

Sternpunktbehandlung in Mittel- und Hochspannungsnetzen



Sternpunktbehandlung in Mittel- und Hochspannungsnetzen

Oesterreichs Energie – Überarbeitung 2014

Inhalt

1. Vorwort.....	3
2. Technische Gegebenheiten.....	4
2.1. Arten der Sternpunktbehandlung.....	4
2.1.1. Netz mit isoliertem Sternpunkt	5
2.1.2. Netz mit Erdschlusskompensation	7
2.1.3. Netz mit wirksamer niederohmiger Sternpunkterdung	8
2.1.4. Netz mit strombegrenzender Sternpunkterdung	9
2.1.5. Netz mit vorübergehender strombegr. Sternpunkt- oder Leitererdung.....	10
2.2. Anwendungsbereiche, Bestimmungsfaktoren, Grenzwerte.....	12
2.2.1. Berührungs- und Schrittspannungen.....	12
2.2.2. Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungs-erdungsanlagen	12
2.2.3. Auswirkungen der Sternpunktbehandlung auf die Fehlerstelle	13
2.2.4. Beeinflussung von Fernmeldeanlagen	14
2.2.5. Beeinflussung von Rohrleitungen.....	15
3. Sternpunktbehandlung und Netzbetrieb	16
3.1. Einpolige Erdfehler	16
3.1.1. Erdkurzschluss	16
3.1.2. Erdschluss.....	17
3.1.3. Erdschlusswischer.....	18
3.1.4. Doppelerdschluss.....	18
3.1.5. Intermittierender Erdschluss.....	18
3.2. Fehlerortung und Schutztechnik.....	19
3.2.1. Fehlerbereichseingrenzung.....	19
3.2.2. Erdfehlererfassungseinrichtungen.....	20
3.3. Beschaltung der Transformatorsternpunkte	29
3.4. Erdschlusskompensation	31
3.4.1. Verlagerungsspannung	31
3.4.2. Bestimmung der Netzparameter	36
3.4.3. Wahl des Verstimmungsgrades	38
3.5. Spannungsbeanspruchung	39
3.5.1. Einpolige Außenleiter-Erde-Fehler	39
3.5.2. Leiterunterbrechung	39
3.5.3. Abstimmung der Erdschlusslöschspule.....	40
3.5.4. Kippschwingungen, Ferroresonanzen.....	40
3.5.5. Beeinflussung durch Parallelführung von Leitungssystemen.....	41
3.5.6. Transiente Erdschlussüberspannungen.....	42
3.5.7. Schaltüberspannungen	42
4. Zusammenfassende Betrachtungen.....	43

1. Vorwort

Trotz eines steigenden Wirtschaftswachstums und eines damit einhergehenden, stetig steigenden Stromverbrauches ist eine kostengünstige Elektrizität in hoher Qualität zur Verfügung zu stellen.

Die Art der Sternpunktbehandlung stellt dabei eine wesentliche Einflussgröße auf die Gestaltung und den Betrieb eines elektrischen Energienetzes sowie auf die Auswahl und die Dimensionierung der Betriebsmittel dar. Der zunehmende Verkabelungsgrad, Überlegungen zur Versorgungs- und Spannungsqualität und neue technische Verfahren haben dazu geführt, dass die Diskussion über die Sternpunktbehandlung national und international in den letzten Jahren verstärkt betrieben wurde.

1. Auflage veröffentlicht 1995, ausgearbeitet von der Expertengruppe „Sternpunktbehandlung in Mittelspannungsnetzen“:

BAUHOFER Peter	TIWAG
EBERHARD Dietmar	KELAG
FICKERT Lothar	WIENSTROM
HARY Karl-Heinz (ab 24.3.95)	STEWEAG
KALCHBRENNER Josef	BEWAG
PANZENBÖCK Friedrich	EVN
RIEDER Thomas (Schriftführer)	SAFE
SCHAFFER Mathias	Stadtwerke Graz
STELZL Werner (bis 24.3.95)	STEWEAG
TENSCHERT Walter (Vorsitzender)	OKA
UMLAUFT Dieter	VEÖ
WEIßENBACHER Walter	Stadtwerke Radkersburg

2. Auflage überarbeitet 2013 im Auftrag des Arbeitskreises „Verteilernetze“:

ACHLEITNER Georg	APG
FICKERT Lothar	TU Graz
HELLERSCHMIED Walter	EVN Netz GmbH
LEITNER Wolfgang	ENERGIE AG OÖ Netz GmbH
NIEDERHUEMER Walter	LINZ STROM Netz GmbH
OBKIRCHER Clemens	ÖBB INFRASTRUKTUR AG
RAUNIG Christian	TU Graz

Bei dieser Überarbeitung wurde der Titel von „Sternpunktbehandlung in Mittelspannungsnetzen“ auf „Sternpunktbehandlung in Mittel- und Hochspannungsnetzen“ geändert, da die in dieser Publikation getroffenen Aussagen auch für Hochspannungsnetze gelten. Das Kapitel „Technische Regelwerke“ ist jetzt in einem Anhang zusammengestellt, um eine leichtere Anpassung bei Normenänderungen zu ermöglichen.

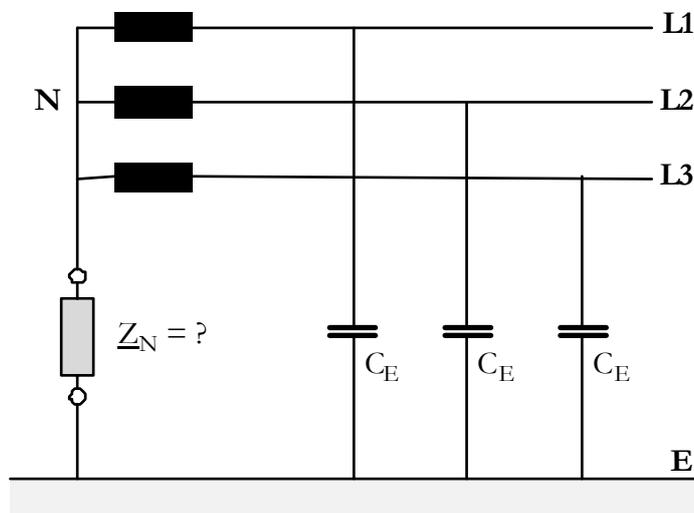
Des Weiteren wird auch auf den ETG-Fachbericht „Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH)“ hingewiesen, der 2012 herausgegeben wurde (VDE Verlag GmbH).

2. Technische Gegebenheiten

2.1. Arten der Sternpunktbehandlung

Die Behandlung des Netzsternpunktes hat auf die Übertragung der elektrischen Energie im fehlerfreien Betrieb wenig Einfluss. In Bezug auf die Störanfälligkeit eines Netzes und die Anzahl der störungsbedingten Abschaltungen kommt der Sternpunktbehandlung jedoch große Bedeutung zu.

Die grundsätzlichen Möglichkeiten der Sternpunktbehandlung zeigt nachstehendes Bild. Maßgebend ist die Impedanz zwischen dem Sternpunkt N des Drehstromsystems und der Erdungsanlage E, die Sternpunktimpedanz Z_N .



$$Z_N = \begin{cases} \infty & \text{Netz mit isoliertem Sternpunkt} \\ \approx \frac{j}{\omega \cdot 3 \cdot C_E} & \text{Netz mit Erdschlusskompensation} \\ \ll \frac{1}{\omega \cdot 3 \cdot C_E} & \text{Netz mit niederohmiger Sternpunkterdung} \end{cases}$$

Der häufigste Fehler in Verteilungsnetzen mit Freileitungsanteil ist der einpolige Erdfehler (Erdschluss oder Erdkurzschluss). Ein Großteil aller Netzstörungen beginnt einpolig als Durchschlag der Isolation eines Außenleiters gegen Erde. Im Freileitungsnetz sind dies meist vorübergehende Fehler (Erdschlusswischer). Aus nicht vorübergehenden Fehlern entwickeln sich durch fortschreitende Zerstörung der Isolation häufig zwei- und dreipolige Fehler.

Wegen der Bedeutung für einpolige Erdfehler sind die Anforderungen an die Sternpunktbehandlung vor allem auf den Erdschluss oder Erdkurzschluss ausgerichtet. Diese Anforderungen lassen sich in drei Gruppen gliedern:

Stromabhängige Forderungen

- kleine Fehlerströme
- möglichst selbständiges Erlöschen von Erdschlüssen
- kleine Schritt- und Berührungsspannungen an der Fehlerstelle
- geringe Beeinflussung anderer Leitungsnetze (Fernmeldeanlagen)

Spannungsabhängige Forderungen

- geringe Spannungsbeanspruchung der Betriebsmittel zwischen Außenleiter und Erde (Verlagerungsspannung, Spannungsanhebung der fehlerfreien Außenleiter)
- Vermeidung von Erdschlussfolgefehlern (Doppelerdschlüsse)
- Vermeidung von Überspannungen (intermittierende Erdschlüsse)
- Vermeidung von Kippschwingungen

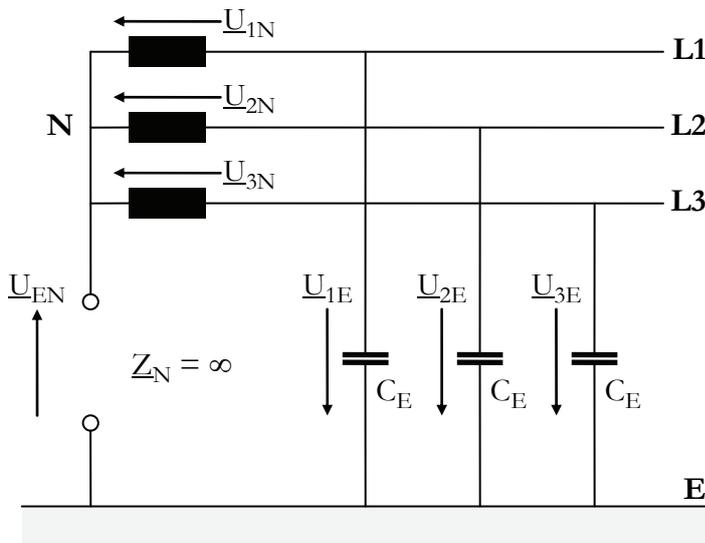
Betriebs- und kundenabhängige Forderungen

- Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität der Kundenanlagen selektive Fehlererkennung
- schnelle Fehlebereichseingrenzung
- Wirtschaftlichkeit des Netzaufbaues

2.1.1. Netz mit isoliertem Sternpunkt

Netz mit isoliertem Sternpunkt ist ein Netz, in dem die Sternpunkte der Transformatoren, Generatoren und Sternpunktbildner nicht oder nur über Mess- und Schutzeinrichtungen mit sehr hohem Scheinwiderstand oder über eine Überspannungsschutzeinrichtung an eine Erdungsanlage angeschlossen sind.

Netze mit geringer Ausdehnung und geringem kapazitivem Erdschlussstrom I_C werden oft mit isoliertem Sternpunkt betrieben. Der einpolige Fehlerstrom - der Erdschlussstrom - wird durch die Kapazitäten zwischen Außenleiter und Erde C_E der Freileitungen und Kabel bestimmt.



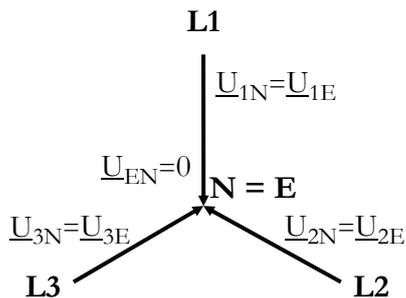
Erdschlussstrom

$$I_C \approx \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_n$$

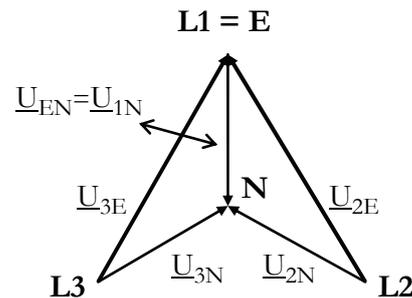
$$\underline{I}_f = \underline{I}_c$$

\underline{I}_c ...kapazitiver Erdschlussstrom
inklusive ohmscher Anteile
und Oberschwingungsstrom

Spannungen im erdschlussfreien symmetrischen Netz



Spannungen im erdschluss- behafteten Netz



Die durch den einpoligen Fehler nicht betroffenen Außenleiter nehmen nach einem transienten Vorgang die verkettete Spannung gegen Erde an. Die Anhebung der Spannungen auf das $\sqrt{3}$ -fache ist eine betriebsfrequente Spannungserhöhung.

Der Erdschluss selbst wird durch einen Überschlag oder einen Isolationsdurchbruch eingeleitet, der meist von einem lichtbogenähnlichen Vorgang begleitet wird. Dieser frei brennende Lichtbogen muss beim ersten Stromnulldurchgang nicht bleibend verlöschen, sondern kann durch die wiederkehrende Spannung im Lichtbogenkanal ständig neu zünden (intermittierender Erdschluss). Bei jeder Neuzündung des Lichtbogens gehen von der Fehlerstelle Wanderwellen aus, die eine zusätzliche Beanspruchung der Isolation darstellen.

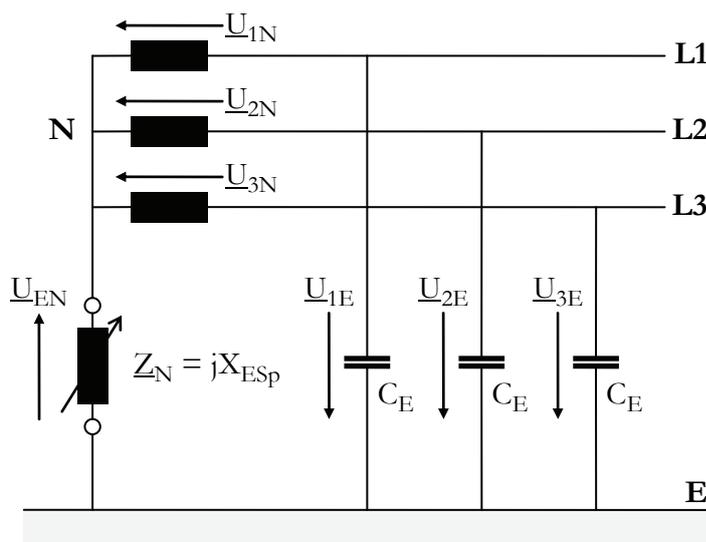
Beide Vorgänge, die Anhebung der Spannung in den gesunden Außenleitern auf das $\sqrt{3}$ -fache, sowie das Auftreten der Wanderwellen können zu einem Doppelerdschluss im Netz führen.

2.1.2. Netz mit Erdschlusskompensation

Netz mit Erdschlusskompensation ist ein solches, in dem der Sternpunkt eines oder mehrerer Transformatoren über Erdschlusslöschspulen geerdet ist, deren Gesamtreaktanz dem jeweiligen Netzzustand so angepasst wird, dass während eines einpoligen Erdschlusses der betriebsfrequente induktive Wechselstrom über diese Spulen die betriebsfrequente kapazitive Komponente des Erdschlussstroms im Wesentlichen kompensiert.

Ausgehend von der isolierten Sternpunktbehandlung, die im Fehlerfalle am Fehlerort einen kapazitiven Strom bewirkt, formulierte Petersen im Jahre 1917 den Grundgedanken der Erdschlusslöschung dahingehend, dass dem kapazitiven Erdschlussstrom des Netzes ein künstlich erzeugter induktiver Strom entgegengesetzt sei, um die Erdschlussstelle strommäßig zu entlasten.

Dieser induktive Strom wird durch die Einschaltung einer sogenannten Erdschlusslöschspule zwischen dem Transformatorsternpunkt und der Erdungsanlage bewirkt.



Abstimmung

$$X_{ESp} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{ESp}} \approx \frac{1}{\omega \cdot 3 \cdot C_E}$$

Erdschlussreststrom

(Formel aus EN 50522)

$$|I_F| = |I_{ERS}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2}$$

I_C ...kapazitiver Erdschlussstrom
inklusive ohmscher Anteile

I_L ...Strom über Erdschlusspule
inklusive ohmschem Anteil

I_H ...Oberschwingungsstrom

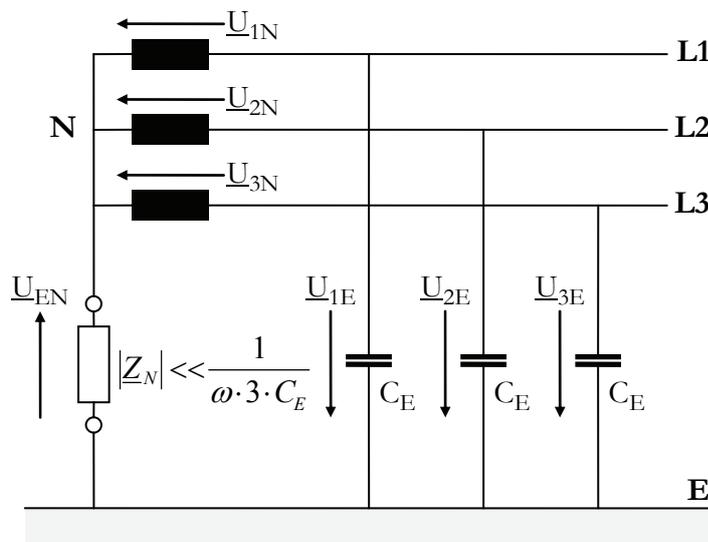
Liegt eine ausgeglichene Blindstrombilanz an der Fehlerstelle vor, so fließt nur noch ein kleiner Erdschlussreststrom, der sich aus dem Wirkstrom und nicht kompensierten Anteilen zusammensetzt (Oberschwingungen, Unsymmetrien und dgl.).

Die Vorbedingungen zum selbständigen Verlöschen eines Lichtbogens sind - im Vergleich zu Netzen mit isoliertem Sternpunkt - wesentlich günstiger. In Freileitungsnetzen wird der Erdschlusslichtbogen meist nach dem ersten Stromnulldurchgang verlöschen.

2.1.3. Netz mit wirksamer niederohmiger Sternpunktterdung

Netz mit wirksamer niederohmiger Erdung des Sternpunkts ist ein Netz, in dem der Sternpunkt eines oder mehrerer Transformatoren, Sternpunktbildner oder Generatoren unmittelbar geerdet ist, um transiente Schwingungen zu reduzieren und bei einem Erdschluss eine selbsttätige Abschaltung sicherzustellen.

Bei unmittelbarer Erdung des Sternpunkts ($Z_N=0$) spricht man auch von „starrer Sternpunktterdung“.



Erdkurzschlussstrom

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot U_n}{|2 \cdot Z_1 + Z_0 + 3 \cdot Z_F|}$$

In Z_0 ist die Sternpunktimpedanz $|Z_N|$ berücksichtigt

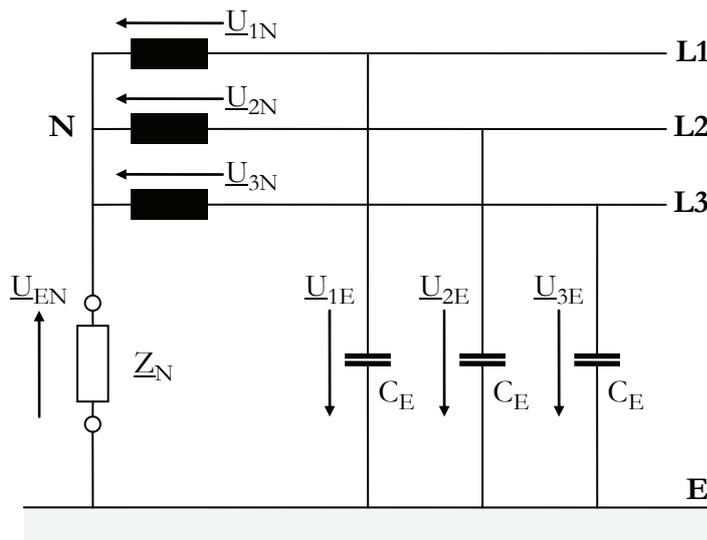
Die Größe des Erdkurzschlussstromes ist von den Mit- und Nullimpedanzen des Netzes (Transformatoren, Leitungen, Sternpunktimpedanz) und vom Fehlerwiderstand Z_F abhängig.

Das Verhältnis des Effektivwertes der höchsten betriebsfrequenten Außenleiter-Erde-Spannung eines nicht fehlerbehafteten Außenleiters während eines ein- oder mehrpoligen Fehlers mit Erdberührung an beliebiger Stelle des Netzes zum Effektivwert der betriebsfrequenten Außenleiter-Erde-Spannung, die ohne Fehler vorhanden wäre, wird als Erdfehlerfaktor bezeichnet. Wird dabei der Wert von 1,4 an keiner Stelle des Netzes überschritten, liegt ein Netz mit wirksamer Sternpunktterdung vor.

Die Isolationsbeanspruchung bei dieser Art der Sternpunktbehandlung ist niedriger als in Netzen mit Erdschlusskompensation oder mit isoliertem Sternpunkt.

2.1.4. Netz mit strombegrenzender Sternpunktterdung

Netz mit strombegrenzender Erdung des Sternpunkts ist ein Netz, in dem der Sternpunkt eines oder mehrerer Transformatoren, Sternpunktbildner oder Generatoren über strombegrenzende Wirk- oder Blindwiderstände geerdet ist, um bei einem Erdschluss eine selbsttätige Abschaltung sicherzustellen.

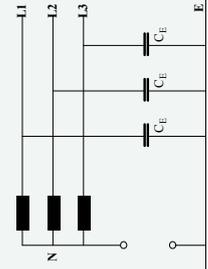
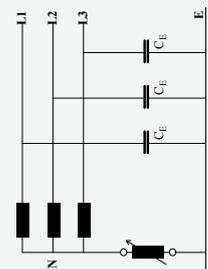
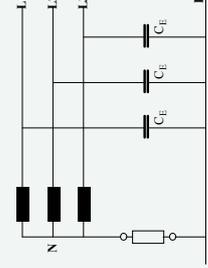
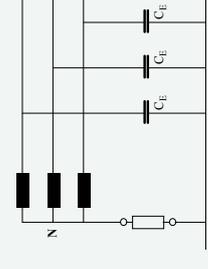


Erdkurzschlussstrom

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot U_n}{|2 \cdot Z_1 + Z_0 + 3 \cdot Z_F|}$$

$$I_{k1}'' \approx \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N}$$

Die Größe des Erdkurzschlussstromes ist hauptsächlich von der Sternpunktimpedanz Z_N und vom Fehlerwiderstand Z_F abhängig.

Übersicht - Arten der Sternpunktbehandlung				
	Isolierter Sternpunkt	Erdschlusskompensation	Wirksam niederohrmige Sternpunktterdung	Strombegrenzende Sternpunktterdung
Schaltbild				
Sternpunktimpedanz	∞	$\approx \frac{j}{\omega \cdot 3 \cdot C_E}$	$\ll \frac{1}{\omega \cdot 3 \cdot C_E}$	$\approx \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \max_dim I_F}$
Strom an der Fehlerstelle bei einpoligem Fehler	Erdschlussstrom $I_C \approx \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_n$ $I_F = I_C$	Erdschlussreststrom $ I_F = I_{RES} = \sqrt{ I_C + I_L ^2 + I_H ^2}$	Erdkurzschlussstrom $I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot U_n}{2 \cdot Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0} + 3 \cdot Z_{\Sigma F}}$	Erdkurzschlussstrom $I_{k1}'' \approx \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_N}$
Spannungsanhebung der fehlerfreien Außenleiter gegen Erde	ja	ja	nein	ja
Verlöschen von Erdschlusswischern	ja	ja	nein	nein

2.2. Anwendungsbereiche, Bestimmungsfaktoren, Grenzwerte

2.2.1. Berührungs- und Schrittspannungen

Der Erdfehlerstrom eines Netzes darf entsprechend den derzeit gültigen nationalen Bestimmungen zulässige Grenzwerte nicht überschreiten, die gegeben sind durch:

- Erdungs- und Berührungsspannungen
- Beeinflussung von Fernmeldeanlagen

Je nach Sternpunktbehandlung eines Netzes und der Größe der auftretenden Erdungsspannung müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein bzw. unterschiedliche Ersatzmaßnahmen durchgeführt werden, um die zulässigen Berührungsspannungen nicht zu überschreiten. Zudem sind auch die Ströme zur Bestimmung der Erdungsspannung an einer Anlage von der Art der Sternpunktbehandlung abhängig. Für die Größe der Schrittspannung sind keine zulässigen Grenzwerte vorgeschrieben.

In der Regel werden die Anforderungen zur Schrittspannung erfüllt, wenn die Anforderungen zur Berührungsspannung eingehalten werden, da die zulässigen Schrittspannungswerte, wegen der unterschiedlichen Strompfade durch den Körper, sehr viel größer als die Berührungsspannungswerte sind.

2.2.2. Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

Entsprechend den elektrotechnischen Vorschriften wird für den Zusammenschluss von Hochspannungsschutz- und Niederspannungsbetriebserdung in Anlagen vorausgesetzt, dass bei Fehlern mit Erdberührung in die Kundenanlagen keine unzulässig hohen Berührungsspannungen verschleppt werden.

In Abhängigkeit vom Netzsystem im Niederspannungsnetz (TN-Netz oder TT-Netz) und der Art der Sternpunktbehandlung im Hochspannungsnetz sind Bedingungen für einen Zusammenschluss der Erdungsanlagen unter Berücksichtigung der auftretenden Erdungsspannung U_E im Fehlerfall einzuhalten.

In einem Gebiet mit geschlossener Bebauung oder innerhalb einer Industrieanlage ist eine einwandfreie Trennung der Erdungsanlagen nicht möglich, weshalb die Erdungsanlagen ohne Bedingungen verbunden werden können. Gebiete mit geschlossener Bebauung sind Gebiete, in denen durch die Dichte der Bebauung (Fundamenterde) oder durch Versorgungseinrichtungen mit Erderwirkung die Gesamtheit der vorhandenen Erder wie ein Maschenerder wirkt.

Die Minimalanforderungen für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs-Erdungsanlagen basierend auf der Erdungsspannung sind im Anhang Normenteil (Punkt 1.3.3 Tabelle 2) beschrieben.

2.2.3. Auswirkungen der Sternpunktbehandlung auf die Fehlerstelle

Das unmittelbare Berühren von unter Spannung stehenden Leitern stellt grundsätzlich eine Gefahr dar. Eine Beseitigung oder Minderung dieser Gefahr vor Eintritt eines Erdfehlers kann durch die Art der Sternpunktbehandlung nicht erreicht werden. Unterschiede bei den verschiedenen Arten der Sternpunktbehandlung treten erst im weiteren Verlauf des durch diese „Erstberührung“ ausgelösten einpoligen Erdfehlers auf.

Isolierter Sternpunkt und Erdschlusskompensation

Der Lichtbogen von vorübergehenden einpoligen Erdfehlern erlischt wegen des geringen Fehlerstromes selbsttätig.

Bei einem bleibenden Erdschluss (z.B. Baum, Seilriss) fließt an der Fehlerstelle ein geringer Fehlerstrom. Für diesen Fall sind unverzüglich Maßnahmen einzuleiten, den Fehlerbereich einzugrenzen, aufzufinden und geeignete Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz von Personen zu treffen.

Wirksam niederohmige Sternpunkterdung

Die Erdkurzschlussströme in wirksam geerdeten Netzen betragen bis zu einigen 1000 A. Diese führen zu höheren Berührungsspannungen als in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation. Entsprechende Maßnahmen im Hinblick auf die Erdungsmaßnahmen sind zu ergreifen. Wegen der Abschaltung durch den Leitungsschutz innerhalb sehr kurzer Zeit besteht aber keine Gefahr von Folgeschäden durch längere Zeit fließende Fehlerströme.

Strombegrenzende Sternpunkterdung

Die Erdkurzschlussströme in strombegrenzend geerdeten Netzen betragen bis zu einigen 100A. Diese führen zu höheren Berührungsspannungen als in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation. Entsprechende Maßnahmen im Hinblick auf die Erdungsmaßnahmen sind zu ergreifen. Wegen der Abschaltung durch den Leitungsschutz innerhalb sehr kurzer Zeit besteht aber keine Gefahr von Folgeschäden durch längere Zeit fließende Fehlerströme.

Vorübergehend strombegrenzende Sternpunkterdung

In diesen Netzen gilt dasselbe wie bei strombegrenzender Sternpunkterdung mit dem Unterschied, dass die Sternpunkterdung erst nach einer gewissen Zeitverzögerung durchgeführt wird. Somit fließt an der Fehlerstelle für wenige Sekunden lang ein geringer Erdschlussreststrom und anschließend kurzzeitig ein Erdkurzschlussstrom von einigen 100A.

2.2.4. Beeinflussung von Fernmeldeanlagen

Aufgrund der Beeinflussung parallelgeführter Fernmeldeleitungen durch Wechselstromleitungen kann entlang der Fernmeldeleitung eine Spannung induziert oder ein Ladestrom induziert werden. Die dadurch abgreifbaren Berührungsspannungen dürfen die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten.

Eine Gefährdung kann durch kapazitive, induktive oder ohmsche Beeinflussung auftreten.

Kapazitive Beeinflussung

Eine kapazitive Beeinflussung oberirdisch geführter, ungeschirmter Fernmeldeleitungen muss bei Drehstromleitungen nur in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation im Erdschlussfall beachtet werden.

Induktive Beeinflussung

Eine induktive Beeinflussung tritt als induzierte Längsspannung an den Enden einer galvanisch zusammenhängenden Fernmeldeverbindung als Spannung gegen Erde auf.

Die induktive Beeinflussung ist in folgenden Fällen zu untersuchen:

- im Normalbetrieb einer Drehstromleitung mit großen Abstandsunterschieden der einzelnen Außenleiter zum Erdseil (ab 220 kV)
- bei Erdkurzschluss eines Netzes mit wirksamer und strombegrenzender Sternpunktterdung
- bei Erdschluss in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation bei bewusster vorübergehender Erdung eines zweiten Netzpunktes dann, wenn sich die Fehlerstelle innerhalb eines Umkreises von 250 km um die Aufschaltstelle befindet
- bei Doppelerdschluss in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation, wenn der kapazitive Erdschlussstrom oder Erdschlussreststrom folgende "Löschgrenzen von Starkstromnetzen" überschreitet (ÖVE-B1, Tab.22-2):

Nennspannung des Netzes [kV]	3 .. 20	25	30	45	60	110	150
Erdschlussstrom in Netzen mit isoliertem Sternpunkt [A] (maßgebend ist die Grundwelle)	35	37	40	50	60	-	-
Erdschlussreststrom in Netzen mit Erdschlusskompensation [A] (maßgebend ist die Grundwelle)	60	63	67	78	90	132	180

Die unteren Werte gelten auch für Kabelnetze bis 20 kV Nennspannung mit kleinen Freileitungsanteilen bei isoliertem Sternpunkt.

Ohmsche Beeinflussung

Durch ohmsche Beeinflussung auf geerdete Teile von Fernmeldeanlagen, die sich im Einflussbereich der Erde von Drehstromanlagen befinden, wird die Erderspannung oder ein Teil derselben als Beeinflussungsspannung übertragen. Dies kann auch bei Fernmeldekabel mit Isoliermantel als Spannung zwischen den Kabeladern (bzw. Koaxialleitern) und dem das Fernmeldekabel umgebende Erdreich auftreten.

Die Grenzwerte der zulässigen Beeinflussungsspannungen sind die gleichen wie bei induktiver Beeinflussung. Die ohmsche Beeinflussung ist in folgenden Fällen zu untersuchen:

- bei Erdkurzschluss eines Netzes mit wirksamer oder strombegrenzender Sternpunktterdung
- bei Erdschluss eines Netzes mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation und bewusster vorübergehender Erdung eines zweiten Sternpunktes für den Punkt, wo die niederohmige Erdung durchgeführt wird
- bei Doppelerdschluss eines Netzes mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation bei Nichteinhalten der Löschgrenzen (Tab.22-2).

Beim Auftreten von Störungen im Betrieb von Fernmeldeanlagen z.B. durch Geräusch-, Fremd- oder Influenzspannungen, alle hervorgerufen durch kapazitive, induktive oder ohmsche Beeinflussung, sind zusätzliche Grenzwerte festgelegt, die einzuhalten sind. Diese Störspannungen lassen sich nur schwer vorherberechnen und müssen deshalb erst beim Auftreten dieser Störungen durch eine Messung nachweislich unter den zulässigen Grenzwerten liegen.

2.2.5. Beeinflussung von Rohrleitungen

In gleicher Weise wie bei Fernmeldeleitungen können durch Energieleitungen auch an parallelverlegten Rohrleitungen Spannungen induziert werden.

Eine Untersuchung der induktiven und ohmschen Beeinflussung auf unzulässig hohe Berührungsspannungen an erdverlegten Rohrleitungen ist nur bei Hochspannungsleitungen und -anlagen mit einer Nennspannung von 110kV und darüber notwendig.

3. Sternpunktbehandlung und Netzbetrieb

3.1. Einpolige Erdfehler

Wird das Isolationsmedium zwischen den Außenleitern untereinander oder gegen Erde überbrückt oder werden seine Eigenschaften insofern geändert, dass es seine isolierende Wirkung verliert, so spricht man allgemein von einem „**Fehler**“. Bei einem einpoligen Fehler ist nur ein Außenleiter von dem Fehler betroffen, bei zwei- oder dreipoligen Fehlern sind mehrere Außenleiter betroffen. Ein einpoliger Fehler entsprechend vorstehender Definition kann nur gegen Erde auftreten und wird daher als „**einpoliger Erdfehler**“ bezeichnet. „**Vorübergehende Fehler**“ werden ohne weiteres Zutun des Netzbetreibers automatisch beseitigt, „**bleibende Fehler**“ müssen geortet und aus dem Netz geschaltet werden.

Die Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Fehlerarten wird wesentlich vom Längenverhältnis Freileitung zu Kabel eines Netzes bestimmt. Während Freileitungen vor allem durch wetterbedingte Fehler betroffen sind, überwiegen bei Kabeln die durch Fremdeinwirkung oder durch Alterung hervorgerufenen Fehler.

Bleibende einpolige Erdfehler (Erdschlüsse) werden gemeldet und protokolliert.

3.1.1. Erdkurzschluss

Ist der Sternpunkt über einen niederohmigen Wirkwiderstand geerdet, führt ein einpoliger Erdfehler zu einem Kurzschlussstrom. Die Höhe des Kurzschlussstroms wird durch die Impedanzen des Netzes und des Einspeise-Transformators (mit Sternpunktwidestand) sowie durch den Fehlerwiderstand bestimmt.

Der Erdkurzschlussstrom I_{k1}'' berechnet sich zu

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U}{\left| \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} + 3 \cdot \underline{Z}_F \right|} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U}{\left| 2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} + 3 \cdot \underline{Z}_F \right|}$$

c Spannungsfaktor entsprechend Kurzschlussberechnungsnorm

U verkettete Spannung

$\underline{Z}_{(1)}$... Kurzschluss-Mitimpedanz

$\underline{Z}_{(2)}$... Kurzschluss-Gegenimpedanz

$\underline{Z}_{(0)}$... Kurzschluss-Nullimpedanz

\underline{Z}_F Fehlerimpedanz

Bei geerdeten Hoch- und Höchstspannungsnetzen ist der Erdkurzschlussstrom sehr groß. In Mittelspannungsnetzen trifft das aber nur bedingt zu. Während im Umspannwerk der Erdkurzschlussstrom vorwiegend durch den Sternpunktwidestand bestimmt wird, verringert die dämpfende Wirkung des Netzes die Höhe des Erdkurzschlussstroms sehr rasch. Erdkurzschlussströme, die kleiner als die maximal zulässigen Lastströme sind, kommen in niederohmig geerdeten Mittelspannungs-Freileitungsnetzen häufig vor.

Jeder Erdkurzschluss führt im Regelfall zur Abschaltung des betroffenen Abgangs und damit zu einer Versorgungsunterbrechung. Durch den Erdkurzschlussstrom kommt es außerdem

zu einem Spannungseinbruch im Mittel- und Niederspannungsnetz. Der Spannungseinbruch besteht auch in den fehlerfreien Abgängen so lange, bis der fehlerbehaftete Abgang abgeschaltet wird.

3.1.2. Erdschluss

In einem isolierten oder erdschlusskompensierten Netz führt ein einpoliger Erdfehler zu Fehlerströmen, die kleiner als die zulässigen Lastströme sind. Wegen der kleinen Fehlerströme und deren Phasenlage kommt es auch zu keinem Spannungseinbruch im Netz. Ein unverzügliches Abschalten ist daher technisch nicht notwendig. Das Netz kann im Erdschluss weiterbetrieben werden, es sind aber unverzüglich Maßnahmen zur Fehlerbereichseingrenzung einzuleiten.

Während bei einem niederohmigen Erdschluss die Spannung des fehlerbehafteten Außenleiters gegen Erde sehr klein ist, steigen die Spannungen der fehlerfreien Außenleiter gegen Erde auf das $\sqrt{3}$ -fache an.

Kommt es bei einem Dauererdschluss durch Leiterriss zu einer (einpoligen) Leiterunterbrechung können während der Dauer der Störungssuche im Niederspannungsnetz Abweichungen der Spannungsqualität außerhalb der zulässigen Grenzen auftreten.

Isolierter Sternpunkt

Der Erdschlussstrom I_C errechnet sich aus den Außenleiter-Erde-Kapazitäten C_E zu

$$\underline{I}_C \approx \sqrt{3} \cdot j\omega \cdot C_E \cdot U + \text{Oberschwingungsstrom}$$

U ... verkettete Spannung

Der Erdschlussstrom ist ein rein kapazitiver Strom. Erlischt ein Lichtbogen im Stromnulldurchgang, so befindet sich die Spannung an der Fehlerstelle im Scheitelwert. Ein Wiederaufladen des Lichtbogens wird dadurch unterstützt. Die Löschfähigkeit von Erdschlüssen in Netzen mit isoliertem Sternpunkt ist daher auf wenige zehn Ampere begrenzt. Der Erdschlussstrom ist von den Außenleiter-Erde-Kapazitäten bestimmt und ist daher von der Netzgröße abhängig. Die Forderung des selbständigen Erlöschens von Erdschlüssen kann also nur bis zu bestimmten Netzgrößen eingehalten werden.

Erdschlusskompensation

Der Erdschlussreststrom I_{Res} in symmetrischen Netzen wird vor allem durch den Dämpfungsgrad, den Verstimmungsgrad (siehe Kap. 3.4.1) und dem Oberschwingungsstrom I_H bestimmt.

$$\underline{I}_{1Res} = 3 \cdot \omega \cdot C_E \cdot (d + jv) \cdot \underline{U}_{1N} + \text{Oberschwingungsstrom}$$

Bei Resonanzabstimmung $v = 0$ ist der Erdschlussreststrom nur durch den Dämpfungsgrad d und dem Oberschwingungsstrom bestimmt. Im praktischen Netz liegt immer eine Kapazitäts-
Unsymmetrie vor. Diese Unsymmetrie führt zu zusätzlichen Komponenten im Erdschlussreststrom.

Starke Unsymmetrien, z.B. durch Beeinflussung parallel laufender Leitungen, können nur schwer auskompensiert werden.

3.1.3. Erdschlusswischer

Erdschlusswischer sind vorübergehende einpolige Erdfehler, meistens Lichtbogenfehler in isolierten oder erdschlusskompensierten Netzen. Sie treten vorwiegend im Freileitungsnetz auf und werden z.B. durch Blitzschlag oder Baumwurf gezündet. Ist der Fehlerstrom ausreichend klein, so erlöschen diese Fehler selbsttätig. Nach dem Verlöschen ist die Spannungsfestigkeit des Isolationsmediums (Luft) wieder hergestellt und es sind keine weiteren Maßnahmen zur Störungsbehebung erforderlich. Diese Erdschlusswischer haben auf den laufenden Netzbetrieb keinen Einfluss.

Das selbsttätige Erlöschen von Erdschlusslichtbögen ist einer der wesentlichen Gründe für die Anwendung der Erdschlusskompensation.

3.1.4. Doppelerdschluss

Im fehlerfreien Betrieb sind alle Betriebsmittel zwischen Außenleiter und Erde in etwa mit der Sternspannung $\frac{U}{\sqrt{3}}$ beaufschlagt. Im Erdschlussfall bei isolierten oder erdschlusskompensierten Netzen erreicht die Spannung der fehlerfreien Außenleiter gegen Erde annähernd die $\sqrt{3}$ -fache Sternspannung. Beim Einschwingvorgang eines Erdschlusses im erdschlusskompensierten Netz treten Außenleiter-Erde-Spannungen bis zum 3-fachen der Sternspannung auf. Kann ein Betriebsmittel, das durch Alterung, Verschmutzung oder andere Ursachen vorgeschädigt ist, diesen Überspannungen nicht standhalten, so kommt es zu einem zweiten Erdschluss eines anderen Außenleiters an einem anderen Ort. Dieser Doppelfehler - der Doppelerdschluss - verursacht Kurzschlussströme und wird vom Kurzschlussschutz abgeschaltet. Auch Mehrfachfehler können vorkommen.

Die Wahrscheinlichkeit eines Doppelerdschlusses hängt vom Isolationszustand des Netzes ab. Befindet sich der zweite Erdschlussfußpunkt auf einem anderen Abgang, kann es zur Abschaltung beider Abgänge kommen.

3.1.5. Intermittierender Erdschluss

Ein intermittierender Erdschluss kann in isolierten oder erdschlusskompensierten Netzen auftreten. In Netzen mit isoliertem Sternpunkt ist der Erdschlussstrom ein vorwiegend kapazitiver Strom. Erlischt der Erdschlussstrom in seinem Nulldurchgang, so hat die Verlagerungsspannung ihr Spannungsmaximum erreicht. Wegen des isolierten Sternpunkts kann sich diese Spannung nicht abbauen und bleibt als Gleichspannung bestehen. Eine Halbperiode nach dem Löschen des Erdschlussstroms erreicht die Spannung des fehlerbehafteten Außenleiters gegen Erde den zweifachen Wert der Sternspannung. Ein erneutes Durchschlagen des sich gerade verfestigenden Isolationsmediums ist möglich. Wiederholt sich dieser Vorgang mehrmals, so spricht man von einem intermittierenden Erdschluss.

Ein intermittierender Erdschluss führt zu hohen Überspannungen, so dass Doppel- oder Mehrfacherdschlüsse auftreten können.

Im gelöschten Netz ist die das Auftreten von intermittierenden Erdschlüssen geringer, weil sich die Gleichspannung des Sternpunktes über die Erdschlusslöschspule abbauen kann.

3.2. Fehlerortung und Schutztechnik

3.2.1. Fehlerbereichseingrenzung

Isolierter Sternpunkt und Erdschlusskompensation

Die Fehlerbereichseingrenzung von Dauererdschlüssen in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation erfolgt in einem vierstufigen Ablauf:

- **Erkennen des Erdschlusses**
Das Auftreten eines Erdschlusses wird durch die Überwachung der Verlagerungsspannung oder durch rechnerische Analyse der Drehstromgrößen erkannt.
- **Feststellen des Abgangs**
Der erdschlussbehaftete Abgang wird mittels Erdschlusserfassungseinrichtungen oder durch Schalthandlungen bestimmt. Dafür sind bei manchen Erdschlusserfassungseinrichtungen kurzzeitige Versorgungsunterbrechungen erforderlich.
- **Feststellen des Fehlerbereiches**
Nach der Feststellung des erdschlussbehafteten Abgangs muss der Fehlerbereich durch Schalthandlungen oder Erdschlussanzeiger im Netz weiter eingegrenzt werden. Bei der Möglichkeit einer Ringschaltung kann der fehlerbehaftete Bereich ohne Versorgungsunterbrechung gefunden werden. Dabei wird durch Öffnen und Schließen des Ringes bei gezielter Verlegung der Trennstellen der fehlerbehaftete Abschnitt ermittelt.
- **Feststellen des Fehlerortes**
Ist der erdschlussbehaftete Fehlerbereich festgestellt, der durch weitere Schalthandlungen nicht mehr verkleinert werden kann, muss der Fehlerort durch weitere Maßnahmen (z.B. Begehen, Kabelfehlerortung....) gefunden werden.

Wirksame oder strombegrenzende Sternpunkterdung

Das Erkennen des Erdschlusses und das Feststellen des Abgangs erfolgt durch Schutzeinrichtungen, die eine automatische Abschaltung des Abgangs veranlassen. Das Feststellen des Fehlerbereiches und das Feststellen des Fehlerortes wird ähnlich durchgeführt, wie in Netzen mit isoliertem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation. Für die Vorortung können zusätzlich Kurzschlussanzeiger und Fehlerentfernungsmessung angewendet werden.

Vorübergehende strombegrenzende Sternpunkterdung

Während der kurzzeitig strombegrenzenden Sternpunkterdung erfolgen das Erkennen des Erdschlusses und das Feststellen des Abganges durch Schutzeinrichtungen.

Eine automatische Abschaltung des fehlerbehafteten Abgangs ist allerdings nicht unbedingt erforderlich, weil der für einen Dauerbetrieb unzulässig hohe Erdkurzschlussstrom nur während der vorübergehenden Sternpunkterdung fließt.

3.2.2. Erdfehlererfassungseinrichtungen

Da die Erfassung einpoliger Erdfehler auf der Auswertung von Summenstrom und/oder Verlagerungsspannung, also auf den von Netz zu Netz verschiedenen Nullimpedanzen beruht, sind die jeweils geeigneten Verfahren ebenfalls netzspezifisch. Entsprechend vielfältig sind die zugehörigen Geräte.

Bei jedem Erdfehler in einem Drehstromnetz entsteht eine Verlagerungsspannung die abhängig von der Sternpunktbehandlung ist, und ein Fehlerstrom der vom fehlerbehafteten Außenleiter gegen Erde fließt. Um den Stromkreis über die Netzelemente wieder zu schließen, gibt es je nach Art der Sternpunktbehandlung verschiedene Möglichkeiten:

Isolierter Sternpunkt

Hier verteilt sich der Fehlerstrom auf alle Abgänge und fließt in den beiden fehlerfreien Außenleitern über deren Kapazität gegen Erde zur Erdschlussstelle zurück. Der Fehlerstrom ist demzufolge ein kapazitiver Strom.

Erdschlusskompensation

Hier steht zum Schließen des Fehlerstromkreises zusätzlich zu den Außenleiter-Erde-Kapazitäten ein Parallelpfad über die Erdschlusslöschspulen, die den Sternpunkt des Netzes mit Erde verbinden, zur Verfügung. Sie sind entweder direkt an die Transformatorsternpunkte oder an Sternpunktbildner angeschlossen. Dadurch überlagert sich dem kapazitiven Fehlerstrom zusätzlich noch ein aus den Erdschlusslöschspulen stammender induktiver Fehlerstrom. An der Erdschlussstelle können sich daher beide Ströme bezüglich ihrer Blindstromanteile bei Netzfrequenz weitgehend aufheben, so dass der resultierende Fehlerstrom an der Erdschlussstelle sehr klein wird. Er besteht aus den nicht kompensierten Blindstromanteilen und den Wirk- und Oberschwingungsanteilen. Die Tatsache, dass an der Fehlerstelle selbst nur ein kleiner Strom fließt, bereitet bei vielen Methoden der Fehlerbereichserfassung große Schwierigkeiten.

Wirksame und strombegrenzende Sternpunkterdung

Hier schließt sich der Stromkreis über die Transformatorsternpunkte und die Erdungswiderstände. Der Erdfehlerstrom ist dabei abhängig von der Größe der Erdungswiderstände und dem Fehlerwiderstand und kann bis hin zum vollen Kurzschlussstrom liegen.

Vorübergehend strombegrenzende Sternpunkterdung

Die Verhältnisse vor und nach dem Einschalten der Sternpunkterdung entsprechen denen der Erdschlusskompensation, während des Einschaltens denen der strombegrenzenden Sternpunkterdung.

Die folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die wichtigsten und geläufigsten Erdfehlererfassungseinrichtungen.

Erdfehlererfassungseinrichtungen für einpolige Erdfehler

Schutz-/Erdfehlererfassungseinrichtungen	Erfassungskriterium	Sternpunktbehandlung					vorübergehend strombegrenzend geerdet
		abgangselektiv	isoliert	kompenstiert	wirksam niedriger geerdet	strombegrenzend geerdet	
Erdschlussmelderrelais	Verlagerungsspannung Umladevorgang	nein	ja	ja	nein	ja ¹	ja
Erdschluss-Wischerrelais		ja	ja	ja	nein	ja ¹	ja ²
Oberschwingungsrelais	Oberschwingung in Summenstrom und Verlagerungsspannung	ja	ja	ja	nein	ja ¹	ja ²
Oberschwingungsfeldmessung	Oberschwingung im Magnetfeld des Summenstromes und im elektrischen Feld der Verlagerungsspannung	ja	ja	ja	nein	ja ¹	ja ²
Phasenvergleich der Oberschwingungsströme	Vergleich der Phasenlage der Oberschwingung der Abgangs-Summenströme	ja	ja	ja	nein	ja ¹	ja ²
Wattmetrische Relais	Wirkkomponente des Reststromes	ja	ja	ja	nein	ja	ja
Kurzschlusschutzrelais	Erdkurzschlussstrom	ja	nein	nein	ja	ja ¹	ja ¹
Fehlerbereichserfassung	Fehlerreaktanz	ja	nein	nein	ja	ja ¹	ja ¹
Kurzschlussanzeiger	Erdkurzschlussstrom oder Magnetfeld des Erdkurzschlussstromes	ja	nein	nein	ja	ja ¹	ja ¹
Pulsortungsmethode	Änderung der -Summenströme	ja	nein	ja	nein	nein	ja ²
Verstellen der Erdschlusslöschspule	Änderung der Abgangs-Summenströme	ja	nein	ja	nein	nein	ja ²

Erdschlusserfassung durch Einspeisung von Stromgrößen in das Nullsystem	Abgangs-Summenströme und Spannungen	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja ²
Handabschaltung	Verlagerungsspannung	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja ³
Umschaltmethode	Verlagerungsspannung	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja ³

¹abhängig von der Größe der Sternpunktimpedanz

²gilt für den Zeitraum **ohne** strombegrenzende Erdung eines Sternpunktes oder gesunden Außenleiters

³wenn die vortübergehende Erdung nur zur Fehlerbereichseingrenzung eingesetzt wird und keine Schutzmaßnahme erfolgt

Erdschlussmelderelais

Durch die Unsymmetrie der Außenleiter-Erde-Spannungen weicht deren Summe (3-fache Nullspannung) von Null ab. Ein niedrig (z.B. 30% U_N) eingestelltes Überspannungsrelais erfasst diese Verlagerungsspannung und gibt eine Meldung ab.

Vorteil:

Wegen der Gleichartigkeit der Verlagerungsspannung im gesamten Netz, unabhängig von der Lage der Erdschlussstelle, kann man Erdschlüsse flächendeckend erfassen.

Nachteil:

Keine Abgangsselektivität, Einstellprobleme bei hochohmigen Fehlern.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Kapazitive Unsymmetrie des Netzes	- bei größerer Unsymmetrie, Abstimmung nahe dem Resonanzpunkt oder geringer Dämpfung hohe Verlagerungsspannung bereits im gesunden Netz
- Übergangswiderstand an der Fehlerstelle	- bei hochohmigen Fehlern nur kleine Verlagerungsspannung

Erdschluss-Wischerrelais

Beim Zünden eines Erdschlusses entlädt sich der fehlerbehaftete Außenleiter mit einem Stromstoß und nachfolgendem Einschwingvorgang („Zündschwingung“), während sich gleichzeitig die fehlerfreien Außenleiter aufladen. Die Amplitude der Zündschwingung hängt dabei vom Augenblick des Erdschlusseintrittes ab. Da bei diesen hochfrequenten Vorgängen die Erdschlusslöschspule durch ihre hohe Induktivität unwirksam ist, bestimmt man die Richtung des Ausgleichsstromes und damit den fehlerbehafteten Abgang aus der Phasenlage zwischen Summenstrom und Verlagerungsspannung in einer sogenannten „ $\text{Sin}\phi$ -Schaltung“.

Vorteil:

Große, allerdings variable Amplituden beim Zündvorgang.

Nachteil:

Die Messung ist nur einmalig beim Erdschlusseintritt möglich. Bei Doppelerdschlüssen ist nach Abschaltung eines Fußpunktes keine Ortung des verbleibenden Fußpunktes mehr möglich.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Ausgleichstrom beim Erdschluss Eintritt	- hängt vom Fehlereintritt ab
- L/C-Verteilung im Netz	- bestimmt die Frequenz des Ausgleichsstromes

Oberschwingungsrelais

Nach dem Abklingen des oben beschriebenen Einschwingvorganges verhält sich ein gelöschtes Netz bezüglich der Oberschwingungsanteile in Summenstrom und Verlagerungsspannung wie ein isoliertes Netz, da die Erdschlusslöschspule durch ihre hohe Induktivität unwirksam ist. Als Oberschwingungsquelle kann man auch anstelle einer natürlichen Oberschwingung eine bei Erdschluss einzuschaltende Tonfrequenz-Rundsteuer-Anlage (TRA)

verwenden. Die Auswertung von Summenstrom und Verlagerungsspannung erfolgt entweder mit amperemetrischen Relais oder vorzugsweise mit Richtungsrelais.

Für die amperemetrischen Relais gilt auch hier entsprechend der allgemeinen Erdschlussregel „Die Gesunden (Abgänge) müssen den Kranken (Abgang) speisen“: Der erdschlussbehaftete Abgang führt die Summe aller einspeisenden Ströme und hat daher den größten Summenstrom. Richtungsrelais, die auf eine entsprechende Frequenz abgestimmt sind, arbeiten hier ebenfalls in „Sinφ-Schaltung“.

Vorteil:

Unabhängigkeit von Zentraleinrichtungen bei Verwendung einer natürlichen Oberschwingung. Insbesondere in Kabelnetzen kräftige Ströme und gute Ergebnisse.

Nachteil:

Pegelschwankungen bedingen in einigen Netzen Einstellprobleme bei amperemetrischen Relais (weniger bei Erdschluss-Richtungsrelais). Bei ungünstiger Verteilung der Kapazitäten und Induktivitäten des Nullsystems, z.B. in ausgedehnten Freileitungsnetzen mit schwerpunktartig verteilten Kapazitäten (Kabelnetzteile), kann es zu falschen Richtungsentscheiden kommen.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Oberschwingungsgehalt	- bestimmt proportional den Signalpegel, schwankt u.a. mit der Netzlast (Oberschwingungslast)
- ungelöschter Erdschlussstrom	- bestimmt proportional den Signalpegel
- Anzahl Abgänge	- bestimmt die Empfindlichkeit der amperemetrischen Relais
- L/C-Verteilung im Netz	- bestimmt die Phasenlage für die Richtungsrelais

Oberschwingungsfeldmessung

Funktionsprinzip analog zu

Oberschwingungsrelais. Dabei sind die vom Gerät verarbeiteten Messgrößen nicht unmittelbar der Summenstrom und die Verlagerungsspannung im betrachteten Abgang, sondern die von diesen hervorgerufenen elektromagnetischen Felder, also das Magnetfeld des Summenstromes und das elektrische Feld der Verlagerungsspannung. Klare Feldverhältnisse entstehen nur bei Freileitungsstrecken, nicht aber in Schaltfeldern oder bei Kabelstrecken.

Vorteil:

Unabhängigkeit von Zentraleinrichtungen.

Nachteil:

Pegelschwankungen bedingen in einigen Netzen Einstellprobleme. Bei ungünstiger Verteilung der Kapazitäten und Induktivitäten des Nullsystems, z.B. in ausgedehnten Freileitungsnetzen mit schwerpunktartig verteilten Kapazitäten, kann es zu falschen Richtungsentscheiden kommen.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Oberschwingungsgehalt	- bestimmt proportional den Signalpegel, schwankt u.a. mit der Netzlast (Oberschwingungslast)
- ungelöschter Erdschlussstrom	- bestimmt proportional den Signalpegel
- L/C-Verteilung im Netz	- bestimmt die Phasenlage für die Richtungsanzeige

Phasenvergleich der Oberschwingungsströme

Funktionsprinzip ähnlich wie bei den

Oberschwingungsrelais, wobei die vom Gerät verarbeitete Messgröße die Phasenlage der Oberschwingungen des Abgangs-Summenstromes ist.

Die Phasenlage der Oberschwingung des fehlerbehafteten Abganges ist um 180 Grad zu den gesunden Abzweigen gedreht.

Vorteil:

Unabhängigkeit von Zentraleinrichtungen, einfache Installation und Prüfbarkeit.

Nachteil:

Bei ungünstiger Verteilung der Kapazitäten und Induktivitäten des Nullsystems, z.B. in ausgedehnten Freileitungsnetzen mit schwerpunktartig verteilten Kapazitäten, kann es zu falschen Richtungsentscheiden kommen.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Oberschwingungsgehalt, Richtung der Oberschwingung	- Ausgewertet wird der Phasenwinkel der Oberschwingung des Abgangs-Summenstromes
- ungelöschter Erdschlussstrom	- bestimmt proportional den Signalpegel

Wattmetrische Relais

Der 50-Hz-Reststrom an der Fehlerstelle enthält neben den kompensationsabhängigen Blindstromanteilen auch eine ohmsche Komponente, den sogenannten "Wattreststrom", dessen Amplitude und Richtung die wattmetrischen Relais erfassen. Seine Größe hängt von den Verlusten der Erdschlusslöschspule und von den Leitungsverlusten im Erdschlusspfad ab. Die Auswertung erfolgt in einer sogenannten "Cos φ -Schaltung". Um den geringen Wattreststrom, der oft in der Größenordnung der Wandlerfehler liegt, zu erhöhen, kann man nach Auftreten eines Erdschlusses an einer Hilfswicklung der Erdschlusslöschspule einen Widerstand zuschalten und dadurch die Messbedingungen der Relais verbessern.

Vorteil:

Konstanz der Wirkverluste im Erdschlusspfad.

Nachteil:

Fehlanzeigen bei vermaschten Netzen auf Grund der Stromaufteilung oder bei Parallelleitungen auf Grund der Phasenspaltung. Große Anforderungen an die Winkelgenauigkeit der Wandler wegen des kleinen Nutzsignales. Es sind Kabelumbauwandler zu bevorzugen, weil sich bei der Holmgreenschaltung von einpoligen Wandlern die Wandlerfehler möglicherweise addieren.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Verluste der Erdschlusslöschspule	- bestimmt proportional den Signalpegel
- Strombelastbarkeit der Belastungswicklung der Erdschlusslöschspule	- begrenzt das verfügbare Nutzsignal

Kurzschlusschutzrelais

Im wirksam niederohmig geerdeten Netzen liegt die Größe des Fehlerstromes im Falle eines Erdfehlers in der Regel über dem Betriebsstrom des Leitungsabganges. Man kann daher mit den aus der Selektivschutztechnik bekannten Verfahren wie Zeitstaffelschutz, Freigabe- und Blockiersystemen, Auswertung von Stromdifferenzen usw. einen dem Kurzschlusschutz gleichwertigen Schutzzumfang erzielen. Bei strombegrenzend niederohmig geerdeten Netzen liegt die Größe des Fehlerstromes im Falle eines Erdfehlers in der Regel unterhalb des Betriebsstromes des Leitungsabganges. Um hier eine Schutzanregung sicher zu stellen müssen Schutzrelais mit geeigneten Anregeverfahren (z.B. Nullstromanregung, Impedanzanregung ...) eingesetzt werden.

Vorteil:

Fehlererfassung mit bestehenden Kurzschlussfassungseinrichtungen (z.B. UMZ-Relais, Distanzschutz, Differentialrelais usw.).

Nachteil:

Unterbrechung der Energieversorgung durch Abschaltung.

Bei Netzen mit vorübergehend strombegrenzender Sternpunkterdung kann auf eine Abschaltung verzichtet werden. Mit der Schutzanregung wird in diesem Fall nur die Fehlerbereichseingrenzung durchgeführt.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Größe des Sternpunktimpedanz	- bestimmt Größe des Fehlerstromes
- kleiner Fehlerstrom	- Anregeprobleme
- großer Fehlerstrom	- Beeinflussung, Spannungseinbruch
- Erdübergangswiderstand	- Beeinflusst die Größe des Fehlerstromes

Fehlerbereichseingrenzung

Digitale Schutzeinrichtungen bieten die Möglichkeit der Ausgabe der gemessenen Fehlerreaktanz. Auch bei einpoligen Erdfehlern die durch Schutzeinrichtungen erfasst werden, kann die Fehlerreaktanz ausgegeben werden und für die Fehlerbereichseingrenzung herangezogen werden.

Vorteil:

Wesentliche Beschleunigung der Fehlersuche.

Nachteil:

Die Genauigkeit der gemessenen Fehlerreaktanz wird beeinflusst durch ev. nicht bekannte Erd Faktoren, und dezentrale Erzeugungsanlagen.

Kurzschlussanzeiger

Durch Auswertung des Kurzschlussstromes wird festgestellt, ob der Fehlerort vor oder nach dem Kurzschlussanzeiger liegt.

Vorteil:

Wesentliche Beschleunigung der Fehlersuche.

Nachteil:

Ablesen des Kurzschlussanzeigers vor Ort, wenn keine Fernübertragung ausgeführt ist. Anregeprobleme, wenn die Fehlerströme kleiner als der Betriebsstrom sind. Eindeutig nur bei Strahlennetzen. Außerdem sind dezentrale Einspeiser zu beachten.

Pulsortungsmethode

Im Erdschlussfall verändert man den Verstimmungsgrad und damit den Blind- bzw. Summenstrom an der Erdschlussstelle durch periodisches Zuschalten einer Kapazität, die in der Regel an der Belastungswicklung der Erdschlusslöschspule angeschlossen ist. Der fehlerbehaftete Abgang ist dabei vom Verstimmungsgrad am stärksten betroffen, weil hier der Summenstrom im Vergleich zu den gesunden Abgängen am stärksten schwankt. Wenn man zusätzlich die Änderung des Summenstromes auf die Änderung der Verlagerungsspannung bezieht, steigert man die Sicherheit gegen Überfunktion.

Vorteil:

Durch den Einbau dezentraler Pulsortungsrelais kann auch eine „Tiefenortung“ realisiert werden.

Nachteil:

Notwendigkeit einer zentralen Hilfseinrichtung. Keine bzw. falsche Anzeigen bei hochohmigen Erdfehlern.

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Verstimmungsgrad des Netzes	- Verfahren arbeitet mit Änderung der Verstimmung
- Oberschwingungsgehalt	- Ist eine Störgröße
- Erdübergangswiderstand	- beeinflusst die korrekte Anzeige

Verstellen der Erdschlusslöschspule

Während des Erdschlusses wird die Erdschlusslöschspule verstellt und somit der Verstimmungsgrad verändert. Durch Auswerten der Änderung der Blind- bzw. Summenströme und der Verlagerungsspannung der einzelnen Abgänge wird der fehlerbehaftete Abgang ermittelt.

Vorteil:

Keine zusätzliche Hilfseinrichtung zur Verstimmung notwendig. Je nach Auswertalgorithmus können auch hochohmige Erdfehler korrekt erfasst werden.

Nachteil:

Die Meldung des fehlerbehafteten Abganges dauert unter Umständen sehr lange (im Minutenbereich).

Wichtige Parameter:	Bemerkungen:
- Verstimmungsgrad des Netzes	- Verfahren arbeitet mit Änderung der Abstimmung
- Oberschwingungsgehalt	- ist eine Störgröße

Erdschlusserfassung durch Einspeisung von Strömen in das Nullsystem

Durch Einspeisen von Strömen in das Nullsystem (vorzugsweise über die Belastungswicklung der E-Spule), kann durch Auswertung der Summenströme und Spannungen des Drehstromsystems bzw. deren Komponenten ein Erdschluss erkannt und der fehlerbehaftete Abzweig ermittelt werden. Bei der Möglichkeit einer Ringschaltung mit einem anderen Abzweig, der vom gleichen Einspeise-Transformator versorgt wird, kann auch der fehlerbehaftete Abschnitt geortet werden.

Die Einspeisung in das Nullsystem kann auch mit nicht netzfrequenten Strömen erfolgen. Dabei erfolgt die Berechnung selektiv auf die eingespeiste Frequenz und damit wirken sich netzfrequente Störgrößen nicht aus.

Vorteil:

Erfassung auch sehr hochohmiger Erdfehler möglich.

Nachteil:

Notwendigkeit einer zentralen Einrichtung.

Handabschaltung

Die fraglichen Abgänge werden händisch aus- und wieder eingeschaltet, während die Verlagerungsspannung des Restnetzes beobachtet wird. Der Abgang, bei dessen Abschaltung die Verlagerungsspannung zurückfällt, ist der fehlerbehaftete Abgang.

Vorteil:

Keine Investitionskosten

Nachteil:

Versorgungsunterbrechung durch Schalthandlungen während Erdschluss

Umschaltmethode

In Anlagen mit Doppelsammelschiene und zwei Einspeise-Transformatoren kann durch einzelnes Umschalten der Abgänge auf eine galvanisch vom Restnetz getrennte Sammelschiene der fehlerbehaftete Abgang ermittelt werden.

Vorteil:

Keine Versorgungsunterbrechung.

Nachteil:

Schalthandlungen während Erdschluss. Zeitweise isolierter Betrieb bei Vorhandensein nur einer Erdschlusslöschspule und damit auch die Gefahr von Kippschwingungen.

Fehlabbstimmung im Restnetz während der Schaltvorgänge.

Bei 2-SS Betrieb wird der Erdschluss auch auf das fehlerfreie Netz geschaltet.

3.3. Beschaltung der Transformatorsternpunkte

Bei Transformatoren mit Schaltgruppe Yy ist grundsätzlich eine Beschaltung beider Sternpunkte gegen Erde möglich. In diesem Fall sind die ober- und unterspannungsseitigen Netze über das Nullsystem gekoppelt und eine unzulässige Übertragung von Nullspannungen kann auftreten. Abhängig von den Transformatorimpedanzen, der Art der Sternpunktbehandlung auf beiden Seiten und den angeschlossenen Netzen kann diese Spannungsübertragung ein Mehrfaches der Nennspannung betragen. Vor einer Beschaltung beider Sternpunkte muss daher die Zulässigkeit überprüft werden.

Die folgende Zusammenstellung gibt einen groben Überblick über die verschiedenen Beschaltungsvarianten der Sternpunkte von Transformatoren mit Schaltgruppe Yy. Soll eine „nicht empfehlenswerte“ bzw. „nicht zulässige“ Beschaltungsvariante ausgeführt werden, ist eine ausführliche Überprüfung der Nullspannungsübertragung zweckmäßig bzw. erforderlich.

Trafosternpunkt Oberspannungsseite	Aus- gleichs- wicklung	Trafosternpunkt Unterspannungsseite	
nicht beschaltet	nein	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht zulässig
		wirksam niederohmig geerdet	nicht zulässig
		strombegrenzend geerdet	nicht zulässig
	ja	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	zulässig
		wirksam niederohmig geerdet	zulässig
		strombegrenzend geerdet	zulässig
Erdschlusslöschspule	nein	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht zulässig
		wirksam niederohmig geerdet	nicht zulässig
		strombegrenzend geerdet	nicht zulässig
	ja	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht empfehlenswert
		wirksam niederohmig geerdet	nicht empfehlenswert
		strombegrenzend geerdet	nicht empfehlenswert
wirksam niederohmig geerdet	nein	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht zulässig
		wirksam niederohmig geerdet	nicht zulässig
		strombegrenzend geerdet	nicht zulässig
	ja	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht zulässig
		wirksam niederohmig geerdet	nicht empfehlenswert
		strombegrenzend geerdet	nicht empfehlenswert

Trafosternpunkt Oberspannungsseite	Aus- gleichs- wicklung	Trafosternpunkt Unterspannungsseite	
strombegrenzend geerdet	nein	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht zulässig
		wirksam niederohmig geerdet	nicht zulässig
		strombegrenzend geerdet	nicht zulässig
	ja	nicht beschaltet	zulässig
		Erdschlusslöschspule	nicht empfehlenswert
		wirksam niederohmig geerdet	nicht empfehlenswert
		strombegrenzend geerdet	nicht empfehlenswert

Eine im Dreieck geschaltete Ausgleichswicklung ist bei Transformatoren mit Schaltgruppe Yy empfehlenswert, wenn einer der beiden Sternpunkte beschaltet wird. Bei Auslegung der Ausgleichswicklung auf ein Drittel der Nennleistung des Transformators kann der Sternpunkt dauernd den Nennstrom einer Wicklung führen. Der Transformator ist somit voll sternpunktbelastbar, wenn nur einer der beiden Sternpunkte belastet wird.

Stehen in einer Anlage zwei Einspeise-Transformatoren zur Verfügung, so kann die Sternpunktbehandlung der Oberspannungsseite auf dem einen und die der Unterspannungsseite auf dem anderen Transformator ausgeführt werden.

Ist eine Erdschlusslöschspule an einen Einspeise-Transformator anzuschließen, der oberspannungsseitig bereits beschaltet ist oder ist keine Ausgleichswicklung vorhanden, so kann der Anschluss der Erdschlusslöschspule über einen Sternpunktbildner erfolgen. Dabei erfolgt keine Nullspannungsübertragung vom oberspannungsseitigen Netz.

Weitere Vorteile eines Sternpunktbildners können sein:

- freie Wahl des Aufstellungsortes und der Größe der Erdschlusslöschspule im Netz
- Abschaltung von Einspeise-Transformatoren ohne Wegfall oder Umschaltung der Erdschlusslöschspule
- dimensionierbare Dämpfung

Der Sternpunktbildner wird häufig gleichzeitig als Eigenbedarfstransformator ausgeführt. Der Kurzschluss- und Überlastschutz bedarf in diesem Fall besonderer Überlegungen, da abhängig vom Verhältnis der Leistung des Sternpunktbildners zur Leistung der EB-Wicklung ein Kurzschluss außerhalb der EB-Wicklung vom oberspannungsseitigen Überstromschutz nicht erfasst werden kann.

Sind die Einspeise-Transformatoren mit Schaltgruppe Yd ausgeführt, müssen auf der Unterspannungsseite zwangsweise Sternpunktbildner eingesetzt werden.

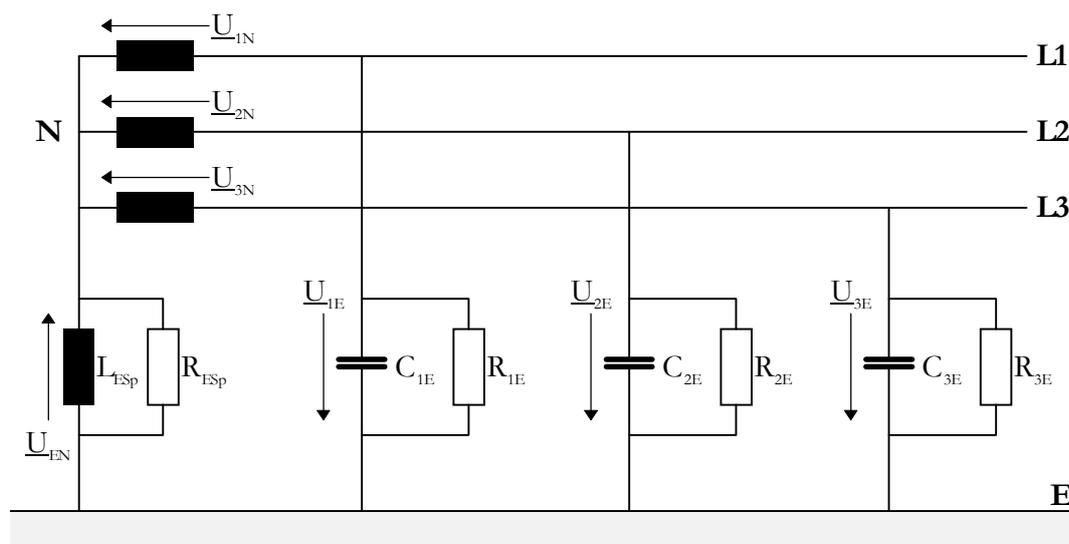
3.4. Erdschlusskompensation

Im Folgenden sind die grundlegenden Zusammenhänge der Erdschlusskompensation dargestellt.

3.4.1. Verlagerungsspannung

Eine wesentliche Größe in Netzen mit Erdschlusskompensation ist die Verlagerungsspannung. Darunter wird die Spannung zwischen dem Sternpunkt des Transformators und der Erdungsanlage verstanden. Diese Spannung ist entweder direkt an der Erdschlusslöschspule oder über die offene Dreieckswicklung der Außenleiter-Erde-Spannungswandler messbar. Im Allgemeinen kann eine Verlagerungsspannung an jedem Punkt des Netzes gemessen werden, diese kann aber durch Last- und Netzeinflüsse geringfügig von der Verlagerungsspannung an der Erdschlusslöschspule abweichen. Im Folgenden ist mit Verlagerungsspannung die Spannung an der Erdschlusslöschspule gemeint.

Das nachstehende Bild zeigt das Ersatzschaltbild eines erdschlusskompensierten Drehstromnetzes. Die Längsimpedanzen des Netzes und des Transformators sowie die Betriebskapazitäten zwischen den Außenleitern sind dabei vernachlässigt.



- U_{1N}, U_{2N}, U_{3N} Außenleiter-Sternpunkt-Spannungen
- U_{1E}, U_{2E}, U_{3E}Außenleiter-Erde-Spannungen
- U_{EN} Verlagerungsspannung
- R_{1E}, R_{2E}, R_{3E} Ableitwiderstände
- C_{1E}, C_{2E}, C_{3E}Außenleiter-Erde-Kapazitäten
- R_{ESp} Verlustwiderstand der Erdschlusslöschspule
- L_{ESp} Induktivität der Erdschlusslöschspule

Aus diesem Ersatzschaltbild kann die Verlagerungsspannung \underline{U}_{EN} berechnet werden. Für eine übersichtliche Darstellung wurden die Netzkenngößen *Widerstands-Unsymmetriegrad* \underline{r} , *Kapazitäts-Unsymmetriegrad* \underline{k} , *Dämpfungsgrad* d und *Verstimmungsgrad* v eingeführt. Diese Netzkenngößen sind dimensionslose Größen und werden in % von $\omega \cdot (C_{1E} + C_{2E} + C_{3E})$ angegeben.

In den Gleichungen der Netzkenngößen werden folgende Abkürzungen verwendet:

$$\underline{a} = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \qquad \underline{a}^2 = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \qquad 1 + \underline{a}^2 + \underline{a} = 0$$

Widerstandsunsymmetrie $\underline{r} = \frac{\frac{1}{R_{1E}} + \frac{\underline{a}^2}{R_{2E}} + \frac{\underline{a}}{R_{3E}}}{\omega \cdot (C_{1E} + C_{2E} + C_{3E})}$

Der Widerstands-Unsymmetriegrad \underline{r} ist nur dann ungleich 0, wenn die Ableitwiderstände der Außenleiter gegen Erde unterschiedlich groß sind. Da diese jedoch üblicherweise gleich groß sind, kann diese Netzkenngöße bei den meisten Überlegungen des erdschlussfreien Netzes vernachlässigt werden. Bei hochohmigen Erdschlüssen ist diese Vernachlässigung aber nicht zulässig.

Kapazitätsunsymmetrie $\underline{k} = \frac{C_{1E} + \underline{a}^2 \cdot C_{2E} + \underline{a} \cdot C_{3E}}{C_{1E} + C_{2E} + C_{3E}}$

Bei Freileitungen sind die Außenleiter-Erde-Kapazitäten wegen der unterschiedlichen Abstände der Leiterseile zur Erde, zu Erdseilen oder Metallmasten unsymmetrisch. Eine Symmetrierung durch Verdrillung wird heute auf den Spannungsebenen bis 110 kV kaum mehr ausgeführt. Durch eine gezielte Belegung der Leiterseile mit den Außenleitern des Drehstromsystems lässt sich jedoch meistens eine gute Symmetrierung im Gesamtnetz erreichen.

Kabel haben symmetrische Außenleiter-Erde-Kapazitäten und wirken daher symmetrierend auf das Gesamtnetz. Da die Kapazitäten von Kabeln ein Vielfaches der von Freileitungen betragen, sind Kabel besonders wirksam.

Unsymmetrien werden aber auch durch kapazitive Einkopplungen von parallelgeführten Freileitungen verursacht. Stark ausgeprägt sind diese „äußeren“ Unsymmetrien bei Mehrfachleitungen mit Systemen unterschiedlicher Spannungsebenen auf einem Gestänge. In Problemfällen müssen zur Beseitigung dieser Unsymmetrien im beeinflussten Netz aufwendige Verdrillungen oder Netztrennungen vorgenommen werden.

Dämpfungsgrad

$$d = \frac{\frac{1}{R_{1E}} + \frac{1}{R_{2E}} + \frac{1}{R_{3E}} + \frac{1}{R_{ESp}}}{\omega \cdot (C_{1E} + C_{2E} + C_{3E})}$$

Der Dämpfungsgrad d ist ein Maß für die Dämpfung des Schwingkreises. Die Widerstände R_{1E} , R_{2E} und R_{3E} sind stark fremschicht- und witterungsabhängig. Die gesamte Dämpfung wird ungefähr zu einem Drittel durch die Ableitwiderstände und zu zwei Drittel durch die Erdschlusslöschspule verursacht.

Verstimmungsgrad

$$v = \frac{\omega \cdot (C_{1E} + C_{2E} + C_{3E}) - \frac{1}{\omega \cdot L_{ESp}}}{\omega \cdot (C_{1E} + C_{2E} + C_{3E})}$$

Vereinfacht kann der Verstimmungsgrad auch nach folgender Formel berechnet werden:

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C}$$

Das Verhältnis der Induktivität der Erdschlusslöschspule zu den Außenleiter-Erde-Kapazitäten des Netzes wird durch den Verstimmungsgrad v ausgedrückt. Im Resonanzpunkt ist $v=0$, bei abgeschalteter Erdschlusslöschspule ist $v=1$.

Mit diesen Netzkenngößen kann die Gleichung der Verlagerungsspannung übersichtlich angeschrieben werden:

$$\underline{U}_{EN} = \frac{r + jk}{d + jv} \cdot \underline{U}_{IN}$$

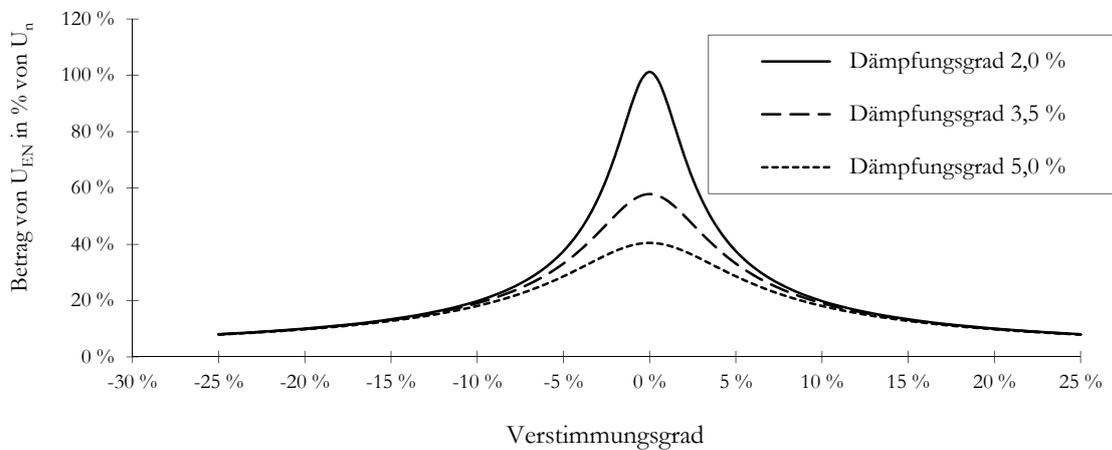
Die Verlagerungsspannung ist demnach eine komplexe Größe mit einem Betrag **und** einem Winkel.

Wird die Unsymmetrie der Ableitwiderstände im ungestörten Netzbetrieb vernachlässigt ($\underline{r}=0$), zeigt die Verlagerungsspannung folgende Eigenschaften:

- Bei völliger Symmetrie der Außenleiter-Erde-Kapazitäten ($\underline{k}=0$) kann **keine Verlagerungsspannung** auftreten. In symmetrischen Kabelnetzen ist die Verlagerungsspannung daher sehr klein.
- Bei Resonanzabstimmung ($v=0$) und sehr guter Isolation des Netzes gegen Erde ($d \rightarrow 0$) nimmt die Verlagerungsspannung unabhängig von der Nennspannung des Netzes **sehr hohe Werte** an (theoretisch unendlich groß).

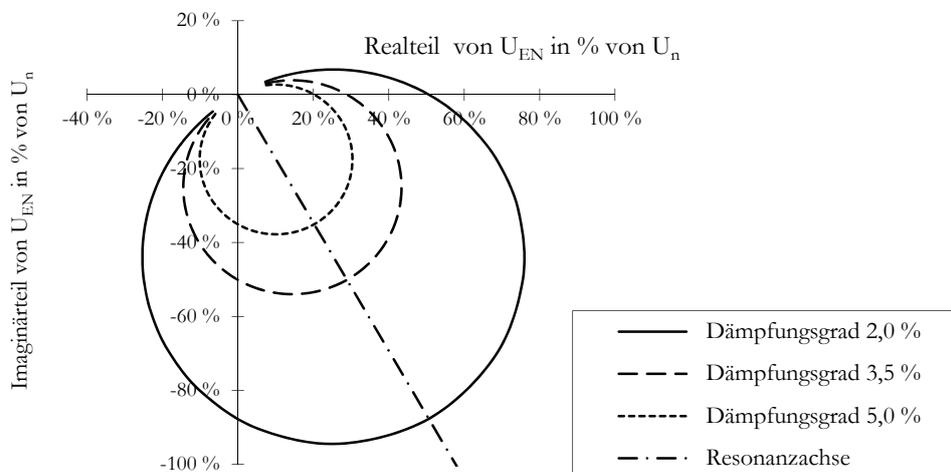
- Eine zu große Verlagerungsspannung kann durch Vergrößerung des Dämpfungsgrades d oder durch eine gezielte Verkleinerung der Kapazitätsunsymmetrie \underline{k} verringert werden.
- Eine zu kleine Verlagerungsspannung kann durch eine gezielte Vergrößerung der Kapazitätsunsymmetrie \underline{k} vergrößert werden.

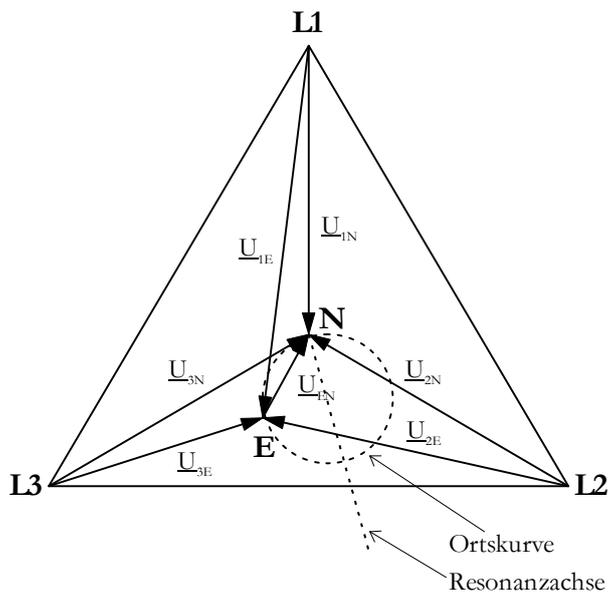
Das nachstehende Bild zeigt den Betrag der Verlagerungsspannung für eine Kapazitätsunsymmetrie von 2% für verschiedene Dämpfungsgrade in Abhängigkeit vom Verstimmungsgrad.



Bei Veränderung des Verstimmungsgrades beschreibt die Ortskurve der Verlagerungsspannung einen Kreis, der durch den Nullpunkt des Spannungsterns des Drehstromsystems geht. Die Lage des Kreises, die Größe des Kreises und die Resonanzachse werden durch die Unsymmetrie der Kapazitäten und durch den Dämpfungsgrad vorgegeben.

Den Verlauf von Betrag und Winkel der Verlagerungsspannung zeigt das folgende Bild:





Eine hohe Verlagerungsspannung bedingt zumindest in einem Außenleiter eine hohe Spannung gegen Erde. Alle Betriebsmittel, die zwischen Außenleiter und Erde geschaltet sind, wie Isolatoren, Überspannungsableiter und einpolige Spannungswandler werden bereits im Normalbetrieb mit dieser Spannung beaufschlagt.

Die Tatsache, dass die Verlagerungsspannung neben dem Betrag auch einen Winkel besitzt, führt beim Zusammen-schalten zweier Netze manchmal zu dem unerwarteten Ergebnis, dass die Verlagerungsspannung sehr klein wird oder überhaupt verschwindet, obwohl jedes Netz für sich eine ausgeprägte Verlagerungsspannung aufweist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Resonanzachsen der beiden Netze in entgegengesetzter Richtung liegen. Beim Zusammenschalten der Netze wird die resultierende Verlagerungsspannung durch die geometrische Addition der beiden Verlagerungsspannungen gebildet, der Betrag der Verlagerungsspannung wird daher sehr klein.

3.4.2. Bestimmung der Netzparameter

Um den Erdschlussreststrom berechnen oder abschätzen zu können, ist es erforderlich, die Netzparameter zu bestimmen.

Ausgangsformeln:

$$U_{EN} = \frac{k}{\sqrt{v^2 + d^2}} \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}}$$

$$k = \frac{\Delta C_E}{|C_{EL1} + C_{EL2} + C_{EL3}|}$$

$$d = \frac{I_W}{I_C}$$

- U_{EN}... Sternpunktverlagerungsspannung
- k..... Unsymmetriefaktor
- v..... Verstimmung
- d..... Dämpfung
- U_B... Betriebsspannung (verkettet)
- ΔC_E... Kapazität (Maß für die Unsymmetrie)
- C_{ELx}... Erdkapazität der Phase x
- I_W..... Wirkkomponente des Erdschlussreststromes
- I_C..... kapazitiver Erdschlussstrom

Ermittlung der Verstimmung v:

I_L und I_C müssen durch Messungen oder Berechnungen bekannt sein, um die anderen Faktoren (k, d) zu bestimmen.

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = 1 - \frac{I_L}{I_C}$$

- I_L... Löschspulenstrom

Bestimmung der Dämpfung d (3 verschiedene Verfahren):

Um den Wattreststrom zu bestimmen, muss man die Dämpfung d des Netzes kennen. Im Folgenden werden drei verschiedene Verfahren, zur Berechnung der Dämpfung aus einem Durchstimmversuch, dargestellt.

1. Wendepunktverfahren

Schritt 1: Messen von U_{EN} bei Variation von v

→ Kurve $U_{NE}(v)$

Schritt 2: Ermittlung der maximalen Steigung der Kurve $U_{EN}(v)$

→ $d = v \cdot \sqrt{2}$ bei maximaler Steigung der Kurve

2. Maximalwertverfahren

Schritt 1: Messen von U_{ENmax} bei $v_1=0$

U_{ENmax} ... Sternpunktverlagerungsspannung bei $v=0$

Schritt 2: Verstimmen bis zu $U_{EN} = \frac{U_{ENmax}}{\sqrt{2}} \rightarrow v_2$

→ in diesem Punkt gilt: $d = v_2$

3. Zweipunktverfahren

Schritt 1: Messen von U_{EN} bei verschiedenen Verstimmungen (v_1, v_2)

1. Punkt: U_{EN1} bei v_1

2. Punkt: U_{EN2} bei v_2

Schritt 2: Berechnung von d

$$d = \sqrt{\frac{U_{EN2}^2 \cdot v_2^2 - U_{EN1}^2 \cdot v_1^2}{U_{EN1}^2 - U_{EN2}^2}}$$

Das Zweipunktverfahren zur Ermittlung der Dämpfung d ist das genaueste, da man mehrere Punkte auswerten und dann den Mittelwert bilden kann.

Bestimmung von k :

Da man jetzt die Dämpfung und die Verlagerungsspannung bei einer gegebenen Verstimmung kennt, kann man die kapazitive Unsymmetrie des Netzes berechnen.

$$k = \frac{U_{EN1} \cdot \sqrt{v_1^2 + d^2} \cdot \sqrt{3}}{U_B}$$

3.4.3. Wahl des Verstimmungsgrades

Bei der Wahl des Verstimmungsgrades der Erdschlusslöschspule ist einerseits darauf zu achten, dass im erdschlussfreien Netz die Verlagerungsspannung nicht zu groß wird und andererseits im Erdschlussfall der Erdschlussreststrom nicht zu groß ist.

Die Grenze für die Höhe der Verlagerungsspannung ist durch die maximal zulässige Spannungsbeanspruchung der Betriebsmittel zwischen Außenleiter und Erde bestimmt. Es ist dabei auf eine ausreichende Reserve zu achten, weil der Dämpfungsgrad als bestimmendes Maß für die Höhe der Verlagerungsspannung stark witterungsabhängig ist. Durch Zu- oder Abschalten von Leitungen kann auch die Kapazitätsunsymmetrie nachteilig verändert werden. Üblicherweise wird die Kompensation so eingestellt, dass im erdschlussfreien Betrieb die Verlagerungsspannung max. 10% der Außenleiter Sternpunktspannung beträgt. Bei Mittelspannungsnetzen mit entsprechend hohem Verkabelungsgrad ist die Verlagerungsspannung im erdschlussfreien Betrieb im Allgemeinen sehr klein. Bei Einsatz von automatischen Kompensationsreglern kann eine zu kleine Verlagerungsspannung im erdschlussfreien Betrieb zu Problemen bei der automatischen Abstimmung führen.

Als Abhilfemaßnahme kann entweder die Unsymmetrie des Netzes durch Einbau von Kapazitäten erhöht, oder ein geeignetes Abstimmungsverfahren (z.B. Stromeinspeisung in Leistungshilfswicklung der Erdschlusslöschspule) gewählt werden.

Eine physikalische Grenze für die Höhe des Erdschlussreststroms ist die Löschgrenze, bei der ein gezündeter Lichtbogen gerade noch selbständig erlischt. Wo diese Grenze für eine bestimmte Spannungsebene liegt, ist nur schwer anzugeben. Die Löschfähigkeit wird neben der Größe des Erdschlussreststromes auch von der Steilheit der wiederkehrenden Spannung bestimmt. Der Einfluss von Oberschwingungsströmen auf das Löschverhalten kann nicht eindeutig beantwortet werden.

Die Frage Über- oder Unterkompensation kann nicht allgemein beantwortet werden. In der Praxis werden die Netze überkompensiert betrieben, um bei Leitungsabschaltungen nicht auf Resonanzabstimmung zu kommen. Insgesamt kann aber die Entscheidung für einen bestimmten Verstimmungsgrad nur unter Einbeziehung aller netztechnischen Gegebenheiten wie Netzgröße, Charakteristik der Erdschlusslöschspulen, Netzkonfiguration, usw. getroffen werden.

3.5. Spannungsbeanspruchung

3.5.1. Einpolige Außenleiter-Erde-Fehler

Zeitweilige Spannungserhöhungen sind Überspannungen, die wenige Sekunden bis zu einigen Stunden auftreten können. Sie entstehen durch Außenleiter-Erde-Fehler oder aufgrund von Resonanzen durch Wechselwirkung von Induktivitäten und Kapazitäten im Netz.

Bei einpoligen Außenleiter-Erde-Fehlern kommt es in den fehlerfreien Außenleitern zu einer Spannungsanhebung. Die Höhe der Spannungsanhebung wird durch den Erdfehlerfaktor δ ausgedrückt (Definition siehe Anhang Normenteil Punkt 1.2).

Isolierter Sternpunkt oder Erdschlusskompensation

Der Erdfehlerfaktor beträgt 1,73. Die Spannung der fehlerfreien Außenleiter gegen Erde ist gleich der verketteten Spannung.

Alle Betriebsmittel, die zwischen Außenleiter und Erde angeschlossen sind (Ableiter, Isolatoren, Spannungswandler), sind während der Dauer eines Erdschlusses mit der verketteten Spannung beaufschlagt und damit höher beansprucht. Manche Betriebsmittel dürfen mit der verketteten Spannung nur eine begrenzte Zeit belastet werden (z.B. Spannungswandler 8 Stunden).

Wirksam niederohmige Sternpunkterdung

Der Erdfehlerfaktor ist kleiner als 1,4. Durch die automatische Abschaltung von einpoligen Fehlern ist die Spannungserhöhung außerdem nur wenige Sekunden wirksam.

Strombegrenzend niederohmige Sternpunkterdung

Der Erdfehlerfaktor ist wie bei Netzen mit isoliertem Sternpunkt bzw. Erdschlusskompensation. Bei Abschaltung von einpoligen Fehlern ist die Spannungserhöhung nur für kurze Zeit wirksam.

3.5.2. Leiterunterbrechung

Leiterunterbrechungen im Mittelspannungsnetz, wie

- Seilriss
- einpoliges Auslösen von Sicherungen
- Störung von Schaltgeräten

wirken sich über die Netztransformatoren auf die Niederspannungsebene aus. Die Unsymmetrie des Mittelspannungsnetzes kann im Niederspannungsnetz Über- oder Unterspannungen verursachen, die zur Zerstörung von Verbrauchergeräten führen können.

Sind größere Netzteile von der Leiterunterbrechung betroffen, so macht sich diese durch ein Ansteigen der Verlagerungsspannung im Mittelspannungsnetz bemerkbar. Leiterunterbrechungen in kleineren Netzteilen oder bei einzelnen Netztransformatoren können nur auf der Niederspannungsseite erkannt werden.

Bei Leiterunterbrechung in isolierten oder kompensierten Netzen können große Unsymmetrien der Leiter Erde Kapazitäten und damit hohe Verlagerungsspannungen auftreten. Unter Umständen kann damit ein Dauererdschluss vorgetäuscht werden. Der Erdfehlerfaktor kann sogar größer als 1,73 werden.

3.5.3. Abstimmung der Erdschlusslöschspule

In gelöschten Netzen bildet die Induktivität der Erdschlusslöschspule mit den Außenleiter-Erde-Kapazitäten des Netzes einen Schwingkreis. Bei Resonanzabstimmung wird zwar der Strom an der Erdschlussstelle minimiert, die Resonanzspannung an der Erdschlusslöschspule (Verlagerungsspannung) kann aber sehr hohe Werte annehmen. Bei einer hohen Verlagerungsspannung können die Außenleiter-Erde-Spannungen unzulässig hohe Werte annehmen.

Die Höhe der Resonanzspannung ist theoretisch nicht direkt von der Nennspannung des Netzes abhängig. Sie wird aber durch den Wirkwiderstand der Erdschlusslöschspule und durch die Ableitwiderstände des Netzes begrenzt. Diese dämpfenden Widerstände sind üblicherweise ausreichend groß um die Verlagerungsspannung auf ungefährliche Werte zu drücken. Andernfalls können Dämpfungswiderstände in Serie oder parallel zur Erdschlusslöschspule die Verlagerungsspannung beschränken. In Mittelspannungsnetzen ist im Vergleich zu Hochspannungsnetzen mit geringeren Verlagerungsspannungen im Resonanzpunkt zu rechnen, da diese Netze in Regel eine höhere Dämpfung bzw. eine höhere Symmetrie aufweisen.

3.5.4. Kippschwingungen, Ferroresonanzen

Durch das Zusammenwirken der nichtlinearen Induktivitäten von Spannungswandlern mit den Netzkapazitäten können Kippschwingungen entstehen. Die Frequenz dieser Schwingungen ist meistens kleiner als die Netzfrequenz, häufig treten 25 Hz auf. Infolge von Kippschwingungen kann es durch Sättigung bereits nach wenigen Minuten zur thermischen Zerstörung der Spannungswandler kommen.

Isolierter Sternpunkt

Kippschwingungen treten praktisch nur in isolierten Netzen auf. Besonders gefährdet sind kleine Netze oder leerlaufende Sammelschienen. Kippschwingungen werden durch Fehler, Schalthandlungen oder auch Laständerungen angeregt.

Die Energie zur Aufrechterhaltung der Schwingung kann auch über die Steuerkondensatoren von offenen Leistungsschaltern oder durch kapazitive Einkopplung von parallelen Leitungssystemen übertragen werden.

Abhilfemaßnahmen zur Vermeidung von Kippschwingungen müssen je nach Art der Schwingung und des Netzes gewählt werden. Vielfach verhindert eine ausreichende Bedämpfung der Spannungswandler (Dreieckswicklung) eine stationäre Kippschwingung. Auch die Beschaltung des Sternpunkts mit einem belasteten Spannungswandler gegen Erde kann zum Ziel führen.

Alle anderen Arten der Sternpunktbehandlung

Kippschwingungen sind theoretisch ebenfalls möglich, treten aber praktisch kaum auf. Sie sind aber auch bei diesen Netzen zu beachten, wenn aufgrund von Schalthandlungen Teilnetze mit isoliertem Sternpunkt gebildet werden können.

3.5.5. Beeinflussung durch Parallelführung von Leitungssystemen

Beeinflussung bei einpoligen Fehlern:

Bei längerer Parallelführung von Leitungen verschiedener Netze kann die kapazitive und induktive Kopplung der beiden Netze groß genug sein, um bei einpoligen Fehlern eine gegenseitige Beeinflussung zu bewirken. Die Kopplung ist umso größer, je länger die Parallelführung und je kleiner der Abstand der Leitungen ist. Besonders groß ist die Beeinflussung von Leitungen auf gleichem Gestänge.

Isolierter Sternpunkt oder Erdschlusskompensation

Durch kapazitive Beeinflussung kann bei einem Erdschluss in dem einen Netz eine Verlagerungsspannung in dem anderen Netz influenziert werden. Ist die Nennspannung des erdschlussbehafteten Netzes größer als die des fehlerfreien Netzes, so kann die influenzierte Spannung unzulässig hohe Werte annehmen. Die Spannung ist besonders hoch, wenn das beeinflusste Netz im Resonanzpunkt betrieben wird. Eine Verbesserung kann durch Verdrillung der Leitungssysteme erreicht werden.

Wirksame und strombegrenzend niederohmige Sternpunkterdung

Hohe einpolige Kurzschlussströme in wirksam niederohmig bzw. strombegrenzend niederohmig geerdeten Netzen können durch induktive Beeinflussung ebenfalls hohe Überspannungen im beeinflussten Netz induzieren.

Beeinflussung im Normalbetrieb:

Auch im Normalbetrieb kommt es zu einer Beeinflussung durch Parallelsysteme. Es können auch im erdschlussfreien Betrieb hohe Verlagerungsspannungen auftreten, die einen höheren Verstimmungsgrad erfordern. Eine Verbesserung kann durch Verdrillung der Leitungssysteme erreicht werden.

3.5.6. Transiente Erdschlussüberspannungen

Transiente Überspannungen dauern nur wenige Millisekunden. Sie werden durch den Eintritt eines Fehlers oder durch eine Schalthandlung verursacht.

Diese Überspannungen werden durch einen Überspannungsfaktor k_{LE} ausgedrückt:

$$k_{LE} = \frac{\text{Scheitelwert der Überspannung}}{\text{Scheitelwert der betriebsfrequenten Außenleiter – Erde – Spannung im fehlerfreien Zustand}}$$

Im ungestörten Netz befindet sich das Drehstromsystem im eingeschwungenen Zustand. Bei Eintritt eines Erdschlusses ändern sich die Spannungen der Außenleiter gegen Erde und die Außenleiter-Erde-Kapazitäten müssen umgeladen werden. Dieser Umladevorgang verläuft mit einer Ausgleichsschwingung, die zu teilweise sehr hohen Überspannungen führt. Die Frequenz der Einschwingspannung beträgt einige hundert Hertz.

Isolierter Sternpunkt

Theoretisch führt ein Erdschluss im Spannungsmaximum zu einem Überspannungsfaktor von $k_{LE} = 2,5$. Da die dabei auftretende Gleichspannungsladung über den isolierten Sternpunkt nicht abfließen kann, kommt es bei intermittierenden Erdschlüssen zum Aufschaukeln der Spannung bis zu Überspannungsfaktoren $k_{LE} = 4$ bis 6. Praktisch sind die Überspannungen wegen der Dämpfung des Netzes niedriger.

Erdschlusskompensation

Der Verlauf der transienten Erdschlussüberspannung verläuft zu Beginn ähnlich wie bei isoliertem Sternpunkt. Ein Aufschaukeln der Spannung kann aber nicht stattfinden, weil die Gleichspannungsladung über die Erdschlusslöschspule abfließen kann.

Hohe Überspannungen treten vor allem in Netzen mit starker Fehlkompensation auf.

Netze mit wirksam und strombegrenzend niederohmiger Sternpunkterdung:

Die transienten Erdschlussüberspannungen sind im Allgemeinen niedriger. Maximale Überspannungen mit $k_{LE} = 2,5$ können auftreten.

3.5.7. Schaltüberspannungen

Schaltüberspannungen können beim Schalten kleiner induktiver Ströme oder durch Wiederzünden beim Schalten von Kondensatoren und Leitungen auftreten. Diese sind bei der Bemessung der Schaltgeräte (Lasttrennschalter) zu berücksichtigen. Insbesondere bei Schalthandlungen während eines anstehenden Erdschlusses sind diese Überspannungen bedeutend.

Im Allgemeinen sind in Mittelspannungsnetzen die Schaltüberspannungen kleiner als die transienten Erdschlussüberspannungen.

4. Zusammenfassende Betrachtungen

Die heute angewendete Art der Sternpunktbehandlung in Netzen beruht zumeist auf zeitlich weit zurückliegenden Überlegungen und Entscheidungen, die unter den technologischen und netztechnischen Rahmenbedingungen erfolgt sind. Diese Rahmenbedingungen ändern sich laufend und die geeignetste Sternpunktbehandlung für ein bestimmtes Netz ist immer wieder zu überdenken.

Wegen der weitreichenden Auswirkungen und der hohen Kosten einer Änderung der Sternpunktbehandlung kann eine Umstellung nur dann zweckmäßig sein, wenn sie auf der Grundlage sorgfältiger Untersuchungen aufbaut. Detailfragen sind ebenso abzuklären wie eine Gegenüberstellung der wirtschaftlichen Aufwendungen zum erreichten Nutzen.

Die Gründe für ein Überdenken der Sternpunktbehandlung sind vielfältig. Die häufigsten Gründe sind:

- Erreichen der Löschgrenze
- Änderung der Netzstruktur (Verkabelungsgrad)
- Beeinflussung von Fernmeldeanlagen
- Berührungsspannungen und Erdungsanlagen
- Fehlerbereichseingrenzung
- Kippschwingungen
- Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität

In die Überlegungen zur Sternpunktbehandlung sind neben dem Verkabelungsgrad als wesentliches Kriterium auch die Anforderungen an einen Betrieb im Dauererdschluss, die betrieblichen Erfahrungen des Netzbetreibers, der technische Zustand und die Ausrüstung des Netzes und nicht zuletzt die Betriebsorganisation einzubeziehen.

Isolierter Sternpunkt

Ein isolierter Sternpunkt stellt für kleine Netze eine sehr kostengünstige Lösung dar.

Für eine Selbstlöschung von Lichtbogenfehlern sollte der Erdschlussstrom jedoch weniger als 30A betragen. In Kabelnetzen beschränkt sich die Netzgröße daher auf wenige Kilometer.

Eine Umstellung der Sternpunktbehandlung ist dann zweckmäßig, wenn die Erdschlussströme zu groß werden oder wenn technische Probleme (z.B. Kippschwingungen) auftreten.

Erdschlusskompensation

Für Freileitungsnetze und gemischte Freileitungs-/Kabelnetze ist die Erdschlusskompensation die gebräuchlichste Form der Sternpunktbehandlung.

Der Hauptvorteil ist die Selbstlöschung von vorübergehenden einpoligen Fehlern ohne Auswirkungen auf den Netzbetrieb. Des Weiteren ist eine hohe Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität gegeben.

Die Grenze der Erdschlusskompensation ist bei Erreichen der Löschgrenze gegeben oder kann bei Abstimmproblemen im Hinblick auf Berührungsspannungen erreicht werden. Schwierigkeiten können bei der Lokalisierung von Dauererdschlüssen auftreten. Auch in reinen Kabelnetzen bringt die Erdschlusskompensation Vorteile hinsichtlich Spannungsqualität und Berührungsspannungen. Eine Selbstlöschung von vorübergehenden Erdschlüssen ist hier aber nicht gegeben.

Wirksam niederohmige und strombegrenzend niederohmige Sternpunktterdung

Die wirksam niederohmige Sternpunktterdung ist für reine Kabelnetze und ausgedehnte Netze geeignet.

Diese Art der Sternpunktbehandlung stellt höhere Anforderungen an die Erdungsanlagen zur Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen. Es treten auch höhere Beeinflussungsspannungen an Fernmeldeanlagen auf. Im Bereich eines globalen Erdungssystems (dicht verbautes Gebiet) bereitet das meistens aber keine besonderen Probleme.

Beide Schwierigkeiten können durch eine geeignete Wahl der Sternpunktimpedanz (strombegrenzend niederohmige Sternpunktterdung) zur Begrenzung der Erdkurzschlussströme verbessert werden.

Für Freileitungsnetze und gemischte Freileitungs-/Kabelnetze bewirkt die wirksam niederohmige Sternpunktterdung bzw. die strombegrenzend niederohmige Sternpunktterdung eine Reduktion der Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität auch bei vorübergehenden einpoligen Fehlern (Lichtbogenfehler).

Vorübergehend strombegrenzende Sternpunktterdung

Die vorübergehend strombegrenzende Sternpunktterdung stellt eine Ergänzung der Erdschlusskompensation zur Beschleunigung und Verbesserung der Fehlerbereichseingrenzung dar. Die gleichen Verfahren zur Fehlerbereichseingrenzung von Kurzschlüssen können auch bei Erdschlüssen herangezogen werden.

Die zulässigen Berührungs- und Beeinflussungsspannungen können durch Begrenzung des Erdkurzschlussstromes auf wenige hundert Ampere meistens ohne besonderen Aufwand eingehalten werden.

Diese Zusammenstellung ist keine Empfehlung für eine bestimmte Art der Sternpunktbehandlung, sondern stellt nur eine grundsätzliche Zuordnung dar.

Sternpunktbehandlung in Mittel- und Hochspannungsnetzen

Anhang Normenteil

Normenauszüge mit freundlicher Genehmigung durch den OVE

Technischer Stand: März 2013

Oesterreichs Energie – Überarbeitung 2014

Inhaltsverzeichnis

1 Technische Regelwerke	3
1.1 Einleitung.....	3
1.2 Begriffserklärungen	4
1.3 Vorschriften und Normen	8
1.3.1 Übersicht	8
1.3.2 ÖVE B1/1976: Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstrom-anlagen mit Nennspannungen über 1 kV	11
1.3.3 ÖVE/ÖNORM EN 50522: Erdung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV.....	15
1.3.4 ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2011-12-01: Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV -- Teil 1: Allgemeine Bestimmungen	30
1.3.5 ÖVE/ÖNORM EN 50423: Freileitungen AC 1 kV bis einschließlich AC 45 kV	35
1.3.6 ÖVE EN 50341: Freileitungen über AC 45 kV.....	36

1 Technische Regelwerke

1.1 Einleitung

Im Folgenden werden die verschiedenen heranzuziehenden Vorschriften und Normen die für das Thema Sternpunktbehandlung von elektrischen Netzen relevant sind auszugsweise angeführt.

Diese Unterlagen stellen eine grundlegende Übersicht dar und erheben keine Garantie auf Vollständigkeit.

In verschiedenen Normen wird die Auslegung der Erdungsanlagen von Masten, Anlagen etc. bezüglich Beeinflussung und Gefährdung festgelegt. Diese Rahmenbedingungen sind ausschlaggebend für den Netzausbau und für eventuelle Netzbauten oder Netzumstellungen hinsichtlich der Sternpunktbehandlung dieser elektrischen Netze.

In diesem Kapitel sind teilweise wörtliche Auszüge (kursiv) aus den Normen wiedergegeben. Es werden nur markante Ausschnitte aus diesen Normen wiedergegeben. Kapitel oder Absätze aus den Normen werden vollständig wiedergegeben. Dennoch ersetzt die Darstellung nicht den vollständigen Text der Normen.

1.2 Begriffserklärungen

Abgang

Ein Abgang ist eine von einer Schaltanlage abgehende Leitungsführung (Freileitung oder Kabel). Bei manchen Netzbetreibern ist dafür auch der Begriff Abzweig eingeführt.

Abzweig

Siehe Abgang.

Außenleiter-Erde-Spannung

Außenleiter-Erde-Spannung ist die Spannung zwischen einem Außenleiter und der Bezugs-erde.

Automatische Wiedereinschaltung (AWE)

In Freileitungsnetzen sind die meisten Kurzschlüsse vorübergehende Lichtbogenfehler, die grundsätzlich vom Leitungsschutz abgeschaltet werden müssen. Nachdem keine bleibende Schädigung des Isolationsmediums auftritt, erfolgt nach wenigen hundert Millisekunden eine automatische Wiedereinschaltung des Leistungsschalters. Ein Großteil der Kurzschlüssen wird dadurch ohne Versorgungsunterbrechung bereinigt.

Berührungsspannung

Berührungsspannung U_T ist der Teil der Erdungsspannung, der vom Menschen überbrückt werden kann, wobei der Stromweg über den menschlichen Körper von Hand zu Fuß (waag-rechter Abstand vom berührten Teil 1 m) oder von Hand zu Hand verläuft

Dämpfungsgrad

Dämpfungsgrad eines Netzes mit Erdschlusskompensation ist das Verhältnis der Summe der Leitwerte der dämpfenden Widerstände (Ableitungen, Wirkwiderstand der Erdschluss-löschspule) zur Summe der Außenleiter-Erde-Kapazitäten.

Doppel- oder Mehrfacherdschluss

Doppel- oder Mehrfacherdschluss ist das gleichzeitige Auftreten von Erdschlüssen an örtlich getrennten Stellen zweier bzw. mehrerer betriebsmäßig gegeneinander unter Spannung stehender Leiter des gleichen Netzes.

Erder

Erder sind Leiter, die in der Erde eingebettet sind und mit ihr in leitender Verbindung stehen, oder Leiter, die in Beton eingebettet sind, der mit der Erde großflächig in Berührung steht (z.B. Fundamenterder).

Erdfehlerfaktor

Als Erdfehlerfaktor versteht man das Verhältnis des Effektivwertes der höchsten betriebsfrequenten Außenleiter-Erde-Spannung eines nicht fehlerbehafteten Außenleiters während eines ein- oder mehrpoligen Fehlers mit Erdberührung an beliebiger Stelle des Netzes zum Effektivwert der betriebsfrequenten Außenleiter-Erde-Spannung, die ohne Fehler vorhanden wäre. Der Erdfehlerfaktor bezieht sich nur auf eine bestimmte Stelle eines Drehstromnetzes (z.B. den Einbauort eines Betriebsmittels) und auf einen bestimmten Netzzustand.

Der Erdfehlerfaktor ist das $\sqrt{3}$ -fache des Erdungsfaktors (Erdungszahl), der früher benutzt wurde.

Erdfehlerstrom

Erdfehlerstrom ist der bei Vorhandensein eines einzigen Erdschlusspunktes an der Fehlerstelle vom Betriebsstromkreis zur Erde oder zu geerdeten Teilen übertretende Strom.

Dieser ist,

- (1) in Netzen mit isoliertem Sternpunkt der kapazitive Erdschlussstrom,
- (2) in Netzen mit Erdschlusskompensation der Erdschlussreststrom,
- (3) in Netzen mit wirksam niederohmiger Sternpunktterdung der Erdkurzschlussstrom.

Erdkurzschluss

Erdkurzschluss bezeichnet den Erdfehler in Netzen mit wirksam niederohmiger Sternpunktterdung.

Erdschluss

Erdschluss ist eine durch einen Fehler entstandene leitende Verbindung eines Außenleiters mit Erde oder einem geerdeten Teil.

Meistens wird unter Erdschluss ein Dauererdschluss verstanden, der nicht selbsttätig erlischt.

Erdschlusswischer

Erdschlusswischer ist ein vorübergehender einpoliger Erdfehler, meisten ein Lichtbogenfehler. Durch einen ausreichend kleinen Fehlerstrom erlischt der Lichtbogen selbsttätig.

Erdschlussreststrom

Der Erdschlussreststrom ist der bei der Erdschlusslöschung an der Fehlerstelle noch verbleibende Erdschlussstrom. Bei vollkommener Abstimmung der Löscheinrichtung ist das die durch die Induktivität der Erdschlusslöschspule nicht löschrare kapazitive Komponente (Unsymmetrie und Oberschwingungen) sowie die durch die Verluste der Erdschlusslöschspule und durch die Ableitungswiderstände der Leitung bedingte Wirkkomponente des Erdschlussstromes.

Erdschlussstrom

Siehe Erdfehlerstrom.

Erdung

Erdung ist die Gesamtheit aller Mittel und Maßnahmen zum Erden.

Erdungsanlage

Erdungsanlage ist eine örtlich abgegrenzte Gesamtheit miteinander leitend verbundener Erder oder in gleicher Weise wirkender Metallteile (z.B. Mastfüsse, Bewehrungen, metallene Kabelmetallmäntel) und Erdungsleitungen.

Erdungsspannung

Erdungsspannung U_E ist die zwischen einer Erdungsanlage und Bezugserde auftretende Spannung, wenn ein Strom durch die Erdungsimpedanz der Erdungsanlage fließt.

Kurzschluss

Kurzschluss ist die beabsichtigte oder unbeabsichtigte Überbrückung zwischen zwei oder mehreren Punkten eines Stromkreises über einen derart niedrigen Widerstand, dass er im Verhältnis zum betriebsmäßig zwischen diesen Punkten anliegenden Widerstand vernachlässigbar ist.

Löschfähigkeit

Die Löschfähigkeit eines Netzes ist gegeben, wenn der Erdfehlerstrom eines Lichtbogenfehlers so klein ist, dass der Lichtbogen noch selbsttätig erlischt.

Löschgrenze

Die Löschgrenze von Starkstromnetzen ist der in der ÖVE-B1/1976, Tab.22-2 angegebene Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom für die Grundwelle, bis zu welchem bei einem einpoligen Fehler ein selbsttätiges Löschen eines auftretenden Lichtbogens in Abhängigkeit von der Spannungsebene des Netzes ohne Nachweis gewährleistet sein soll.

Schrittspannung

Schrittspannung U_S ist der Teil der Erdungsspannung, der vom Menschen mit einem Schritt von 1 m überbrückt werden kann, wobei der Stromweg über den menschlichen Körper von Fuß zu Fuß verläuft.

Sternpunkt

Sternpunkt ist der neutrale Punkt eines Mehrphasensystems. (Drehstromsystem)

Sternpunktimpedanz

Sternpunktimpedanz ist die Impedanz zwischen dem Sternpunkt und der Erdungsanlage.

Sternspannung

Sternspannung ist die Spannung zwischen einem Außenleiter und dem Sternpunkt.

Transiente Überspannung

Transiente Überspannung ist eine kurzzeitig auftretende unipolare oder die Polarität wechselnde Überspannung.

Überspannung

Überspannung ist eine zeitveränderliche Spannung zwischen einem Leiter und Erde oder zwischen den Leitern mit einem Scheitelwert, der die von der höchsten Spannung für Betriebsmittel abgeleiteten Bezugsscheitelwerte überschreitet.

Überspannungen sind vorübergehende Erscheinungen. Man kann unterscheiden zwischen stark gedämpften Überspannungen relativ kurzer Dauer und ungedämpften Überspannungen relativ langer Dauer. Die Grenze zwischen diesen beiden Gruppen kann nicht eindeutig festgelegt werden.

Verlagerungsspannung

Verlagerungsspannung UEN ist die Spannung zwischen dem Sternpunkt und der Erdungsanlage.

Verstimmungsgrad

Verstimmungsgrad eines Netzes mit Erdschlusskompensation ist das Verhältnis der Differenz zwischen der Summe der Außenleiter-Erde-Kapazitäten und der Induktivität der Erdschlusslöschspule zur Summe der Außenleiter-Erde-Kapazitäten.

Zeitweilige Spannungserhöhung

Zeitweilige Spannungserhöhung ist der Zustand einer betriebsfrequenten, die höchste Spannung für Betriebsmittel übersteigenden Überspannung vorübergehender Dauer.

1.3 Vorschriften und Normen

1.3.1 Übersicht

Hinsichtlich der Thematik der Sternpunktbehandlung von Netzen sind unter anderem die folgenden angeführten Normen und Vorschriften zu beachten.

Österreichische Bestimmungen:

- **ÖVE EN 60071-1:1-1995**
Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen über 1 kV - Teil 1: Isolation Leiter gegen Erde
Ersatz für ÖVE-A 61 Teil 1/1980
- **ÖVE-B1/1976**
Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
- **ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01**
Erdung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
Ersatz für: ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01
Diese Europäische Norm ist anwendbar zur Festlegung von Anforderungen für die Projektierung und Errichtung von Erdungsanlagen für Starkstromanlagen in Netzen mit Nennwechselspannungen über 1 kV und einer Nennfrequenz bis einschließlich 60 Hz, um damit eine sichere und störungsfreie Funktion im bestimmungsgemäßen Betrieb sicherzustellen. Im Sinne dieser Norm gilt als eine Starkstromanlage eine der folgenden: a) Schalt- und Umspannanlagen, einschließlich Schaltanlagen zur Speisung von Bahnanlagen. b) Elektrische Anlagen auf Masten oder in Türmen, Schaltgeräte und/oder Transformatoren außerhalb abgeschlossener elektrischer Betriebsstätten. c) Eine (oder mehrere) Stromerzeugungsanlage(n) an einem räumlich begrenzten Ort. Die Anlage enthält Generatoren und Transformatoren mit zugehörigen Schaltgeräten und elektrischen Hilfseinrichtungen. Verbindungen zwischen Stromerzeugungsanlagen an unterschiedlichen Orten sind ausgeschlossen. d) Das elektrische Netz einer Fabrik, Industrieanlage oder anderer industrieller, landwirtschaftlicher, gewerblicher oder öffentlicher Räumlichkeiten.
- **ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2011-12-01**
Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV -- Teil 1: Allgemeine Bestimmungen
Ersatz für: ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01
Dieser Teil der 61936 gibt allgemeine Bestimmungen für die Projektierung und Errichtung von Starkstromanlagen in Netzen mit Nennwechselspannungen über 1 kV und einer Nennfrequenz bis einschließlich 60 Hz, um damit eine sichere und störungsfreie Funktion im bestimmungsgemäßen Betrieb sicherzustellen. Im Sinne dieser Norm gilt als eine Starkstromanlage eine der folgenden: a) Schalt- und Umspannanlagen, einschließlich Schaltanlagen zur Speisung von Bahnanlagen. b) Elektrische Anlagen auf Masten oder in Türmen. Schaltgeräte und/oder Transformatoren außerhalb abgeschlossener elektrischer Betriebsstätten. c) Eine (oder mehrere) Stromer-

zeugungsanlage(n) an einem räumlich begrenzten Ort. Die Anlage enthält Generatoren und Transformatoren mit zugehörigen Schaltgeräten und elektrischen Hilfseinrichtungen. Verbindungen zwischen Stromerzeugungsanlagen an unterschiedlichen Orten sind ausgeschlossen. d) Das elektrische Netz einer Fabrik, Industrieanlage oder anderer industrieller, landwirtschaftlicher, gewerblicher oder öffentlicher Räumlichkeiten.

- **ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01**

Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV

Diese Norm wird zukünftig ersetzt durch die Normen: EN 50522, EN 61936-1

- **ÖVE/ÖNORM E 8384:2007-05-01**

Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV

Ersatz für: ÖVE-EH 41/1987

Diese ÖVE/ÖNORM gilt für Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV und Nennfrequenzen unter 100 Hz und in Gleichstromanlagen über 1,5 kV (hier nur sinngemäß), für die es keine eigenständigen normativen Anforderungen an deren Erdung gibt.

- **ÖVE/ÖNORM EN 50110-1 (EN 50110-2-100 eingearbeitet):2008-09-01 8384:2007-05-01**

Betrieb von elektrischen Anlagen -- Teil 1: Europäische Norm -- Teil 2-100: Nationale
Diese ÖVE/ÖNORM gilt für das Bedienen von und allen Arbeiten an, mit oder in der Nähe von elektrischen Anlagen. Hierbei handelt es sich um elektrische Anlagen aller Spannungsebenen von Kleinspannung bis Hochspannung. Sie beschreibt die Anforderungen für sicheres Bedienen von und Arbeiten an, mit oder in der Nähe von elektrischen Anlagen. Diese Anforderungen gelten für alle Bedienungs-, Arbeits- und Wartungsverfahren. Sie gelten für alle nichtelektrotechnischen Arbeiten, wie Bauarbeiten in der Nähe von Freileitungen oder Kabeln sowie für elektrotechnische Arbeiten, bei denen eine elektrische Gefahr besteht. Diese Norm gilt nicht beim Benutzen elektrischer Anlagen und Betriebsmittel, die den einschlägigen Normen entsprechen und die konstruiert und installiert wurden für den Gebrauch durch Laien. (In diese Ausgabe ist die Berichtigung 1:2008 - Ergänzung des Abschnittes 6.2.4.3.101 - eingearbeitet).

- **ÖVE/ÖNORM EN 50423:2005-09-01**

Freileitungen über AC 1 kV bis einschließlich AC 45 kV -- Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Gemeinsame Festlegungen

Ersatz für: ÖVE/ÖNORM E 8111:2002-09-01

Diese Norm gilt für Freileitungen mit Nennspannungen über AC 1 kV bis und einschließlich AC 45 kV mit Nennfrequenzen unter 100 Hz ausgerüstet mit blanken Leitern, kunststoffisolierten Leitern oder Freileitungskabelsystemen. In Verbindung mit EN 50341-1 legt diese Norm die allgemeinen Anforderungen fest, die bei der Bemessung, Konstruktion und Errichtung von neuen Freileitungen eingehalten werden müssen, um sicherzustellen, dass die Freileitung ihren Zweck hinsichtlich Personensicherheit, Instandhaltung, Betrieb und Umwelteinflüssen erfüllt. Diese Norm gilt nicht für Oberleitungen elektrischer Bahnen soweit nicht ausdrücklich in einer anderen Norm gefordert. ÖVE/ÖNORM: Konsolidierte Fassung.

- **ÖVE/ÖNORM EN 50341:2011-01-01**

Freileitungen über AC 45 kV -- Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Gemeinsame Festlegungen

Diese ÖVE/ÖNORM gilt für elektrische Freileitungen mit Nennspannungen über AC 45 kV und Nennfrequenzen unter 100 Hz. Diese Norm legt die allgemeinen Anforderungen fest, die bei der Planung und Errichtung neuer Freileitungen erfüllt werden müssen, um sicherzustellen, dass die Freileitung ihren Zweck in Bezug auf Personensicherheit, Instandhaltung, Betrieb und Umweltfragen erfüllt. Diese Bestimmungen gelten auch für Fernmeldeleitungen, die auf Tragwerken von Hochspannungsfreileitungen mitgeführt werden. Sie gelten nicht für Seil- oder Kabelkonstruktionen mit integrierten Lichtwellenleitern, unbeschadet ihrer Verwendung, die keine Funktion als Erd- oder Leiterseil erfüllen.

- **ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 (ÖVE/ÖNORM E 8001-x Reihe)**

Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V -- Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen) (Konsolidierte Version) Ersatz für: ÖVE/ÖNORM E 8001-1/A1 ... A5

Diese Bestimmungen gelten für die Errichtung von Starkstromanlagen mit folgenden Nennspannungen zwischen beliebigen Leitern: (1) bei Wechselstrom bis einschließlich 1 000 V effektiv mit einer Frequenz bis 1 kHz (2) bei Gleichstrom bis einschließlich 1 500 V. Die vorliegende ÖVE/ÖNORM ist die konsolidierte Ausgabe von ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2000, in die die Änderungen A1:2002, A2:2003, A3:2007, A4:2009 und A5:2010 eingearbeitet sind.

- **ÖVE/ÖNORM EN 50160:2011-03-01**

Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen

Diese Europäische Norm definiert, beschreibt und spezifiziert die wesentlichen Merkmale der Versorgungsspannung an der Übergabestelle zum Netznutzer in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungs-Wechselstrom-Versorgungsnetzen unter normalen Betriebsbedingungen. Diese Norm beschreibt die Grenzen oder Werte, innerhalb derer die Merkmale der Spannung an beliebigen Übergabestellen in öffentlichen europäischen Elektrizitätsversorgungsnetzen zu erwarten sind, sie beschreibt aber nicht die durchschnittliche Situation (in einem öffentlichen Energieversorgungsnetz), wie sie ein einzelner Nutzer des Netzes gewöhnlich erfährt. Diese Europäische Norm gilt nicht für von den normalen Betriebsbedingungen abweichende Betriebsbedingungen, welche die folgenden einschließen: a) vorübergehende Versorgungsmaßnahmen, die durchgeführt werden, um Nutzer des Netzes während Bedingungen, die als Ergebnis einer Störung bzw. eines Fehlers, von Wartungs- und/oder Baumaßnahmen auftreten, weiter zu versorgen, oder die durchgeführt werden, um das Ausmaß und die Dauer von Versorgungsausfällen zu minimieren, b) Fälle, bei denen eine Anlage oder ein Gerät des Netznutzers nicht den einschlägigen Normen oder den technischen Anschlussbedingungen – aufgestellt entweder von den Behörden oder dem Netzbetreiber – entspricht oder die Grenzwerte für die Aussendung leitungsgeführter Störgrößen überschreitet.

- **Nullungsverordnung: 1998**

Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Anforderungen an öffentliche Verteilungsnetze mit der Nennspannung 400/230 V und an diese angeschlossenen Verbraucheranlagen zur grundsätzlichen Anwendung der Schutzmaßnahme.

1.3.2 ÖVE B1/1976: Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstrom-anlagen mit Nennspannungen über 1 kV

In der Tabelle 1, gemäß der derzeit gültigen ÖVE-B1/1976: Tab. 19-1, wird eine Übersicht über Gefährdungs- und Störungsmöglichkeiten sowie die notwendigen Untersuchungen für induktive, kapazitive und ohmsche Beeinflussungen in Abhängigkeit von der Betriebsweise des Hochspannungsnetzes und der Sternpunktbehandlung des Netzes getrennt für Hochspannungsfreileitungen und Hochspannungskabel angegeben, wenn nach den jeweiligen Voraussetzungen ein Überschreiten der zulässigen Grenzwerte im Fehlerfall möglich erscheint. Scheint in der Tabelle ein Querstrich auf, so bedeutet dies, dass keine Untersuchungen erforderlich sind.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	Wechselstromanlage			Fernmeldeanlage													
				Gefährdung durch						Geräuschstörungen in erdsymmetrisch betriebenen Stromwegen durch			Störungen durch Fremdspannungen in erdunsymmetrisch betriebenen Stromwegen durch				
				KB	IB	OB	KB	IB	IB	OB	F und K	F und K					
2	Betriebsart	Art	Zustand	F	K	F	K	F	K	F	K	F	K	F und K	F und K	Störungen durch Ansprechen der Überspannungsschutzgeräte bei KB von Freileitungen - §32	
3	Netze mit isoliertem, neutralem Punkt oder Erdschlusskompensation	F	Normal	-	-	-	-	-	-	§30	-	-	-	§31	-		
4			Erdschluss	§21	-	-	-	-	-	§30	-	§30	§30	§31	-		
5			Doppelerdschluss	-	-	§22	§22	§23	§23	-	-	-	-	-	-		-
6			Normal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
7		K	Erdschluss	-	-	-	-	-	-	-	-	§30	§30	§31	-		
8			Doppelerdschluss	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
9			Netze mit niederohmiger Erdung des neutralen Punktes	Normal	-	-	§22	§22	-	-	§30	-	§30	§30	§31		§31
10				F	Erdkurzschluss	-	-	§22	§22	§23	§23	-	-	-	-		-
11	Normal	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
12	Netze mit vorübergehender Erdung eines Netzpunktes	K		Erdkurzschluss	-	-	-	§22	-	-	-	-	-	-	-		-
13			Normal	-	-	-	-	-	-	§30	-	-	-	§31	-		
14		F	Erdkurzschluss / Doppelerdschluss	-	-	§22	§22	§23	§23	-	-	-	-	-	-		
15			Normal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
16	Fahr- und Speiseleitungen	K	Erdkurzschluss / Doppelerdschluss	-	-	-	§22	-	-	-	-	-	-	-	-		
17			Normal	§21	-	§22	§22	§23	§23	§30	-	§30	§30	§31	§31		
18		F	Erdkurzschluss	-	-	§22	§22	§23	§23	-	-	-	-	-	-		
19			Normal	-	-	§22	§22	§23	§23	-	-	§30	§30	§31	§31		
20	K	Erdkurzschluss	-	-	§22	§22	§23	§23	-	-	-	-	-	-			
		Normal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

Tabelle 1: Notwendigkeit der Prüfung auf Gefährdung oder Störung bei induktiver Beeinflussung (gemäß der Norm ÖVE-B1: Tab. 19-1) in Abhängigkeit einer Freileitungs- oder Kabellösung.

- F Freileitung
- K Kabel
- KB Kapazitive Beeinflussung
- IB Induktive Beeinflussung
- OB Ohmsche Beeinflussung
- §21 Kapazitive Beeinflussung in ÖVE-B 1/1976
- §22 Induktive Beeinflussung in ÖVE-B 1/1976
- §23 Ohmsche Beeinflussung in ÖVE-B 1/1976
- §30 Zulässige Geräusch-EMK in ÖVE-B 1/1976
- §31 Zulässige Fremdspannung in ÖVE-B 1/1976
- §32 Zulässige influenzierte Spannung in ÖVE-B 1/1976

Kapazitive Beeinflussung

Oberirdisch geführte Fernmeldeleitungen, die keine geerdeten metallenen Hüllen oder Abschirmungen haben, können kapazitiv beeinflusst werden, dabei darf der influenzierte Ladestrom bei widerstandsloser Erdung der Fernmeldeleitung höchstens 9 mA (gemäß der Norm ÖVE B1) betragen, wenn Fahr- und Speiseleitung im Normalbetrieb stehen oder wenn Bahnübertragungs- oder Drehstromleitungen, mit gegen Erde isoliertem neutralem Punkt oder Erdschlusskompensation, einen Erdschluss haben.

Induktive Beeinflussung

Zur Beurteilung dieser Beeinflussung ist anzunehmen, dass am jeweils betrachteten Ende einer galvanisch zusammenhängenden Fernmeldeverbindung die gesamte induzierte Längs-EMK als Spannung gegen Erde auftritt. Die Grenzwerte der zulässigen Beeinflussungsspannungen gegen Erde sind in Tab. 22-1 der ÖVE B1 festgelegt.

Leitungsart		Spannungen (Effektivwerte) bei	
		Kurzzeitbeeinflussung [V]	Langzeitbeeinflussung bei Normalbetrieb [V]
Freileitung		300	65
Kabel ³⁾	Ohne Übertrager	300 ¹⁾ bzw. 500	125 ⁴⁾
	Mit Übertrager	1200 ²⁾	250 ²⁾ bzw. 500

Beim Überschreiten einer Beeinflussungsspannung von 300 V im Kurzzeitbereich und 65 V im Langzeitbereich sind die Anlagen zu kennzeichnen und Schutzmaßnahmen beim Arbeiten zu treffen.

¹⁾ Dieser Wert gilt für Fernmeldeanlagen der Österreichischen Post- und Telegraphenverwaltung sowie für Anlagen, die leitend mit dem Netz der Österreichischen Post- und Telegraphenverwaltung verbunden sind.

²⁾ Dieser Wert entspricht im allgemeinen 60 % der Prüfwechselspannung zwischen Adern und Metallmantel oder Schirm bei Kabeln mit Papierisolierung. Bei Kabeln mit höherem Isoliervermögen, z. B. bei Kabeln mit Kunststoffisolierung besonderen Aufbaues, können einvernehmlich entsprechend der höheren Prüfwechselspannung höhere Spannungen festgelegt werden, sofern auch die Garnituren (Muffen, Endeinrichtungen usw.) dieses Isoliervermögen aufweisen.

³⁾ Ausgenommen sind Koaxialkabelsysteme mit Wechselstromfernspesung, bei denen die Symmetriemittelpunkte geerdet sind.

⁴⁾ Für Rundfunk- und Fernseh Rundfunkempfangsanlagen, Gemeinschaftsantennenanlagen, Großgemeinschaftsantennenanlagen, Kabelfernseh- und Programmverteilanlagen sowie Videoverteilanlagen gilt als Grenzwert 65 V.

Tabelle 2: Zulässige Beeinflussungsspannungen gemäß ÖVE B1, Tab. 22-1.

Die induktive Beeinflussung ist unter Berücksichtigung der Art der Wechselstrom- bzw. Fernmeldeanlagen in folgenden Fällen zu untersuchen:

- (1) bei Normalbetrieb von Fahr- und Speiseleitungen,
- (2) bei Normalbetrieb einer Bahnübertragungsleitung oder Drehstromleitung bei großen Abstandsunterschieden der einzelnen Phasenleiter zum Erdseil; im allgemeinen nur bei Nennspannungen über 220 kV,
- (3) bei Erdkurzschluss einer Fahr- oder Speiseleitung,
- (4) bei Erdkurzschluss eines Netzes mit niederohmig geerdetem neutralem Punkt.

- (5) bei Erdschluss eines Netzes mit isoliertem neutralem Punkt oder Erdschlusskompensation bei bewusster vorübergehender Erdung eines zweiten Netzpunktes. Dieser Fall ist nur dann zu berücksichtigen, wenn sich die Fehlerstelle innerhalb eines Umkreises von 250 km um die Aufschaltstelle befindet.
- (6) bei Doppelerdschluss eines Netzes mit isoliertem neutralem Punkt oder Erdschlusskompensation, wenn der kapazitive Erdschlussstrom oder Erdschlussreststrom in Abhängigkeit von der Nennspannung des Netzes den in Tab. 3 (gemäß der Norm ÖVE B1, Tab. 22-2) festgelegten Wert überschreitet.

Nennspannung des Netzes [kV]		3...20	25	30	45	60	110	150
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom [A] Maßgebend ist die Grundwelle.	Tabelle a	60	63	67	78	90	132	180
	Tabelle b	35	37	40	50	60	-	-

Tabelle a für Netze mit Erdschlusskompensation;
für Kabelnetze bis 20 kV Nennspannung mit kleinen Freileitungsanteilen gilt Tabelle a auch bei isoliertem neutralem Punkt,
Tabelle b für Netze mit isoliertem neutralem Punkt.

Tabelle 3: Löschgrenze von Starkstromnetzen gemäß ÖVE B1, Tab. 22-2.

Diese Festlegung schließt nicht aus, dass in Einzelfällen höhere Werte, als in Tab. 22-2 der ÖVE-B1 angegeben, zugelassen werden können, wenn die Löschfähigkeit des Netzes z.B. durch Messungen nachgewiesen wird¹.

Ohmsche Beeinflussung

Auf geerdete Teile von Fernmeldeanlagen (Erdkabel mit Metallmantel, Erder, metallene Kabelverzweigergehäuse u. dgl.), die sich im Einflussbereich der Erder von Bahn- oder Drehstromanlagen befinden, kann von deren Erdern durch ohmsche Beeinflussung die Erder-spannung oder ein Teil derselben als Beeinflussungsspannung übertragen werden. Sie tritt zwischen Teilen einer Fernmeldeanlage und benachbarten, geerdeten anderen Bauteilen sowie zwischen der Fernmeldeanlage und Erde auf. Eine Beeinflussungsspannung kann auch bei Fernmeldekabeln mit Isoliermantel im Einflussbereich der Erder von Bahn- oder Drehstromanlagen zwischen den Kabeladern (bzw. Koaxialleitern) und dem das Fernmeldekabel umgebenden Erdreich auftreten. Die Grenzwerte der zulässigen Beeinflussungsspannung sind aus Tab. 2 (siehe auch die derzeit gültige ÖVE B1 Tab. 22-1) zu entnehmen.

¹ Der Nachweis der Löschfähigkeit eines Netzes durch Messungen oder durch Auswertung des realen Erdschlussgeschehens gestaltet sich mit derzeitigen Mitteln in der Praxis als unrealistisch, da eine allgemeine Aussage (mangels belastbarer Modelle für Extrapolationen) wegen der sich von Erdschlussfall zu Erdschlussfall geänderten lichtbogenbestimmenden Parameter (Windgeschwindigkeit, Kompensationsgrad, OS-Pegel, Phasenlage der OS zu der Grundschwingung und untereinander, Flankensteilheit der wiederkehrenden Spannung, Brenndauer vor dem Verlöschen, ...) de facto unmöglich erscheint.

Die ohmsche Beeinflussung ist unter Berücksichtigung der Art der Wechselstrom- bzw. Fernmeldeanlage in folgenden Fällen zu untersuchen:

- (1) bei Normalbetrieb von Fahr- und Speiseleitungen,
- (2) bei Erdkurzschluss einer Fahr- bzw. Speiseleitung,
- (3) bei Erdkurzschluss eines Netzes mit niederohmig geerdetem neutralem Punkt,
- (4) bei Erdschluss eines Netzes mit isoliertem neutralem Punkt oder Erdschlusskompensation bei bewusster vorübergehender Erdung eines zweiten Netzpunktes für den Punkt, wo die niederohmige Erdung durchgeführt wird,
- (5) bei Doppelerdschluss eines Netzes mit isoliertem neutralem Punkt oder Erdschlusskompensation, wenn der kapazitive Erdschlussstrom oder Erdschlussreststrom in Abhängigkeit von der Nennspannung des Netzes den in Tab. 3 (siehe auch Tab. 22-2, Norm ÖVE B1) festgelegten Wert überschreitet.

1.3.3 ÖVE/ÖNORM EN 50522: Erdung von Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV

Gemeinsam ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 Ersatz für die ÖVE/ÖNORM E 8383.
Die ÖVE/ÖNORM E 8383 ist Ersatz für: ÖVE-EH 1:1982 und ÖVE-EH 1a:1987

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm ist anwendbar zur Festlegung von Anforderungen für die Projektierung und Errichtung von Erdungsanlagen für Starkstromanlagen in Netzen mit Nennwechselspannungen über 1 kV und einer Nennfrequenz bis einschließlich 60 Hz, um damit eine sichere und störungsfreie Funktion im bestimmungsgemäßen Betrieb sicherzustellen.

Im Sinne dieser Norm gilt als eine Starkstromanlage eine der folgenden:

- a) Schalt- und Umspannanlagen, einschließlich Schaltanlagen zur Speisung von Bahnanlagen;*
- b) elektrische Anlagen auf Masten oder in Türmen, Schaltgeräte und/oder Transformatoren außerhalb abgeschlossener elektrischer Betriebsstätten;*
- c) eine (oder mehrere) Stromerzeugungsanlage(n) an einem räumlich begrenzten Ort; die Anlage enthält Generatoren und Transformatoren mit zugehörigen Schaltgeräten und elektrischen Hilfseinrichtungen. Verbindungen zwischen Stromerzeugungsanlagen an unterschiedlichen Orten sind ausgeschlossen;*
- d) das elektrische Netz einer Fabrik, Industrieanlage oder anderer industrieller, landwirtschaftlicher, gewerblicher oder öffentlicher Räumlichkeiten.*

In Starkstromanlagen können unter anderem folgende Betriebsmittel vorkommen:

- *Drehende elektrische Maschinen;*
- *Schaltgeräte;*
- *Transformatoren und Reaktoren;*
- *Stromrichter;*
- *Kabel;*
- *Verdrahtungen;*
- *Batterien;*
- *Kondensatoren;*
- *Erdungsanlagen;*
- *Gebäude und Umzäunungen, die zu einer abgeschlossenen elektrischen Betriebsstätte gehören;*
- *zugehörige Schutz-, Steuerungs- und Hilfssysteme;*
- *große Luftdrosselspulen.*

ANMERKUNG Grundsätzlich haben Festlegungen von Betriebsmittelnormen Vorrang vor dieser Norm.

Diese Europäische Norm gilt nicht für die Projektierung und Errichtung von Erdungsanlagen für eine der folgenden:

- *Freileitungen und Kabel zwischen getrennten Anlagen;*
- *elektrische Bahnen;*
- *Bergwerksausrüstungen und -anlagen;*
- *Leuchtröhrenanlagen;*
- *Anlagen auf Schiffen und off-shore-Plattformen;*

- elektrostatischen Einrichtungen (z. B. Elektrofilter, Pulverbeschichtungsanlagen);
- Prüffeldern;
- medizinischen Einrichtungen, zum Beispiel medizinischen Röntgeneinrichtungen.

Diese Europäische Norm gilt nicht für die Anforderungen zur Durchführung von Arbeiten unter Spannung an elektrischen Anlagen.

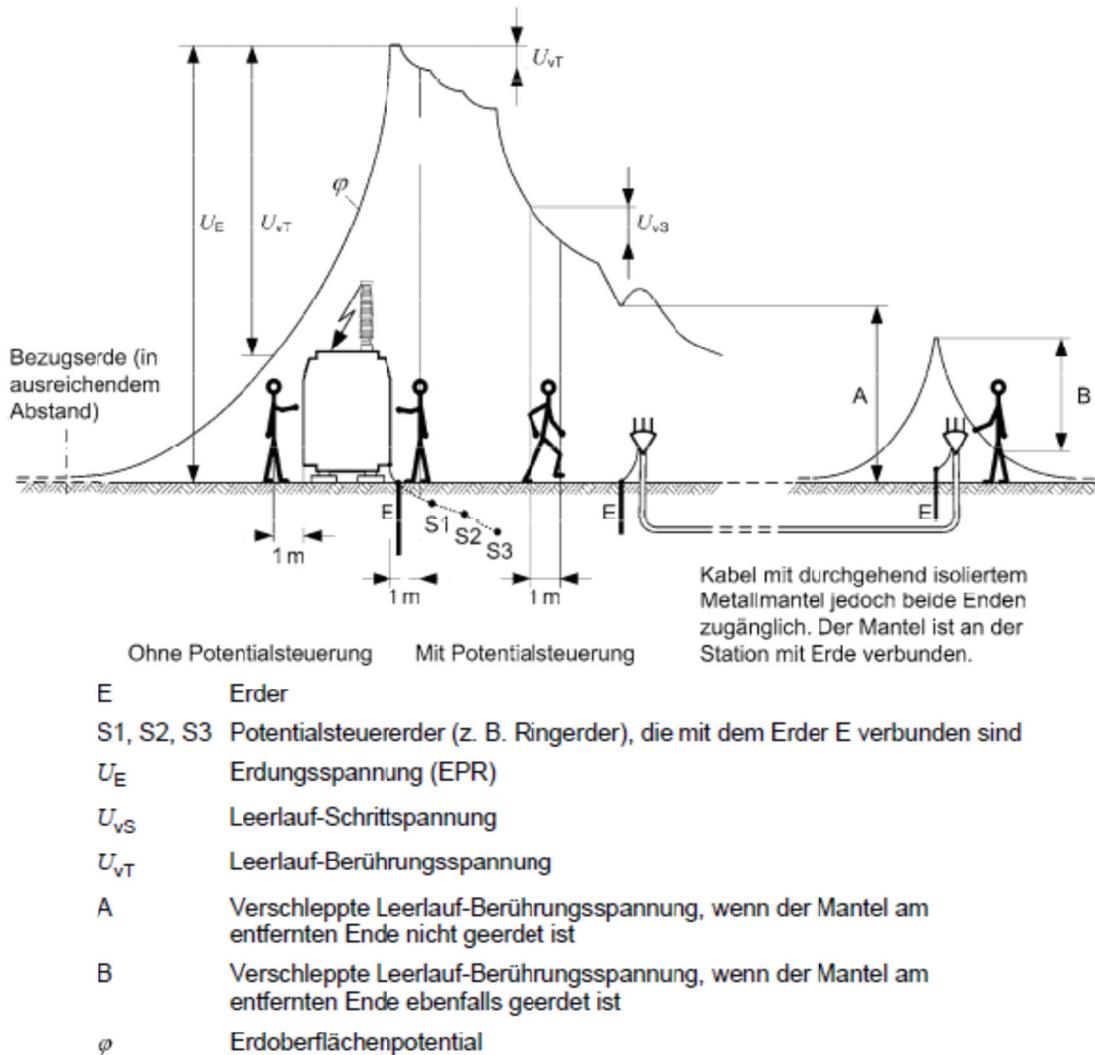
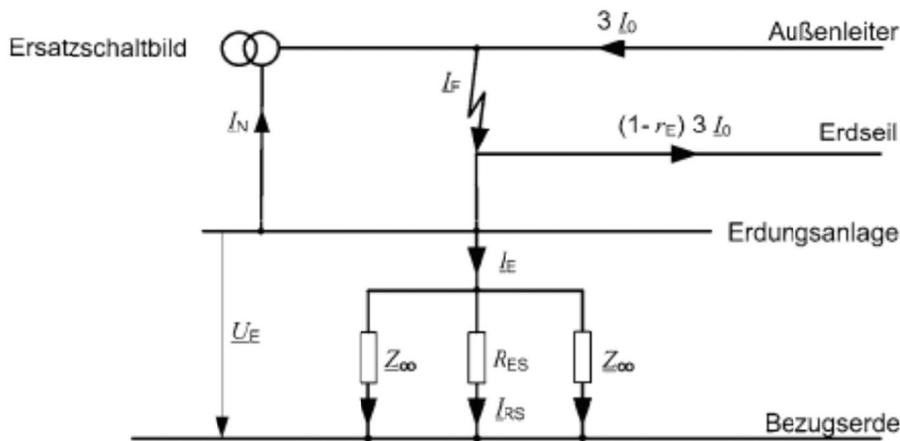
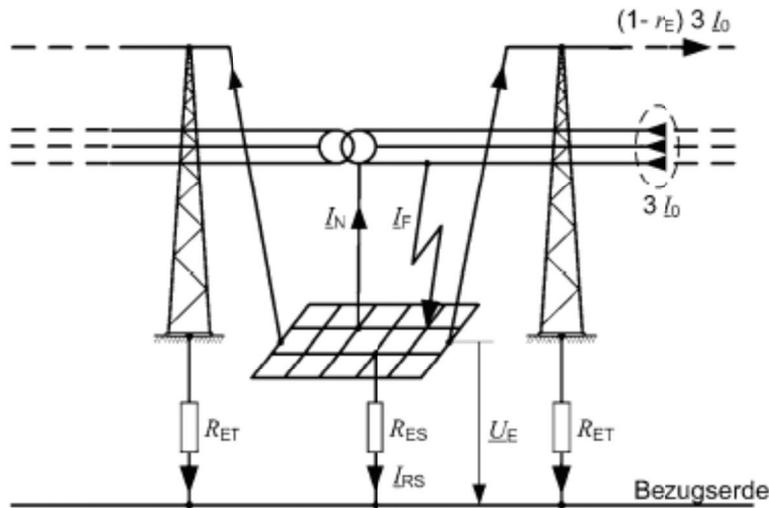


Bild 1 – Beispiel für den Verlauf des Erdoberflächenpotentials und für die Spannungen bei stromdurchflossenem Erder



$$I_F = 3 I_0 + I_N$$

$$I_E = r_E \cdot (I_F - I_N)$$

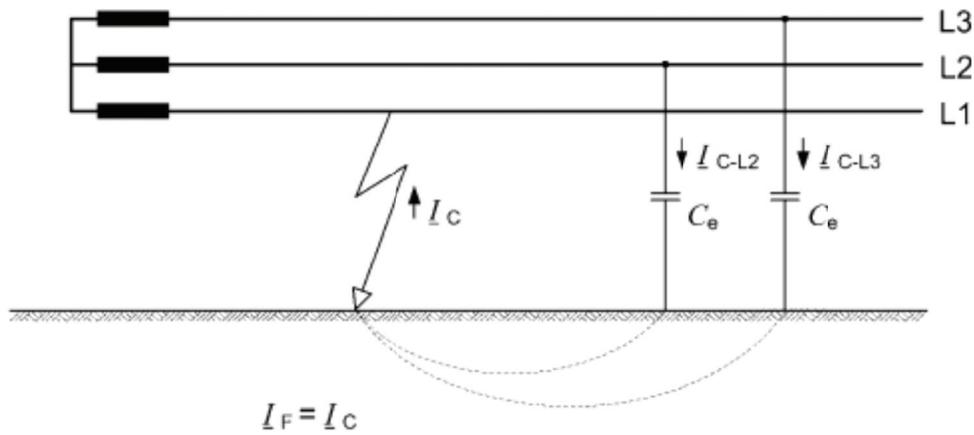
$$U_E = I_E \cdot Z_E$$

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + n \frac{1}{Z_{\infty}}}$$

Für gleiche Kettenleiter-
Impedanzen der
angeschlossenen Freileitungen

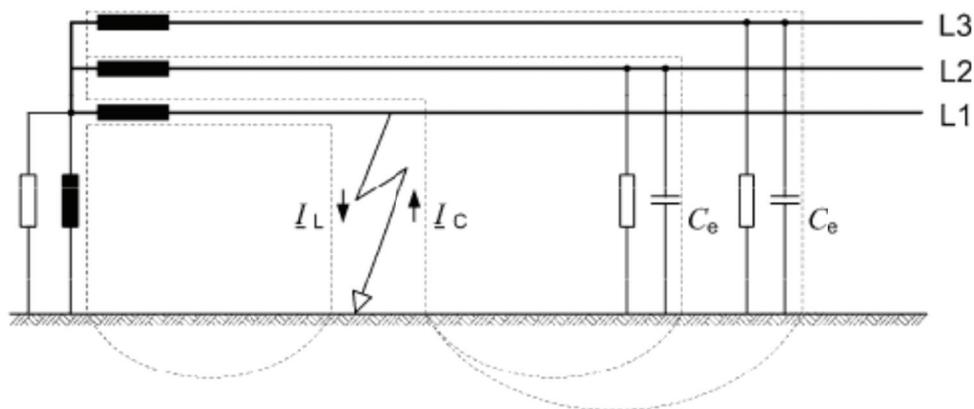
- $3I_0$ Dreifacher Nullstrom der Leitung
- I_N Über die Sternpunktterdung des Transformators fließender Strom
- I_F Erdfehlerstrom
- I_E Erdungsstrom (kann nicht direkt gemessen werden)
- I_{RS} Über den Ausbreitungswiderstand des Maschenerders fließender Strom
- r_E Reduktionsfaktor der Freileitung
- R_{ES} Ausbreitungswiderstand des Maschenerders
- R_{ET} Ausbreitungswiderstand des Mastes
- Z_{∞} Kettenleiterimpedanz (Erdseil/Mastfuß) der Freileitungen, als unendlich angenommen
- Z_E Erdungsimpedanz
- U_E Erdungsspannung
- n Anzahl der aus der Anlage führenden Freileitungen (hier: $n = 2$)

Bild 2 – Beispiel für Ströme, Spannungen und Widerstände bei einem Erdfehler in einer Umspannanlage mit niederohmiger Sternpunktterdung



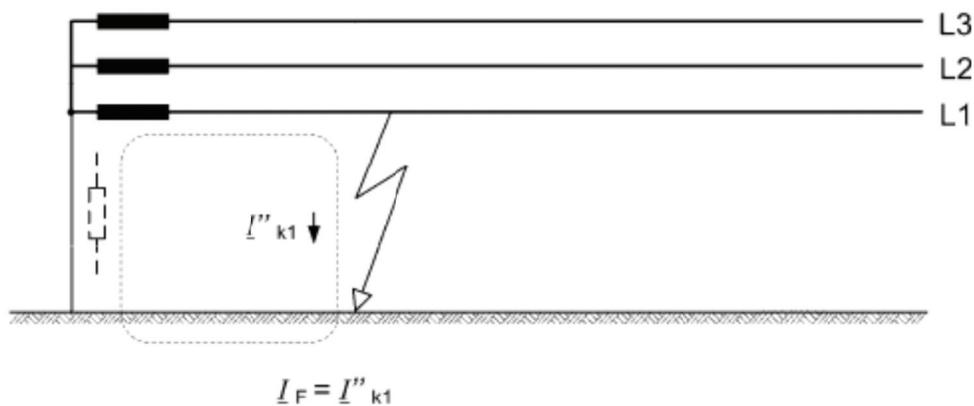
ANMERKUNG I_C kann einen ohmschen Anteil enthalten

a) Erdfehlerstrom in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt



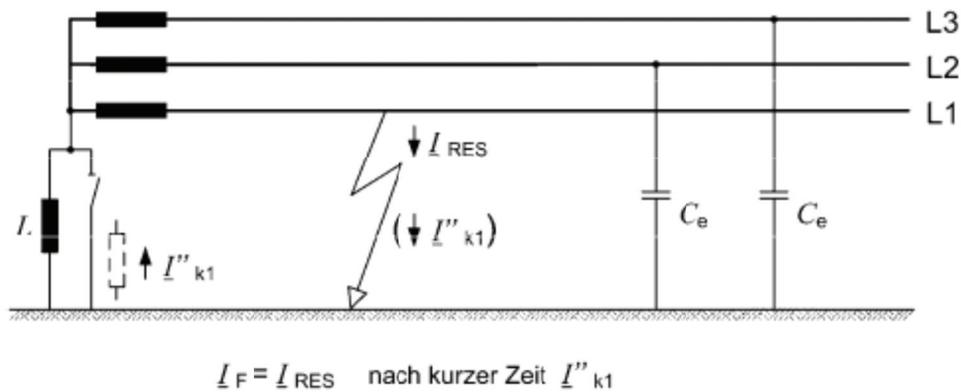
$$|I_F| = |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2}$$

b) Erdfehlerstrom in einem Netz mit Erdschlusskompensation

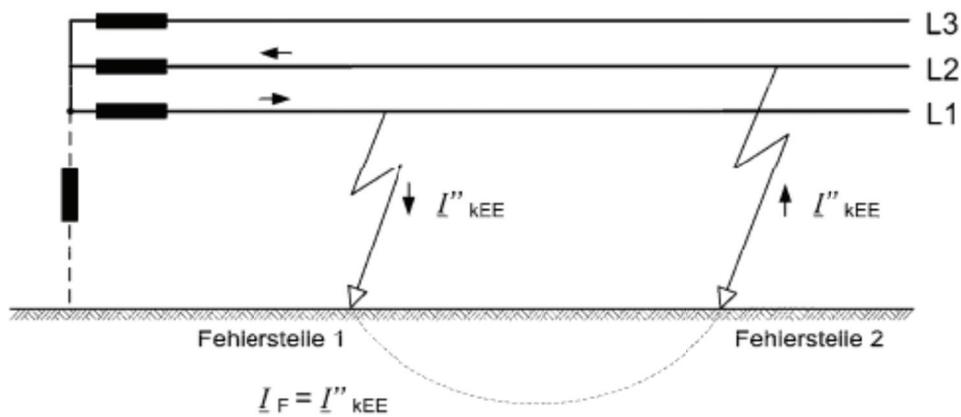


c) Erdfehlerstrom in einem Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung

ANMERKUNG Wenn I_C in der gleichen Größenordnung wie I''_{k1} ist, muss dieser Strom zusätzlich berücksichtigt werden.



d) Erdfehlerstrom in einem Netz mit Erdschlusskompensation und vorübergehender niederohmiger Sternpunktterdung (Kurzzeit-Erdung)



e) Doppelerdschlussstrom in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation

- \underline{I}_F Erdfehlerstrom
- \underline{I}_C Kapazitiver Erdungsstrom (komplexer Wert, einschließlich ohmscher Anteil)
- \underline{I}_L Summe der Ströme paralleler Erdschlusslöschspulen (komplexer Wert, einschließlich ohmscher Anteil)
- \underline{I}_H Oberschwingungsstrom (unterschiedliche Frequenzen)
- \underline{I}_{RES} Erdschlussreststrom
- \underline{I}''_{k1} Anfangskurzschlusswechselstrom für einpoligen Erdkurzschluss
- \underline{I}''_{KEE} Doppelerdschlussstrom

ANMERKUNG I_R ist der ohmsche Anteil der komplexen Größe $(\underline{I}_C + \underline{I}_L)$

Bild 3 – Die wesentlichen Komponenten der Erdfehlerströme in Hochspannungsnetzen

..4.2 Elektrische Anforderungen

..4.2.1 Arten der Sternpunktterdung

Die Art der Sternpunktterdung hat starken Einfluss auf die Größe und Dauer des Fehlerstromes. Weiterhin ist die Art der Sternpunktterdung eines Netzes wichtig für:

- *Wahl des Isolationspegels;*
- *Kennwerte von überspannungsbegrenzenden Einrichtungen, wie Funkenstrecken oder Überspannungsableitern;*
- *Auswahl von Schutzrelais;*
- *Planung der Erdungsanlage.*

Beispiele für Sternpunktterdungen sind:

- *Netz mit isoliertem Sternpunkt;*
- *Netz mit Erdschlusskompensation;*
- *Netz mit hochohmiger Sternpunktterdung;*
- *Netz mit niederohmiger Sternpunktterdung.*

Die Wahl der Sternpunktterdung berücksichtigt normalerweise folgende Kriterien:

- *örtliche Vorschriften (falls vorhanden);*
- *geforderte Versorgungssicherheit des Netzes;*
- *Begrenzung der Schäden an Betriebsmitteln durch Erdschlüsse;*
- *selektive Abschaltung fehlerhafter Netzteile;*
- *Feststellung der Fehlerstelle;*
- *Berührungs- und Schrittspannungen;*
- *induktive Beeinflussung;*
- *Betriebs- und Instandhaltungsgesichtspunkte.*

In einem galvanisch verbundenen Netz gibt es nur eine Art der Sternpunktterdung. Galvanisch nicht verbundene Netze können unterschiedliche Arten der Sternpunktterdung haben. Wenn unterschiedliche Sternpunktterdungen während des Normalbetriebs oder bei anormalen Betriebsbedingungen vorkommen können, müssen die Geräte und die Schutzeinrichtungen für diese Betriebsbedingungen ausgelegt sein.

Tabelle 1 – Maßgebende Ströme für die Bemessung von Erdungsanlagen

Art des Hochspannungsnetzes		Maßgebend für die thermische Belastung ^{a e}		Maßgebend für Erdungs- und Berührungsspannungen
		Erder	Erdungsleiter	
Netze mit isoliertem Sternpunkt				
		I_{KEE}	I_{KEE}	$I_E = r \times I_C^b$
Netze mit Erdschlusskompensation einschließlich Kurzzeit-Erdung zur Fehlerortung				
	In Anlagen ohne Erdschlussspule ^f	I_{KEE}	I_{KEE}	$I_E = r \times I_{RES}^b$
	In Anlagen mit Erdschlussspule	I_{KEE}	I_{KEE}^c	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2}^{b h}$
Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung einschließlich Kurzzeit-Erdung zur Abschaltung ^g				
	Anlagen ohne Sternpunktterdung	I_{k1}	I_{k1}	$I_E = r \times I_{k1}$
	Anlage mit Sternpunktterdung	I_{k1}	I_{k1}	$I_E = r \times (I_{k1} - I_N)^d$
<p>^a Sind mehrere Stromflusswege möglich, darf die sich ergebende Stromverteilung für die Auslegung des Erdernetzes berücksichtigt werden.</p> <p>^b Wenn eine automatische Abschaltung von Erdschlüssen nicht vorgesehen ist, ist die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von Doppelerdschlüssen abhängig von den Betriebserfahrungen.</p> <p>^c Erdungsleiter an Erdschlussspulen sind nach dem größten Strom der Spulen auszulegen.</p> <p>^d Es ist zu prüfen, ob außenliegende Fehler maßgeblich sind.</p> <p>^e Die Mindestquerschnitte im Anhang C müssen beachtet werden.</p> <p>^f Bei merklicher Verstimmung eines kompensierten Netzes kann die generelle Annahme von 10 % I_C nicht verwendet werden. Die Blindkomponente des Erdschlussreststromes ist zusätzlich zu berücksichtigen.</p> <p>^g Die Kurzzeit-Erdung von Netzen mit Erdschlusskompensation beginnt innerhalb von 5 s nach Feststellung des Erdschlusses.</p> <p>^h Im Falle eines Fehlers in der Anlage muss der kapazitive Erdungsstrom I_C berücksichtigt werden. Weitere Erdschlussspulen außerhalb der Anlage können berücksichtigt werden.</p>				
Legende für Tabelle 1:				
I_C Berechneter oder gemessener kapazitiver Erdschlussstrom.				
I_{RES} Erdschlussreststrom (siehe Bild 3b). Wenn der exakte Wert nicht bekannt ist, dürfen 10 % von I_C angenommen werden.				
I_L Summe der Bemessungsströme paralleler Erdschlussspulen der betrachteten Anlage.				
I_{KEE} Doppelerdschlussstrom, berechnet nach EN 60900 (für I_{KEE} dürfen 85 % des dreipoligen Anfangskurzschlusswechselstromes als Höchstwert verwendet werden).				
I_{k1} Anfangskurzschlusswechselstrom für einen einpoligen Erdkurzschluss, berechnet nach EN 60900.				
I_E Erdungsstrom (siehe Bild 2).				
I_N Strom über den Transformator-Sternpunkt (siehe Bild 2)				
r Reduktionsfaktor (siehe Anhang I).				
Wenn die aus der Anlage abgehenden Leitungen und Kabel unterschiedliche Reduktionsfaktoren haben, ist der maßgebende Strom zu bestimmen (nach Anhang L).				

..5.4 Bemessung im Hinblick auf Berührungsspannungen

..5.4.1 Zulässige Werte

Grenzwerte für Berührungsspannungen sind in Bild 4 angegeben, wie in 4.3 (Sicherheitskriterien) beschrieben.

Jedoch ist die Kurve in Bild 4 nur auf den Kontakt zwischen den bloßen Händen und Füßen bezogen. Es ist zulässig, das im Anhang A angegebene Rechenverfahren anzuwenden, um Zusatzwiderstände zu berücksichtigen z. B. Schuhwerk, hochohmiges Oberflächenmaterial.

Jeder Erdschluss wird automatisch oder von Hand abgeschaltet. Demnach treten als Folge von Erdfehlern keine Berührungsspannungen mit sehr langer oder zeitlich unbegrenzter Dauer auf.

..5.4.2 Maßnahmen zur Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen

Die Anwendung der grundlegenden Anforderungen ergibt die Grundausslegung der Erdungsanlage. Diese Auslegung ist hinsichtlich der Berührungsspannungen zu überprüfen und kann danach als eine typgeprüfte Ausführung bei vergleichbaren Randbedingungen angesehen werden.

Für die Werte der zulässigen Berührungsspannungen U_{Tp} ist Bild 4 zu verwenden. Diese Anforderung bezüglich der Berührungsspannungen wird als erfüllt angesehen, wenn

- entweder eine der Voraussetzungen C erfüllt ist:
 - C1: Die betreffende Anlage ist Teil eines Globalen Erdungssystems.
 - C2: Die durch Messung oder Berechnung ermittelte Erdungsspannung überschreitet nicht den zweifachen Wert der zulässigen Berührungsspannung nach Bild 4.
- oder die zutreffenden anerkannten festgelegten Maßnahmen M in Abhängigkeit von der Höhe der Erdungsspannung und der Fehlerdauer durchgeführt wurden. Diese Maßnahmen werden im Anhang E beschrieben.

Zusatzwiderstände können berücksichtigt werden, um nach Anhang A und Anhang B die zulässige Leerlauf-Berührungsspannung U_{vTp} zu bestimmen.

Ein Flussdiagramm dieses Auslegungsablaufs ist in Bild 5 enthalten.

Wenn weder die Bedingungen C erfüllt, noch die anerkannten festgelegten Maßnahmen M durchgeführt sind, muss die Einhaltung der zulässigen Berührungsspannung U_{Tp} nach Bild 4 überprüft werden, im Allgemeinen durch Messungen.

Alternativ dazu darf eine typgeprüfte Ausführung angewendet werden, die sicherstellt, dass alle Anforderungen nach 5.4.1 erfüllt sind.

ANMERKUNG Als Alternative zur Anwendung der Voraussetzungen C und der anerkannten festgelegten Maßnahmen M können die Berührungsspannungen durch Messungen vor Ort überprüft werden.

Potentialverschleppungen müssen immer zusätzlich überprüft werden.

Die Erdungs- und Berührungsspannungen einer Erdungsanlage dürfen aus bekannten Daten (spezifischer Erdwiderstand, Erdungsimpedanz von vorhandenen Erdungsanlagen, siehe Anhang J) errechnet werden. Für die Berechnung dürfen alle Erder und sonstigen Erdungsanlagen berücksichtigt werden, die bei ausreichender Strombelastbarkeit mit der betreffenden Erdungsanlage zuverlässig verbunden sind. Das gilt insbesondere für angeschlossene Freileitungserdseile, Bodenseile und Kabel mit Erderwirkung. Das gilt auch für Erdungsanlagen, die mit der betrachteten Erdungsanlage über Kabelmäntel oder -schirme, PEN-Leiter oder auf andere Weise verbunden sind.

Für den rechnerischen Nachweis mit Hilfe von Bild J.3 dürfen alle Kabel mit Erderwirkung berücksichtigt werden, sofern sie auf nicht mehr als vier Trassen verlegt sind. Diese Kabel können Netzen mit unterschiedlichen Nennspannungen angehören.

ANMERKUNG Bei mehr als vier Trassen darf die gegenseitige Beeinflussung nicht vernachlässigt werden; daher sollen aus den vorhandenen Trassen nur vier ausgewählt werden. Bei mehreren Kabeln in einer Trasse kann nur eine Länge berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung von Erdungs- und Berührungsspannungen sind die Ströme nach Tabelle 1 maßgebend.

Für den Nachweis durch Messung ist Abschnitt 8 (unter Berücksichtigung von Anhang H und Anhang L) zu beachten.

..5.4.3 Auslegungsverfahren

Die Auslegung einer Erdungsanlage kann wie folgt durchgeführt werden:

- a) Datenerfassung, z. B. Erdfehlerstrom, Fehlerdauer und räumliche Anordnung;
- b) Erstentwurf der Erdungsanlage unter Berücksichtigung der funktionalen Anforderungen;
- c) Feststellen, ob ein globales Erdungssystem vorliegt;
- d) Wenn nicht: Bestimmung der Bodenkennwerte, z. B. spezifischer Widerstand der Erdschichten;
- e) Bestimmung des Erdfehlerstromanteils, der im Bereich der Erdungsanlage in das Erdreich eintritt;
- f) Bestimmung der Gesamtimpedanz zur Erde, basierend auf der Anlagengestaltung, den Bodeneigenschaften und den parallelen Erdungsanlagen;
- g) Bestimmung der Erdungsspannung (EPR);
- h) Bestimmung der zulässigen Berührungsspannung;
- i) Die Auslegung ist abgeschlossen, wenn die Erdungsspannung (EPR) kleiner als die zulässige Berührungsspannung ist und die Anforderungen der Tabelle 2 erfüllt sind;

ANMERKUNG Die Auslegung ist auch abgeschlossen, wenn die Erdungsspannung (EPR) kleiner als $2 U_{Tp}$ ist, nach 5.4.2

- j) Falls nicht, ist festzustellen ob die Berührungsspannungen innerhalb und am Rande der Erdungsanlage unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen;
- k) Prüfung, ob Potentialverschleppungen eine Gefährdung außerhalb oder innerhalb der Starkstromanlage darstellen. Falls ja, sind Abminderungen an den exponierten Stellen vorzusehen;
- l) Prüfung, ob Niederspannungsbetriebsmittel einer besonders hohen Spannungsbeanspruchung ausgesetzt werden. Falls ja, sind Abminderungsmaßnahmen vorzusehen, zu denen die Trennung der Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen zählt;

m) Prüfung, ob durch Sternpunktausgleichsströme der Transformatoren große Potentialdifferenzen innerhalb der Erdungsanlage entstehen können. Falls ja, sind geeignete Abminderungsmaßnahmen vorzusehen.

Wenn die zuvor genannten Kriterien erfüllt sind, kann, falls notwendig, die Auslegung durch Wiederholen der obigen Bearbeitungsschritte verfeinert werden. Eine detaillierte Auslegung ist erforderlich um sicherzustellen, dass sämtliche zugänglichen leitfähigen Teile der elektrischen Betriebsmittel geerdet werden. Fremde leitfähige Teile müssen, falls erforderlich, geerdet werden.

Konstruktionsteile mit Erderwirkung müssen mit der Erdungsanlage verbunden werden und sind somit Teil der Erdungsanlage. Falls sie nicht verbunden werden, muss nachgewiesen werden, dass alle Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.

Metallteile mit kathodischem Schutz können von der Erdungsanlage getrennt werden. Es sind Vorkehrungen, wie Kennzeichnung, zu treffen, um sicherzustellen, dass, wenn solche Maßnahmen ergriffen wurden, diese nicht durch Instandhaltungsarbeiten oder Änderungen unabsichtlich aufgehoben werden.

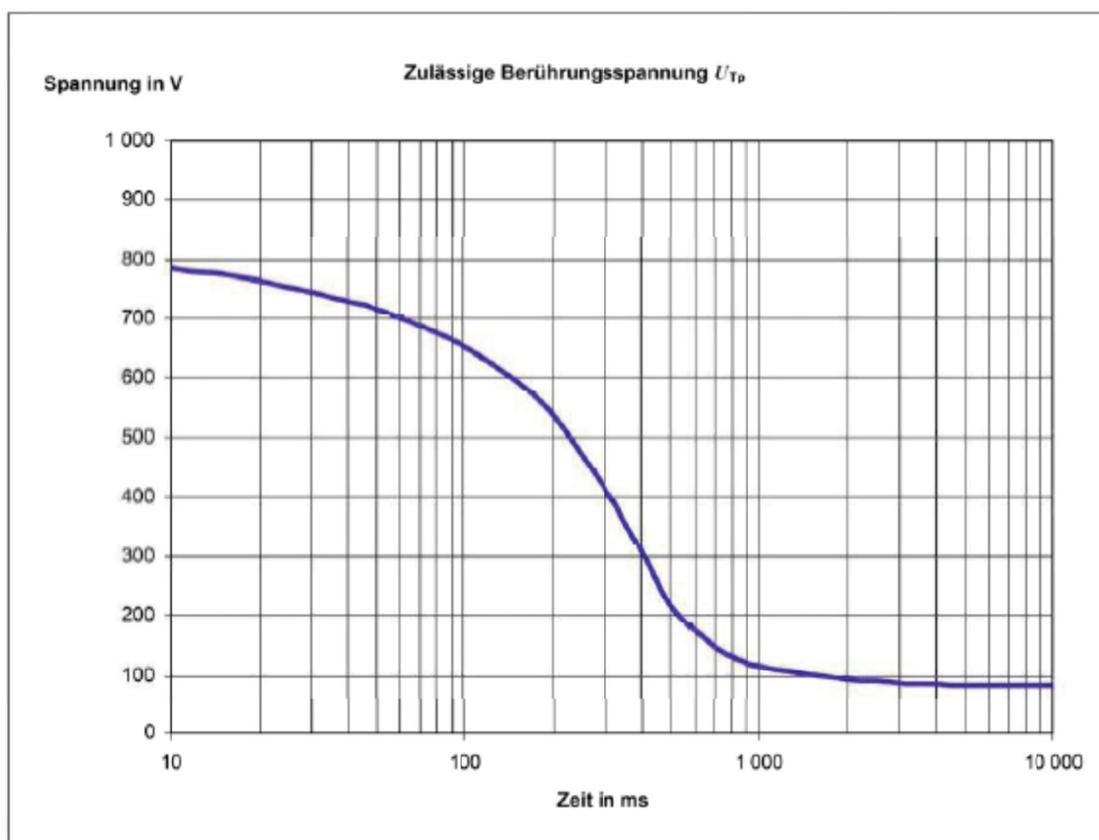


Bild 4 – Zulässige Berührungsspannung

ANMERKUNG Für eine Stromflussdauer beträchtlich länger als 10 s kann als zulässige Berührungsspannung U_{Tp} ein Wert von 80 V verwendet werden.

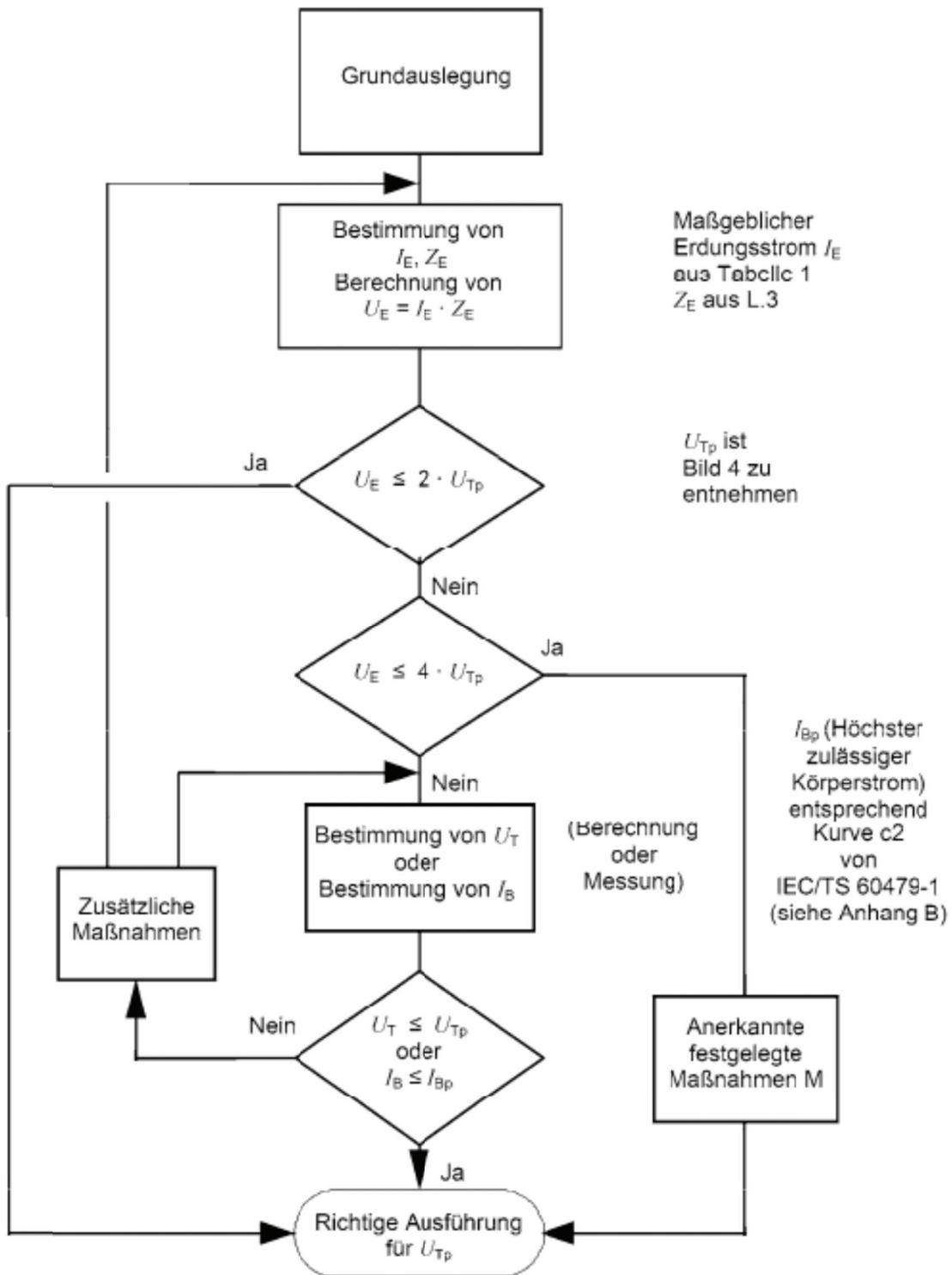


Bild 5 – Auslegung von Erdungsanlagen, die nicht Teil eines Globalen Erdungssystems (C1 von 5.4.2) sind, im Hinblick auf zulässige Berührungsspannung U_{Tp} durch Überprüfung der Erdungsspannung U_E oder der Berührungsspannung U_T

..6 Maßnahmen zur Vermeidung von Potentialverschleppung

..6.1 Potentialverschleppung von Hochspannungsanlagen zu Niederspannungsanlagen

..6.1.1 Erdungsanlagen für Hoch- und Niederspannung

Wenn Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen dicht nebeneinander liegen und nicht ein globales Erdungssystem bilden, kann ein Teil der Erdungsspannung (EPR) in das Niederspannungssystem übertragen werden.

Zwei Methoden werden zur Zeit verwendet:

- a) Zusammenschluss aller Hochspannungs-Erdungsanlagen mit den Niederspannungs-Erdungsanlagen;
- b) Trennung der Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen.

In jedem Fall müssen die nachstehenden Anforderungen an Berührungsspannungen, Schrittspannungen und Potentialverschleppung in der Hochspannungsanlage und in der von ihr versorgten Niederspannungsanlage erfüllt werden.

ANMERKUNG Wenn machbar, ist vorzugsweise der Zusammenschluss anzuwenden.

..6.1.2 Niederspannungsversorgung nur innerhalb der Hochspannungsanlage

Wenn sich das Niederspannungsnetz nur innerhalb des Bereiches des Hochspannungsnetzes befindet, müssen beide Erdungsanlagen zusammengeschlossen werden, auch wenn dort kein globales Erdungssystem vorhanden ist.

..6.1.3 Niederspannungsversorgung mit Zu-/Ableitung außerhalb der Hochspannungsanlage

Die Anforderungen werden vollständig erfüllt, wenn die Hochspannungs-Erdungsanlage Teil eines globalen Erdungssystems ist oder mit einem mehrfach geerdeten Neutralleiter des Hochspannungsnetzes in einem symmetrischen System verbunden ist. Wenn kein globales Erdungssystem vorliegt, müssen die Minimal-Anforderungen aus Tabelle 2 angewendet werden, um denjenigen Sachverhalt festzustellen, bei dem ein Zusammenschluss von Erdungsanlagen mit Niederspannungsversorgungen außerhalb der Hochspannungsanlage möglich ist.

Bei einer Trennung von Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen muss durch die Verwendung von getrennten Erden gewährleistet sein, dass keine Gefahr für Personen oder Betriebsmittel in der Niederspannungsanlage auftreten kann. Das bedeutet, dass Schrittspannung, Berührungsspannung sowie Potentialverschleppung und Beanspruchungsspannung in der Niederspannungsanlage, die durch einen Hochspannungsfehler hervorgerufen werden, unter den entsprechenden Grenzwerten bleiben müssen.

ANMERKUNG Für Anlagen mit einer Bemessungsspannung unter 50 kV wird in vielen Fällen ein Abstand von 20 m zwischen getrennten Erdungsanlagen angewendet. Andere Werte können für bestimmte Erdbodenverhältnisse zutreffend sein.

..6.1.4 Niederspannung in der Nähe von Hochspannungsanlagen

Niederspannungsanlagen, die sich im Einflussbereich von Hochspannungs-Erdungsanlagen befinden, sollten besonders beachtet werden.

Bei industriellen und gewerblichen Anlagen kann eine gemeinsame Erdungsanlage verwendet werden. Unter Berücksichtigung der unmittelbaren Nähe der Geräte ist es nicht möglich, die Erdungsanlagen zu trennen.

Tabelle 2 – Minimalanforderungen für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs-Erdungsanlagen basierend auf der Erdungsspannung (EPR)

Art des Niederspannungssystems ^{a, b}		Anforderungen zur Erdungsspannung (EPR)		
		Berührungsspannung	Beanspruchungsspannung ^c	
			Fehlerdauer $t_f \leq 5 \text{ s}$	Fehlerdauer $t_f > 5 \text{ s}$
TT		nicht zutreffend	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$
TN		$EPR \leq F \times U_{Tp}^{d, e}$	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$
IT	Gleichmäßig verteilter PE-Leiter	wie im TN System	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$
	PE-Leiter nicht gleichmäßig verteilt	nicht zutreffend	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$

^a Definition der Arten der Niederspannungssysteme siehe **HD 60364-1**.

^b Für Telekommunikationsanlagen sollten die ITU-Richtlinien beachtet werden.

^c Der Grenzwert kann angehoben werden, wenn geeignete Niederspannungsgeräte eingebaut sind oder wenn die Erdungsspannung (EPR) durch gemessene oder berechnete Potentialdifferenzen für diesen Ort ersetzt wird.

^d Wenn der PEN-Leiter oder Neutralleiter des Niederspannungssystems nur mit der Hochspannungs-Erdungsanlage verbunden ist, muss für F der Wert 1 sein.

^e U_{Tp} ist abgeleitet von **Bild 4**

ANMERKUNG Der typische Wert für F ist 2. Größere Werte für F können verwendet werden, wenn zusätzliche Verbindungen zwischen PEN-Leiter und Erde vorhanden sind. Bei bestimmten Bodenschichtungen kann der Wert für F bis zu 5 betragen. Vorsicht ist geboten, wenn diese Regel bei Böden mit großen Unterschieden im spezifischem Widerstand und einer oberen Lage mit höherem spezifischem Widerstand angewendet wird. Die Berührungsspannung kann in diesem Fall 50 % der Erdungsspannung (EPR) überschreiten.

Anhang B
(normativ)

Berührungsspannung und Körperstrom

..B.1 Berechnung der zulässigen Berührungsspannung

Zur Berechnung von zulässigen Werten der Berührungsspannung in Hochspannungsanlagen werden folgende Annahmen gemacht:

- Stromweg über eine Hand und beide Füße;
- 50 % Wahrscheinlichkeit für den Wert der Körperimpedanz;
- 5 % Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Herzkammerflimmern;
- keine zusätzlichen Widerstände.

ANMERKUNG Diese Annahmen ergeben unter Berücksichtigung von Erfahrungen, besonders ausgebildetem Personal, vertretbaren Kosten usw. eine Berührungsspannungskurve mit einem Restrisiko, das bei Erdfehlern in einer Hochspannungsanlage akzeptiert werden kann.

Unter der Annahme, dass die Grundlage für Berechnungen im Zusammenhang mit Körperströmen die IEC/TS 60479-1 ist und bei Berücksichtigung von Kurve c2 in Bild 20 und Tabelle 11 der IEC/TS 60479-1 (Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern kleiner als 5 % bei einem Stromweg linke Hand gegen beide Füße) als zulässige Grenze für den Strom, ergibt sich folgende Tabelle B.1:

Tabelle B.1 – Höchster zulässiger Körperstrom I_B in Abhängigkeit von der Fehlerdauer t_f

Fehlerdauer s	Körperstrom mA
0,05	900
0,10	750
0,20	600
0,50	200
1,00	80
2,00	60
5,00	51
10,00	50

Um nun die zutreffenden zulässigen Berührungsspannungen zu erhalten, ist es erforderlich, die Gesamtkörperimpedanz zu bestimmen. Diese Impedanz ist abhängig von der Berührungsspannung und vom Stromweg; für den Stromweg Hand zu Hand oder Hand zu einem Fuß werden in IEC/TS 60479-1 Werte angegeben, aus denen die nachfolgende Tabelle B.2 abgeleitet wurde (Wahrscheinlichkeit von 50 %, dass die Körperimpedanzen kleiner oder gleich im Vergleich zu den angegebenen Werten sind):

Tabelle B.2 – Gesamtkörperimpedanz Z_T in Abhängigkeit von der Berührungsspannung U_T für einen Stromweg Hand zu Hand

Berührungsspannung V	Gesamtkörperimpedanz Ω
25	3 250
50	2 500
75	2 000
100	1 725
125	1 550
150	1 400
175	1 325
200	1 275
225	1 225
400	950
500	850
700	775
1 000	775

Wegen der Berücksichtigung eines Stromweges Hand gegen beide Füße muss ein Korrekturfaktor 0,75 für die Körperimpedanz verwendet werden (Bild 3 der IEC/TS 60479-1). Bei Verknüpfung der beiden Tabellen und Berücksichtigung dieses Korrekturfaktors ist es mit einem Iterationsverfahren möglich, die Grenze für die Berührungsspannung für jede Fehlerdauer zu berechnen. Das Ergebnis in Bild 4 basiert auf dem gewichteten Durchschnitt (Anmerkung in Anhang A). In Tabelle B.3 sind Werte einiger Punkte der Kurve aus Bild 4 dargestellt.

Tabelle B.3 – Berechnete Werte der zulässigen Berührungsspannung U_{Tp} in Abhängigkeit von der Fehlerdauer t_f

Fehlerdauer t_f s	Zulässige Berührungsspannung U_{Tp} V
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

ANMERKUNG 1 Für besondere Bedingungen kann die Berührungsspannung bezogen auf den tatsächlichen Strompfad bestimmt werden.

ANMERKUNG 2 Für eine Stromflussdauer beträchtlich länger als 10 s kann als zulässige Berührungsspannung U_{Tp} ein Wert von 80 V verwendet werden.

1.3.4 ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2011-12-01: Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV -- Teil 1: Allgemeine Bestimmungen

Gemeinsam ÖVE/ÖNORM EN 50522 Ersatz für die ÖVE/ÖNORM E 8383.
Die ÖVE/ÖNORM E 8383 ist Ersatz für: ÖVE-EH 1:1982 und ÖVE-EH 1a:1987

..10 Erdungsanlagen

..10.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt enthält die Anforderungen an Planung, Errichtung, Prüfung und Instandhaltung von Erdungsanlagen, damit diese unter allen Bedingungen wirksam sind und die Sicherheit von Personen an jedem Ort, zu dem sie berechtigten Zutritt haben, gewährleistet ist. Der Abschnitt enthält auch die Anforderungen mit denen die Funktionsfähigkeit von Betriebsmitteln, die an die Erdungsanlage angeschlossen sind oder sich in deren Nähe befinden, aufrechterhalten wird.

..10.2 Grundlegende Anforderungen

..10.2.1 Sicherheitskriterien

Für Personen besteht die Gefahr, dass ein Strom durch die Herzregion fließt, der groß genug ist, um Herzkammerflimmern hervorzurufen. Die Grenzwerte für betriebsfrequente Vorgänge sind von der zutreffenden Kurve in IEC/TS 60479-1:2005 abgeleitet. Diese Grenzwerte für Körperströme sind unter Berücksichtigung der nachstehenden Faktoren in Spannungsgrenzwerte umgewandelt worden, um mit den berechneten Schritt- und Berührungsspannungen verglichen werden zu können:

- Anteil des Stromes, der durch die Herzregion fließt;
- Körperimpedanz entlang des Strompfades;
- Übergangswiderstand an den Berührungspunkten des Körpers, z. B. Metallkörper zu Hand (einschließlich Handschuhe), Bezugserde zu Fuß (einschließlich Schuhe oder Kies);
- Fehlerdauer.

Es ist ergänzend festzustellen, dass dem Auftreten eines Fehlers, der Größe des Fehlerstromes, der Fehlerdauer und der Anwesenheit von Personen unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zugrunde liegen.

Für die Anlagenplanung ist die Kurve in Bild 12 nach dem in Anhang B festgelegten Verfahren berechnet.

ANMERKUNG Die Kurve ist auf Daten aus IEC/TS 60479-1:2005 bezogen:

- Körperimpedanz aus IEC/TS 60479-1:2005, Tabelle 1 (nicht übertroffen bei 50 % der Bevölkerung);
- zulässiger Körperstrom entsprechend der Kurve c_2 aus IEC/TS 60479-1:2005, Bild 20 und Tabelle 11 (Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern kleiner als 5 %);
- Herzstromfaktor nach IEC/TS 60479-1:2005, Tabelle 12.

Die Kurve in Bild 12, welche die zulässige Berührungsspannung darstellt, sollte verwendet werden. Anhang C zeigt die Kurve aus IEEE 80 [34], die als Alternative zur Kurve in Bild 12 angewendet werden kann.

Anhang C und Anhang D sind für CENELEC nur informativ. Einzelheiten über die zulässigen Berührungsspannungen sind in EN 50522 enthalten.

In der Regel werden die Anforderungen zur Schrittspannung erfüllt, wenn die Anforderungen zur Berührungsspannung eingehalten werden, da die zulässigen Schrittspannungswerte, wegen der unterschiedlichen Strompfade durch den Körper, sehr viel größer als die Berührungsspannungswerte sind.

Für Anlagen, bei denen die Hochspannungsbetriebsmittel nicht in einer abgeschlossenen elektrischen Betriebsstätte angeordnet sind, z. B. in industrieller Umgebung, sollte ein globales Erdungssystem verwendet werden, um zu verhindern, dass die Berührungsspannungen, verursacht durch Hochspannungsfehler, die Niederspannungs-Grenzwerte aus IEC 60364-4-41 (z. B. 50 V) [17] überschreiten.

..10.2.3 Erdungsanlagen für Hoch- und Niederspannung

Wenn Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen dicht nebeneinander liegen und nicht ein globales Erdungssystem bilden, kann ein Teil der Erdungsspannung (EPR) in das Niederspannungssystem übertragen werden.

Zwei Methoden werden zurzeit verwendet:

- a) Zusammenschluss aller Hochspannungs-Erdungsanlagen mit den Niederspannungs-Erdungsanlagen;
- b) Trennung der Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen.

In jedem Fall müssen die nachstehenden Anforderungen an Berührungsspannungen, Schrittspannungen und Potentialverschleppung in der Hochspannungsanlage und in der von ihr versorgten Niederspannungsanlage erfüllt werden.

ANMERKUNG Wenn machbar, ist vorzugsweise der Zusammenschluss anzuwenden.

..10.2.3.1 Niederspannungsversorgung nur innerhalb der Hochspannungsanlage

Wenn sich das Niederspannungsnetz nur innerhalb des Bereiches des Hochspannungsnetzes befindet, müssen beide Erdungsanlagen zusammengeschlossen werden, auch wenn dort kein globales Erdungssystem vorhanden ist.

..10.2.3.2 Niederspannungsversorgung mit Zu-/Ableitung außerhalb der Hochspannungsanlage

Die Anforderungen werden vollständig erfüllt, wenn die Hochspannungs-Erdungsanlage Teil eines globalen Erdungssystems ist oder mit einem mehrfach geerdeten Neutralleiter des Hochspannungsnetzes in einem symmetrischen System verbunden ist. Wenn kein globales Erdungssystem vorliegt, müssen die Minimal-Anforderungen aus Tabelle 5 angewendet werden, um denjenigen Sachverhalt festzustellen, bei dem ein Zusammenschluss von Erdungsanlagen mit Niederspannungsversorgungen außerhalb der Hochspannungsanlage möglich ist.

Bei einer Trennung von Hochspannungs- und Niederspannungs-Erdungsanlagen muss durch die Verwendung von getrennten Erden gewährleistet sein, dass keine Gefahr für Personen oder Betriebsmittel in der Niederspannungsanlage auftreten kann. Das bedeutet, dass Schrittspannung, Be-

rührungsspannung sowie Potentialverschleppung und Beanspruchungsspannung in der Niederspannungsanlage, die durch einen Hochspannungsfehler hervorgerufen werden, unter den entsprechenden Grenzwerten bleiben müssen.

..10.2.3.3 Niederspannung in der Nähe von Hochspannungsanlagen

Niederspannungsanlagen, die sich im Einflussbereich von Hochspannungs-Erdungsanlagen befinden, sollten besonders beachtet werden.

Bei industriellen und gewerblichen Anlagen kann eine gemeinsame Erdungsanlage verwendet werden. Unter Berücksichtigung der unmittelbaren Nähe der Geräte ist es nicht möglich, die Erdungsanlagen zu trennen.

Tabelle 5 – Minimalanforderungen für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs-Erdungsanlagen basierend auf der Erdungsspannung (EPR)

Art des Niederspannungssystems ^{a, b}		Anforderungen zur Erdungsspannung (EPR)		
		Berührungsspannung	Beanspruchungsspannung ^c	
			Fehlerdauer $t_f \leq 5 \text{ s}$	Fehlerdauer $t_f > 5 \text{ s}$
TT		nicht zutreffend	EPR $\leq 1\,200 \text{ V}$	EPR $\leq 250 \text{ V}$
TN		$EPR \leq F \cdot U_{Tp}$ ^{d, e}	EPR $\leq 1\,200 \text{ V}$	EPR $\leq 250 \text{ V}$
IT	Gleichmäßig verteilter PE-Leiter	wie im TN System	EPR $\leq 1\,200 \text{ V}$	EPR $\leq 250 \text{ V}$
	PE-Leiter nicht gleichmäßig verteilt	nicht zutreffend	EPR $\leq 1\,200 \text{ V}$	EPR $\leq 250 \text{ V}$

^a Definition der Arten der Niederspannungssysteme siehe IEC 60364-1.

^b Für Telekommunikationsanlagen sollten die ITU-Richtlinien beachtet werden.

^c Der Grenzwert kann angehoben werden, wenn geeignete Niederspannungsgeräte eingebaut sind oder wenn die Erdungsspannung (EPR) durch gemessene oder berechnete Potentialdifferenzen für diesen Ort ersetzt wird.

^d Wenn der PEN-Leiter oder Neutralleiter des Niederspannungssystems nur mit der Hochspannungs-Erdungsanlage verbunden ist, muss für F der Wert 1 sein.

^e U_{Tp} ist abgeleitet von Bild 12.

ANMERKUNG Der typische Wert für F ist 2. Größere Werte für F können verwendet werden, wenn zusätzliche Verbindungen zwischen PEN-Leiter und Erde vorhanden sind. Bei bestimmten Bodenschichtungen kann der Wert für F bis zu 5 betragen. Vorsicht ist geboten, wenn diese Regel bei Böden mit großen Unterschieden im spezifischem Widerstand und einer oberen Lage mit höherem spezifischem Widerstand angewendet wird. Die Berührungsspannung kann in diesem Fall 50 % der Erdungsspannung (EPR) überschreiten.

..10.3 Auslegung von Erdungsanlagen

..10.3.1 Allgemeines

Die Auslegung einer Erdungsanlage kann wie folgt durchgeführt werden:

- a) Datenerfassung, z. B. Erdfehlerstrom, Fehlerdauer und räumliche Anordnung;
- b) Erstentwurf der Erdungsanlage unter Berücksichtigung der funktionalen Anforderungen;
- c) Feststellen, ob ein globales Erdungssystem vorliegt;
- d) wenn nicht: Bestimmung der Bodenkennwerte, z. B. spezifischer Widerstand der Erdschichten;
- e) Bestimmung des Erdfehlerstromanteils, der im Bereich der Erdungsanlage in das Erdreich eintritt;
- f) Bestimmung der Gesamtimpedanz zur Erde, basierend auf der Anlagengestaltung, den Bodeneigenschaften und den parallelen Erdungsanlagen;
- g) Bestimmung der Erdungsspannung (EPR);
- h) Bestimmung der zulässigen Berührungsspannung;
- i) die Auslegung ist abgeschlossen, wenn die Erdungsspannung (EPR) kleiner als die zulässige Berührungsspannung ist und wenn die Anforderungen der Tabelle 5 erfüllt sind;
- j) falls nicht, ist festzustellen ob die Berührungsspannungen innerhalb und am Rande der Erdungsanlage unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen;
- k) Prüfung, ob Potentialverschleppungen eine Gefährdung außerhalb oder innerhalb der Starkstromanlage darstellen. Falls ja, sind Abminderungen an den exponierten Stellen vorzusehen;
- l) Prüfung, ob Niederspannungsbetriebsmittel einer besonders hohen Spannungsbeanspruchung ausgesetzt werden. Falls ja, sind Abminderungsmaßnahmen vorzusehen, zu denen die Trennung der Hochspannung- und Niederspannungs-Erdungsanlagen zählt;
- m) Prüfung, ob durch Sternpunktgleichsströme der Transformatoren große Potentialdifferenzen innerhalb der Erdungsanlage entstehen können. Falls ja, sind geeignete Abminderungsmaßnahmen vorzusehen.

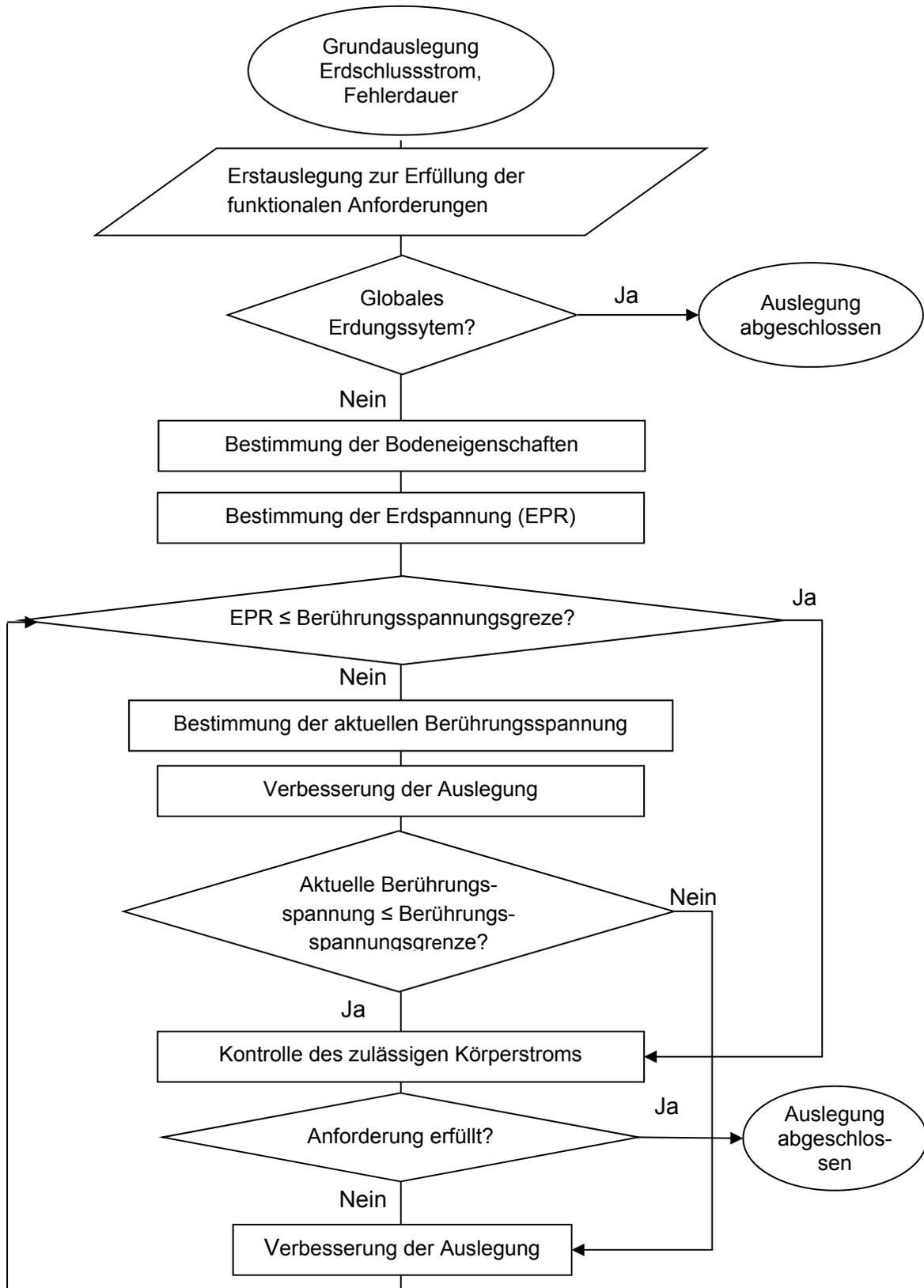
Wenn die zuvor genannten Kriterien erfüllt sind, kann, falls notwendig, die Auslegung durch Wiederholen der obigen Bearbeitungsschritte verfeinert werden. Eine detaillierte Auslegung ist erforderlich, um sicherzustellen, dass sämtliche zugänglichen leitfähigen Teile der elektrischen Betriebsmittel geerdet werden. Fremde leitfähige Teile müssen, falls erforderlich, geerdet werden.

Ein Ablaufdiagramm des Auslegungsvorgangs ist in Anhang D enthalten.

Konstruktionsteile mit Erderwirkung müssen mit der Erdungsanlage verbunden werden und sind somit Teil der Erdungsanlage. Falls sie nicht verbunden werden, muss nachgewiesen werden, dass alle Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.

Metallteile mit kathodischem Schutz können von der Erdungsanlage getrennt werden. Es sind Vorkehrungen, wie Kennzeichnung, zu treffen, um sicherzustellen, dass, wenn solche Maßnahmen ergriffen wurden, diese nicht durch Instandhaltungsarbeiten oder Änderungen unabsichtlich aufgehoben werden.

Anhang D (informativ)
Auslegung von Erdungsanlagen (Flussdiagramm)



1.3.5 ÖVE/ÖNORM EN 50423: Freileitungen AC 1 kV bis einschließlich AC 45 kV

Erdungsanlagen

Zweck

Hinsichtlich Bemessung, Einbau und Prüfung von Erdungsanlagen müssen Freileitungen mit Nennspannung über AC 1 kV bis einschließlich AC 45 kV entsprechend EN50341-1 und den zugehörigen NNA gestaltet werden.

Erstellen von Erdungsanlagen

Einbau von Erdern und Erdungsleitungen

AT.1: Für Bemessung, Umfang und Ausführung der Erdungsanlage bestehen technische Bestimmungen (siehe ÖVE-EH 41).

AT.2: Bei Holzmasten ist außerdem zu beachten:

- (1) Im Allgemeinen sind die Isolatorenträger an Holzmasten nicht zu erden, um das Isoliervermögen des Holzes gegen Stoßspannungen auszunützen.*
- (2) Sind auf einer Holzmastfreileitung Erdseile vorhanden, so sind die Erdungsleitungen an das Erdseil hinreichend weit vom Mast entfernt anzuschließen und frei bis unterhalb des unteren Isolatorenträgers zu führen. Zwischen Erdungsleitung und Isolatorenträgern ist ein Abstand einzuhalten, der eine ausreichende Festigkeit gegen Stoßspannungen sicherstellt.*

AT.3: Bei Stahl- und Stahlbetonmasten ist außerdem zu beachten:

- (1) Bei Stahlbetonmasten darf die Längsarmierung unter Beachtung des erforderlichen Querschnittes als Teil der Erdungsleitung benutzt werden. Eine ausreichende gegenseitige Verbindung der einbezogenen Stäbe sowie fixe Anschlussstellen müssen vorgesehen sein. Falls kein der ganzen Länge nach durchlaufender Bewehrungsstahl verfügbar ist, muss für eine gut leitende Verbindung vom Mastkopf bis zur Anschlussstelle des Erders gesorgt werden. Die zur Isolatorenbefestigung dienenden Metallteile sind an die längs des Mastkörpers verlaufende leitende Verbindung (allenfalls unter Mitbenützung der Ausleerarmierung) gut leitend anzuschließen.*
- (2) Bei Mastschaltern auf Stahl- oder Stahlbetonmasten darf der Einbau von Isolatoren im Betätigungsgestänge entfallen.*

AT.4: Bei Freileitungen mit kunststoffumhüllten Leitern sind Erdungspunkte für das Erden der kunststoffumhüllten Leiter vorzusehen. Diese Erdungspunkte müssen gutschichtbar oder gekennzeichnet sein.

1.3.6 ÖVE EN 50341: Freileitungen über AC 45 kV

Die ÖVE EN 50341 ist Ersatz für:

ÖVE-L 11/1979, ÖVE-L 11a/1980,
ÖVE-L 11b/1982, ÖVE-L 11c/1983, ÖVE-L 11d/1986,
ÖVE-L 11e:1997-11 und ÖVE/ÖNORM E 8111/A6:1999-12

Auslegung von Erdungsanlagen bei Betriebsfrequenz

Allgemeines

Die Auslegung von Erdungsanlagen muss fünf Anforderungen erfüllen:

- (a) Die mechanische Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit sind sicherzustellen.
- (b) Sie muss dem höchsten Fehlerstrom, der sich aus der Berechnung ergibt, thermisch standhalten.
- (c) Schäden an Eigentum und Ausrüstung müssen vermieden werden.
- (d) Die Personensicherheit bei Spannungen in der Erdungsanlage, die während eines Erdfehlers auftreten, muss sichergestellt sein.
- (e) Eine gewisse Zuverlässigkeit der Freileitung muss sichergestellt sein.

Maßgebende Parameter für die Auslegung der Erdungsanlage sind deshalb:

- der Wert des Fehlerstroms,
- die Wirkungsdauer des Fehlerstroms,
ANMERKUNG: Die obigen Parameter hängen hauptsächlich von der Sternpunktbehandlung im Hochspannungsnetz ab.
- die Bodeneigenschaften.

In einer Freileitungsanlage mit zwei oder mehreren unterschiedlichen Spannungsebenen müssen die fünf Anforderungen für die Erdung für jede Spannungsebene erfüllt werden. Gleichzeitige Fehler in unterschiedlichen Stromkreisen müssen nicht betrachtet werden.

Auslegung bezüglich Personensicherheit

Zulässige Werte

Die Ursache der Personengefährdung ist der durch den menschlichen Körper fließende Strom. IEC 60479-1 (Effects of current on human beings and livestock) gibt Hinweise für die Auswirkungen von Körperströmen, abhängig von deren Größe und Dauer. In der Praxis ist es bequemer, sich auf Berührungsspannungen beziehen. Grenzen für die Berührungsspannungen sind in Abbildung 4 angegeben. Die Kurve U_{D1} stellt den Wert der Spannung dar, der längs des Körpers zwischen Hand und Fuß auftreten kann. Bei dieser Kurve sind keine zusätzlichen Widerstände berücksichtigt.

Es ist jedoch erlaubt, die (im Anhang G.4 der ÖVE EN 50341) angegebenen Rechenverfahren zu verwenden, um zusätzliche Widerstände zu berücksichtigen, z.B. Schuhwerk und Werkstoffe mit hohem Oberflächenwiderstand.

Jeder Erdfehler wird automatisch oder von Hand abgeschaltet. Daher treten zeitlich unbegrenzt wirkende Berührungsspannungen als Folge von Erdfehlern nicht auf.¹

¹ Bemerkung der Autoren: Trotzdem werden in der ÖVE E 8383 75 V für Dauererdschlüsse angegeben.

Für Schrittspannungen sind in dieser Norm keine zulässigen Werte festgelegt.

ANMERKUNG: Die zulässigen Werte für Schrittspannungen sind etwas größer als diejenigen für Berührungsspannungen.

Wenn eine Erdungsanlage die Anforderungen an die Berührungsspannung erfüllt, kann daher angenommen werden, dass in den meisten Fällen keine gefährlichen Schrittspannungen auftreten werden.

Die hier beachtete Fehlerdauer setzt die korrekte Funktion von Schutz- und Unterbrechungseinrichtungen voraus.

Berechnungsmethoden und Werte von zulässigen Berührungsspannungen müssen in den NNA (Nationale Normative Festlegungen) oder der Projektspezifikation vorgegeben werden.

Maßnahmen für die Einhaltung zulässiger Berührungsspannungen

Die Anwendung der Anforderungen (a), (b) und (c) in 2.1.5.1 führt zur grundlegenden Auslegung der Erdungsanlage.

Diese Auslegung muss hinsichtlich der Gefahr zu hoher Berührungsspannungen geprüft werden und kann dann als beispielhafte Auslegung für ähnliche Vorgaben betrachtet werden.

Das Blockdiagramm in Abbildung 1 zeigt eine allgemeine Vorgehensweise für die Auslegung einer Erdungsanlage im Hinblick auf die zulässige Berührungsspannung. Die Ziffern in Klammern weisen auf die Erklärungen nach diesem Bild hin.

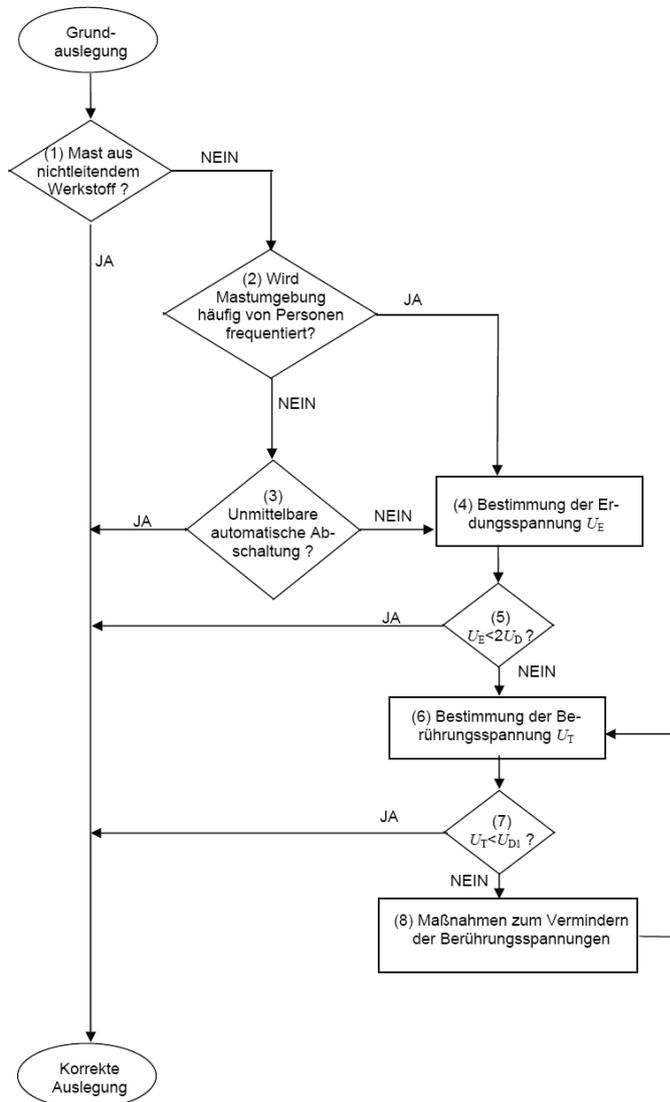


Abbildung 1: Auslegung von Erdungsanlagen hinsichtlich zulässiger Berührungsspannungen gemäß ÖVE EN 50341, Bild 6.1, Seite 134.

Die folgenden erläuternden Bemerkungen beziehen sich auf das Abbildung 1.

- (1) An Masten aus Holz oder anderen nicht leitenden Materialien ohne irgendwelche leitende, mit Erde verbundene Teile sind in der Praxis Erdfehler nicht möglich. Es bestehen daher keine Anforderungen an die Erdung.
- (2) Maste an Standorten, die für Personen frei zugänglich sind und an denen sich Personen entweder innerhalb einiger Wochen relativ lange (einige Stunden am Tag), oder für kurze Zeit aber sehr häufig (viele Male am Tag) aufhalten können, z.B. in der Nähe von Wohngebieten und Spielplätzen, sind davon betroffen und sind genauer zu untersuchen. Nicht betroffen sind Standorte, die nur gelegentlich begangen werden, wie Wälder und offenes Gelände.
- (3) Für Maste an Standorten, die nicht frei zugänglich sind oder selten von Personen begangen werden, brauchen Berührungsspannungen nicht betrachtet zu werden, wenn die Leitung mit einer automatischen Schutzabschaltung ausgerüstet ist.

Wenn die Anwesenheit von Personen als selten angenommen werden kann, kann die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens mit automatisch abgeschalteten Fehlern als vernachlässigbar und die Auslegung der Erdungsanlage als ausreichend angesehen werden.

- (4) *Siehe Anhang H „Erdungsanlagen“, in ÖVE EN 50341.*
- (5) *Siehe Abbildung 2. Wenn der Anstieg des Erdpotentials geringer als $2 U_D$ bezogen auf die zutreffenden Bedingungen 1, 2, 3 oder 4 ist, dann kann die Auslegung als annehmbar angesehen werden. Die Berührungsspannung ist in den meisten dieser Fälle nur ein Teil der Erdungsspannung, was in Anhang G.4.1 der ÖVE EN 50341, im Einzelnen erläutert wird.*
- (6) *Siehe Anhang G.4 der ÖVE EN 50341, G.4.*
- (7) *Siehe Abbildung 2, Kurve U_{D1} , die der zulässigen Berührungsspannung U_{TP} entspricht.*
- (8) *Wenn die in (7) genannte Bedingung nicht erfüllt ist, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Berührungsspannung zu ermäßigen, bis die Anforderungen erfüllt sind. Diese Maßnahmen können in den NNA (Nationale Normative Festlegungen) festgelegt werden.*

ANMERKUNG: Solche Maßnahmen können z.B. sein: Eingegrabene Potentialsteuerringe, Mastisolation, Erhöhung des Widerstandes der oberen Bodenschicht, usw.

Falls verschleppte Potentiale auftreten, müssen diese immer durch eine eigene Berechnung nachgewiesen werden.

Grenzwerte der Berührungsspannungen an unterschiedlichen Standorten

Abbildung 2 zeigt Grenzwerte für Berührungsspannungen (Potentialunterschiede), die über den menschlichen Körper an unterschiedlichen typischen Standorten auftreten können. Die Kurven U_{D2} , U_{D3} und U_{D4} zeigen die Einflüsse zunehmend größer werdender Zusatzwiderstände auf.

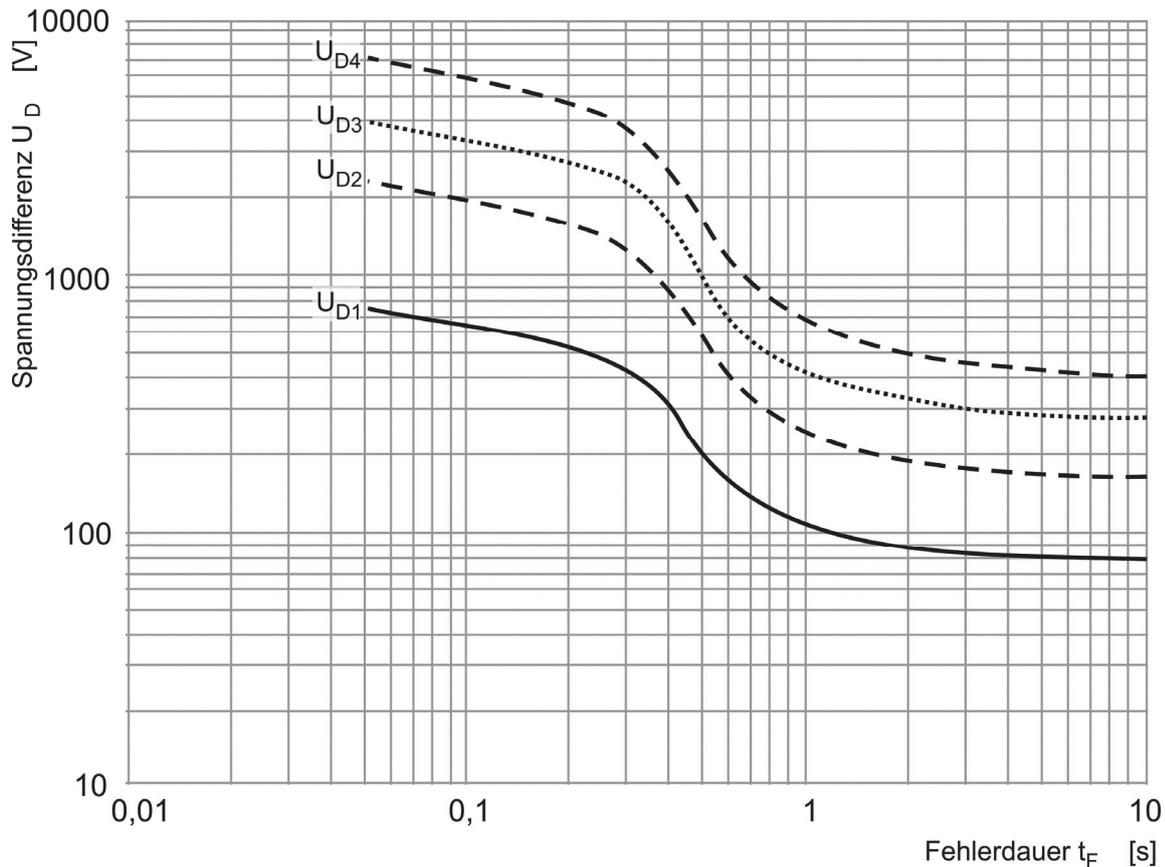


Abbildung 2: Beispiele für die Berührungsspannung (Spannungsdifferenz U_D) in Abhängigkeit von der Wirkungs-
dauer t_F des Fehlerstromes gemäß ÖVE EN 50341, Bild 6.2, Seite 136.

Die als Spannungsquelle in einem Berührungsstromkreis wirkende Spannungsdifferenz U_D gewährleistet die Personensicherheit, wenn zusätzliche Widerstände R_a vorhanden sind, siehe ÖVE EN 50341 Anhang G.4.2.

Für die Kurven in Abbildung 2 gilt:

Kurve U_{D1} : $R_a = 0 \Omega$ (Beispiel 1)

Kurve U_{D2} : $R_a = 1750 \Omega$, $R_{a1} = 1000 \Omega$, $\rho E = 500 \Omega m$ (Beispiel 2)

Kurve U_{D3} : $R_a = 4000 \Omega$, $R_{a1} = 1000 \Omega$, $\rho E = 2000 \Omega m$ (Beispiel 3)

Kurve U_{D4} : $R_a = 7000 \Omega$, $R_{a1} = 1000 \Omega$, $\rho E = 4000 \Omega m$ (Beispiel 4)

mit t_F = Wirkungs-
dauer des Stromes.

Beschreibung typischer Standorte entsprechend den oben erwähnten Fällen 1 bis 4 und den Kurven U_{D1} bis U_{D4} in Abbildung 2.

- Fall 1. Kurve U_{D1}
Orte wie Spielplätze, Schwimmbäder, Campingplätze, Erholungsgebiete und ähnliche Bereiche, wo sich Personen barfuß aufhalten können. Zum Körperwiderstand wird kein zusätzlicher Widerstand beachtet.

- *Fall 2. Kurve U_{D2}
Orte, für die begründet angenommen wird, dass Personen Schuhe tragen, wie Gehsteige, öffentliche Straßen, Parkplätze usw. Ein zusätzlicher Widerstand von 1750 Ω wird berücksichtigt.*
- *Fall 3. Kurve U_{D3}
Orte, für die begründet angenommen werden kann, dass Personen Schuhe tragen und der spezifische Bodenwiderstand hoch ist, z.B. 2000 Ω m. Ein zusätzlicher Widerstand von 4000 Ω wird berücksichtigt.*
- *Fall 4. Kurve U_{D4}
Orte, für die begründet angenommen werden kann, dass Personen Schuhe tragen und der spezifische Bodenwiderstand sehr hoch ist, z.B. 4000 Ω m. Ein zusätzlicher Widerstand von 7000 Ω wird berücksichtigt.*

Maßnahmen in Anlagen mit isoliertem oder erdschlusskompensiertem Sternpunkt

In Anlagen mit isoliertem oder erdschlusskompensiertem Sternpunkt, in denen unzulässig hohe Berührungsspannungen auftreten, kann eine der folgenden Maßnahmen anstelle der Verminderung der Berührungsspannungen getroffen werden, so dass ein lang anstehender Erdfehler am Mast unwahrscheinlich oder die Dauer des Erdfehlers auf eine kurze Zeitspanne begrenzt wird.

- *Verwendung von Langstab- oder Vollkernisolatoren;*
- *Verwendung von Isolatoren, deren Isolationsgüte durch Inspektion erkannt werden kann (z.B. Kappenisolatoren aus Glas);*
- *Verwendung eines Erkennungsgerätes für Erdfehler und Abschalten der Leitung, wenn ein Erdfehler auftritt.*