genutzt und müssen für die höchste Einzelanforderung ausgelegt sein. Das gleichzeitige Auftreten von einem Fehler auf der Mittel- und Niederspannungsseite ist unwahrscheinlich und kann bei der Dimensionierung vernachlässigt werden.

Zur Auslegung oder Beurteilung der verschiedenen Erdungsleiter müssen folgende Parameter sowohl für die Mittelspannungs-, als auch für die Niederspannungsebene bekannt sein:

- Maximale Erdfehlerströme I_F (Erdschlussstrom)
- Einwirkzeiten t_F
- Geometrische Anordnungen und Position der Erdungsverbindungen (mögliche Fehlerstrompfade).

2. Erdschluss auf der Mittelspannungsebene (MS)

2.1 Maximaler MS-Erdfehlerstrom I_F (Erdschlussstrom)

Mittelspannungsnetze werden in der Schweiz mit isoliertem Trafo-Sternpunkt oder mit einer entsprechenden Erdschlusskompensation betrieben. Bei einem einpoligen Erdschluss fliesst maximal der kapazitive Ausgleichsstrom gegen Erde. Zur Dimensionierung der Erdungsleiter wird der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung berücksichtigt. Zwischen den beiden Erdfehlern fliesst ein grosser Erdfehlerstrom, welcher von den übergeordneten Hochspannungstransformatoren in den Unterwerken und den Netzimpedanzen bestimmt wird.

Für den zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung auf der Mittelspannungsebene kann angenommen werden, dass dieser innerhalb einer Transformatorenstation gleich gross ist.

2.2 Einwirkzeit t_f

Um einen zweipoligen Kurzschluss im Mittelspannungsnetz zu löschen, wird je nach Netz die 2. Stufe des Netzschutzes benötigt, was bis zu 1 s dauern kann.

2.3 Geometrische Anordnung

Zur Bestimmung der Leiterquerschnitte der Erdungsanlage muss zunächst analysiert werden, welche Anteile des Erdfehlerstroms zwischen den Anlagepunkten fließen können.

Bei einem Erdschluss auf der Mittelspannungsebene fließt der Erdfehlerstrom zwischen Unterwerk und den betroffenen Transformatorenstationen.

Besteht das Mittelspannungsnetz hauptsächlich aus Kabelleitungen mit beidseitig geerdeten Kabelschirmen, fließt bei einem Erdschluss ein grosser Anteil des Erdfehlerstromes über die Kabelschirme [4]. Reduktionsfaktoren, um diesen Anteil abzuschätzen, können in der SN EN 50522 [2] herausgelesen werden.

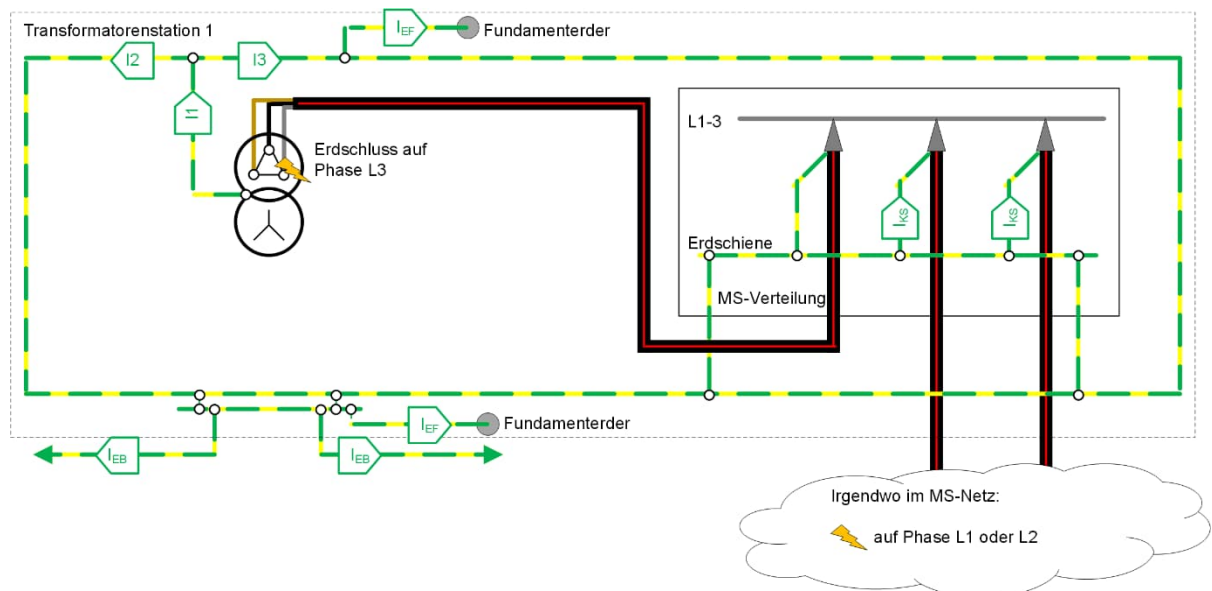


Abbildung 1 Beispiel: Strombelastung der Erdungsverbindungen bei einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung auf der MS-Ebene:

- | | |
|--------------------|---|
| I_1 : | 100% des zweipoligen Kurzschlussstroms mit Erdberührung (Fehlerstrom), wenn Schirm des Transformatorenkabels nur einseitig geerdet. |
| I_2, I_3 : | ~ 50% des Fehlerstroms |
| I_{KS} : | Erdungs-Rückströme auf allen beidseitig geerdeten Kabelschirmen (in der Summe bis zu ~ 90% des Erdschlussstroms, je nach Reduktionsfaktor) |
| I_{EB}, I_{EF} : | Erdungs-Rückströme zu den Band- oder Tieferdernen oder zum Fundamente (Differenz zwischen I_1 und alle I_{KS} , in diesem Beispiel: ~ 10% des Fehlerstroms) |

Sind die Transformatorenstationen nur mit Freileitungen ohne Erdseile oder Kabeln mit einseitig geerdeten Kabelschirmen erschlossen, fließt der gesamte Erdfehlerstrom durch den

Erdboden. Die Erdungsverbindungen von der Mittelspannungsschaltanlage Richtung Erder (Fundament-, Band- oder Tiefenerder) müssen entsprechend dimensioniert sein.

Bei einem Isolationsfehler bei einer Mittelspannungs-Durchführung am Transformator, muss der Erdfehlerstrom zu den geerdeten Kabelschirmen der Leitungsabgänge fließen können. Dies kann entweder über beidseitig geerdete Transformatorenkabelschirme oder sonst über die Erdungsverbindung des Transformatorenkessels und der Mittelspannungsanlage geschehen.

Wenn die Mittelspannungskabelverbindung von der Schaltanlage zum Transformator nur mit einseitig geerdeten Kabelschirmen betrieben wird, muss die Erdung des Transformators an die Anlagenerdung für den gesamten Erdkurzschlussstrom dimensioniert werden.

3. Erdschluss auf der Niederspannungsebene (NS)

3.1 Maximaler NS-Erdfehlerstrom I_F (Erdschlussstrom)

Beim starr geerdeten Niederspannungsnetz ist der einpolige Erdschluss einer Phase (Aussenleiter) gegen Erde für die Auslegung der Erdungsleiter massgebend. Der Erdfehlerstrom entspricht somit dem einpoligen Erdschlussstrom.

Bei typischen Ortsnetztransformatoren der Schaltgruppe Dyn5 entspricht der einpolige Erdschlussstrom (I_{KES}) dem dreipoligen Kurzschlussstrom (I_{K3}).

Scheinleistung	Kurzschlussspannung	$I_{K3} \sim I_{KES}$
[kVA]	[%]	[kA]
400 kVA	4.4%	13.2 kA
630 kVA	4.6%	19.8 kA
1000 kVA	5.0%	29.0 kA

Tabelle 1 Beispiele von typischen Transformatoren

3.2 Einwirkzeit t_F

Die vom Betreiber getroffenen Massnahmen zum Überstromschutz bestimmen die Einwirkzeit. Eine Erdungsanlage sollte zudem auch beim Versagen der primären Schutzeinrichtung bis spätestens der redundante Schutz einwirkt, noch intakt bleiben.

Erdschlüssen ausserhalb des Sekundärschutzbereiches (Gehäuseschluss im Transformator, Isolationsversagen der NS-Leitung zwischen Transformator und NS-Verteilung) werden vom Schutzorgan auf der Oberspannungsseite ausgeschaltet.

3.3 Geometrische Anordnung

Zur Bestimmung der Leiterquerschnitte der Erdungsanlage muss zunächst analysiert werden, welche Anteile des Erdfehlerstroms zwischen den Anlagepunkten fließen können.

Beim einpoligen Erdschluss auf der Niederspannungsseite fliesst der ganze Erdfehlerstrom innerhalb der TS. Es muss sichergestellt sein, dass von jedem möglichen Erdschlussort aus, der Erdfehlerstrom zum Transformatorensternpunkt zurückfließen kann.

Die grösste Belastung für die Erdungsanlage und Erdungsleiter tritt in der Regel dann ein, wenn im Transformator selbst ein Erdschluss entsteht. Beim Versagen einer NS-Durchführung fliesst der einpolige Erdschlussstrom von der betroffenen Phase auf den Transformatorenkessel.

Bei den starr geerdeten NS-Netzen muss der Erdkurzschlussstrom zum Transformatorsternpunkt zurückfließen. Oftmals ist in einer Transformatorenstation der Transformatoren-Sternpunkt nur über einen zentralen Erdungspunkt (ZEP) in der NS-Verteilung geerdet. In diesem Fall muss der Erdfehlerstrom vom Transformatorengehäuse über die Anlagenerdung zum

ZEP, via NS-Verteilung und deren PEN-Leiterverbindung zum Transformatoren-Sternpunkt zurückfließen (Abbildung 2).

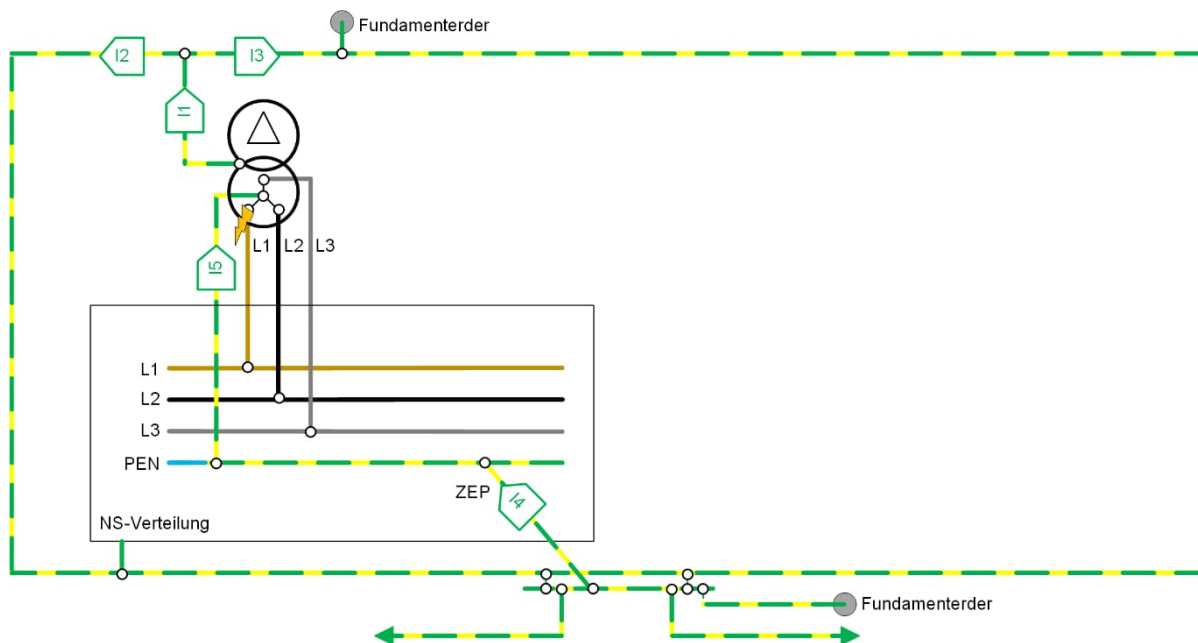


Abbildung 2 Beispiel: Strombelastung der Erdungsverbindungen bei einem Erdschluss an einem Transformator (Phase gegen Kessel):
 I1, I4, I5: 100% des Erdschlussstrom
 I2, I3: ~ 50% des Erdschlussstroms

Bei Transformatorenstationen mit zwei Transformatoren ist ein Parallelbetrieb für Umschaltungen vorgesehen.

In diesem Fall verdoppelt sich mit vereinfachter Rechnung der Erdschlussstrom bei einem einpoligen Erdschluss an einem Transformator.

In folgendem Beispiel (Abbildung 3) ist dargestellt, wie sich die Ströme aufteilen. Gemäss Tabelle 2 von Kapitel 4 müssten bei zwei 1000-kVA-Transformatoren die Gehäuse mit je einem elektrischen Leiter äquivalent zu mindestens 257 mm² Kupfer geerdet werden, falls der Erdschluss (50 kA = 100%) in einer Zeit von 1 s abgeschaltet wird.

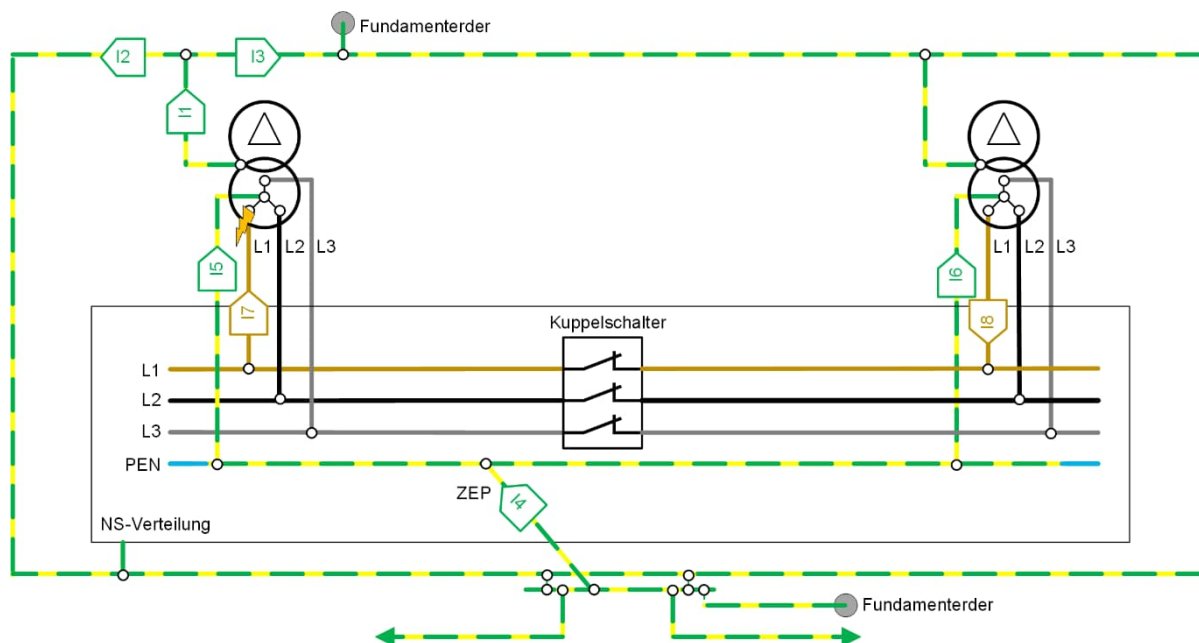


Abbildung 3 Beispiel: Strombelastung der Erdungsverbindungen bei einem Erdschluss an einem Transformator bei Parallelbetrieb:

I1, I4:	100% des Erdschlussstrom
I2, I3, I5, I6:	~ 50% des Erdschlussstroms
I7, I8:	Fehlerströme auf der Phase L1, 50% des Erdschlussstroms

3.4 Ausführungsvarianten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten eine Transformatorenstation korrekt zu erden.

- Die Erdungsleiter werden für den grössten Erdschlussstrom und die längste, mögliche Abschaltzeit dimensioniert. Ist die Erdungsanlage wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 ausgeführt, müssen insbesondere die Verbindungen vom Transformatorengehäuse zum Erdungsringleiter korrekt dimensioniert sein.
- Früher wurden sowohl bei allen Transformatoren als auch in der Niederspannungsverteilung je eine Sternpunkt-Erdungsverbindung eingebaut. Damit konnten die grossen Erdschlussströme direkt vom Transformatorenkessel zum Sternpunkt, oder im Erdschlussfall in der Niederspannungsverteilung über den PEN-Leiter fliessen. Aus EMV-Gründen wird heute in der Regel ein zentraler Erdungspunkt (ZEP) in der Niederspannungsverteilung angebracht, um im ungestörten Betriebsfall zu verhindern, dass Ausgleichs- oder Streuströme ausserhalb der Neutraleiter im Erdungsleiter fliessen.

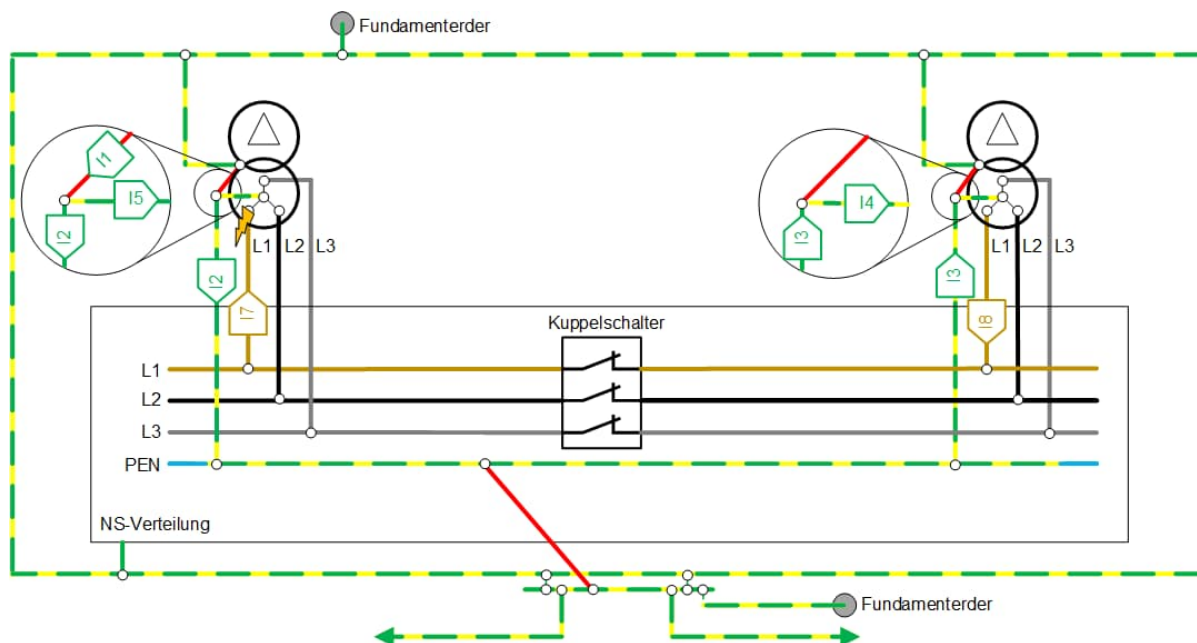


Abbildung 4 Beispiel: Strombelastung der Erdungsverbindungen bei einem Erdschluss an einem Transformator bei Parallelbetrieb. Die roten Linien sind Erdverbindungen zwischen Sternpunkt/Neutraleiter und Anlagenerdung.

I1:	~ 100% des Erdschlussstrom
I2, I3, I4, I5:	~ 50% des Erdschlussstroms
I7, I8:	Fehlerströme auf der Phase L1, 50% des Erdschlussstroms

- Das Anbringen von direkten Erdverbindungen von den Transformatoren-Gehäusen zum PEN-Leiter der NS-Verteilanlage (parallel zu den Transformatorenkabeln) entlastet die geschlossene Ringleitung / Potentialausgleichsschiene wesentlich.

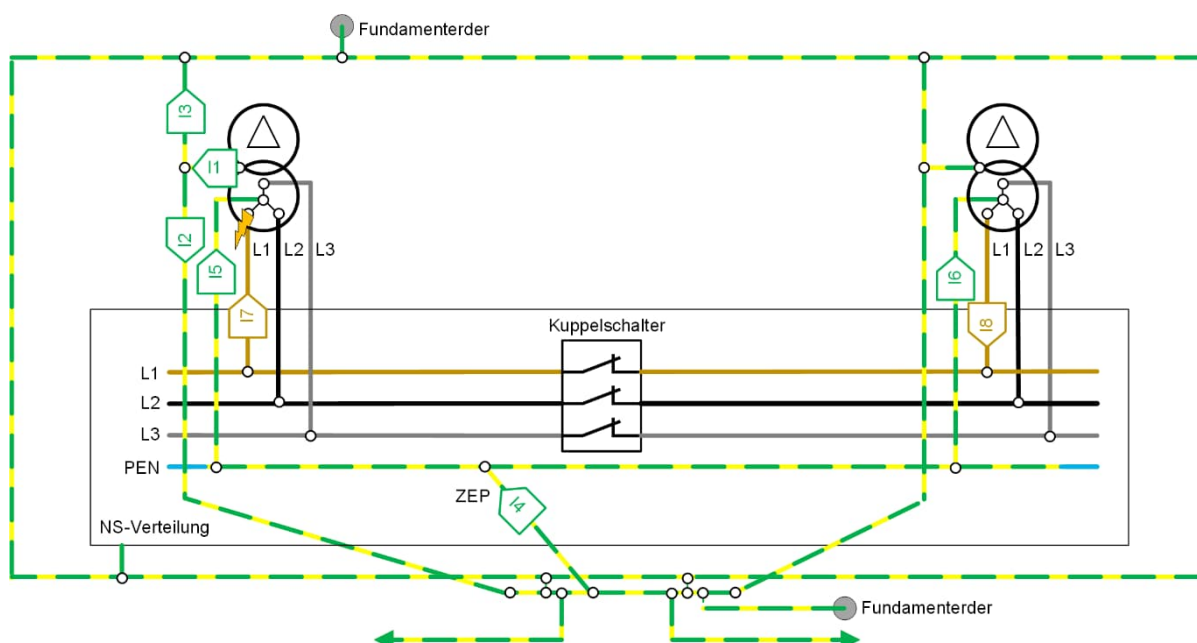


Abbildung 5 Beispiel: Strombelastung der Erdverbindungen bei einem Erdschluss an einem Transformator bei Parallelbetrieb.

I1, I4:	100% des Erdschlussstrom
I2, I3;	zusammen 100% des Erdschlussstroms
I5, I6:	~ 50% des Erdschlussstroms
I7, I8:	Fehlerströme auf der Phase L1, 50% des Erdschlussstroms

- Bei beidseitig geerdeten Kabelschirmen der Mittelspannungstransformatorenkabel dürfen die Schirmquerschnitte miteinberechnet werden.
- Schutzelemente zwischen den Unterspannungsabgängen der Transformatoren und der Niederspannungsverteilung schalten im Erdfehlerfall beim Parallelbetrieb den einen Transformator schon nach kurzer Zeit weg (30 – 50 ms). Für die Dimensionierung der Erdungsleiter darf somit mit einer Staffelung der Abschaltzeiten gerechnet werden.

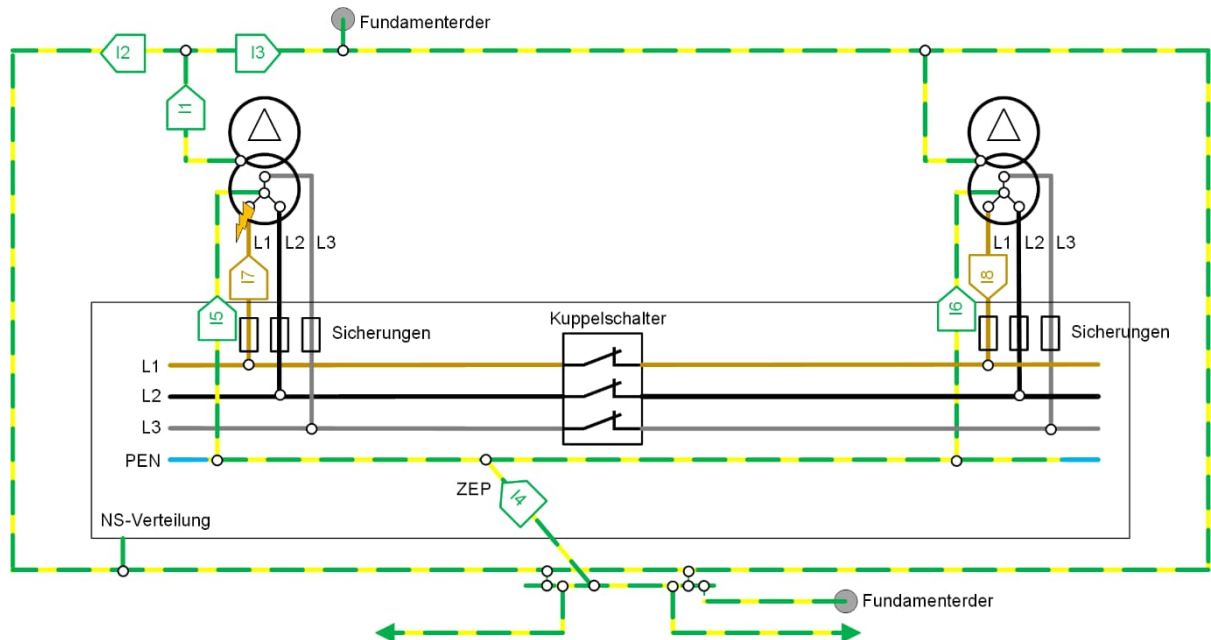


Abbildung 6 Beispiel: Strombelastung der Erdungsverbindungen bei einem Erdkurzschluss an einem Transformator bei Parallelbetrieb. Anfänglich ist die Strombelastung gleich wie in Abbildung 3:

I1, I4:	100% des Erdschlussstrom
I2, I3, I5, I6:	~ 50% des Erdschlussstroms
I7, I8:	Fehlerströme auf der Phase L1, 50% des Erdschlussstroms

Nachdem das erste Sicherungselement ausgelöst hat, wird der Erdschlussstromanteil des zweiten Transformators abgeschaltet. Der Erdschlussstrom halbiert sich am Fehlerort und die Stromverteilung verändert sich gleich wie Abbildung 2:

I1, I4:	50% des ursprünglichen Erdschlussstrom
I2, I3, I5:	~ 50% des ursprünglichen Erdschlussstroms
I7, I8:	Fehlerströme auf der Phase L1, -
I6:	-

- Eine detaillierte und genaue Berechnung der Erdfehlerströme unter Einbezug der Impedanzen durch die geometrische Lage der Erdungsleiter, ergibt möglicherweise kleinere Erdschluss-Stromwerte, insbesondere bei grossräumigen Transformatorenstationen.

4. Bemessung der Erdungsleiter

Mindestmass für Erder aus Kupfer für Erwärmung von 20°C auf 300°C			
	Dauer des Kurzschlussstromes t [s]		
	0.5 s	1 s	5 s
Kurzschlussstrom [kA]	minimaler Leiterquerschnitt [mm ²]		
100 kA	363	514	1149
50 kA	182	257	574
30 kA	109	155	345
20 kA	73	103	230
10 kA	36	51	115
5 kA	18	26	57

Tabelle 2 Ausschnitt aus der Tabelle 10.2.3 der SNG 483755 mit zusätzlichen Stromwerten.
Dimensionierung von blanken Kupferleitern

In der SN EN 50522 [2] sind im Anhang D Formeln zur Berechnung der Strombelastbarkeit von Erdungsleitern oder Erdern angegeben. In der SNG 483755 [3] sind in der Tabelle 10.2.3 nach dieser Formel für einige Kurzschlussströme die Kupferquerschnitte notiert.

Erdungsleiter, welche dem reinen Potentialausgleich dienen und keinen wesentlichen Anteil des Erdfehlerstromes ableiten, müssen aus mechanischen Gründen die Mindestquerschnitte gemäss SNG 483755, Kap. 10.2.1 [3] einhalten.

5. Literaturverzeichnis

- [1] SR 734.2 «Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung)» 30. März 1994 (Stand am 1. Juni 2019)
- [2] SN EN 50522:2022-02 «Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV»
- [3] SNG 483755:2023 "Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen – Erläuterungen zu den Artikeln 53 – 61 der Starkstromverordnung SR 734.2"
- [4] Günther Storf, Erdung in Mittelspannungsnetzen, Bulletin SEV/VSE 2021, Nr. 5, S 41ff

Autoren:

ESTI: Günther Storf

TK Erdungen des CES: Beat Geiser, Marcel Schellenberg, Christoph Studer