

ANALYSE VON ERDUNGSMESS- UND BEWERTUNGSMETHODEN IN GLOBALEN ERDUNGSSYSTEMEN

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Vorgelegt von
STEFAN WENZL, BSc

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr.techn. ERNST SCHMAUTZER
Dipl.-Ing. THOMAS MALLITS
Dipl.-Ing. CHRISTIAN TENGG

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.ifea.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / Februar – 2016



Danksagung

Zu Allererst ist es mir eine große Freude, meinen Eltern für ihre tatkräftige Unterstützung und beständige Förderung zu danken, wodurch mir dieses Studium erst ermöglicht wurde.

Großer Dank gilt auch der KNG - Kärnten Netz GmbH, die diese Arbeit erst ermöglicht hat. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Christian Tengg, der mich seitens der KNG - Kärnten Netz GmbH betreut hat, bedanken. Weiters gilt mein Dank auch Ing. Karl Schoaß, der mir bei den Messungen tatkräftig zur Seite stand, wie auch den Mitarbeitern des KNG-Standortes Spittal an der Drau, die sich meinen Anliegen immer hilfreich angenommen haben.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzner und Dipl.-Ing. Thomas Mallits, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit am Institut für Elektrische Anlagen begleitet und fachkundig unterstützt haben, sowie mit ihren wertvollen Anregungen und ihrer kritischen Durchsicht zu dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich auch bei meiner Verlobten Beatrix Knas, für ihre unermüdliche moralische Unterstützung und Begleitung während dieser Zeit bedanken.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 29.02.2016

Stefan Wenzl

Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich sowohl mit messtechnischen, als auch für die Projektierung und Errichtung notwendigen theoretischen Anforderungen und Kriterien von Erdungsanlagen in Verteilernetzen. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf den Anforderungen an Erdungsanlagen, die sich zur Beherrschung der Auswirkungen von Erdschlüssen in gelöst betriebenen Verteilernetzen ergeben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden eine Vielzahl von Messungen an Erdungsanlagen im Mittel- und Niederspannungsnetz durchgeführt. Durch Analyse der Ergebnisse werden etwaige Abweichungen verschiedener Messmethoden und Messgeräte erarbeitet. Aufbauend auf die Ergebnisse der Messung, erfolgt eine Nachbildung dieser Anlagen mittels Softwaretools. Relevante Kenngrößen, wie Erdoberflächenpotentiale im Bereich der Erdungsanlagen, werden mit den zuvor messtechnisch ermittelten Resultaten verglichen und Unterschiede hervorgehoben.

Anhand von entworfenen Modellen zur Nachbildung von Mittel- und Niederspannungsverteilernetzen, soll darüber hinaus eine zuverlässige Grenze für einen sicheren Zusammenschluss von Mittel- und Niederspannungserdungsanlagen, sowohl im Bereich von Verteilernetzen als auch im Bereich der Verbraucheranlagen, gefunden werden. Auf Basis der Simulationsmodelle werden Kriterien beziehungsweise Anforderungen für das Vorhandensein eines sogenannten globalen Erdungssystems abgeleitet.

Weitere Aspekte stellen die Aufarbeitung, der Vergleich und kritische Betrachtungen geltender Normen im Bereich der Mittel- und Niederspannungserdungsanlagen dar. Besonderer Fokus wird auf die Beurteilung von Erdungsanlagen in Bezug auf die Personengefährdungen in Hinblick auf Herzkammerflimmern gelegt.

Schlüsselwörter:

Globales Erdungssystem, Erdungsanlage, Verteilnetz, Betriebserdung, Erdungsmessungen, Erdschluss, Erdoberflächenpotential, Schrittspannung, Berührungsspannung, PEN-Leiter, Begleiterder, Potentialsteuerringe

Abstract

This master thesis deals with current issues concerning middle voltage and low voltage earthing arrangements during earth faults. Questions regarding the construction and measuring of earth-electrode networks and, especially, transformer stations with respect to the appearing earth-surface voltages and appearing step voltages resulting from earth-fault currents are answered. Also, analyses of low frequency faults are part of this master thesis.

In the course of this thesis, a variety of earthing measurements within distribution grids were carried out. In order to compare the results, several different measurement methods are used. In addition to the measurements of the earth potential rise of transformation stations, a variety of types of commonly used earthing arrangements are simulated and calculated with computer-based models. Furthermore, the measuring and the simulation results are compared and additionally differences between these results are elaborated.

Within this master thesis several computer-based simulation models of earthing systems in distribution grids are created and used in order to calculate a boundary for global earthing systems. For this, simulation models for middle voltage as well as models for low voltage systems are created.

Other aspects of this thesis are reconditioning, comparison and critical reflection of valid compensation-current regulations in relation to earthing arrangements in distribution grids.

Keywords:

global earthing systems, earthing arrangement, distribution grid, power system earthing, earthing measurement, earth-surface voltage, step voltage, effective touch voltage, PEN-conductor, underground cable-route earth electrode

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	11
1.1 Ausgangssituation und Motivation	11
1.2 Stand der Technik und Wissenschaft	12
1.3 Methodik.....	13
2 Grundlagen zum Thema Erdung.....	14
2.1 Begriffe und Definitionen	14
2.2 Spezifischer Erdwiderstand.....	16
2.3 Definition globales Erdungssystem laut Norm.....	17
2.4 Netzsysteme im Niederspannungsnetz.....	18
2.4.1 TN-System	18
2.4.2 TT-System.....	19
2.5 Messung des spezifischen Erdwiderstandes	20
2.6 Messung von Erdungsimpedanzen nach dem Strom- Spannungsprinzip	22
2.6.1 Messverfahren.....	22
2.6.2 Eliminierung von Störspannungen	23
2.7 Messung von Berührungs- und Schrittspannungen	24
3 Normative Lage	27
3.1 Allgemeines	27
3.2 Zulässiger Körperstrom und Körperimpedanz.....	27
3.3 Auslegung von Erdungsanlagen von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV	30
3.3.1 Auslegung	30

3.3.2	Überprüfung hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung.....	34
3.3.3	Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen.....	38
3.3.4	Beurteilung von Schrittspannungen gemäß Norm.....	39
3.4	Kriterien hinsichtlich der Errichtung von Erdungsanlagen für Nennwechselspannungen unter 1 kV.....	40
3.5	Gegenüberstellung von Begriffsbezeichnungen zur Thematik Berührungsspannung	43
3.6	Zulässige Schrittspannung auf Beurteilungsbasis maximal zulässiger Berührungsspannungen	44
3.6.1	Berechnung maximal zulässige Berührungsspannung.....	44
3.6.2	Berechnung zulässiger Schrittspannungen.....	45
3.6.3	Modell „Belastete Schrittspannung“	49
4	Messungen an Erdungsanlagen	54
4.1	Allgemeines	54
4.2	Durchgeführte Messungen an Mittelspannungsstationen.....	54
4.2.1	Gemessene Erdoberflächenpotentiale der Stationen.....	56
4.2.2	Berechnung der Schrittspannungen aus den Potentialtrichterverläufen	58
4.2.3	Messung nach hergestelltem Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen	60
4.3	Simulation und Berechnung von Mittelspannungserdungsanlagen mittels OBEIN.....	62
4.3.1	Modellannahmen Mittelspannungserdungsanlage.....	62
4.3.2	Berechnung der Erdoberflächenpotentiale mittels OBEIN 2S	64
4.3.3	Verlauf des Erdoberflächenpotentials bei Mehrschichtböden.....	65
5	Modellbildung globaler Erdungssysteme	67
5.1	Modell zur Nachbildung eines Erdungssystems	67
5.1.1	Einleitung.....	67
5.1.2	Komponenten	67
5.1.3	Modellannahmen der Erderwirkung von Begleiterdern.....	68
5.2	Erdungsanlagen von Mittelspannungstransformatorstationen.....	71

5.2.1	Ausführung von Stationserdungsanlagen mit Horizontalerdern.....	71
5.2.2	Widerstand, Erdoberflächenpotential und Schrittspannungen von Stationserdungsanlagen mit Horizontalerdern	71
5.2.3	Ausführung von Stationserdungsanlagen mit Tiefenerdern.....	74
5.2.4	Widerstand, Erdoberflächenpotential und Schrittspannungen von Stationserdungsanlagen mit Tiefenerdern	75
5.2.5	Betrachtung von Mehrschichtböden.....	77
5.3	Mittelspannungsteilnetz mit zwei Kabelanspeisungen	80
5.3.1	Modellbeschreibung und Annahmen.....	80
5.3.2	Ergebnisse Mittelspannungsteilnetz.....	82
5.4	Niederspannungsnetz – Kabelabgang	83
5.4.1	Modellbeschreibung und Annahmen.....	83
5.4.2	Ergebnisse Niederspannung – Kabelabgang.....	85
5.5	Niederspannungsnetz – Freileitungsabgang.....	87
5.5.1	Modellbeschreibung und Annahmen.....	87
5.5.2	Ergebnisse Niederspannung – Freileitungsabgang.....	88
5.6	Verbraucheranlagen	90
5.7	Gesamtmodell einer Erdungsanlage zur Beurteilung globaler Erdungssysteme	91
5.7.1	Szenarien	91
5.7.2	Ergebnisse	92
6	Zusammenfassung	94
7	Literaturverzeichnis.....	97
8	Anhang	104

Abkürzungsverzeichnis

In der Arbeit verwendete Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen fachlicher Begriffe sind nachfolgend alphabetisch (zuerst lateinische, dann griechische Buchstaben) aufgelistet:

ε	erlaubte absolute Abweichung eines berechneten Wertes (Schranke)
ρ	spez. Erdwiderstand
ρ_1, ρ_2	spez. Erdwiderstand bei Mehrschichtböden
$\rho_{Al,Cu}$	spez. Widerstand von Aluminium, Kupfer
μ	Permeabilität
a	Sondenabstände der inneren Sonden bzw. aller Sonden (Wennerverfahren)
A	Querschnittsfläche
b	Sondenabstände der äußeren Sonden zum Mittelpunkt
BF	Korrekturfaktor für die menschliche Körperimpedanz
$E1 - E8$	Erdungsanlagenausführung 1 bis 8
EPR	„Earth potential rise“ - Erdungsspannung
HF	Herzstromfaktor
$I_{\Delta N}$	Nennfehlerstrom der Fehlerstrom- Schutzeinrichtung
I_A	Auslösestrom der vorgelagerten Schutzeinrichtung
I_B	durch einen menschlichen Körper fließenden Strom
I_{Bp}	höchst zulässiger Körperstrom für Herzkammerflimmern
I_f	Erdfehlerstrom
$I_{f,MS}$	Erdfehlerstromanteil, welcher ins Mittelspannungsnetz fließt
$I_{f,NS}$	Erdfehlerstromanteil, welcher ins Niederspannungsnetz fließt
$I_{f,ST}$	Erdfehlerstromanteil, welcher in die lokale Stationserdungsanlage fließt
I_h	Körperstrom für unterschiedliche Strompfade durch den Körper
I_{ref}	Körperstrom für den Strompfad von linker Hand zu beiden Füßen
l	Abstand
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PAS	Potentialausgleichschiene
PEN	Kombination aus Schutz- und Neutralleiter (Protective Earth Neutral)
r	Reduktionsfaktor
r_0	Radius eines Halbkugelerders
r_a	äußerer Radius
r_i	innerer Radius
R_{Σ}	Widerstand zusammengeschlossener Erdungsanlagen, Summenwiderstand

R_A	.....	Widerstand der Anlagenerdung
R_B	.....	Widerstand der Betriebserdung
R_E	.....	Erdausbreitungswiderstand
R_F	.....	Zusatzwiderstände bei Berührungsspannungsberechnungen
R_{F1}	.....	Zusatzwiderstand für die Berücksichtigung des Schuhwerks
R_{F2}	.....	Zusatzwiderstände zur Berücksichtigung von Erdausbreitungswiderstände
R_{Haus}	.....	Erdungswiderstand einer Verbraucheranlage
R_S	.....	Widerstand der Schutzerdung
t	.....	Tiefe der tieferliegenden Bodenschicht
t_f	.....	Fehlerdauer (Dauer des Fehlerzustandes)
U_E	.....	Erdungsspannung
U_F	.....	Fehlerspannung
U_{FL}	.....	Grenzfehlerspannung
U_m	.....	durch Versuchsstrom hervorgerufene Messspannung
$U_{min,max}$	.....	minimal / maximal gemessene Spannung
U_N	.....	Nennspannung gegen Erde
U_S	.....	Schrittspannung
U_{Sp}	.....	höchst zulässige Schrittspannung
U_{St}	.....	Störspannung
U_T	.....	Berührungsspannung
U_{Tp}	.....	höchst zulässige Berührungsspannung
U_{vTp}	.....	höchste zulässige Leerlauf - Berührungsspannung
X_C	.....	kapazitiver Blindwiderstand
X_L	.....	induktiver Blindwiderstand
Z_i	.....	innere Körperimpedanz
Z_S	.....	Impedanz der Fehlerschleife
$Z_{S1,2}$	.....	Impedanz der Hautein- und Hautaustrittsflächen
Z_T	.....	menschliche Körperimpedanz

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Ziel dieser Arbeit ist es sowohl durch Messung, als auch durch computergestützte Modellbildung, ein Kriterium respektive eine genaue Eingrenzung für den Begriff des globalen Erdungssystems zu finden [1].

Da derzeit gültige Normen lediglich Richtwerte und Kriterien für ein mögliches globales Erdungssystem liefern, stellt eine genauere Betrachtung, fokussiert auf die Struktur von Verteilernetzen, eine Basis und einen möglichen Ansatz für eine Bewertung dar. Die Motivation für diese Arbeit liegt somit in der Erarbeitung praxisnaher Grundlagen für die Gewährleistung der Sicherheit von Personen im Einflussbereich elektrischer Anlagen. Dabei gilt es, durch Erdschlüsse auftretende Schritt- und Berührungsspannungen ausreichend gering zu halten.

Betrachtet man die in Österreich installierten Leitungslängen wie in Abbildung 1.1 dargestellt, so erkennt man die Wichtigkeit genauer Untersuchungen von Mittel- und Niederspannungs-erdungsanlagen zur Gewährleistung der Personensicherheit und Anlagenzuverlässigkeit.

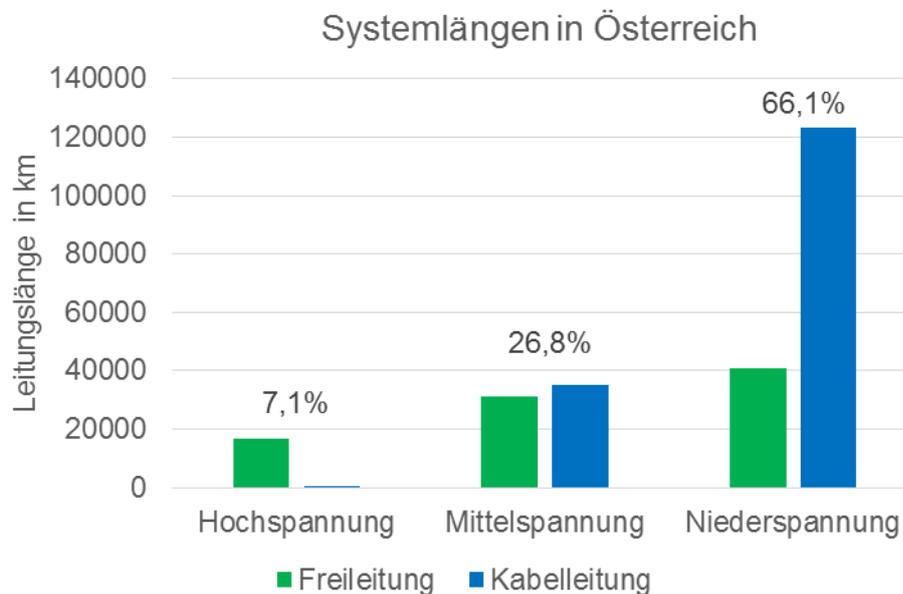


Abbildung 1.1: Übersicht über die Systemlängen des österreichischen Stromnetzes (Daten: e-control, Marktbericht 2010, Stand August 2010, Tabelle siehe Kapitel 8, Anhang)

Demnach erstreckt sich das Mittel- und Niederspannungsnetz in Österreich zusammen über 230 000 km und umfasst über 92 % des gesamten Stromnetzes.

Je nach Ausdehnung und Struktur des Verteilernetzes, kann dieses gegebenenfalls in einem geeigneten Gebiet für ein globales Erdungssystem liegen. Ein solches Erdungssystem ist

dadurch definiert, dass innerhalb eines Gebiets keine für Personen gefährliche Berührungs- und Schrittspannungen auftreten [2]. Aufgrund unzähliger Ausführungsvarianten und Verzweigungen des Mittel- und Niederspannungsnetzes einerseits und schwankender Parameter, wie spezifischer Erdwiderstände, die sowohl von Wetter und Jahreszeit als auch vom Ort andererseits abhängig sind, ist eine genaue Aussage, ab wann ein globales Erdungssystem vorherrscht, nicht ohne weiteres möglich. Genaue Kenntnisse über den Bodenwiderstand, die Bodenschichtung und etwaige Einbauten im betroffenen Erdreich sind ohne erheblichen Aufwand nur bedingt und oft nur für einen kurzen Zeitraum möglich.

Da in Österreich Mittelspannungsnetze vorwiegend gelöscht und somit als Netze mit Erdschlusskompensation betrieben werden, müssen nicht nur kurzzeitige Fehler sondern auch Erdschlüsse mit längeren Fehlerdauern bei der Auslegung von Erdungsanlagen berücksichtigt werden. Darüber hinaus weisen Mittelspannungsnetze eine höhere Anzahl an Erdschlüssen bezogen auf 100 km Netzlänge, als Störungsursache auf. Dies ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

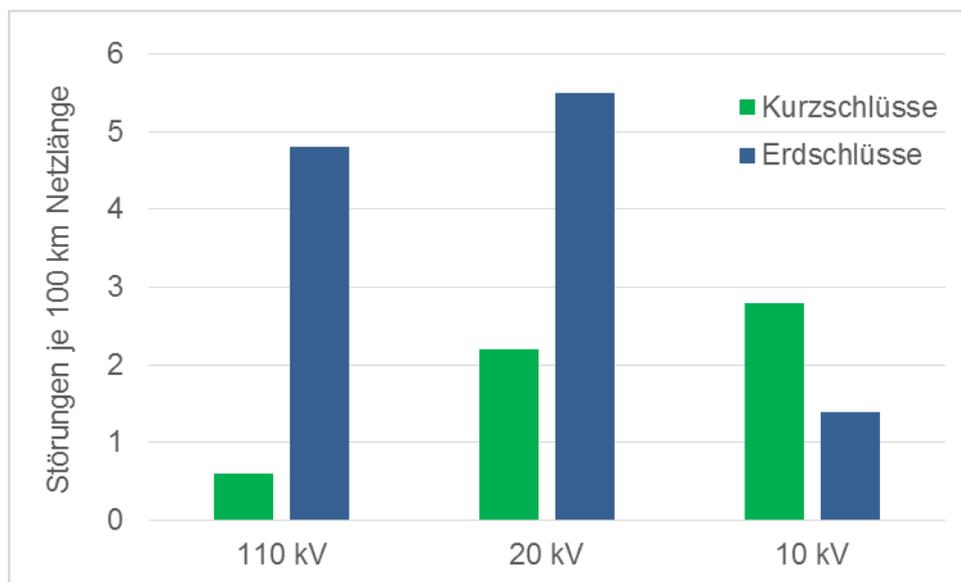


Abbildung 1.2: Störungen je 100 km Netzlänge im 10-kV-, 20-kV- und 110-kV-Netz gemäß [3] (für die zugehörige Tabelle siehe Kapitel 8, Anhang)

Eine weitere Herausforderung stellt die messtechnische Erfassung einer Vielzahl von unterschiedlich konstruierten Erdungsanlagen in Hinblick auf den Erhalt eines zuverlässigen ausreichend genauen Messergebnisses dar. Sowohl die Struktur der Erdungsanlage als auch mögliche Störeinflüsse während des Messvorganges sind zu berücksichtigen.

1.2 Stand der Technik und Wissenschaft

Basis für die Messung und Berechnung von Erdungsanlagen mit Nennwechselspannungen über und unter 1 kV, stellen die jeweils zutreffenden Normen dar (siehe Kapitel 7), welche sowohl Grenzwerte für Berührungs- und Schrittspannungen, als auch mögliche Berechnungsformeln für Erdausbreitungswiderstände beinhalten. In diesen Normen werden

auch zulässige Methoden zur messtechnischen Überprüfung von Erdungsanlagen gelistet und beschrieben.

1.3 Methodik

Für die Berechnung der Ausbreitungswiderstände von Erdungsanlagen in Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzen werden im folgenden sowohl Simulationsprogramme als auch Berechnungsmethoden, die in den aktuell gültigen Normen und Vorschriften angeführt sind, herangezogen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden weiters Messungen an Erdungsanlagen in Mittel- und Niederspannungsnetzen durchgeführt. Zusätzlich werden auftretende Messabweichungen aufgrund unterschiedlicher Messmethoden analysiert. Die Messungen werden sowohl an Einzelerdungsanlagen als auch in räumlich ausgedehnten Erdungsanlagen wie beispielsweise Niederspannungsnetzen mit Betriebserdungspunkten und räumlich verteilten Verbrauchererdungsanlagen vorgenommen, um die Einsetzbarkeit der einzelnen Methoden, je nach vorzufindender Erdungsanlage, herauszuarbeiten.

Durch Nachbildung einzelner erdungswirksamer Komponenten eines Verteilnetzes, sollen darüber hinaus charakteristische Grenzen für das Auftreten eines globalen Erdungssystems gefunden werden. Die Simulationsmodelle weisen den Vorteil auf, dass zusätzlich auftretende ohmsche Kopplungen der Erdungskomponenten untereinander leicht berücksichtigt und Szenarien analysiert werden können.

Durch die Gegenüberstellung der gemessenen Potentialverläufe von Verteilnetzstationen mit den berechneten Potentialverläufen aus den Simulationsergebnissen, können Unterschiede aufgrund fehlender Kenntnis der genauen Bodenstruktur in den Modellen herausgearbeitet und zukünftig berücksichtigt werden. Von besonderem Interesse stellt sich hierbei der Nahbereich der Station, bei welchem die größten Spannungsgradienten auftreten und somit erhöhtes Gefährdungspotential vorherrscht, heraus.

Zulässige Grenzwerte für Berührungs- und Schrittspannungen zur Bewertung von Erdungsanlagen, erfolgen gemäß dem gültigen Normenwerk. Darüber hinaus werden Grenzwerte für Schrittspannungen näher untersucht, kritisch hinterfragt und auf Basis von möglichen Schrittspannungskonfigurationen für auftretende Fehlerfälle in kompensiert betriebenen Verteilnetzen analytisch errechnet.

2 Grundlagen zum Thema Erdung

2.1 Begriffe und Definitionen

Gemäß: [2], [4], [5]

Bezugserde (ferne Erde)

Teil der Erde, insbesondere der Erdoberfläche, der sich außerhalb des Einflussbereiches eines Erders oder einer Erdungsanlage befindet, in welchem zwischen zwei beliebigen Punkten keine merklichen, vom Erdungsstrom herrührenden Spannungen auftreten

Erdung

Gesamtheit aller Mittel und Maßnahmen zum Erden

Oberflächenerder

Erder, der in geringer Tiefe im Allgemeinen bis etwa 1 m verlegt ist. Er kann z.B. aus Band-, Rundmaterial oder Seil bestehen und als Strahlen-, Ring- oder Maschenerder oder als eine Kombination dieser Erderarten ausgeführt sein

Tiefenerder

Erder, der im Allgemeinen in größeren Tiefen verlegt oder in größere Tiefe eingetrieben ist. Er kann z.B. aus einem Rohr, Rundstab oder anderem Profilmaterial bestehen

Potentialsteuererder

Leiter, der durch Form und Anordnung mehr zur Potentialsteuerung als zum Erreichen eines bestimmten Ausbreitungswiderstandes verwendet wird

Betriebserdung

Erdung eines Punktes des Betriebsstromkreises, die für den ordnungsgemäßen Betrieb von Geräten oder Anlagen erforderlich ist

Schutzerdung

Erdung eines leitfähigen Teiles, das nicht zu den spannungsführenden Teilen gehört, um Personen vor gefährlichen Körperströmen zu schützen

Ausbreitungswiderstand, R_E

Wirkwiderstand der Erde zwischen dem Erder und der Bezugserde

Erdungsimpedanz, Z_E

Impedanz bei einer gegebenen Frequenz zwischen einem Punkt in einem System oder einer Anlage oder einem Betriebsmittel und der Bezugserde

Anmerkung: Die Erdungsimpedanz wird nicht nur von den unmittelbar angeschlossenen Erden bestimmt, sondern auch durch angeschlossene Erdseile von Freileitungen sowie von erdfühligen oder mehrfach geerdeten Bodenseilen von Freileitungen, durch angeschlossene Kabel mit Erderwirkung sowie durch andere Erdungsanlagen, die mit der betreffenden Erdungsanlage durch Kabelmäntel und – schirme, PEN-Leiter oder auf andere Weise leitend verbunden sind

Erdungsspannung (EPR), U_E

Spannung zwischen einer Erdungsanlage und Bezugserde

Erdoberflächenpotential, φ

Spannung zwischen einem Punkt auf der Erdoberfläche und Bezugserde

Berührungsspannung, U_T

Teil der Erdungsspannung bei einem Erdfehler, der vom Menschen abgegriffen werden kann. Dabei wird angenommen, dass der Strom durch den menschlichen Körper von einer Hand zu den Füßen fließt (horizontaler Abstand vom berührbaren Teil 1 m)

Leerlauf-Berührungsspannung, U_{ST} [4] bzw. U_{VT} [2]

Spannung, die bei einem Erdfehler zwischen leitfähigen Teilen und Erde auftritt, während diese Teile noch nicht berührt werden (Quellenspannung)

Schrittspannung, U_S

Teil der Erdungsspannung bei einem Erdfehler, der vom Menschen mit einem Schritt von 1 m abgegriffen werden kann. Dabei wird angenommen, dass der Strom von Fuß zu Fuß durch den menschlichen Körper fließt

vereinbarter Grenzwert der Fehlerspannung (Grenzfehlerspannung), U_{FL}

Höchstzulässiger Wert einer dauernd auftretenden Fehlerspannung, für den unter vereinbarten Bedingungen das Risiko eines elektrischen Schlages vertretbar ist

PEN – Leiter

Leiter, der zugleich die Funktionen eines Schutzerdungsleiters und eines Neutralleiters erfüllt

Erdfehlerstrom, I_F

Strom, der vom Betriebsstromkreis zur Erde oder zu geerdeten Teilen an der Fehlerstelle (Ort des Erdfehlers) fließt

Erdungsstrom, I_E

Strom, der über die Erdungsimpedanz in die Erde fließt

Anmerkung: Der Erdungsstrom ist der Teil des Erdfehlerstromes I_F durch den die Potentialanhebung der Erdungsanlage verursacht wird

2.2 Spezifischer Erdwiderstand

Definitionsgemäß repräsentiert der spezifische Erdwiderstand jenen elektrischen Widerstand, welcher durch einen Würfel mit 1 m Kantenlänge und einem Kubikmeter Erdreich, zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen, gebildet wird. Bei der Berechnung wird eine homogene Strömungsverteilung vorausgesetzt. Die Angabe der Einheit erfolgt in Ωm [6].

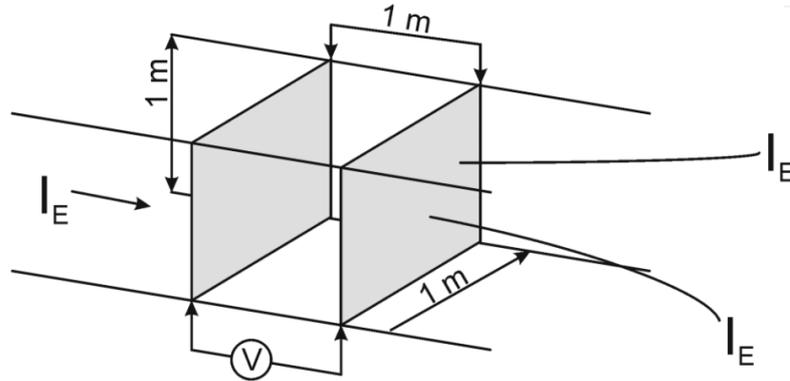


Abbildung 2.1: Graphische Darstellung der physikalischen Bedeutung des spezifischen Erdwiderstandes [6]

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} \quad \text{Einheit: } \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{bzw. } \Omega \text{m} \quad (2.1)$$

- ρspezifischer Erdwiderstand Ωm
 Rohmscher Widerstand Ω
 AQuerschnittsfläche mm^2
 lLänge m

Bodenbeschaffenheit	spezifischer Erdwiderstand ρ in Ωm	
	Wertebereich	Mittelwert
sumpfiger Boden	2 - 50	30
Ziegelton	2 - 200	40
Schwemmsand und Lehmsandboden, Humus	20 - 260	100
Sand und Sandboden	50 - 3000	200 (feucht)
Torf	> 100	200
Kies (feucht)	50 - 3000	1000 (feucht)
steiniger und felsiger Boden	100 - 8000	2000
Beton: 1 Teil Zement + 3 Teile Sand	50 - 300	150
Beton: 1 Teil Zement + 5 Teile Kies	100 - 8000	400
Beton: 1 Teil Zement + 7 Teile Kies	50 - 300	500

Tabelle 2.1: Spezifische Erdwiderstände unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten gemäß [6] (überarbeitet)

Der spezifische Erdwiderstand ist aufgrund mehrere Faktoren starken Schwankungen unterworfen. So hängt dieser einerseits von der Bodenbeschaffenheit selbst (siehe Tabelle 2.1), als auch von der Schichtung des Bodens, dem Feuchtegehalt, Frost und vom Wetter ab. Die Variation des spezifischen Erdwiderstandes in Abhängigkeit von der Jahreszeit, ohne die zusätzliche Beeinflussung durch Niederschlag, ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Der Einfluss der Jahreszeit ist bei höheren Bodenschichten stärker ausgeprägt und nimmt mit zunehmender Tiefe des Bodens ab [7].

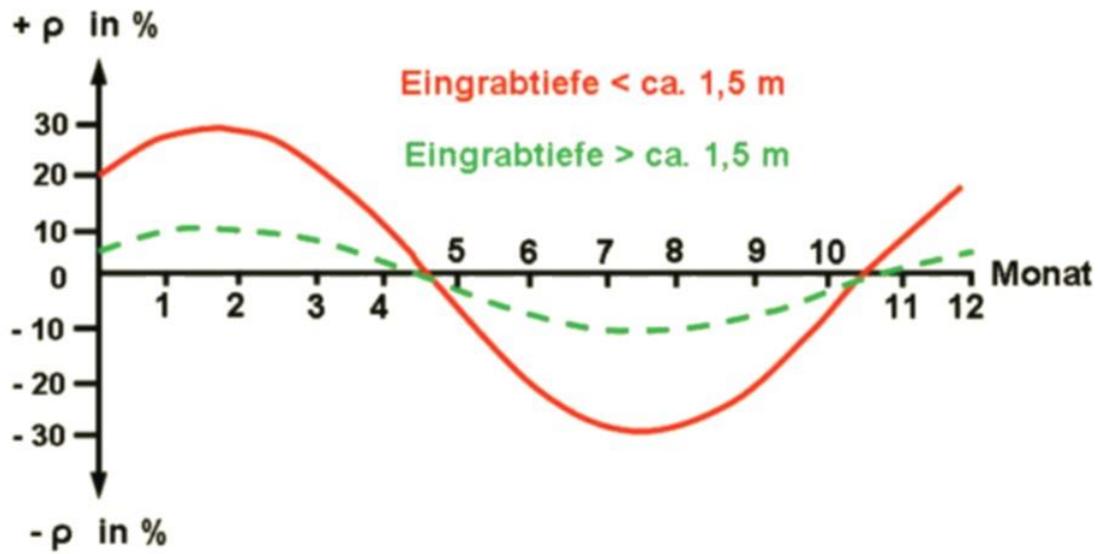


Abbildung 2.2: Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes von der Jahreszeit (ohne Beeinflussung durch Niederschläge) gemäß [7] (überarbeitet)

2.3 Definition globales Erdungssystem laut Norm

ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [2]:

„Globales Erdungssystem ist ein durch die Verbindung von örtlichen Erdungsanlagen hergestelltes Erdungssystem, das sicherstellt, dass durch den geringen gegenseitigen Abstand dieser Erdungsanlagen keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten.“

Anmerkung 1: *„Solche Systeme bewirken eine Verteilung der Erdfehlerströme in der Weise, dass die Erdungsspannung der örtlichen Erdungsanlage reduziert wird. Solch ein System bildet eine Quasiäquipotentialfläche.“*

Zusätzlich werden in der ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 [2], Anhang O typische Fälle für ein globales Erdungssystem genannt. Diese umfassen beispielsweise Anlagen welche Stadtzentren oder Vorstadtgebiete versorgen, Anlagen mit bestimmten Längen an Erdern oder Anlagen welche über mehrere Kabel mit Erderwirkung angeschlossen sind (Anmerkung: Konkrete Angaben wie z.B. Längen werden nicht angeführt).

2.4 Netzsysteme im Niederspannungsnetz

Niederspannungsnetze werden, je nach Art der Erderverbindung und Wahl der Schutzmaßnahme als TN, TT oder IT System ausgeführt. Dabei bezeichnet der erste Buchstabe die Beziehung der Quelle zur Erde und der zweite Buchstabe die Beziehung der Verbraucher zur Erde [8], [5]:

- I: Isolierung, oder Verbindung über eine Impedanz eines Punktes gegenüber Erde
- T: direkte Erdung eines Punktes
- N: Verbindung eines Körpers mit Betriebserde

In Kapitel 2.4.1 und Kapitel 2.4.2 werden der Aufbau und die Ausschaltbedingungen im TN- und TT-System kurz näher erläutert. Auf die Beschreibung von IT-Systemen wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

2.4.1 TN-System

Bei einem Netzsystem in TN-Ausführung ist ein Punkt der Quelle (der Sternpunkt des versorgenden Transformators) über einen Betriebserder geerdet. Die Erdungsanlagen der Verbrauchieranlagen sind über einen PEN-Leiter mit der Betriebserde verbunden. Weiteres lässt sich ein TN-System, je nach Anordnung des PE- und N-Leiters, in 3 Arten unterteilen [8]:

- TN-C: kombiniert geführter Schutz (PE)- und Neutraleiter (N)
- TN-S: getrennt geführter Schutz (PE)- und Neutraleiter (N)
- TN-C-S: teilweise getrennt und teilweise kombiniert geführter Schutz (PE)- und Neutraleiter (N)

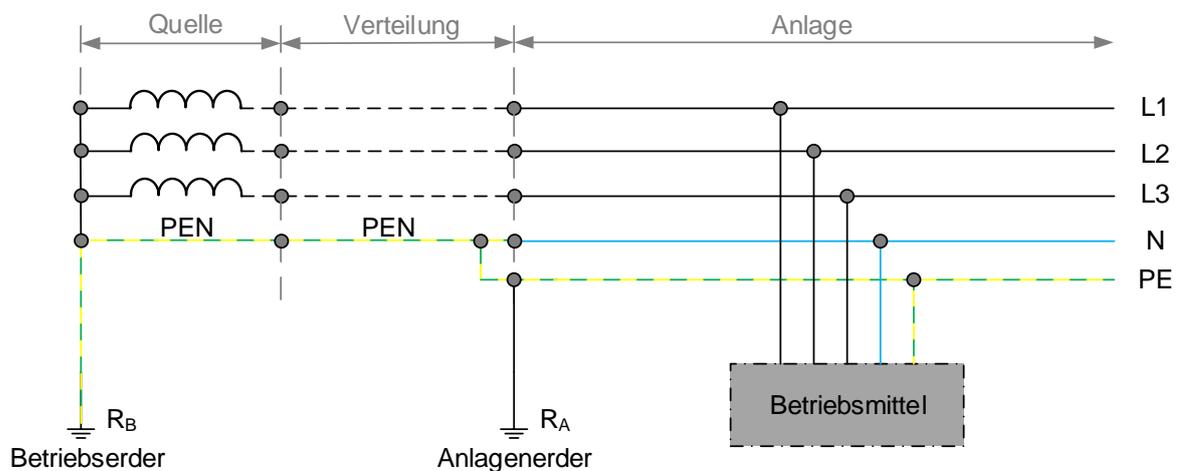


Abbildung 2.3: TN-System

Bedingung für die Schleifenimpedanz im Fehlerfall bei TN-Systemen und Schutz durch Überstrom- Schutzeinrichtungen gemäß [5]:

$$Z_s \leq \frac{U_N}{I_A} \quad (2.2)$$

Z_s	Impedanz der Fehlerschleife	Ω
U_N	Nennspannung gegen Erde	V
I_A	Ausschaltstrom vorgelagerter Überstrom-Schutzeinrichtung	A

Bedingung für die Schleifenimpedanz im Fehlerfall bei TN-Systemen und Schutz durch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen gemäß [5]:

$$Z_s \leq \frac{U_N}{5 \cdot I_{\Delta N}} \text{ und } Z_s \leq 100 \Omega \quad (2.3)$$

Z_s	Impedanz der Fehlerschleife	Ω
U_N	Nennspannung zwischen Außen- und Neutraleiter	V
$I_{\Delta N}$	Nennfehlerstrom der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung	A

2.4.2 TT-System

Im TT-System ist ein Punkt der Quelle (der Sternpunkt des versorgenden Transformators) über einen Betriebserder geerdet. Die Erdung der Körper der Verbrauchieranlagen ist über eine von der Betriebserdung getrennte, unabhängige Schutzerdungsanlage ausgeführt [5].

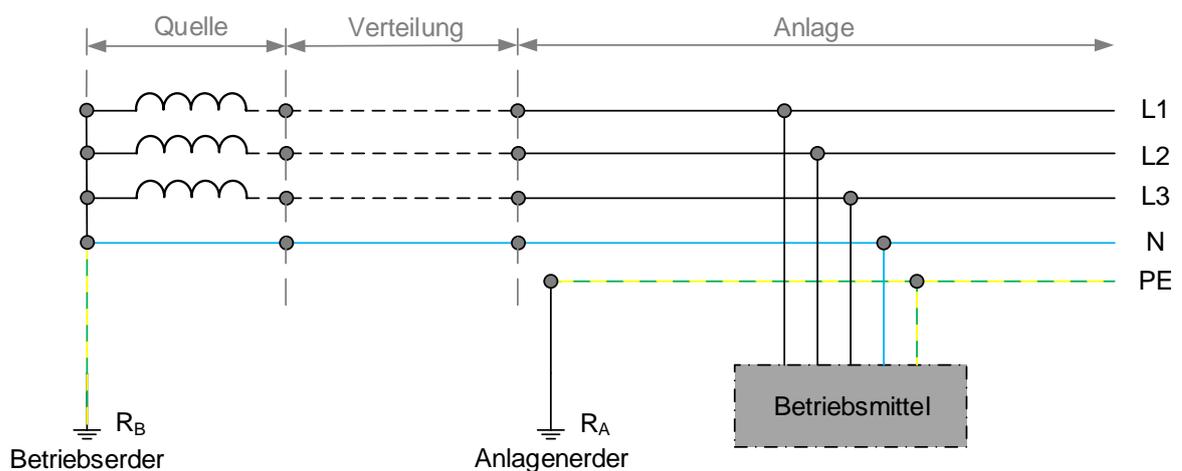


Abbildung 2.4: TT-System

Bedingung für die Schleifenimpedanz im Fehlerfall bei TT-Netzen und Schutz durch Überstrom-Schutzeinrichtungen (Schutzerdung) gemäß [5]:

$$Z_S \leq \frac{U_N}{I_A} \quad (2.4)$$

Z_S	Impedanz der Fehlerschleife	Ω
U_N	Nennspannung gegen Erde	V
I_A	Ausschaltstrom vorgelagerter Überstrom- Schutzeinrichtung	A

Anmerkung:

Gemäß ÖVE/ÖNORM E8001:2010 ist die Anwendung der Schutzerdung als Fehlerschutz in neu errichteten Anlagen nicht mehr anzuwenden.

Bedingung für die Schleifenimpedanz im Fehlerfall bei TT-Netzen und Schutz durch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (Schutz durch FI-Schutzschaltung) gemäß [5]:

$$Z_S \leq \frac{U_N}{5 \cdot I_{\Delta N}} \text{ und } Z_S \leq 100 \Omega \quad (2.5)$$

Z_S	Impedanz der Fehlerschleife	Ω
U_N	Nennspannung zwischen Außen- und Neutralleiter	V
$I_{\Delta N}$	Nennfehlerstrom der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung	A

2.5 Messung des spezifischen Erdwiderstandes

Der spezifische Erdwiderstand hat maßgeblichen Einfluss auf den Ausbreitungswiderstand von Erden beziehungsweise Erdungsanlagen (siehe Kapitel 3.6.3 und Kapitel 5.2), wodurch die genaue Bestimmung des vorherrschenden Erdwiderstandes zur Dimensionierung der Erdungsanlage von großer Bedeutung ist.

Zur Messung des spezifischen Erdwiderstandes ist eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden bekannt, wobei sich vorrangig zwei Methoden zur Bestimmung in der Praxis bewährt haben:

- 4-Sonden-Methode nach dem Wenner-Verfahren
- 4-Sonden-Methode nach dem Schlumberger-Verfahren

Der Unterschied der beiden Methoden liegt in der Anordnung und Aufteilung der Abstände zwischen den einzelnen Sonden. Am Häufigsten kommt die Wenner Methode zum Einsatz. Die Messung erfolgt meist mit einem klassischen Erdungsmessgerät, welches nach dem Strom-Spannungsprinzip arbeitet. Über die äußeren zwei Hilfserder wird ein Strom ins Erdreich gespeist und über die inneren zwei Hilfserder beziehungsweise Sonden, wird die Spannung abgegriffen und gemessen [9].

4-Sonden-Methode nach dem Wenner-Verfahren:

Die vier Hilferder werden in gleichen Abständen und entlang einer Geraden platziert. Der gewählte Abstand a der Hilferder bestimmt die gewünschte Erfassungstiefe der Bodenschicht. Der Erdwiderstand wird laut folgender Formel berechnet, wobei der Widerstand R vom Messgerät abgelesen wird [9]:

$$\rho_{Tiefe\ a} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (2.6)$$

$\rho_{Tiefe\ a}$	spezifischer Erdwiderstand in der Tiefe a	Ωm
R	ohmscher Widerstand (abgelesener Wert)	Ω
a	gewählter Abstand der Sonden	m

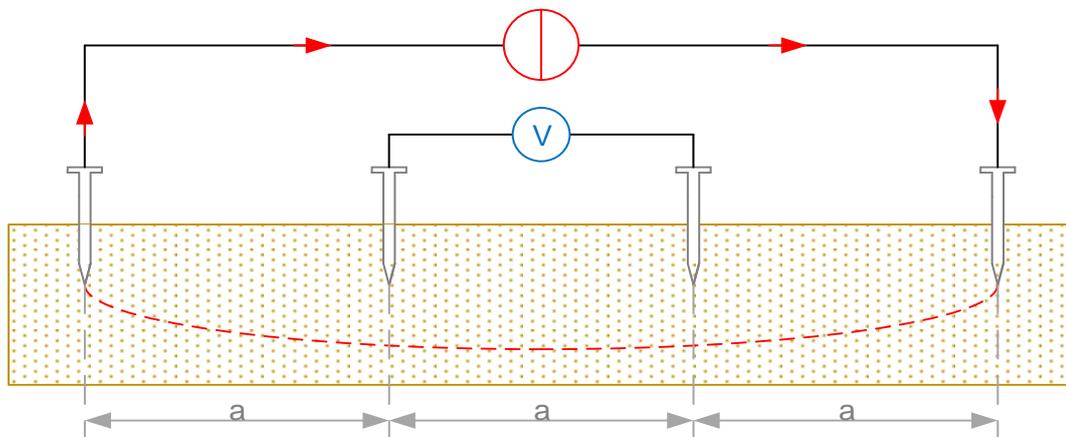


Abbildung 2.5: spezifische Erdwiderstandsmessung nach dem Wenner – Verfahren

4-Sonden-Methode nach dem Schlumberger-Verfahren:

Das Verfahren nach Schlumberger beruht, abgesehen von der örtlichen Platzierung der Sonden, auf dem Verfahren nach Wenner. Die Sonden werden erneut entlang einer Gerade platziert, wobei die beiden mittleren Sonden den Abstand a zueinander und die beiden äußeren Sonden jeweils den Abstand b zum Mittelpunkt aufweisen. Der Abstand a der inneren Sonden bleibt während der gesamten Messreihe konstant, bestimmt wird der spezifische Widerstand bis zur Tiefe b . Erneut kann aus der Anordnung der Sonden und dem mittels Messgerät ermittelten Widerstand R der spezifische Widerstand berechnet werden [9]:

$$\rho_{Tiefe\ b} = \pi \cdot \frac{\left(b^2 - \frac{a^2}{4}\right)}{a} \cdot R \quad (2.7)$$

$\rho_{Tiefe\ b}$	spezifischer Erdwiderstand in der Tiefe a	Ωm
R	ohmscher Widerstand (abgelesener Wert)	Ω
a	Abstand der innenliegenden Sonden	m
b	Abstand der äußeren Sonden zum Mittelpunkt	m

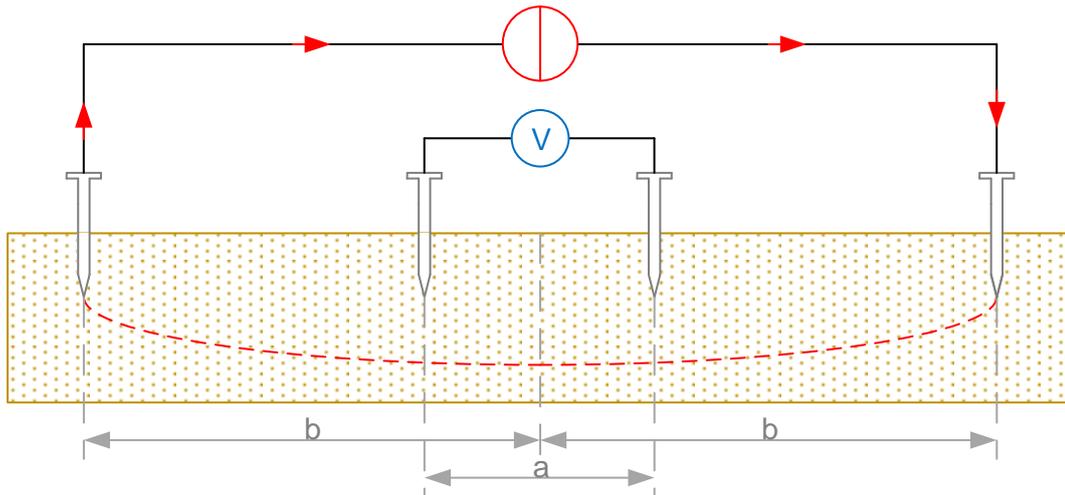


Abbildung 2.6: spezifische Erdwiderstandsmessung nach dem Schlumberger – Verfahren

2.6 Messung von Erdungsimpedanzen nach dem Strom- Spannungsprinzip

Zur messtechnischen Überprüfung von Erdungsanlagen kommen unterschiedliche Messverfahren und Methoden zum Einsatz. In Kapitel 2.6.1 und Kapitel 2.6.2 werden die gebräuchlichen Verfahren erläutert:

2.6.1 Messverfahren

Erdungsmessbrücke:

Erdungsmessbrücken kommen zum Einsatz, wenn Erdungsanlagen kleiner oder mittlerer Ausdehnung gemessen werden sollen. Dies umfasst beispielsweise einzelne Tiefen- oder Bänderder, Erdungsanlagen von einzelnen Freileitungsmasten und Anlagen im Mittelspannungsnetz bei getrennten Erdungsanlagen für Mittel- und Niederspannung [2].

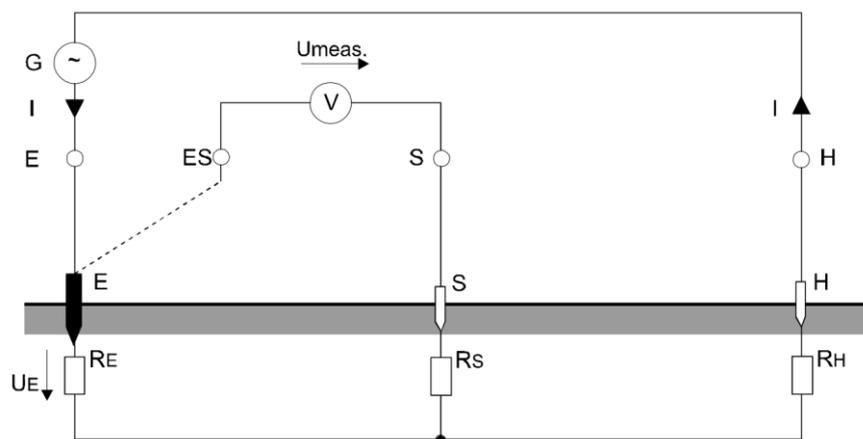


Abbildung 2.7: Messmethode zur Messung des Erdausbreitungswiderstandes eine Anlage mithilfe einer Erdungsmessbrücke nach dem Strom-Spannungsverfahren [10]

Stromeinspeisung mittels Stromquelle:

Zur Messung größerer Erdungsanlagen kommt bevorzugt die Strom-Spannungsmethode mit größeren eingespeisten Strömen zum Einsatz [2] (siehe auch Kapitel 4.2). Der Versuchsstrom wird über eine Quelle, dies ist beispielsweise ein Stromaggregat oder aber auch ein ans Netz angekoppelter Anpassungstransformator, ins Erdreich eingespeist. Mittels Leitung zu einer geeigneten Gegenerde (z.B. Kupferkabel mit ausreichendem Querschnitt, freigeschaltete, einseitig geerdete Phasenleiter von Freileitungen) wird der Versuchsstromkreis geschlossen. Die Gegenerde darf sich dabei nicht im Einflussbereich des Potentialtrichters der zu messenden Erdungsanlage befinden.

2.6.2 Eliminierung von Störspannungen

Durch ohmsch beziehungsweise induktiv eingekoppelte Fremd- und Störspannungen, kann es während der Erdungsmessungen zu Verfälschungen des Messergebnisses kommen [11]. Um diese Fehlerquellen zu eliminieren, werden gezielt Maßnahmen zur Unterdrückung von Fremd- und Störspannungen eingesetzt. Diese Methoden beruhen auf den in Kapitel 2.6.1 beschriebenen Strom-Spannungsmessverfahren.

Ein/Aus-Methode:

Bei diesem Verfahren wird ein netzfrequenter Strom ins Erdreich eingespeist, welcher in gleichen Abständen ein- und ausgeschaltet wird. Gemessen wird sowohl die Spannung bei eingeschalteter Quelle, als auch bei abgeschalteter Quelle [11].

Umpolmethode:

Diese Methode arbeitet nach demselben Prinzip wie die Ein/Aus-Methode, jedoch mit dem Zusatz, dass vor den Abschaltungen der Quelle, zusätzlich bei umgepolter Polarität gemessen wird [11].

$$U_m = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2} - U_{St}^2} \tag{2.8}$$

U_1	gemessene Spannung bei eingeschalteter Quelle	V
U_2	gemessene Spannung bei umgepolter Quelle	V
U_{St}	gemessene Störspannung bei ausgeschalteter Quelle	V
U_m	durch Versuchsstrom hervorgerufene Messspannung	V

Schwegungsmethode:

Bei der Schwegungsmethode wird ein Strom ins Erdreich eingespeist, welcher in seiner Frequenz geringfügig von der vorherrschenden Netzfrequenz abweicht. Aufgrund dessen kommt es zu einer Überlagerung des Messsignales U_m mit dem Störsignal U_{St} . Werden die

Maximalwerte U_{min} und U_{max} dieses Schwebungssignales ermittelt, kann daraus das Messsignal berechnet werden [11].

$$|U_m| = \frac{|U_{min} + U_{max}|}{2} \quad \text{für } |U_{St}| \leq |U_m| \quad (2.9)$$

$$|U_m| = \frac{|U_{min} - U_{max}|}{2} \quad \text{für } |U_{St}| \geq |U_m| \quad (2.10)$$

U_{min}	maximal gemessene Spannung	V
U_{max}	minimal gemessene Spannung	V

Frequenzselektive Methode:

Bei dieser Methode wird ein Versuchsstrom eingespeist, welcher von der Netzfrequenz und möglichen Vielfachen dieser Frequenz abweicht, um eingekoppelte Fremd- und Störspannungen zu eliminieren. Nachteilig bei der frequenzselektiven Messung ist die Tatsache, dass für die Auswertung spezielle Messgeräte notwendig sind, welche frequenzselektiv messen müssen, da nur Signale der eingespeisten Frequenz ausgewertet werden sollen.

2.7 Messung von Berührungs- und Schrittspannungen

Messungen von Berührungs- und Schrittspannungen können als Nachweis der Einhaltung zulässiger Grenzwerte an Erdungsanlagen notwendig sein. Umfang und Vorgehensweise dieser Messung ist in ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 [2] beziehungsweise ÖVE/ÖNORM E8383:2000 [4] angeführt und wird nachfolgend inhaltlich zusammengefasst. Die Messung hat mittels Strom-Spannungsmessverfahren zu erfolgen.

Die Messung erfolgt stichprobenweise in 1 m Abstand zu der zur beurteilenden Anlage.

Anmerkung: Zahlreiche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Berührungsspannungsmessungen haben gezeigt, dass die gemessene Berührungsspannung von Messpunkt zu Messpunkt sehr stark variieren kann. Es ist daher zu empfehlen, mehrere verteilte Messpunkte zur sicheren Beurteilung einer Anlage heranzuziehen.

Nachbildung des Körperwiderstandes:

Die Messung erfolgt durch Nachbildung des menschlichen Körperwiderstandes mit einem stellvertretenden ohmschen Widerstand von 1 kΩ.

Anmerkung: Der Körperwiderstand des Menschen streut stark und ist einerseits von der Berührungsspannung (siehe Abbildung 3.3) und andererseits vom Hautübergangswiderstand und vom Fehlerstromweg (siehe Kapitel 3.2) abhängig. Die Messung mit dem angeführten 1 kΩ Widerstand stellt somit nur ein repräsentatives Messverfahren dar.

Nachbildung der Füße:

- Messaufbau mit Nachbildung der Füße: Messelektrode mit einer Gesamtfläche von 400 cm², Mindestanpresskraft auf die Erde muss 500 N betragen
- Messaufbau ohne Nachbildung der Füße: Sonde, welche mindestens 20 cm in die Erde getrieben wird.

Nachbildung der Hand:

- Elektrode mit Spitze, welche ein sicheres Durchstoßen des Farbanstrichs garantiert

Die Abbildung 2.8 zeigt die Ersatzschaltung der Berührungsspannungsmessung mit zusätzlicher Berücksichtigung des Erdausbreitungswiderstandes.

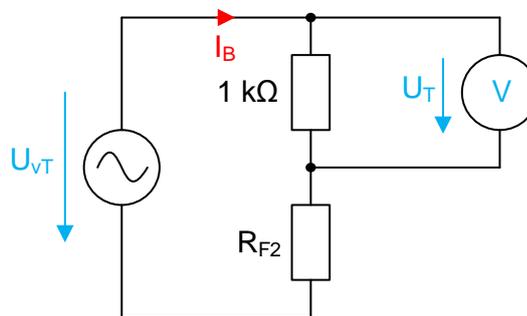


Abbildung 2.8: Ersatzschaltung einer Berührungsspannungsmessung ohne Berücksichtigung von Schuhwerk (R_{F1}) und mit Berücksichtigung des Erdausbreitungswiderstandes (R_{F2})

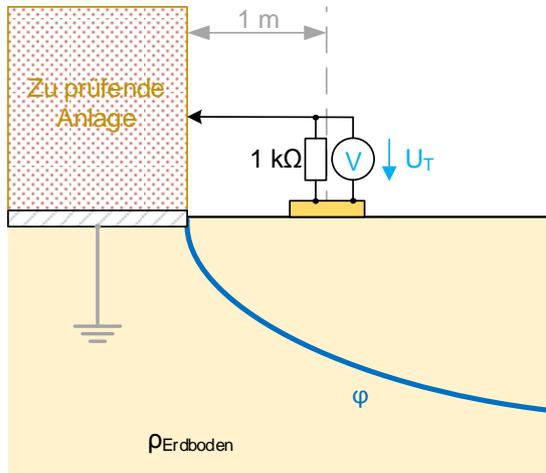
I_BStrom, der durch den menschlichen Körper fließt

U_{vT}gemessene Potentialdifferenz, die im Berührungsspannungskreis als Quellenspannung wirkt

U_Tgemessene Berührungsspannung

Die Abbildung 2.9 zeigt den Messaufbau zur Durchführung von Berührungsspannungsmessungen mit und ohne Berücksichtigung zusätzlicher Widerstände.

Messung von Berührungsspannungen



Ohne Berücksichtigung zusätzlicher
Widerstände

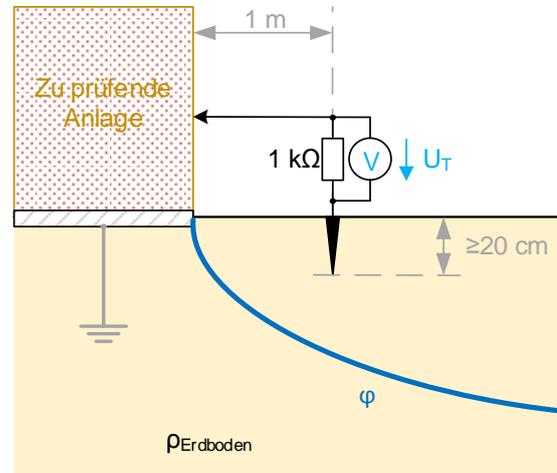


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau zur Durchführung von Berührungsspannungsmessungen (links) mit und (rechts) ohne Berücksichtigung zusätzlicher Widerstände

φErdoberflächenpotential

U_Tgemessene Berührungsspannung

3 Normative Lage

3.1 Allgemeines

Im folgenden Kapitel werden wichtige Parameter untersucht, welche zur Beurteilung der Personengefährdung von elektrischen Anlagen im Erdschlussfall relevant sind. Dies umfasst die Berechnungsvorschriften zulässiger Schritt- und Berührungsspannungen, dazu notwendige Kennwerte wie beispielsweise die menschliche Körperimpedanz, und weiterführende Vorgaben, welche zur Auslegung von Erdungsanlagen berücksichtigt werden müssen.

3.2 Zulässiger Körperstrom und Körperimpedanz

Körperimpedanz und zulässige Körperströme stellen wichtige Faktoren und begrenzende Parameter zur Beurteilung von Erdungsanlagen hinsichtlich maximal zulässiger Schritt- und Berührungsspannungen dar. In der *IEC 60479-1:2007* [12] bzw. *IEC 60479-1:1994* [13] werden Werte für die Impedanz des menschlichen Körpers bei 50/60 Hz Wechselstrom, als auch Werte für den maximal zulässigen Körperstrom (siehe Abbildung 3.1) in Hinblick auf Herzkammerflimmern angegeben. Diese Angaben sind mit Wahrscheinlichkeiten behaftet und variieren von Mensch zu Mensch. Für die Beurteilung von Berührungsspannung werden folgende Werte herangezogen:

- 50% Wahrscheinlichkeit für den Wert der Gesamtkörperimpedanz für den Strompfad Hand zu Hand unter trockenen Handbedingungen und große Berührungsflächen (*Tabelle 1, IEC 60479-1* [12] bzw. [13])
- 5% Wahrscheinlichkeit für Herzkammerflimmern (*Kurve c2, Abbildung 20 IEC 60479-1:2007*, [13] bzw. *Abbildung 14 IEC 60479-1:1994*, [12])

Hinsichtlich Körperimpedanz bezieht sich die maximal zulässige Berührungsspannungskurve der *ÖVE/ÖNORM E8383:2000* auf die *IEC 60479-1:1994 beziehungsweise die ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 auf die IEC 60479-1:2007*.

Zulässiger Körperstrom für Herzkammerflimmern:

Die Abbildung 3.1 zeigt die Wirkungsbereiche für die physiologische Wirkung des elektrischen Stroms auf den menschlichen Körper. Die für die Berechnung zulässiger Schritt- und Berührungsspannung relevante Strom- Zeitkennlinie c2 für eine 5 % Wahrscheinlichkeit für Herzkammerflimmern ist rot hervorgehoben.

AC-1:	Wahrnehmbarkeitsschwelle
AC-2:	Wahrnehmung und Muskelkontraktionen
AC-3:	Starke Muskelkontraktionen, Schwierigkeiten beim Atmen, im Allgemeinen keine organische Schäden
AC-4:	Herzstillstand, Atemstillstand, Zellschäden möglich

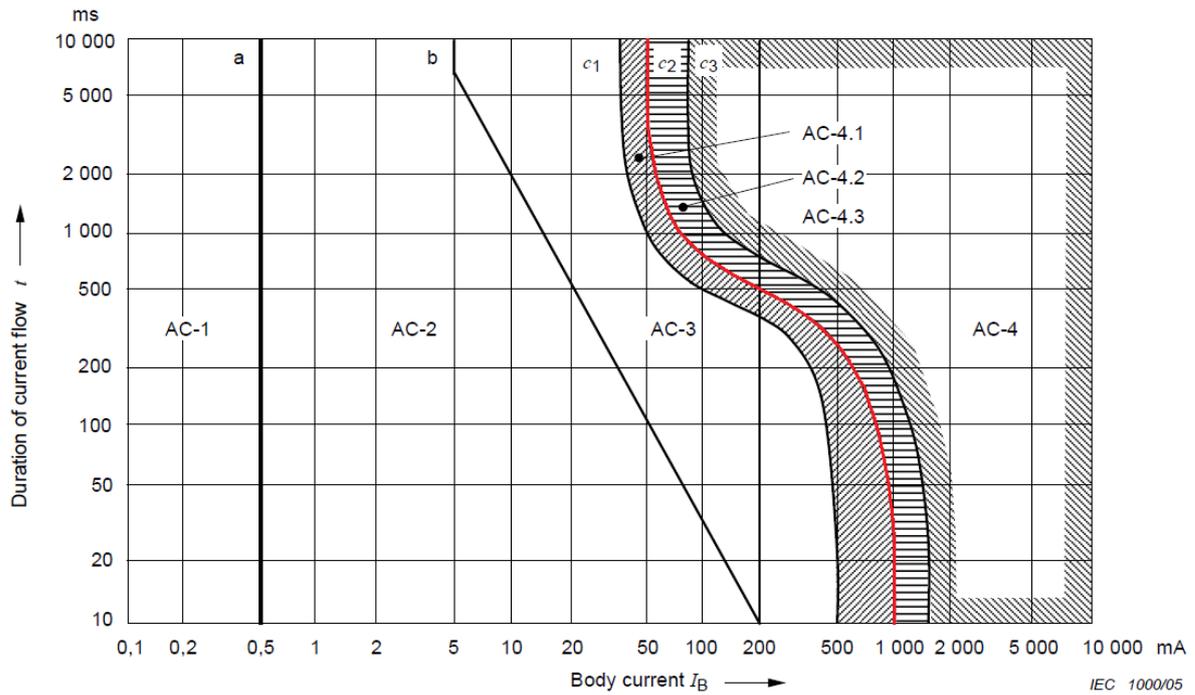


Abbildung 3.1: Strom-Zeitkennlinie c2 mit 5% Wahrscheinlichkeit für Kammerflimmern nach [12] *Abbildung 14*, bzw. [13] *Abbildung 20* (überarbeitet)

Die Kurve c2 in Abbildung 3.1 gilt für folgende Strompfade:

- von beiden Händen zu beiden Füßen
- von linker Hand zu linkem Fuß, rechtem Fuß oder beiden Füßen

Andere Strompfade als die oben beschriebenen werden mit dem sogenannten Herzstromfaktor berücksichtigt. Dieser gibt das Verhältnis, zwischen der Stromstärke bei Referenzstromweg (von linker Hand zu beiden Füßen) im Bezug zur auftretenden Stromstärke im Herzen bei anderen Stromwegen, an [13].

Um die Gefährdung von Schrittspannungen mit berücksichtigen zu können, wurde in der *IEC 60479-1:2007* erstmals ein Herzstromfaktor für den Strompfad linker Fuß zu rechter Fuß hinzugefügt.

$$HF = \frac{I_{Ref}}{I_h} \quad (3.1)$$

HF.....	Herzstromfaktor	p. u.
I_{ref}	Stromhöhe gemäß Abbildung 3.1 (Referenzstrompfad)	A
I_h	Strompfade gemäß Tabelle 3.1	A

Somit kann bei gegebenem Herzstromfaktor, die zulässige Stromhöhe für 5%-Wahrscheinlichkeit für Herzkammerflimmern, für beliebige Strompfade gemäß Formel (3.1) berechnet werden.

Strompfad	Herzstromfaktor HF
Linke Hand zu linkem, rechtem Fuß oder zu beiden Füßen	1,0
Beide Hände zu beiden Füßen	1,0
Linke Hand zu rechter Hand	0,4
Rechte Hand zu linkem, rechtem Fuß oder zu beiden Füßen	0,8
Rücken zu rechter Hand	0,3
Rücken zu linker Hand	0,7
Brust zu rechter Hand	1,3
Brust zu linker Hand	1,5
Gesäß zu linker, rechter Hand oder beiden Händen	0,7
linker Fuß zu rechtem Fuß	0,04

Tabelle 3.1: Herzstromfaktor für unterschiedliche Strompfade gemäß IEC 60479-1:2007, Tabelle 12

Zusammensetzung der Körperimpedanz:

Die gesamte Körperimpedanz (Z_T) setzt sich aus den Impedanzen der Haut an den Ein- und Austrittsflächen (Z_{s1} und Z_{s2}) und aus der inneren Impedanz (Z_i) zusammen (siehe Abbildung 3.2). Sie hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab (Berührungsspannung, Zeit und Höhe der Stromeinwirkung, Feuchtigkeit der Haut, Kontaktfläche und Anpressdruck). Während die innere Impedanz mehr vom auftretenden Strompfad und nur im geringen Ausmaß von den zuvor beschriebenen Einflussfaktoren abhängig ist, hängt die Hautübergangsimpedanz stark von diesen und somit von der Person ab. Der Wert für die Körperimpedanz schwankt bei kleinen Berührungsspannungen aufgrund der unterschiedlichen Hautübergangsimpedanzen von Mensch zu Mensch stark. Bei höheren Spannungen brechen die Hautübergangsimpedanzen zusammen und die Körperimpedanz nähert sich der überwiegend ohmsch geprägten, inneren Impedanz [13] (siehe Abbildung 3.3).

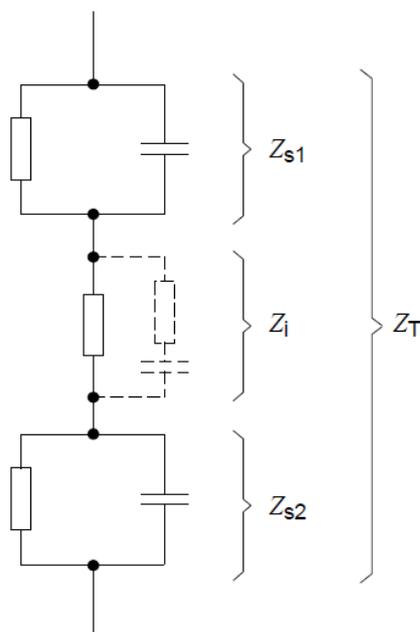


Abbildung 3.2: Körperimpedanz, bestehend aus Hautübergangsimpedanz und innerer Impedanz nach IEC 60479-1:2007 [13], Abbildung 1

Vergleicht man die Körperimpedanz bei gleichen Bedingungen und Voraussetzungen der *IEC 60479-1* von 1994 und 2007, so zeigt sich eine zunehmende Abweichung der Impedanz beider Normen bei steigender Berührungsspannung. In der aktuell gültigen Ausgabe der *IEC 60479-1:2007* nimmt die Körperimpedanz bei 1000 V einen Wert von ca. 775 Ω an, während die Körperimpedanz in der *IEC 60479-1:1994* einen Wert von 1050 Ω annimmt.

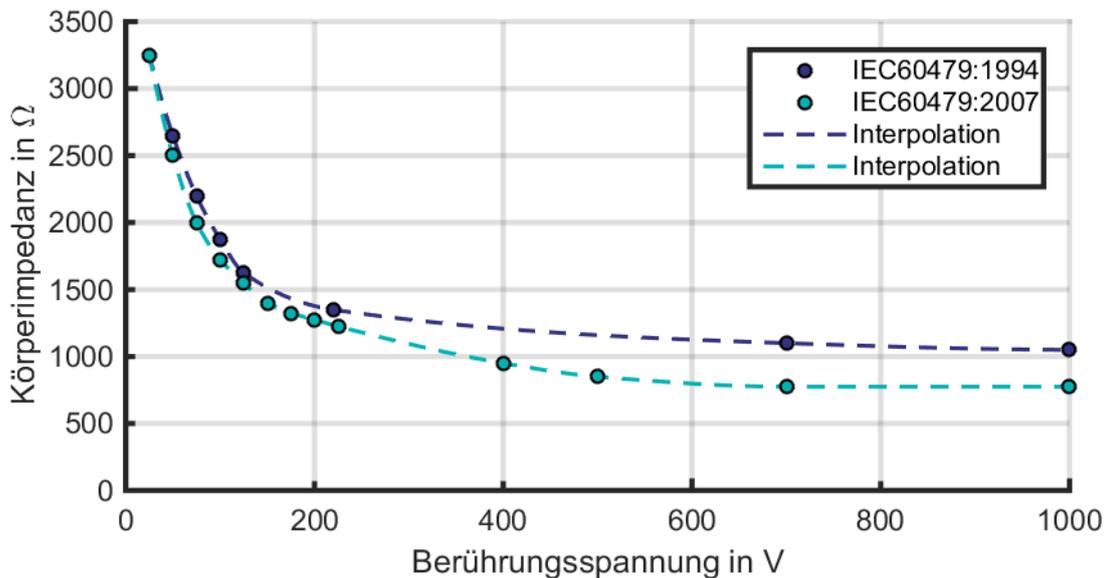


Abbildung 3.3: Vergleich der Körperimpedanz für einen Stromweg 50/60 Hz von Hand zu Hand, große Flächen (10000 mm²) und trockene Verhältnisse

3.3 Auslegung von Erdungsanlagen von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV

3.3.1 Auslegung

Die Planung und Auslegung von Erdungsanlagen für Starkstromanlagen über 1 kV erfordert das Erfüllen folgender Anforderungen gemäß *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011*:

- Sicherstellung der mechanischen Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit
- Bemessung im Hinblick auf thermische Beanspruchung (höchster Kurzschlussstrom)
- Vermeidung von Beschädigung von Betriebsmitteln
- Gewährleistung der Sicherheit von Personen

Mechanische Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit [2]:

Zur Errichtung müssen korrosionsbeständige Werkstoffe (z.B. Kupfer, Aluminium, feuerverzinkter Stahl) zum Einsatz kommen. Um eine ausreichende mechanische Festigkeit zu gewährleisten, werden zusätzlich je Material Mindestquerschnitte vorgeschrieben (*ÖVE/ÖNORM EN50522:2011, Anhang C*).

Werkstoff	Mindestquerschnitt
Kupfer	16 mm ²
Aluminium	35 mm ²
Stahl	50 mm ²

Tabelle 3.2: Mindestquerschnitte für Erdungsleiter gemäß ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 aus Gründen mechanischer Festigkeit [2]

Feuerverzinkter Bandstahl, wie er häufig als Erder (Begleiterder, Strahlenerder) zum Einsatz kommt, muss beispielsweise einen Mindestquerschnitt von 90 mm² und eine Mindestdicke von 3 mm aufweisen.

Thermische Beanspruchung [2]:

Zusätzlich zu den mechanischen Kriterien, muss die Dimensionierung der Querschnitte den thermischen Anforderungen genügen. Die Berechnung erfolgt durch Berücksichtigung der Materialeigenschaften und Berücksichtigung der Dauer und Höhe des auftretenden Fehlerstromes. Durch Aufteilung der Fehlerströme innerhalb der Anlage, kann die Beurteilung des zu beurteilenden Teils der Erdungsanlage auch für den entsprechenden Anteil des Fehlerstroms durchgeführt werden. Zusätzlich sollten spätere zu erwartende Erhöhungen der Fehlerströme bei der Dimensionierung in Betracht gezogen werden.

Querschnitt des Erdungsleiters für Fehler, welche innerhalb 5 s abgeschaltet werden [2]:

$$A = \frac{I}{K} \cdot \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (3.2)$$

A.....	Querschnitt	mm ²
I.....	Leiterstrom (Effektivwert)	A
t _f	Fehlerstromdauer	s
K.....	Werkstoffkonstante	A · √s/mm ²
β.....	Kehrwert des Temperaturkoeffizienten	°C
θ _i	Anfangstemperatur	°C
θ _f	Endtemperatur	°C

Werkstoff	β in °C	K in √s/mm ²
Kupfer	234,5	226
Aluminium	228	148
Stahl	202	78

Tabelle 3.3: Werkstoffkonstanten zur Bestimmung der Strombelastbarkeit [2] (β für 0 °C)

Beispielsweise ergibt sich für einen Bänderder aus Stahl folgender Querschnitt (4 kA für 1 s, Anfangstemperatur 20 °C, Endtemperatur 300 °C):

$$A = \frac{I}{K} \cdot \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} = \frac{4 \text{ kA}}{78 \text{ A} \cdot \frac{\sqrt{s}}{\text{mm}^2}} \cdot \sqrt{\frac{1 \text{ s}}{\ln \frac{300^\circ\text{C} + 202}{20^\circ\text{C} + 202^\circ\text{C}}}} = 57 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

Querschnitte für länger als 5 s andauernde Fehlerströme können entsprechend der ÖVE/ÖNORM EN50522:2011, Anhang D entnommen werden.

Die maßgebenden Ströme, nach denen die Erdungsanlage zu bemessen ist, hängen von der Ausführung des Sternpunktes, d.h. von der Sternpunktsbehandlung des Netzes ab. Die je nach Sternpunkt maßgebenden Ströme sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

Art des Hochspannungsnetzes	Maßgebend für die thermische Belastung ^{a e}		Maßgebend für Erdungs- und Berührungsspannungen
	Erder	Erdungsleiter	
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

^a Sind mehrere Stromflusswege möglich, darf die sich ergebende Stromverteilung für die Auslegung des Erdernetzes berücksichtigt werden.

^b Wenn eine automatische Abschaltung von Erdschlüssen nicht vorgesehen ist, ist die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von Doppelerdschlüssen abhängig von den Betriebserfahrungen.

^c Erdungsleiter an Erdschlussspulen sind nach dem größten Strom der Spulen auszulegen.

^d Es ist zu prüfen, ob außenliegende Fehler maßgeblich sind.

^e Die Mindestquerschnitte im [Anhang C](#) müssen beachtet werden.

^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.

^g Die Kurzzeit-Erdung von Netzen mit Erdschlusskompensation beginnt innerhalb von 5 s nach Feststellung des Erdschlusses.

^h Im Falle eines Fehlers in der Anlage muss der kapazitive Erdungsstrom I_C berücksichtigt werden. Weitere Erdschlussspulen außerhalb der Anlage können berücksichtigt werden.

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 60909 (für I'_{KEE} dürfen 85 % des dreipoligen Anfangskurzschlusswechselstromes als Höchstwert verwendet werden).

I'_{k1} Anfangskurzschlusswechselstrom für einen einpoligen Erdkurzschluss, berechnet nach EN 60909.

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](#)).

Abbildung 3.4: Maßgebende Ströme für die Bemessung von Erdungsanlagen [2] (überarbeitet)

Berührungs- und Schrittspannungen [2]:

Zulässige Grenzwerte für Berührungs- und Schrittspannungen, welche bei der Planung und Errichtung elektrischer Starkstromanlagen über 1 kV einzuhalten sind, sind in Kapitel 3.3.2 und Kapitel 3.3.4 beschrieben beziehungsweise in *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011, Bild 4* dargestellt. Diese Grenzwerte sind Ergebnisse einer Beurteilung ohne Zusatzwiderstände, von bloßen Füßen zu bloßen Händen. Laut *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011* ist die zusätzliche rechnerische Berücksichtigung von Zusatzwiderständen, wie beispielsweise Schuhwerk, zulässig.

Die Anforderungen von Erdungsanlagen hinsichtlich zulässiger Berührungsspannungen gelten gemäß *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011* [2] als erfüllt, wenn:

- Die Anlage befindet sich innerhalb, beziehungsweise ist Teil eines globalen Erdungssystems
- Die Erdungsspannung der betreffenden Anlage beträgt maximal den zweifachen Wert der je nach Fehlerdauer zulässigen Berührungsspannung ($U_E \leq 2 \cdot U_{Tp}$)
- Durch anerkannte Maßnahmen (*ÖVE/ÖNORM EN50522, Anhang E*) werden die Bedingungen für zulässige Berührungsspannungen eingehalten ($U_E \leq 4 \cdot U_{Tp}$)

Ein Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen zulässiger Berührungsspannungen kann auch durch typgeprüfte Ausführungen von Erdungsanlage erbracht werden. Trifft keiner der genannten Punkte zu, muss die Einhaltung mittels Messung vor Ort oder Rechnung nachgewiesen werden.

Grundsätzlich muss immer die Berücksichtigung und Überprüfung möglicher Potentialverschleppungen betrachtet werden.

Die Abbildung 3.5 zeigt die Vorgangsweise bei der Auslegung von Erdungsanlagen gemäß *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011* [2], welche nicht Teil eines globalen Erdungssystems sind:

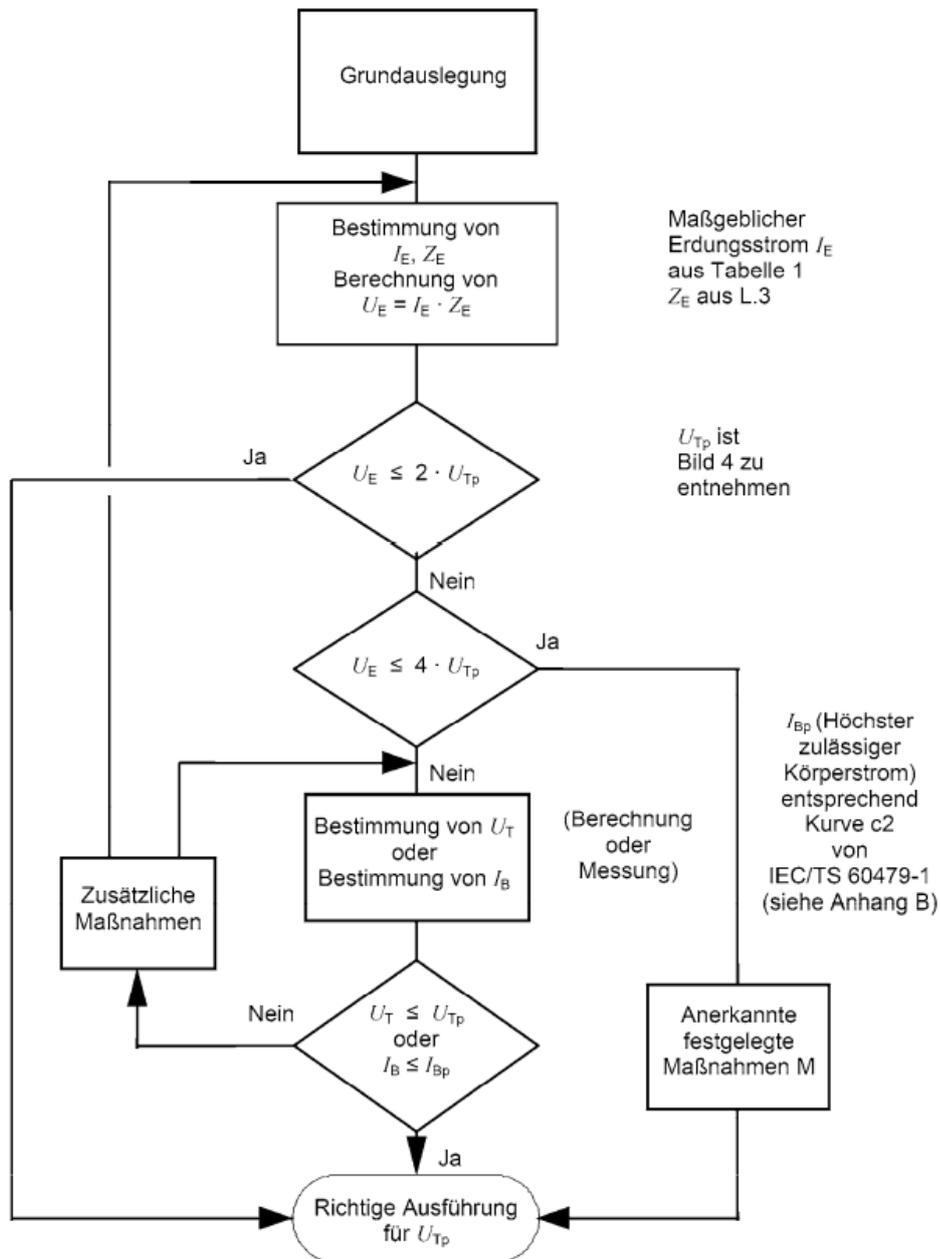


Abbildung 3.5: Auslegungsschema von Erdungsanlagen [2]

3.3.2 Überprüfung hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung

Die Bemessung hinsichtlich Berührungsspannung stellt eines der wesentlichen Kriterien einer normenkonformen Ausführung von Erdungsanlagen dar. Die Normen (ÖVE/ÖNORM E8383:2000, ÖVE/ÖNORM EN50522:2011) geben diesbezüglich Grenzwerte für die maximal zulässige Berührungsspannung abhängig von der Einwirkdauer des Fehlerstromes an. Diese Werte beziehen sich auf einen Kontakt von bloßen Händen und Füßen, Zusatzwiderstände wie etwa Widerstände von Schuhen und Erdübergangswiderstände sind nicht berücksichtigt.

Die Berechnung erfolgt iterativ und ist in Kapitel 3.6 beschrieben. Aufgrund unterschiedlicher Annahmen beider Normen, wie etwa unterschiedliche Körperwiderstände in Abhängigkeit der Berührungsspannung, sind die Kurven beider Normen nicht deckungsgleich.

ÖVE/ÖNORM E8383:2000		ÖVE/ÖNORM EN50522:2011	
Fehlerdauer t_f	zulässige Berührungsspannung U_{TP}	Fehlerdauer t_f	zulässige Berührungsspannung U_{TP}
s	V	s	V
0,04	800	0,05	716
0,08	700	0,1	654
0,14	600	0,2	537
0,2	500	0,5	220
0,29	400	1	117
0,39	300	2	96
0,49	220	5	86
0,64	150	10	85
0,72	125	-	-
1,1	100	-	-
10	80	-	-

Tabelle 3.4: Vergleich maximal zulässige Berührungsspannung [2], [4]

Bei zeitlich länger andauernden Fehlern $\gg 10$ s, wie sie in gelöscht betriebenen Netzen aufgrund des möglichen Weiterbetriebes erdschlussbehafteter Abgänge auftreten können, geben die Normen *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011* und *ÖVE/ÖNORM E8383:2000* folgende zulässige Werte vor:

ÖVE/ÖNORM E8383:2000		ÖVE/ÖNORM EN50522:2011	
Fehlerdauer t_f	zulässige Berührungsspannung U_{TP}	Fehlerdauer t_f	zulässige Berührungsspannung U_{TP}
s	V	s	V
$\gg 10$	75	$\gg 10$	80

Tabelle 3.5: Zulässige Berührungsspannung für eine Fehlerdauer $\gg 10$ s gemäß [2], [4]

Die Abbildung 3.6 zeigt die maximal zulässigen Berührungsspannungskurven gemäß *ÖVE/ÖNORM EN50522:2011* und *ÖVE/ÖNORM E8383:2000*.

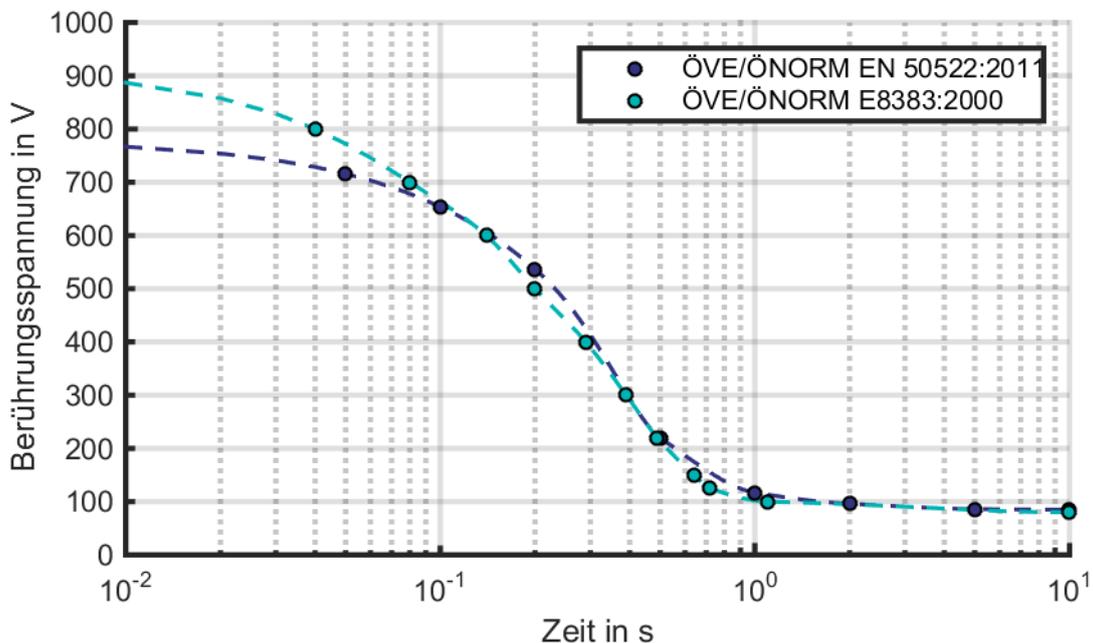


Abbildung 3.6: Vergleich maximal zulässiger Berührungsspannungen gemäß ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 und ÖVE/ÖNORM E8383:2000 (Originalkurven der Normen siehe Kapitel 8)

All diese Betrachtungen beruhen auf dem Fall, dass eine Berührung von bloßen Händen und bloßen Füßen stattfindet. Es werden keine Zusatzwiderstände berücksichtigt. Da dies größtenteils nicht dem zu erwartenden Fall entspricht, ist es zulässig, Zusatzwiderstände wie beispielsweise Schuhwerk und Erdübergangswiderstände rechnerisch zu berücksichtigen. Eine solche Berücksichtigung erlaubt eine dementsprechend höhere Leerlaufberührungsspannung U_{vTp} .

Berücksichtigung von Zusatzwiderständen R_F gemäß ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 [2] zur Bestimmung der maximal zulässigen Leerlaufberührungsspannung:

Folgende Zusatzwiderstände werden berücksichtigt:

- Widerstand der Schuhe R_{F1} :
Es wird ein Durchschnittswert für gebrauchte feuchte Schuhe herangezogen, dieser beträgt ca. 1000 Ω
- Ausbreitungswiderstand des Standortes R_{F2} :
Der Widerstand wird rechnerisch durch Multiplikation des vorherrschenden spez. Erdwiderstandes mit dem Faktor 1,5 ermittelt (Anm.: Dies entspricht näherungsweise dem Ergebnis der Berechnung mittels Halbkugelerder bei einer durchschnittlichen Fußfläche von 400 cm², siehe dazu Kapitel 3.6.3, Tabelle 3.12)

Der berücksichtigte Zusatzwiderstand ergibt sich dann gemäß [2]:

$$R_F = R_{F1} + R_{F2} \tag{3.4}$$

Die maximal zulässige Leerlaufberührungsspannung U_{vTp} kann mit Kenntnis der bereits bekannten Daten der Berührungsspannungsmessung ($U_{Tp}(t_f)$) entsprechend Tabelle 3.4, $Z_T(U_T)$ entsprechend Abbildung 3.3) wie folgt berechnet werden [2]:

$$U_{vTp}(t_f) = U_{Tp}(t_f) + (R_{F1} + R_{F2}) \cdot I_B = U_{Tp}(t_f) \cdot \left(1 + \frac{R_F}{Z_T}\right) \tag{3.5}$$

Mit:

$$I_B = \frac{U_{Tp}}{Z_T} \tag{3.6}$$

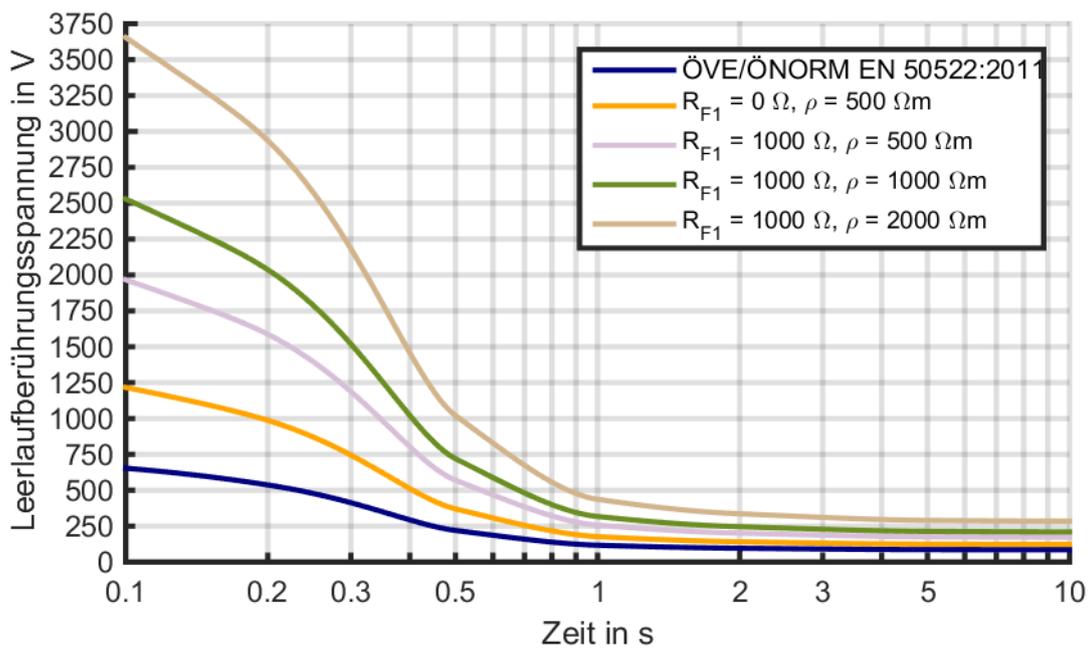


Abbildung 3.7: zulässige Leerlaufberührungsspannung bei Berücksichtigung von Zusatzwiderständen

t_f		U_{Tp}	U_{vTp}	U_{vTp}	U_{vTp}	U_{vTp}
	R_{F1} :	0Ω	0Ω	1000Ω	1000Ω	1000Ω
R_{F2} :	0Ω	750Ω	750Ω	1500Ω	3000Ω	
s		V	V	V	V	V
>> 10		80	117,5	167,5	205,0	280,0

Tabelle 3.6: Zulässige Leerlaufberührungsspannungen für eine Fehlerdauer über 10 s (Bewertungsbasis ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011)

3.3.3 Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

Je nach Gegebenheit des Netzes (Niederspannungsversorgung nur innerhalb oder auch außerhalb der Hochspannungserdungsanlage) und Einhaltung vorgeschriebener Grenzwerte bezüglich Berührungsspannung, Schrittspannung und Potentialverschleppung, kann ein Zusammenschluss zwischen der Hoch- und der Niederspannungserdungsanlage angestrebt werden. Grundvoraussetzung ist die Einhaltung der Grenzwerte bei beiden Erdungsanlagen.

Niederspannungsversorgung nur innerhalb der Hochspannungsanlage [2]:

Die beiden Erdungsanlagen müssen zusammengeschlossen werden.

Niederspannungsversorgung mit Zu-/Ableitung außerhalb der Hochspannungserdungsanlage [2]:

Zusammenschluss ist möglich, wenn:

- Hochspannungserdungsanlage Teil eines globalen Erdungssystems ist
- Anforderung laut Abbildung 3.8 (ÖVE/ÖNORM EN50522:2011, Tabelle 2) müssen erfüllt werden.

Niederspannung im Einflussbereich der Hochspannungsanlagen [2]:

Die Niederspannungserdungsanlagen sollten besonders beachtet werden.

ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011:

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.

Abbildung 3.8: Minimalanforderungen für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs- Erdungsanlagen gemäß [2]

Getrennte Erdungsanlagen [2]:

Um Beeinflussungen der Niederspannungsanlage durch Hochspannungsfehler zu begrenzen, muss ein ausreichender Abstand zwischen den getrennt errichteten Erdungsanlagen eingehalten werden. Als Richtwert gilt für Anlagen mit einer Bemessungsspannung $\leq 50 \text{ kV}$ mindestens 20 m.

3.3.4 Beurteilung von Schrittspannungen gemäß Norm

Schrittspannungsgrenzwerte werden normativ nicht eigenständig, sondern indirekt über die Berührungsspannungen definiert. Aufgrund des wesentlich günstigeren Stromwegs in Bezug auf Herzkammerflimmern im Vergleich des Stromwegs von Berührungsspannungskonfigurationen geht man davon aus, dass eine Erdungsanlage bei Erfüllen der Kriterien hinsichtlich Berührungsspannungen diese auch im Hinblick auf Schrittspannungen als ungefährlich eingestuft werden kann.

ÖVE/ÖNORM E8383 [4]:

„Für Schrittspannungen ist es nicht erforderlich, zulässige Werte zu definieren.“

Anmerkung: Zulässige Werte für Schrittspannungen wären um einiges größer als die zulässigen Berührungsspannungen; demzufolge kann, wenn eine Erdungsanlage die Anforderungen im Hinblick auf die Berührungsspannungen erfüllt, angenommen werden, dass im Allgemeinen keine gefährlichen Schrittspannungen auftreten.“

ÖVE/ÖNORM EN50522 [2]:

„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.“

In Kapitel 3.6 werden genauere Betrachtungen zur Thematik zulässiger Schrittspannungen durchgeführt. Insbesondere wird untersucht, ob beziehungsweise wann es zu Gefährdungen durch Schrittspannungen kommen kann. Hintergrund für die Betrachtung liefern Verteilernetztransformatorstationen welche einerseits hohe Erdungswiderstände aufweisen (im Bereich um die 100Ω), jedoch durch konstruktive Auslegungen und ausreichender Potentialsteuerung die Kriterien hinsichtlich Berührungsspannungen erfüllen.

3.4 Kriterien hinsichtlich der Errichtung von Erdungsanlagen für Nennwechselspannungen unter 1 kV

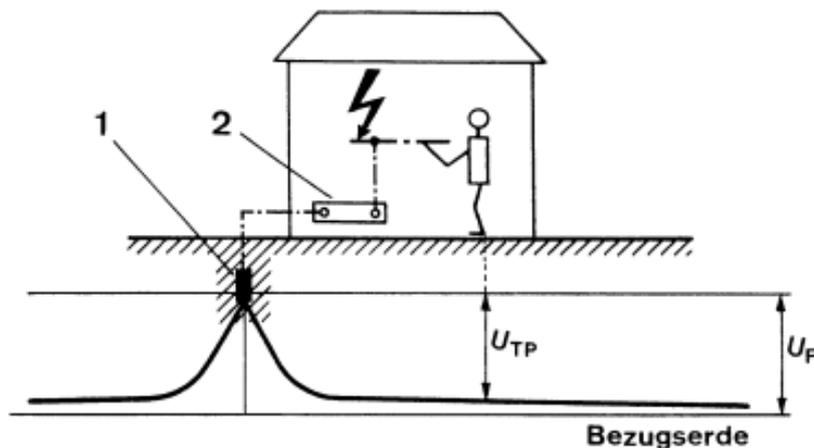
Prinzipiell beinhaltet die heranzuziehende Norm *ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010* keine direkten Vorgaben und Grenzwerte bezüglich der Ausführung von Niederspannungsanlagen zur Vermeidung von Personengefährdungen durch Mittelspannungsfehler. Behandelt werden vorrangig Isolationsfehler an Körpern oder fremden leitfähigen Teilen im Niederspannungsnetz selbst.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Begriffe in der Niederspannungsnorm anders beziehungsweise mit anderen Abkürzungen als in den zuständigen Normen für Nennspannungen über 1 kV genannt werden.

Bezeichnung	ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011	ÖVE/ÖNORM E8383:2000	ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010
(max.) Leerlaufberührungsspannung	$U_{VT}, (U_{VTp})$	$U_{ST}, (U_{STp})$	U_{TP}
belastete (max.) Berührungsspannung	$U_T, (U_{Tp})$	$U_T, (U_{Tp})$	U_T
Schrittspannung	U_S	U_S	U_S
Fehlerspannung / Erdungsspannung	U_E, EPR	U_E, EPR	U_E, U_F

Tabelle 3.7: Gegenüberstellung der Begriffskürzel Verschiedener Bezeichnungen

Maßgebende Größe hinsichtlich Personengefährdung stellt gemäß *ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010* die Grenzfehlerspannung dar, die maximal bei Isolationsfehlern an Körpern oder fremden leitfähigen Teilen in elektrischen Anlagen gegen Bezugserde (Bezugspotenzial) auftreten darf und unter vereinbarten Bedingungen ein akzeptables Risiko eines elektrischen Schlages darstellt [5].



- 1 Fehlerspannung führende Erdungsanlage (z. B. Bänderder)
- 2 PE-Leiterschiene oder Potentialausgleichsschiene
- U_F Fehlerspannung (Spannung zwischen Erdungsanlage und Bezugserde)
- U_{TP} unbeeinflusste Berührungsspannung (im Überbrückungsbereich)
- f Isolationsfehler

Abbildung 3.9: Zusammenhang zwischen Fehlerspannung U_F und unbeeinflusster Berührungsspannung U_{TP} gemäß *ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010* [5]

Demnach beträgt dieser vereinbarte Grenzwert der Fehlerspannung bei Nullung [5]:

- $U_{FL} = 65 \text{ V}$ für Wechselspannungen
- $U_{FL} = 120 \text{ V}$ für Gleichspannungen

Diese Grenzfehlerspannung darf bis zum zeitgerechten automatischen Ausschalten durch eine zugeordnete Schutzeinrichtung überschritten werden [5].

Dimensionierung des Betriebserders in Verteilnetzen bei Nullung als Maßnahme des Fehlerschutzes [5]:

Die Ausführung hat gemäß *ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010 Kapitel 10* und *Kapitel 14* zu erfolgen. Dies erfordert die Einhaltung der Nullungsbedingungen für Verteilnetze [5]:

- Ausschaltbedingungen für Verteilnetze bis 400/230 V:

$$Z_S \cdot 1,6 \cdot I_N \leq U_N \quad (3.7)$$

Z_S	Impedanz der Fehlerschleife	Ω
I_N	Nennstrom der vorgelagerten Überstrom-Schutzeinrichtung	A
U_N	Nennspannung gegen Erde	V

- Erdungsbedingung für Verteilnetze:

Der PEN-Leiter ist in der Nähe der Stromquelle und nahe den Enden der Netzausläufer, dies sind Abzweige mit Längen über 100 m, zu erden.

Bedingungen laut Abbildung 3.10 beziehungsweise *ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010 Kapitel 14* sind einzuhalten.

Die Erdungsbedingung nahe den Enden der Netzausläufer kann auch durch eine Nullungsverbindung mit einer Verbraucheranlage mit entsprechender Erdungsanlage erfüllt werden (gemäß *ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010 Kapitel 10.2.2.2*)

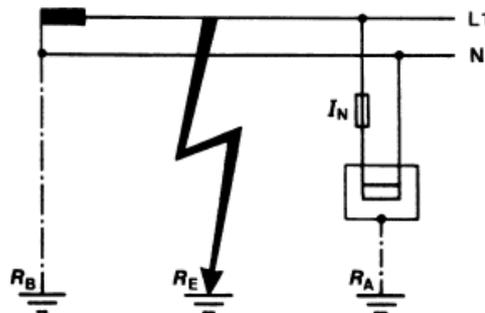
- Prüfung:

Vor Inbetriebnahme der Anlage ist diese gemäß *ÖVE/ÖNORM E8001-6-61* zu prüfen und zu dokumentieren.

Weiters muss der Erdungswiderstand der Gesamtheit aller Betriebserder ausreichend niedrig sein [5]:

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{65 \text{ V}}{U_N - 65 \text{ V}} \quad (3.8)$$

R_B	Erdungswiderstand der Gesamtheit aller Betriebserder	Ω
R_E	kleinster abschätzbarer Erdausbreitungswiderstand (nicht mit dem Schutzerdungsleiter verbunden)	Ω
U_N	Nennspannung gegen Erde	V



- R_B Erdungswiderstand der Gesamtheit aller Betriebserder
- R_E Kleinster abschätzbarer Erdausbreitungswiderstand der nicht mit einem Schutzerdungsleiter (oder Potentialausgleichsleiter) verbundenen, fremden leitfähigen Teile, über die ein Erdschluss entstehen kann
- U_N Nennspannung gegen geerdeten Leiter

Abbildung 3.10: Erdschluss in einem geerdeten Verteilernetz und einer Verbraucheranlage im TT – System gemäß ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010 [5], (überarbeitet)

Die Abschätzung des Erdausbreitungswiderstandes zur Bestimmung von R_E erfolgt durch Wahl des niedrigsten, zu erwartenden spez. Erdwiderstandes im Gebiet des Verteilernetzes.

3.5 Gegenüberstellung von Begriffsbezeichnungen zur Thematik Berührungsspannung

Je nach Norm werden einzelne Begriffe unterschiedlich bezeichnet. Zur besseren Verständlichkeit werden nachfolgend gebräuchliche Begriffe im Bereich der Berührungsspannungen und deren unterschiedlichen Bezeichnungen gelistet:

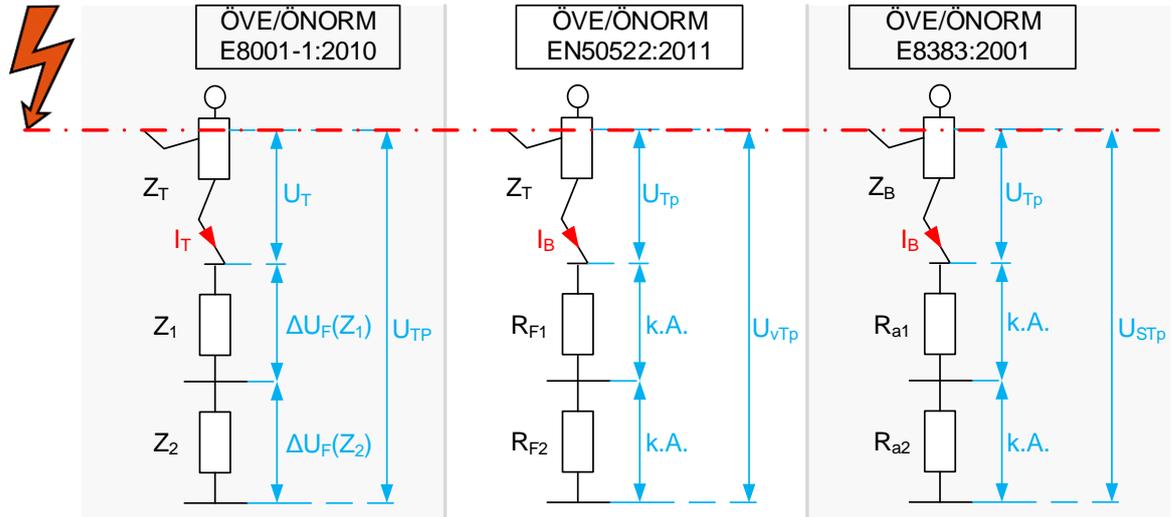


Abbildung 3.11: Gegenüberstellung der Bezeichnungen für die Berührungsspannung

- Z_T, Z_B Körperimpedanz
- I_B, I_T Strom, der durch den Körper fließt
- U_{Tp}, U_T Zulässige Berührungsspannung
- U_{vTp}, U_{STp}, U_{TP} Grenzwerte der Potentialdifferenz (Quellenspannung im Berührungsspannungskreis)
- $R_a, R_F, Z_{1,2}$ Zusätzlicher Widerstand (Schuhwerk, Erdausbreitungswiderstand)

Anforderungen zur Einhaltung der zulässigen Berührungsspannungen:

	ÖVE/ÖNORM EN50522:2011	ÖVE/ÖNORM E8383:2000
max. zulässige Berührungsspannung ($t > 10$ s):	80 V	75 V
grundlegende Anforderung erfüllt, wenn:	Anlage ist Teil eines globalen Erdungssystems	
	$U_E \leq 2 \cdot U_{Tp} = 160$ V	$U_E \leq 2 \cdot U_{Tp} = 150$ V
mit Anwendung von Ersatzmaßnahmen:	Anhang E	Anhang D
	$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp} = 320$ V	$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp} = 300$ V

Tabelle 3.8: Bedingungen, um die Auslegung hinsichtlich zulässiger Berührungsspannungen sicherzustellen

3.6 Zulässige Schrittspannung auf Beurteilungsbasis maximal zulässiger Berührungsspannungen

3.6.1 Berechnung maximal zulässige Berührungsspannung

Die Berechnung zulässiger Berührungsspannungen wird in [2] *Anhang A* beschrieben und wird nachfolgend inhaltlich zusammengefasst.

Berechnungsformel:

$$U_{Tp} = I_B(t_f) \cdot Z_T(U_T) \cdot \frac{1}{HF} \cdot BF \quad (3.9)$$

Zur Berechnung werden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt:

- Zulässiger Körperstrom $I_B(t_f)$ in Abhängigkeit der Fehlerdauer für 95 % Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ([13] bzw. Abbildung 3.1)
- Herzstromfaktor HF ([13] bzw. Tabelle 3.1)
- Körperimpedanz $Z_T(U_T)$ in Abhängigkeit der Berührungsspannung([13] bzw. Abbildung 3.3)
- Korrekturfaktor BF für Körperimpedanz([13] *Abbildung 3*):
 - Eine Hand – beide Füße: 0,75
 - Beide Hände – beide Hände: 0,50
- Keine Berücksichtigung zusätzlicher Widerstände (Schuh-, Erdübergangswiderstand)

Die maximal zulässige Berührungsspannung kann mit Hilfe dieser Faktoren für einen vorgegebenen Stromweg berechnet werden. Da mehrere Stromwege möglich und denkbar sind, erfolgt die Berechnung für die maximal zulässige Berührungsspannung mittels gewichtetem Mittelwert mehrerer möglicher Berührungsspannungskonfigurationen.

Folgende Konfigurationen fließen in die Berechnung laut [2] mit ein:

Konfiguration:	Gewichtung	BF	HF
linke Hand - beide Füße	1	0,75	1
rechte Hand - beide Füße	1	0,75	0,8
beide Hände - beide Füße	1	0,5	1
linke Hand - rechte Hand	0,7	1	0,4

Tabelle 3.9: Gewichtung berücksichtigter Konfigurationen zur Berührungsspannungsberechnung

3.6.2 Berechnung zulässiger Schrittspannungen

Durch das Hinzufügen eines Herzstromfaktors für den Strompfad von linkem Fuß zu rechtem Fuß in der *IEC 60479-1:2007* ist es möglich, maximal zulässige Schrittspannungen bezogen auf die Gefahr von Herzkammerflimmern hin zu berechnen. Die Berechnungsbasis bildet die Berechnung von maximal zulässigen Berührungsspannungen gemäß Formel (3.9). Da die Körperimpedanz selbst von der Berührungsspannung und damit vom Ergebnis abhängig ist, muss die Berechnung iterativ (siehe Abbildung 3.12) erfolgen. Die Ströme für diese Konfiguration sind um ein vielfaches höher, daher kann es zu vielen Effekten durch den auf den menschlichen Körper einwirkenden Strom kommen. Betrachtet werden hier vorerst nur Auswirkungen in Bezug auf Kammerflimmern! Ebenso werden analog zur Berechnung der Berührungsspannung vorerst keine Zusatzwiderstände berücksichtigt.

Beschreibung der Vorgangsweise für die Berechnung zulässiger Schrittspannungen:

Die Berechnung der zulässigen Schrittspannung erfolgt in dieser Arbeit unter dem Kriterium des Herzkammerflimmerns. Der Wertebereich wird in Anlehnung an die Berührungsspannungskurve (siehe Abbildung 3.6) mit Fehlerdauern größer gleich fünf Millisekunden gewählt.

- Start erfolgt durch Vorgabe des zu berechnenden Stromweges
- Wahl der Fehlerdauer (aufsteigend: 0.05 s, 0.1 s, 0.2 s, 0.5 s, 1 s, 2 s, 5 s, 10 s)
- Berechnung des für die gewählte Konfiguration konstanten Anteils, anhand der Einflussfaktoren für die gegebene Fehlerzeit und gegebenen Strompfad
- Vorgabe einer kleinen fiktiven Körperimpedanz als Startwert (im Bereich von 1 Ω)
- Berechnung der Schrittspannung für die zuvor gewählte Impedanz
- Vergleich der berechneten Schrittspannung mit jener Spannung, welche die Körperimpedanz laut Norm [13] für diesen Impedanzwert vorgibt
- Schrittweises Erhöhen der Körperimpedanz, bis beide Spannungen nur mehr geringfügig voneinander abweichen (Schranke ϵ)
- Zuordnen der prospektiven Schrittspannung zu der zum Beginn gewählten Fehlerdauer
- Wiederholung der Berechnung für größere Fehlerzeiten bis einschließlich 10 s

Die Abbildung 3.12 zeigt die Vorgangsweise zur Berechnung zulässiger Schrittspannung, wie zuvor beschrieben. Berechnungsbasis stellt die Berechnung zulässiger Berührungsspannungen (siehe Kapitel 3.6.1) dar.

Die aus der iterativen Berechnung erhaltenden Kurven sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

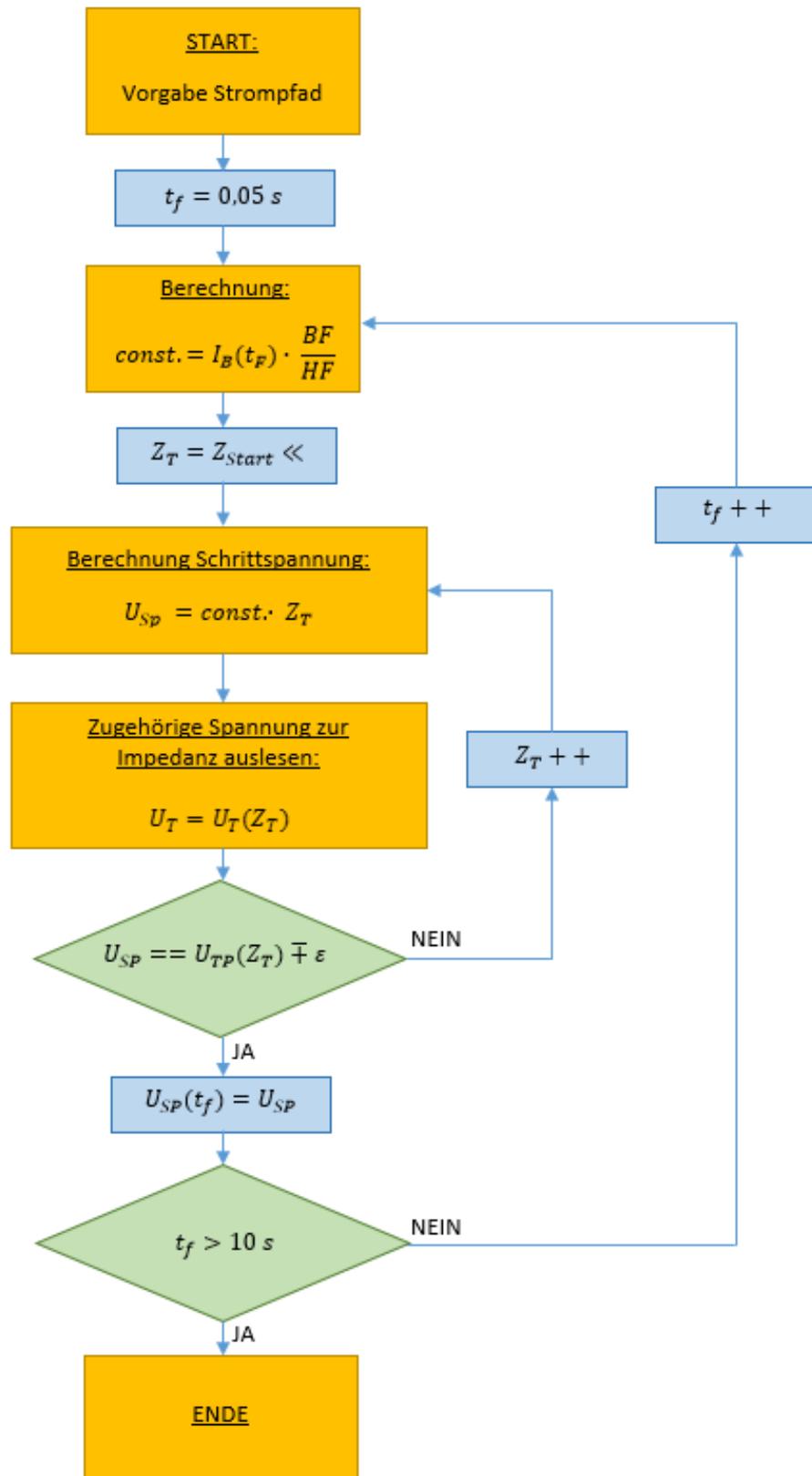


Abbildung 3.12: Berechnungsweg zur Bestimmung zulässiger Schrittspannungen bezüglich Herzkammerflimmern

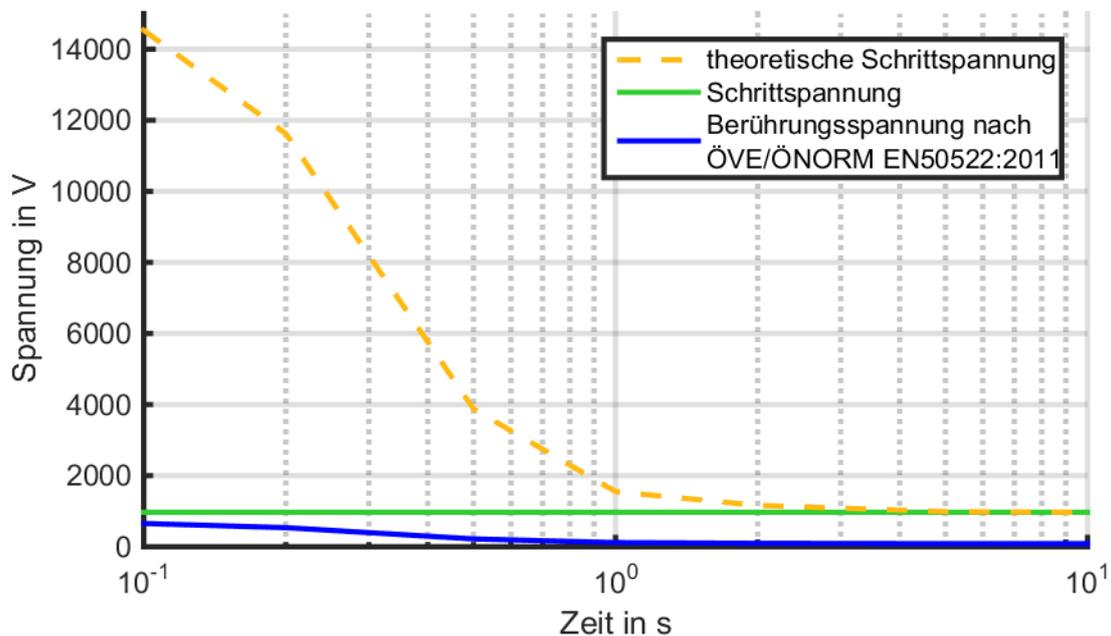


Abbildung 3.13: Berechnete, theoretisch zulässige Schrittspannungen für Herzkammerflimmern

Wie in Abbildung 3.13 ersichtlich, überschreitet die gemäß Abbildung 3.12 berechnete Schrittspannung die maximal zulässige Berührungsspannung deutlich. Dies ist aufgrund der wesentlich höheren zulässigen Ströme, bedingt durch den Herzstromfaktor, zurückzuführen. Da diese abseits der Gefahr von Herzkammerflimmern zu weiteren zahlreichen Einflüssen auf den menschlichen Körper führen (Muskelverkrampfungen, Verbrennungen, etc.), ist eine weitere Erhöhung der zulässigen Schrittspannung bei kürzeren Einwirkzeiten in Abbildung 3.13 nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird für die zulässige Schrittspannung in weiterer Folge nur mehr der Wert für eine Einwirkdauer von ≥ 10 s betrachtet, welcher 969 V beträgt.

Weitere Konfigurationen:

Alternativ können auch hier unterschiedliche Konfigurationen für die Stromwege betrachtet und gewichtet werden. Exemplarisch werden hier zwei zusätzliche denkbare Szenarien und deren Gefahrenpotential aufgezeigt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass diese Betrachtung eine „worst case“ Abschätzung ohne jegliche Zusatzwiderstände darstellt. Untersucht wird der Stromweg von beiden Füßen zu beiden Händen und der Stromweg vom Gesäß zu beiden Händen (z-B. sitzen in der Wiese). Dabei wird trotz unterschiedlicher Ausprägung des Stromwegs einheitlich der Begriff Schrittspannung verwendet.

Konfiguration:	BF	HF
linker Fuß - rechter Fuß	1	0,04
beide Hände - beide Füße	0,5	1
beide Hände - Gesäß	0,38	0,7

Tabelle 3.10: Einflussfaktoren unterschiedlicher Schrittspannungskonfigurationen

Der Korrekturfaktor BF der Körperimpedanz für den Stromweg beide Hände zu Gesäß, kann nach IEC 60479-1:2007 (Abbildung 2, Seite 59) [13] berechnet werden. Die Berechnung zulässiger Schrittspannungen je gewählter Konfiguration erfolgt nach Abbildung 3.12.

t_f	linker Fuß - rechter Fuß	Hände - Füße	Hände - Gesäß
	$U_{Sp,Fuß-Fuß}$	$U_{Sp,Hände-Füße}$	$U_{Sp,Hände-Gesäß}$
s	V	V	V
0,05	(17438)	418	441
0,1	(14531)	370	391
0,2	(11625)	319	337
0,5	(3875)	143	151
1	(1550)	78	83
2	(1163)	65	69
5	(988)	59	62
10	969	58	61

Tabelle 3.11: gemäß Abbildung 3.12 berechnete maximal zulässige „Schrittspannungen“ für verschiedene Ausprägungen des Stromweges, ohne Berücksichtigung von Zusatzwiderständen

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 3.11 und den Verläufen in Abbildung 3.14 ist zu erkennen, dass gewisse Konfigurationen (Hände – Füße, Hände – Gesäß) hinsichtlich des Stromwegs durch den Körper ein bedeutend größeres Gefährdungspotential aufweisen, als die normativ erfasste Schrittspannung, wenngleich darauf hingewiesen werden muss, dass die Wahrscheinlichkeit auf das Eintreffen dieser Ausprägungen des Stromweges während eines Fehlerfalls möglicherweise gering einzuschätzen ist. Mit dieser Untersuchung soll somit lediglich die Gefährdung durch Erdungsspannungen und die damit verbundenen Folgen aufgezeigt werden und so das Bestreben, Erdungsspannungen und die daraus resultierenden Schrittspannungen so gering als möglich zu halten, verdeutlicht werden.

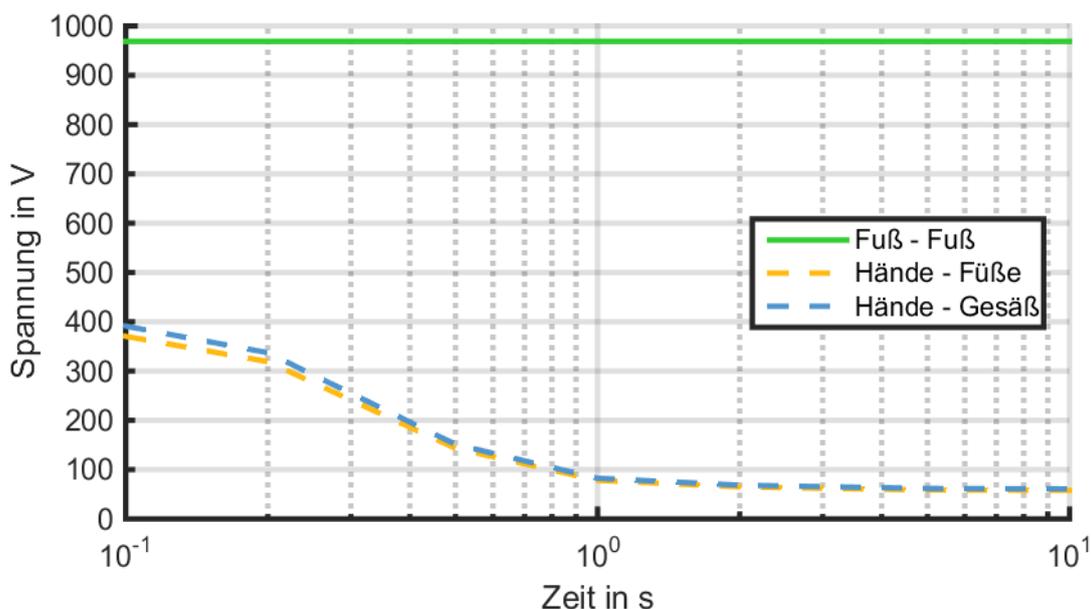


Abbildung 3.14: gemäß Abbildung 3.12 berechnete maximal zulässige „Schrittspannungen“ in Abhängigkeit der Einwirkdauer, ohne Berücksichtigung von Zusatzwiderständen

3.6.3 Modell „Belastete Schrittspannung“

Die Berechnung zulässiger Schrittspannungen nach Kapitel 3.6.2 berücksichtigt analog zur Berechnung zulässiger Berührungsspannung keine Zusatzwiderstände. Da dieser Fall in der Praxis mit geringer Wahrscheinlichkeit auftritt, werden nun zusätzliche Widerstände, wie Erdübergangswiderstände und Isolationswiderstände von Schuhen im Stromkreis, mitberücksichtigt. Durch die entstehende Serienschaltung kann die zulässige Schrittspannung auch dementsprechend höher ausfallen. Betrachtet wird folgend der Strompfad von linkem Fuß zu rechtem Fuß welcher den klassischen Fall darstellt, als auch im Anschluss die beiden zuvor beschriebenen Konfigurationen (Stromweg: Hände – Füße, Stromweg: Hände – Gesäß).

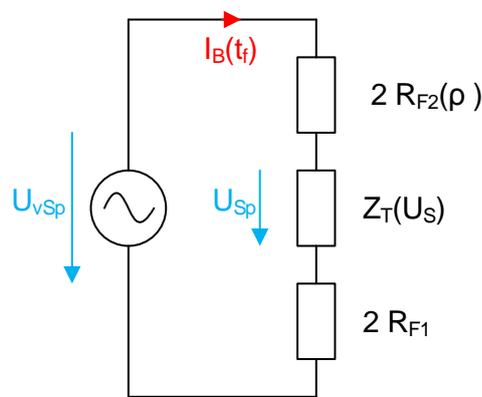


Abbildung 3.15: Ersatzschaltung zur Berechnung belasteter Schrittspannungen

Zusatzwiderstand für Schuhe R_{F1} :

In Anlehnung an [2] und [4] wird ein Durchschnittswert für feuchte Schuhe herangezogen, dieser liegt bei $R_{F1} = 1000 \Omega$.

Ausbreitungswiderstand des Standortes R_{F2} :

Der Ausbreitungswiderstand wird je Fuß mittels Halbkugelerder für eine durchschnittliche Fußfläche von $A_{Fu\beta} = 200 \text{ cm}^2$ eines Menschen nachgebildet.

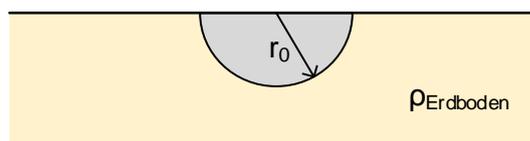


Abbildung 3.16: Nachbildung des Ausbreitungswiderstandes mittels Halbkugelerder

Berechnungsformel Ausbreitungswiderstand Halbkugelerder gemäß [14]:

$$R_{Halbkugel} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_0} \quad (3.10)$$

Somit lässt sich der Ausbreitungswiderstand je Fuß näherungsweise berechnen wenn eine durchschnittliche Fußfläche von $A_{Fu\beta} = 200 \text{ cm}^2$ angenommen wird:

$$R_{F2} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_{Fu\beta}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot \sqrt{\frac{A_{Fu\beta}}{\pi}}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot \sqrt{\frac{0,02 \text{ m}^2}{\pi}}} \quad (3.11)$$

Vereinfacht kann der Ausbreitungswiderstand, wie in ÖVE/ÖNORM EN 50522, auch als Vielfaches des spezifischen Erdwiderstandes angegeben werden, wie es bei Berührungsspannungen üblich ist (z.B.: $R=1,5 \times \rho$ bei Berührungsspannungen).

Hier gibt die Norm [2] und [4] für den Ausbreitungswiderstand das 1,5 fache des spezifischen Erdwiderstands an. Vergleicht man diese Werte mit den Berechnungsergebnissen eines Halbkugelerders (Tabelle 3.12), so ergeben sich ähnliche Größenordnungen. Geht man für Schrittspannungen nach dem gleichen Prinzip vor und beachtet zusätzlich, dass hier lediglich der Ausbreitungswiderstand je Fuß und nicht für beide Füße zu berücksichtigen ist, ergibt sich angenähert ein Faktor zwei zum spezifischen Erdwiderstand.

ρ	Berührungsspannung: Beide Füße		Schrittspannung: je ein Fuß	
	$R_{\text{Halbkugel, beide Füße}}$	$1,5 \cdot \rho$	$R_{\text{Halbkugel, ein Fuß}}$	$2 \cdot \rho$
Ωm	Ω	Ω	Ω	Ω
50	70,5	75	99,7	100
100	141,0	150	199,5	200
200	282,1	300	398,9	400
300	423,1	450	598,4	600
500	705,2	750	997,4	1000
1000	1410,5	1500	1994,7	2000
2000	2820,9	3000	3989,4	4000
3000	4231,4	4500	5984,1	6000
5000	7052,4	7500	9973,6	10000

Tabelle 3.12: Vergleich Ausbreitungswiderstand Halbkugelerder und $x \cdot$ spez. Bodenwiderstand zur Berechnung des Standortübergangswiderstands

Das komplette Ersatzschaltbild (Abbildung 3.15) setzt sich nun aus zweifacher Berücksichtigung des Ausbreitungswiderstandes, zweifacher Berücksichtigung des Zusatzwiderstandes für Schuhe und aus der Körperimpedanz für den Stromweg von linkem Fuß zu rechtem Fuß zusammen. Beeinflussungen der beiden Ausbreitungswiderstände (Halbkugelerder) untereinander werden nicht mitberücksichtigt.

Die Berechnung der zulässigen Leerlaufschrittspannung, wobei $U_{Sp}(t_f)$ aus (Tabelle 3.11) entnommen werden kann, kann mit der folgenden Gleichung durchgeführt werden:

$$U_{vSp} = U_{Sp}(t_f) + 2 \cdot (R_{F1} + R_{F2}) \cdot I_B = U_{Sp}(t_f) \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{R_{F1} + R_{F2}}{Z_T} \right) \right] \quad (3.12)$$

Zur Berechnung der weiteren Konfigurationen muss der Stromein- und Stromaustrittsweg separat betrachtet werden, wodurch die Zusatzwiderstände nochmals unterteilt werden müssen:

$$U_{vSp} = U_{Sp}(t_f) + (R_{F1,1} + R_{F1,2} + R_{F2,1} + R_{F2,2}) \cdot I_B \quad (3.13)$$

Folgende Zusatzwiderstände werden exemplarisch für die Berechnung angenommen:

	$R_{F1,1}$	$R_{F1,2}$	$R_{F2,1}$	$R_{F2,2}$
	Ω	Ω	Ω	Ω
Fuß - Fuß	Schuh	Schuh	$R_{\text{Halbkugel,Fuß}}$	$R_{\text{Halbkugel,Fuß}}$
	1000	1000	$2 \cdot \rho$	$2 \cdot \rho$
Hände - Füße	Hände	Schuhe	$R_{\text{Halbkugel,Hände}}$	$R_{\text{Halbkugel,Fußspitzen}}$
	0	1000	$2 \cdot \rho$	$\rho / (2\pi \cdot 0,113)$
Hände - Gesäß		Hose	$R_{\text{Halbkugel,Hände}}$	$R_{\text{Halbkugel,Gesäß}}$
	0	100	$2 \cdot \rho$	$1,5 \cdot \rho$

Anmerkungen:

Ein Fuß entspricht ($2 \cdot \rho$)

Beide üße entsprechen ($1,5 \cdot \rho$)

Zwei Hände bilden ca. die Fläche von einem Fuß ($2 \cdot \rho$)

Beide Fußspitzen bilden ca. eine Fläche von 20 cm^2 ($R = \rho / (2 \cdot \pi \cdot 0,1128)$)

Das Gesäß wird mit einer vergleichbaren Fläche mit beiden Füßen angenommen ($1,5 \cdot \rho$)

Zur Berücksichtigung der Hose wird stellvertretend ein Widerstand von 100Ω angenommen

Tabelle 3.13: Angenommene Zusatzwiderstände zur Berechnung belasteter Schrittspannung

Damit ergeben sich für den belasteten Fall bei einer Stromeinwirkdauer von $> 10 \text{ s}$ gemäß Modell (Abbildung 3.15) folgende zulässige Schrittspannungen:

ρ	linker Fuß - rechter Fuß	Hände - Füße	Hände - Gesäß
	$U_{vSp,Fuß-Fuß}$	$U_{vSp,Hände-Füße}$	$U_{vSp,Hände-Gesäß}$
Ωm	V	V	V
0	3469	83	64
50	3719	87	68
100	3969	91	73
200	4469	100	83
300	4969	108	92
500	5969	126	111
1000	8469	168	159
2000	13469	253	254
3000	18469	339	349
5000	28469	509	539

Tabelle 3.14: laut Berechnung zulässige „Schrittspannungen“ für verschiedene Konfigurationen mit Berücksichtigung von Zusatzwiderständen bei einer Stromeinwirkdauer von $> 10 \text{ s}$

Die Abbildung 3.17 zeigt die Berechnungsergebnisse der zulässigen, belasteten Schrittspannung für die Stromwege Hände - Füße und Hände - Gesäß bei einer Stromeinwirkdauer über 10 s .

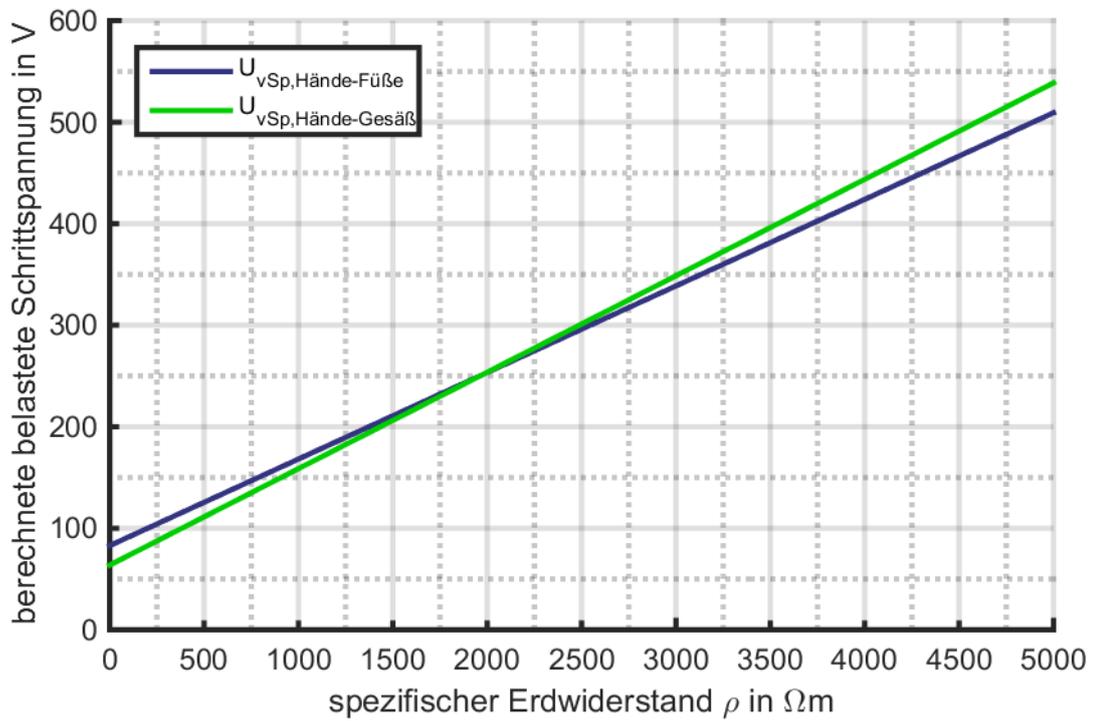


Abbildung 3.17: berechnete, belastete Schrittspannung für eine Stromeinwirkdauer über 10 s und einen Stromweg von Hände – Füße und Hände – Gesäß (siehe auch Tabelle 3.14) bei einer Stromeinwirkdauer von > 10

4 Messungen an Erdungsanlagen

4.1 Allgemeines

Durch Messungen an Erdungsanlagen von 20/0,4- kV-Verteilnetztransformatorstationen werden diese hinsichtlich der Einhaltung normativ vorgeschriebener Grenzwerte und richtiger Ausführung geprüft.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Vielzahl an Anlagen gemäß nachfolgenden Ausführungen gemessen und die erhaltenen Ergebnisse bewertet.

4.2 Durchgeführte Messungen an Mittelspannungsstationen

Der Ablauf der Messung erfolgt bei jeder zu messenden Station analog, wenngleich nicht bei jeder Station alle aufgezählten Messungen durchgeführt werden. Nach Möglichkeit und geographischer Gegebenheit werden bevorzugt zwei zu bewertende Stationen im Rahmen einer Messung beurteilt. Hierfür stellt jeweils eine der beiden Stationen die Gegenerde für die andere dar. Ist dieser Aufbau aus technischen und geographischen Gegebenheiten nicht möglich, beispielsweise aufgrund verbundener Erdungsanlagen der Stationen oder zu großer Entfernung der beiden Stationen, wird eine geeignete Gegenerde, zum Beispiel in Form eines Kabelauführungsmasten oder Hochspannungsmasten verwendet. Bei allen Messungen wird darauf geachtet, dass die Erdungsanlage der Gegenerde durch geeigneten Abstand nicht im Einflussbereich der zu messenden Erdungsanlage liegt.

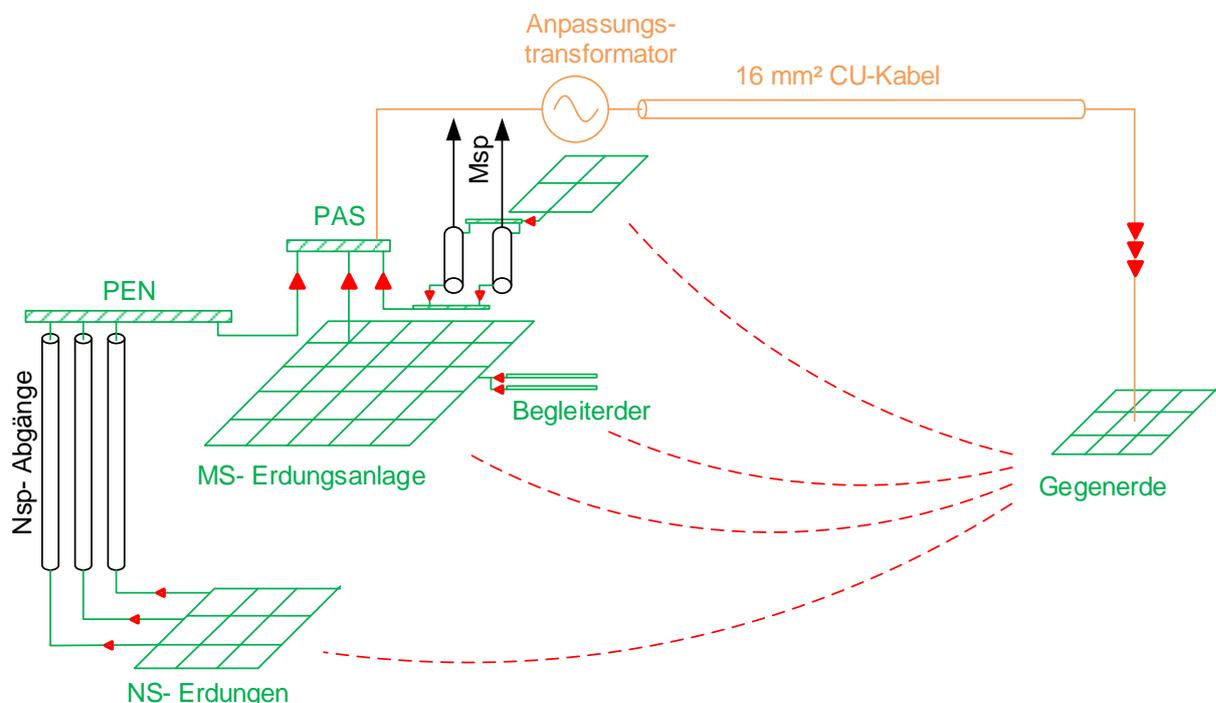


Abbildung 4.1: Messaufbau der Erdungsmessungen bei zusammengeschlossenen MS/NS - Erdungsanlagen

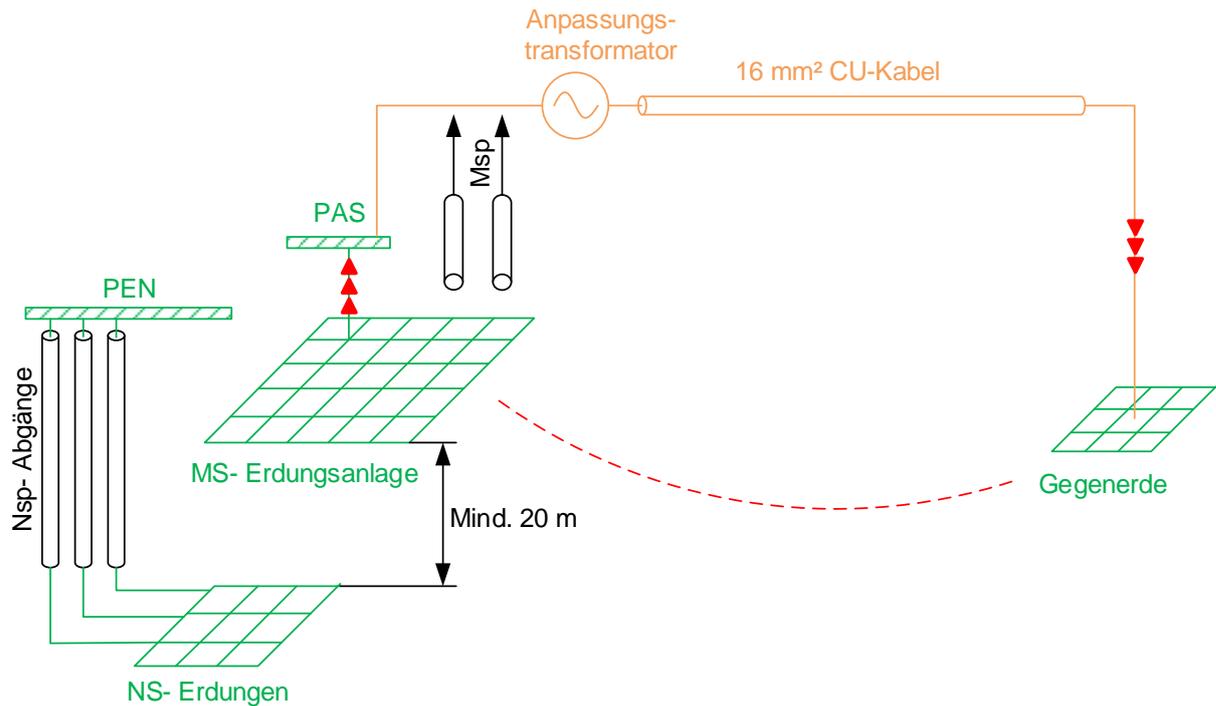


Abbildung 4.2: Messaufbau der Erdungsmessungen bei getrennten MS/NS - Erdungsanlagen

Der Messablauf gliedert sich in folgende Schritte:

- Messung des spezifischen Erdwiderstandes
- Herstellung des Messstromkreises durch verbinden der Erdungsanlage und der Gegenerde mittels 16 mm² Kupferkabel oder nach Möglichkeit direktes Verbinden über freigeschaltete, einseitig geerdete Phasenleiter
- Auslegung der Messsondenleitungen auf ca. 300 m Entfernung zur betrachteten Station
- Widerstandsvormessung mittels Messbrücke zur Abschätzung der Ausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen
- Stromeinspeisung mit oder ohne Anpassungstransformator, je nach Größenordnung der Ausbreitungswiderstände der Stationen
- Messung des eingespeisten Stroms und der Erdungsspannung
- Nach Möglichkeit Messung der Stromaufteilung (Schirme, MS/NS - Begleiterder, etc.) innerhalb der Station
- Rechnerische Bestimmung des Anlagenerdungswiderstandes

$$R_A = \frac{U_E}{I_{Station}} \quad (4.1)$$

- Messung der belasteten Berührungsspannung rund um die Station und an ausgewählten Punkten im Netz
- Messung des Erdoberflächenpotentials und Messung von Schrittspannungen
- Bei Stationen mit getrennten NS- und MS-Erdungsanlagen Wiederholung des Messablaufs nach Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

4.2.1 Gemessene Erdoberflächenpotentiale der Stationen

Zur Bestimmung der maximalen auftretenden Spannungsgradienten und die damit verbundene Bestimmung auftretender Schrittspannungen einer Station, wird das Erdoberflächenpotential, ausgehend von der Verteilernetztransformatorstation, in mehrere Richtungen gemessen. Durch Auswertung der Messdaten, können anhand der durchgeführten Messreihe, Einflüsse von Potentialsteuerringen und weiterer erdungswirksamer Einbauten, wie beispielsweise Strahlenerder, auf die auftretenden Schrittspannungen und Potentialverläufe dargestellt werden.

Um die einzelnen Potentialverläufe der Stationen miteinander vergleichen zu können, werden alle gemessenen Potentialkurven einheitlich im Bereich bis 300 m Entfernung zur Station interpoliert.

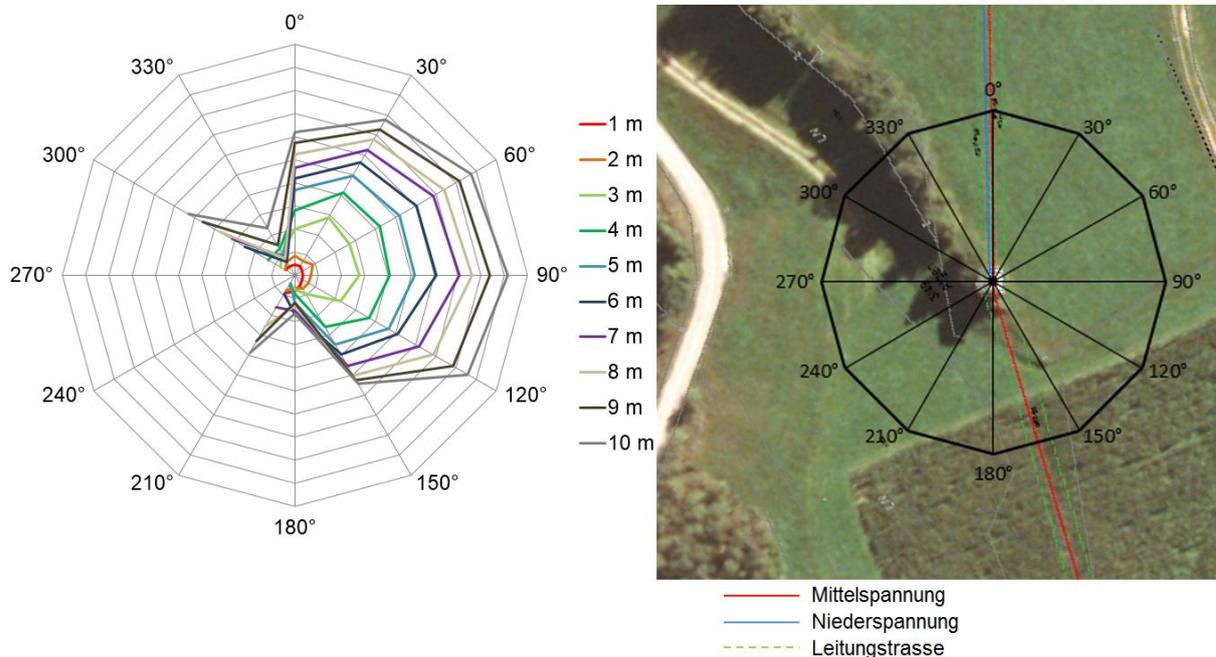


Abbildung 4.3: Beispiel eines gemessenen Potentialverlaufs rund um eine Station (Position am Rande des Waldstreifens in der Bildmitte)

Durch Messungen rund um die Station ist die Wirkung und Lage vorhandener Erder entlang der Bäume klar zu erkennen. Aufgrund örtlicher Gegebenheiten, wie beispielsweise Straßen und Häuser, konnte nicht immer der gesamte Bereich um die Station ausgemessen werden.

Die Abbildung 4.4 und die Abbildung 4.5 beinhalten die Gegenüberstellung gemessener Erdoberflächenpotentialverläufe einzelner Stationen. Zu beachten ist bei diesen Abbildungen, dass die Potenzialtrichter ausgehend von den Stationen gemessen wurden und somit in weiterer Entfernung von der Station der größte Potenzialunterschied zur Station auftritt.

Anmerkung: Aus Gründen der Anonymisierung wurden die Achsenbeschriftungen der nachfolgend dargestellten Abbildungen unkenntlich gemacht.

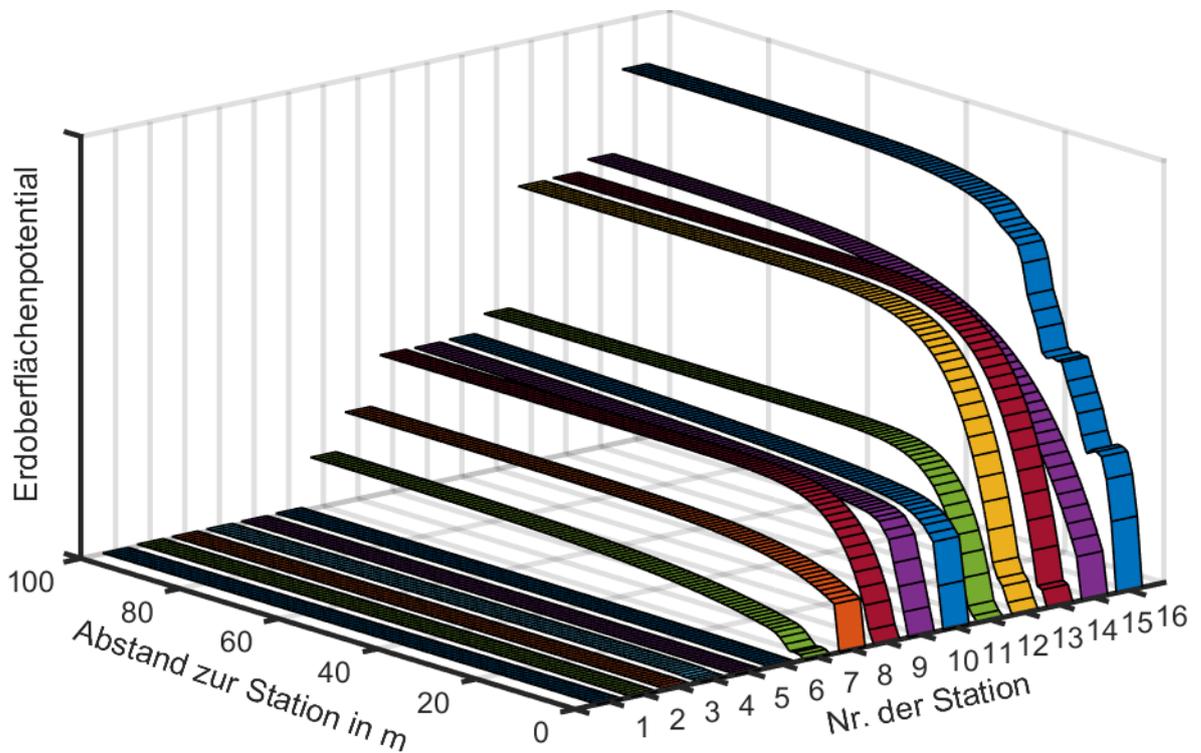


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung der Potentialverläufe einzelner Stationen

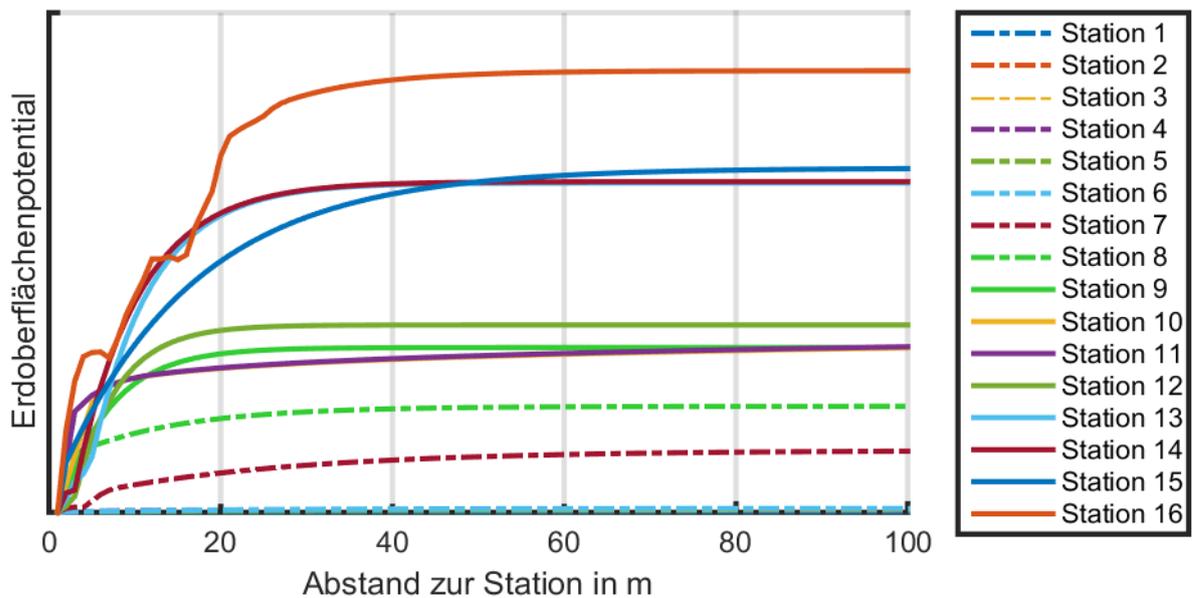


Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der Potentialverläufe einzelner Stationen

Zur besseren Veranschaulichung der Potentialverläufe niederohmigerer Stationen sind diese, in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 detailliert dargestellt.

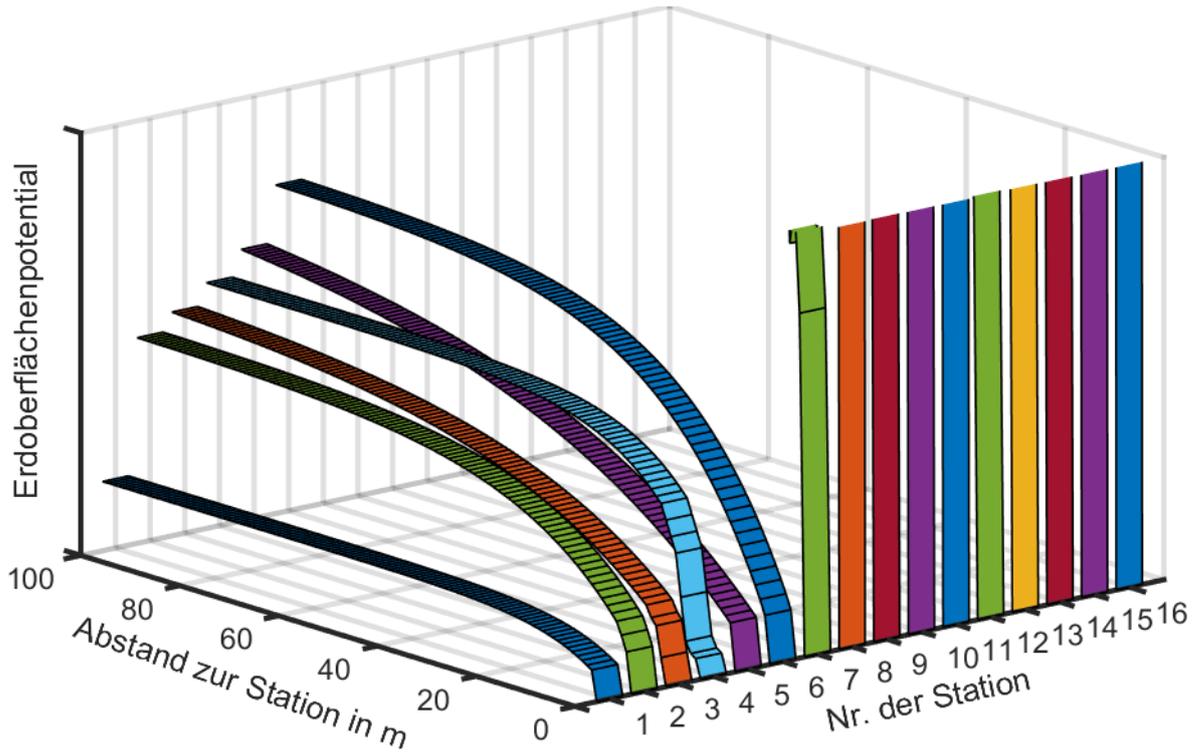


Abbildung 4.6: Detailansicht der Potentialrichter einzelner Stationen

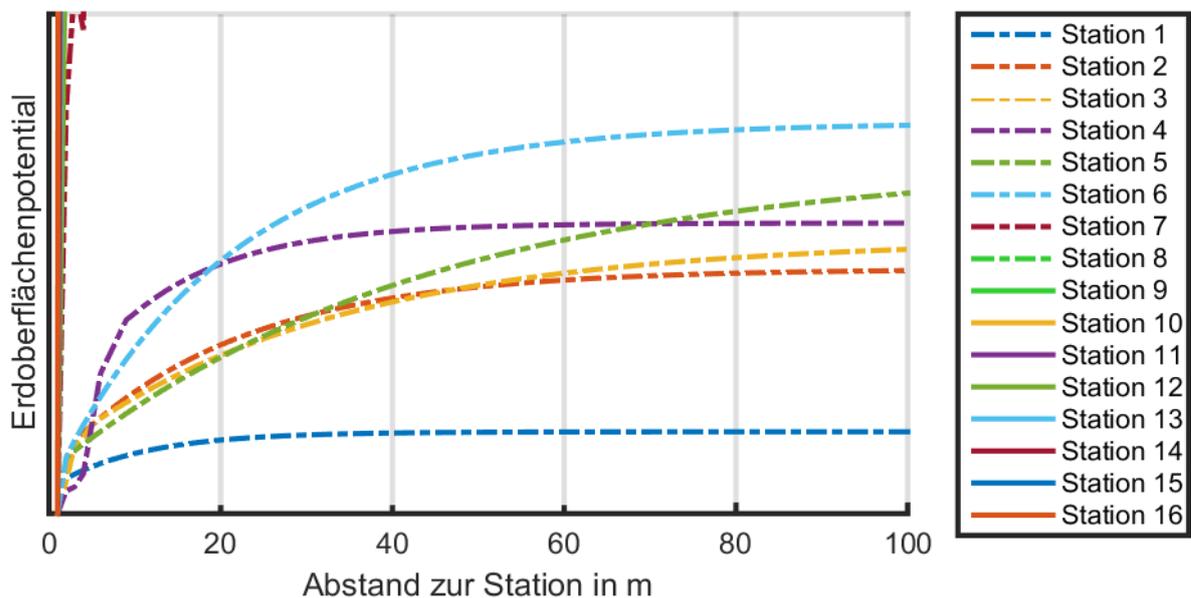


Abbildung 4.7: Detailansicht der Potentialrichter einzelner Stationen

4.2.2 Berechnung der Schrittspannungen aus den Potentialrichterverläufen

Aus den gemessenen Potentialrichterverläufen (Kapitel 4.2.1), können die auftretenden Schrittspannungen je Station berechnet werden. Diese stellen den Gradienten des Erdoberflächenpotentialverlaufs, bezogen auf einen Differenzabstand von 1 m dar.

Die Abbildung 4.8 und die Abbildung 4.9 zeigen die berechneten Schrittspannungen der einzelnen Stationen.

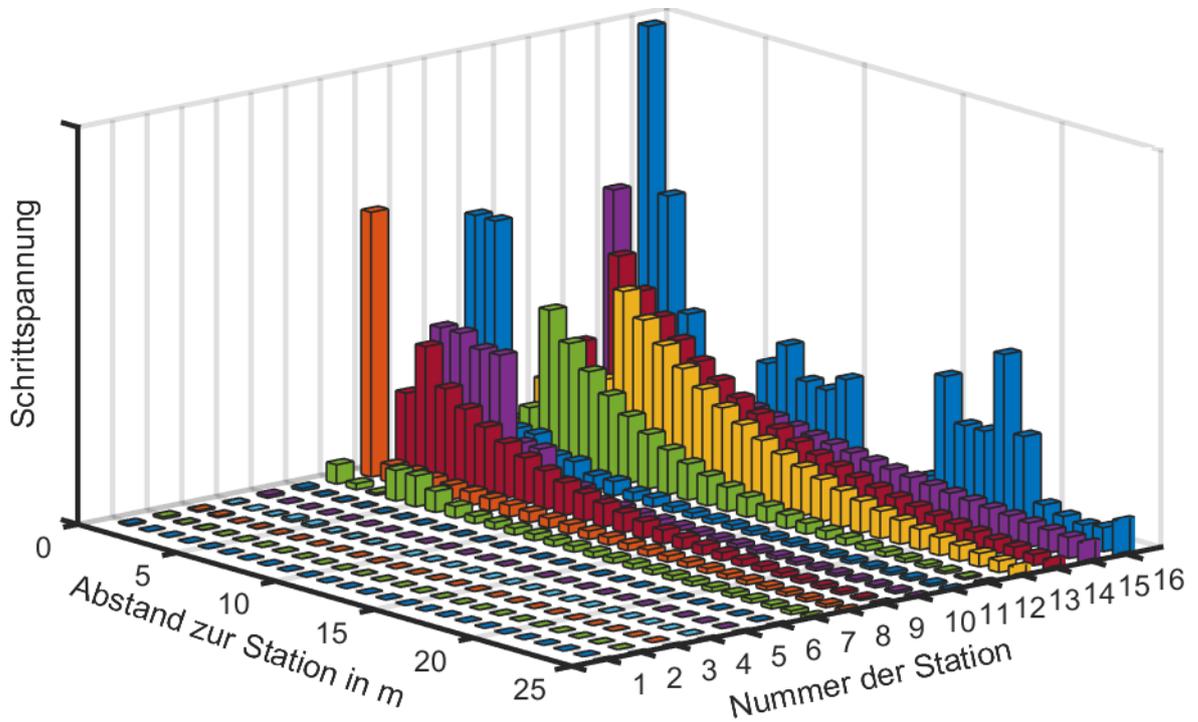


Abbildung 4.8: Gegenüberstellung der Schrittspannungen einzelner Stationen

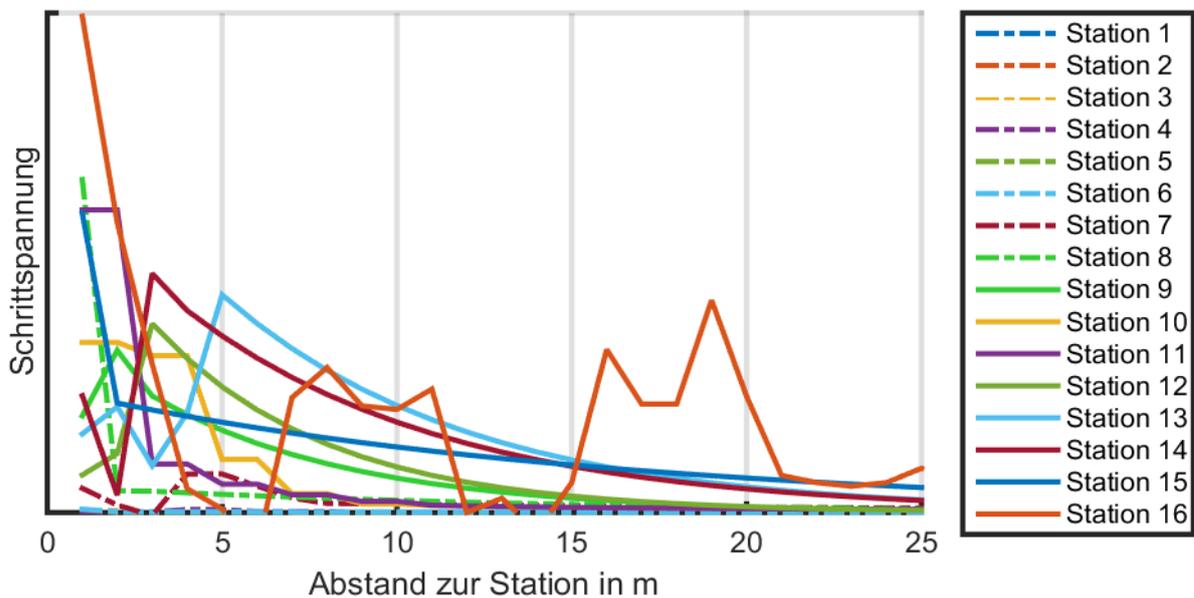


Abbildung 4.9: Gegenüberstellung der Schrittspannungen einzelner Stationen

Bei Stationen mit mitverlegten Potentialsteuerringen tritt die maximale Schrittspannung, aufgrund deren Einfluss auf den sich ausbildenden Potentialtrichter, erst in einigen Metern Entfernung zur Station auf.

4.2.3 Messung nach hergestelltem Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

Die Verringerung des Ausbreitungswiderstandes einer Station, kann durch einen Zusammenschluss mit der Betriebserdungsanlage des Niederspannungsnetzes erzielt werden. Hierbei sind die normativen Vorgaben für einen Zusammenschluss zu beachten, um keine Gefährdungen durch Potentialverschleppungen in die Niederspannung bei Mittelspannungsfehler zu generieren (siehe Kapitel 3.3.3).

Im Zuge der Messungen wurden Verteiltransformatorstationen mit getrennten Erdungsanlagen für den kurzen Zeitraum der Messdauer zusammengeschlossen und die Messung bei verbundenen Erdungsanlagen wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.10 dargestellt.

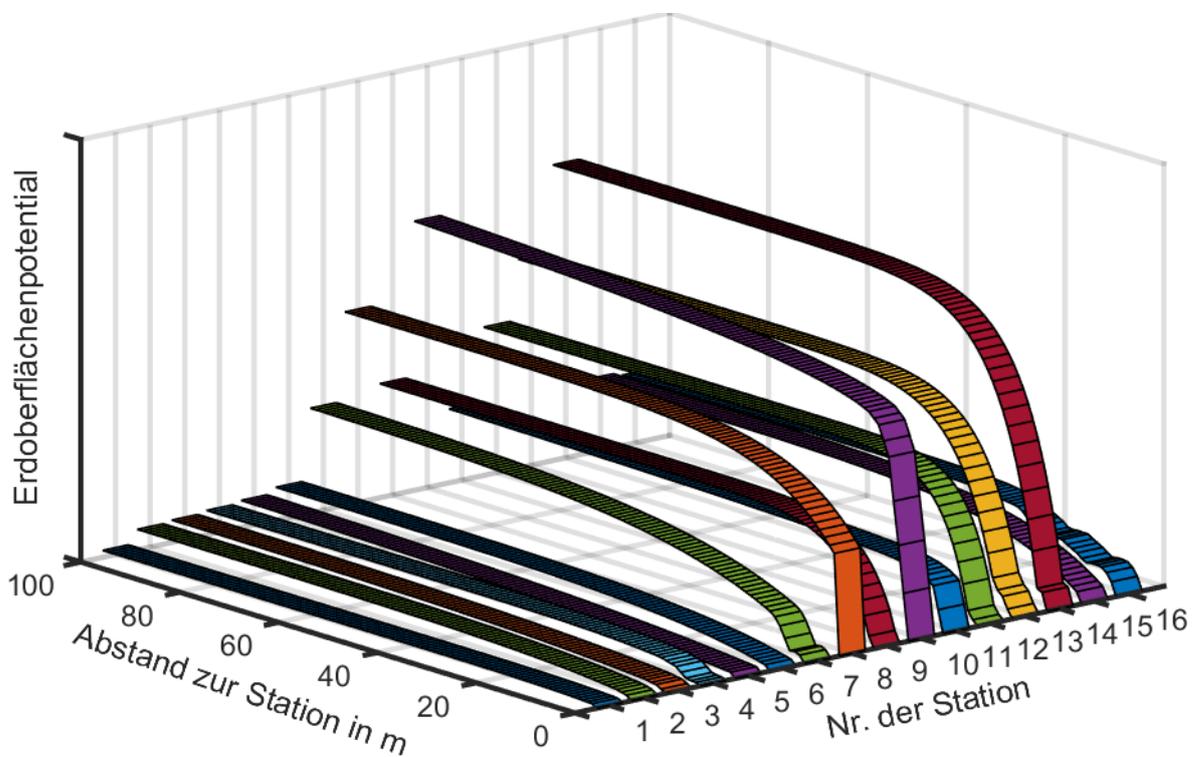


Abbildung 4.10: Potentialverläufe nach Verbindung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

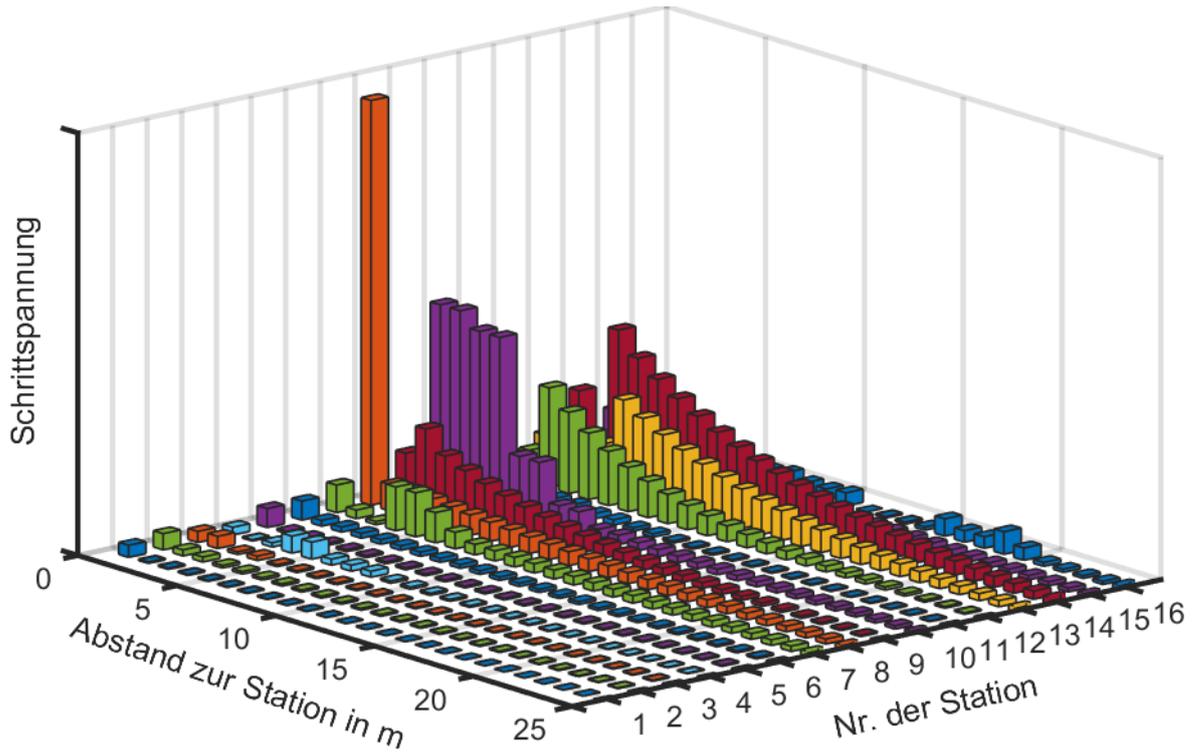


Abbildung 4.11: Schrittspannungen nach Verbindung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

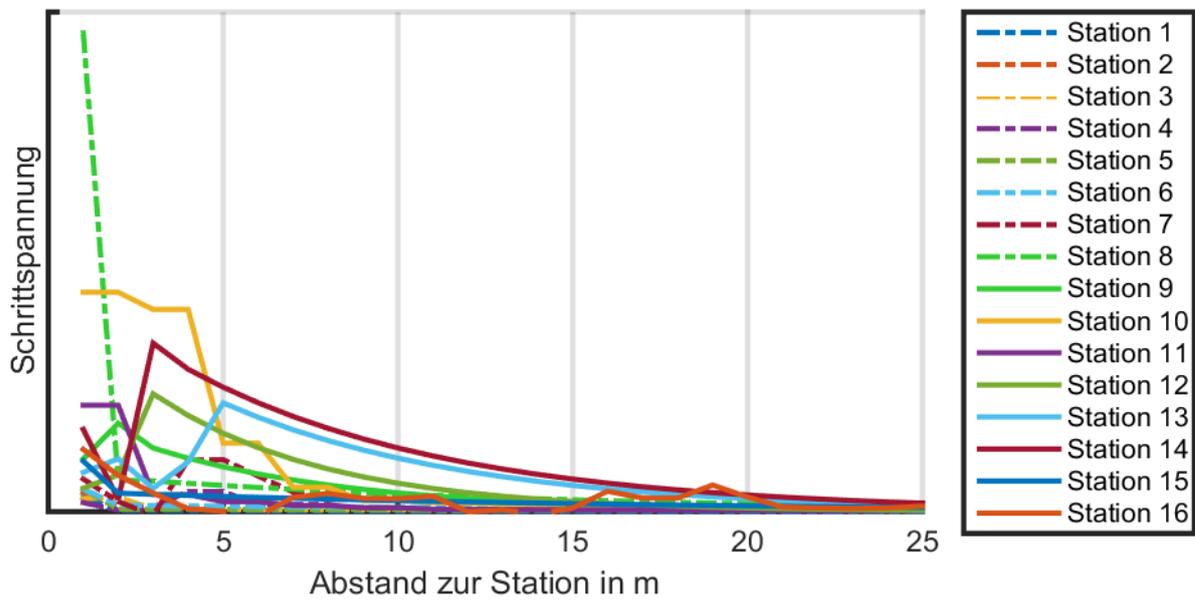


Abbildung 4.12: Schrittspannungen nach Verbindung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlage

Aufgrund der verbesserten Erdungsverhältnisse im Vergleich zur vorangegangenen Konstellation können Schrittspannungen weiter reduziert werden.

Die Abbildung 4.13 zeigt eine Gegenüberstellung der auftretenden Schrittspannungen vor (in schwarz) und nach dem Verbinden der Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen (in Farbe).

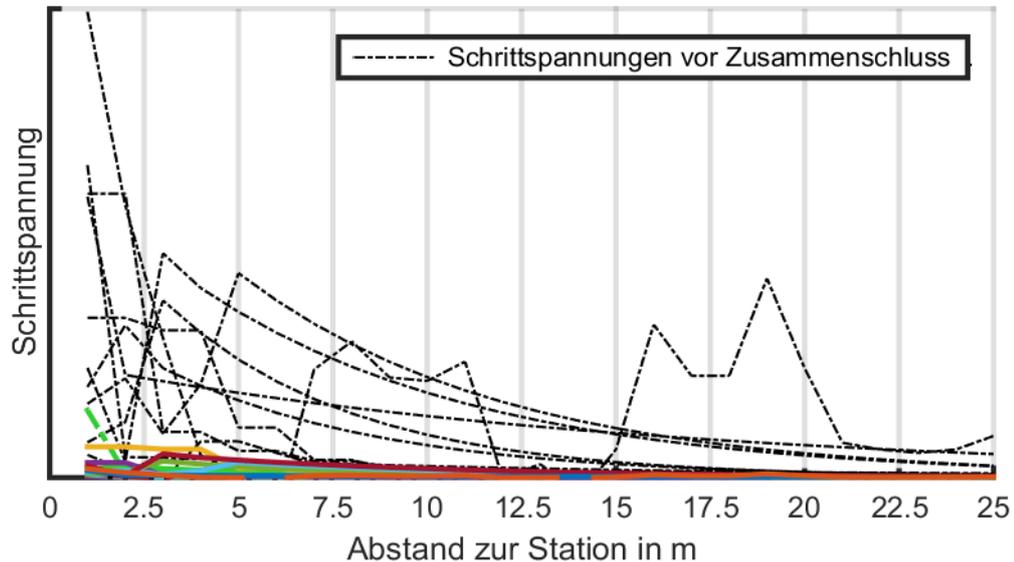


Abbildung 4.13: Vergleich der auftretenden Schrittspannungen vor (in schwarz) und nach dem Verbinden von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen

4.3 Simulation und Berechnung von Mittelspannungserdungsanlagen mittels OBEIN

Das Programm OBEIN 2S ist ein vom Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz entwickeltes Software Tool, welches auf der Methode der Potentialkoeffizienten basiert und mit dem Erdungsanlagen, unter Berücksichtigung ohmscher Kopplungen, nachgebildet werden können [15]. Mithilfe einer graphischen Oberfläche können zu untersuchende Erdungsanlagen sowohl als Horizontal- als auch Vertikalerder als Modell nachgebildet werden. Es besteht die Möglichkeit, den Erdboden als Zweischichtboden, mit zwei unterschiedlichen spezifischen Erdwiderständen zu modellieren. Nach der Erstellung des Modells können Berechnungen des Erdungswiderstandes, von Oberflächenpotentialen sowie von Schrittspannungen durchgeführt werden.

4.3.1 Modellannahmen Mittelspannungserdungsanlage

Um den Potentialverlauf der modellierten Mittelspannungsanlage aussagekräftig mit den gemessenen Potentialverläufen der analysierten Stationen vergleichen zu können, werden Stationen in OBEIN nachgebildet, welche möglichst nahe an die Ausführungen der Erdungsanlagen der gemessenen Stationen heranreichen. Die Nachbildung erfolgt gemäß vorliegenden Dokumentationsunterlagen hinsichtlich der Errichtung der jeweiligen Station. Da

im Rahmen der getätigten Messungen lediglich Stationen mit Oberflächenerdern analysiert worden sind, erfolgt die Nachbildung ebenso nur für Oberflächenerder.

Genauere Betrachtungen zu den modellierten Erdungsanlagen (Erdungsimpedanz in Abhängigkeit des spez. Erdwiderstandes, Erdoberflächenpotentiale, Schrittspannung, Tiefenerder), werden in Kapitel 5.2 durchgeführt.

Modellannahmen:

Bez.	Ring 1		Ring 2		Strahlen	
	Tiefe	Radius	Tiefe	Radius	Anzahl	Länge
	m	m	m	m	Stk.	m
E1	0,5	1	0,7	2	4	25
E2	0,5	1	-	-	4	25
E3	0,5	1	0,7	2	3	33,3
E4	0,5	1	-	-	3	33,3
E5	0,5	1	0,7	2	2	50
E6	0,5	1	-	-	2	50

Tabelle 4.1: Angenommene Erdergeometrie für die Nachbildung der Stationserdungsanlagen in OBEIN 2S

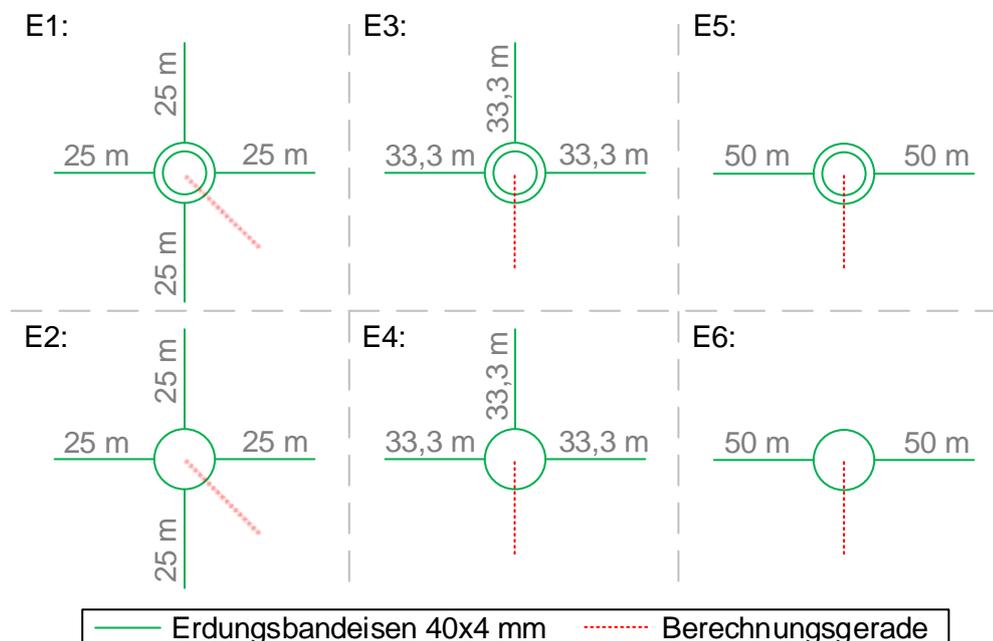


Abbildung 4.14: Modellvarianten von Stationserdungsanlagen mit Darstellung der Berechnungsgeraden denen entlang die Oberflächenpotentiale berechnet werden

4.3.2 Berechnung der Erdoberflächenpotentiale mittels OBEIN 2S

Die Berechnung erfolgt jeweils in eine Richtung, von der Station weg betrachtet, wie in Abbildung 4.14 dargestellt. Der maximale Abstand zur Station wird analog zu den Messungen mit 300 m definiert. Die daraus resultierenden Verläufe der einzelnen Modellkonfigurationen sind nachfolgend in Abbildung 4.15 dargestellt.

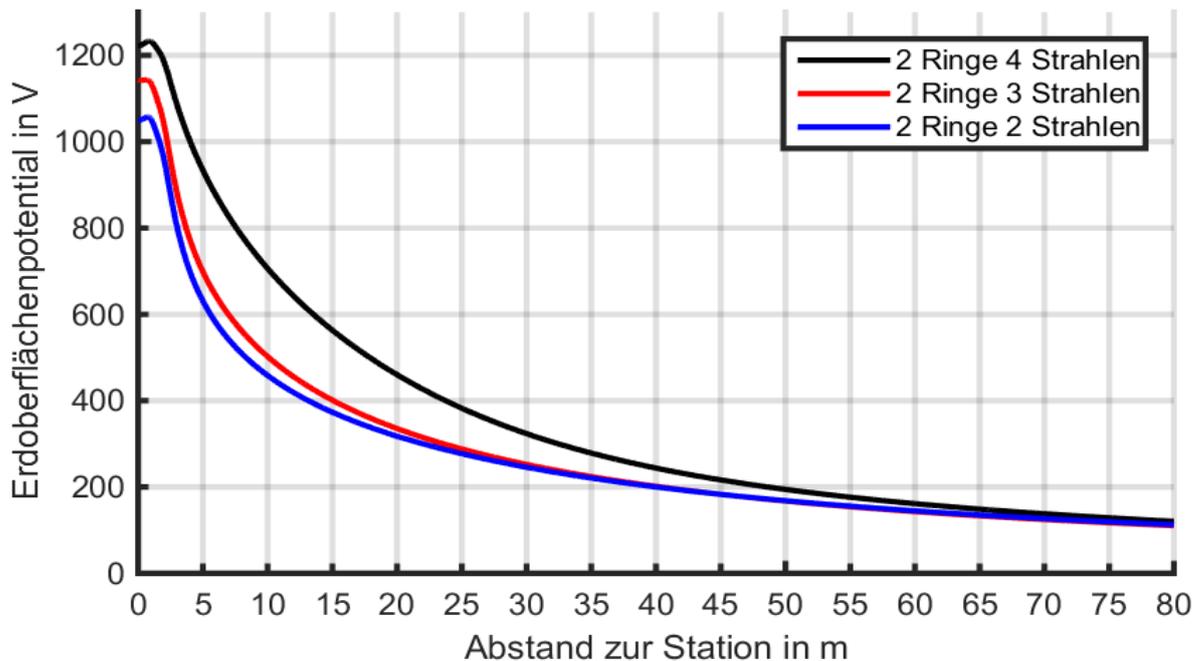


Abbildung 4.15: Mittels OBEIN berechnete Erdoberflächenpotentialverläufe von Stationserdungsanlagen (E1, E3, E5 gemäß Abbildung 4.14) bei $I_F = 60 \text{ A}$ und $\rho = 1000 \text{ }\Omega\text{m}$

Durch die geringeren Abstände der einzelnen Strahlen bei Erdungsanlagen mit vier Strahlen, verläuft bei dieser Ausführungsvariante der Potentialtrichter im Nahbereich flacher als bei den übrigen Varianten. Im flachen Bereich des Potentialtrichters verlaufen alle gewählten Modelle hingegen sehr ähnlich, da in diesem Bereich die gegenseitige Beeinflussung einzelner Erderstrahlen kaum mehr gegeben ist. Die gegenseitige Beeinflussung der Strahlenerde ist auch der Grund, warum bei vier Strahlenerden die Trichterspannung größer ist als bei zwei Strahlen bei gleicher Länge der Strahlenerde (in Summe 100 m Horizontalerderlänge).

Durch den größeren Abstand der Erderstrahlen bei Varianten mit zwei beziehungsweise drei Strahlen fallen Schrittspannungen (siehe Abbildung 4.16) bei diesen Erdungsanlagen jedoch höher, als bei Anlagen mit vier Strahlen aus. Dies ist durch den steiler abfallenden Potentialtrichter im Nahbereich der Station bedingt.

Die Abbildung 4.16 zeigt die Schrittspannungen der Stationen, welche mit zwei, drei oder vier Strahlenerde ausgeführt sind. Der über die Erdungsanlage abgeleitete Strom beträgt 60 A.

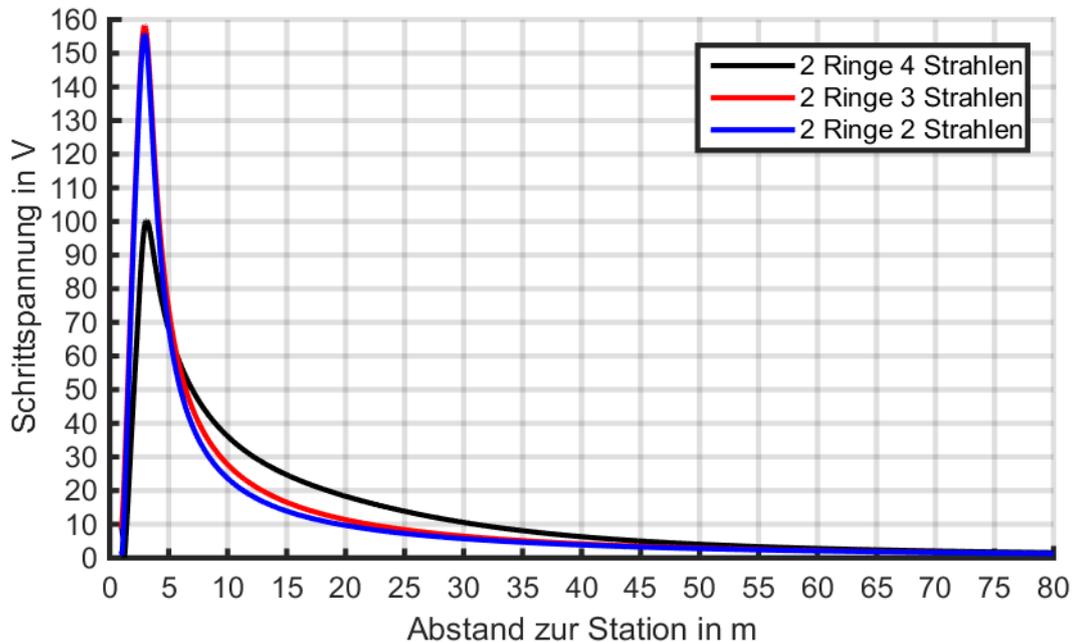


Abbildung 4.16: Schrittspannungen der Stationserdungsanlagen (E1, E3, E5 gemäß Abbildung 4.14) bei $I_F = 60 \text{ A}$ und $\rho = 1000 \Omega\text{m}$

4.3.3 Verlauf des Erdoberflächenpotentials bei Mehrschichtböden

Der Verlauf des Erdoberflächenpotentials im Bereich einer Erdungsanlage hängt von den spezifischen Erdwiderständen der Bodenschichten ab. Die Widerstände der einzelnen Schichten hängen von der Bodenbeschaffenheit ab (siehe Kapitel 2.2), welche in Abhängigkeit der Tiefe üblicherweise nicht konstant bleiben. Je nach Schichtung, beispielsweise hohe spezifische Erdwiderstände in höheren Schichten und niedrige spezifische Erdwiderstände in tieferen Schichten, wirkt sich dies auf den Verlauf der Trichterspannung sowie der Schrittspannungen aus.

Die Abbildung 4.17 und die Abbildung 4.18 zeigen die Erdoberflächenpotentiale bei unterschiedlichen Verhältnissen von oberen zu unteren spezifischen Erdwiderständen. Der Beginn der unteren Bodenschicht ist beispielhaft in 1 m Tiefe gewählt. Die Berechnungen erfolgen für die Erdungsanlage E1 (siehe Abbildung 4.14).

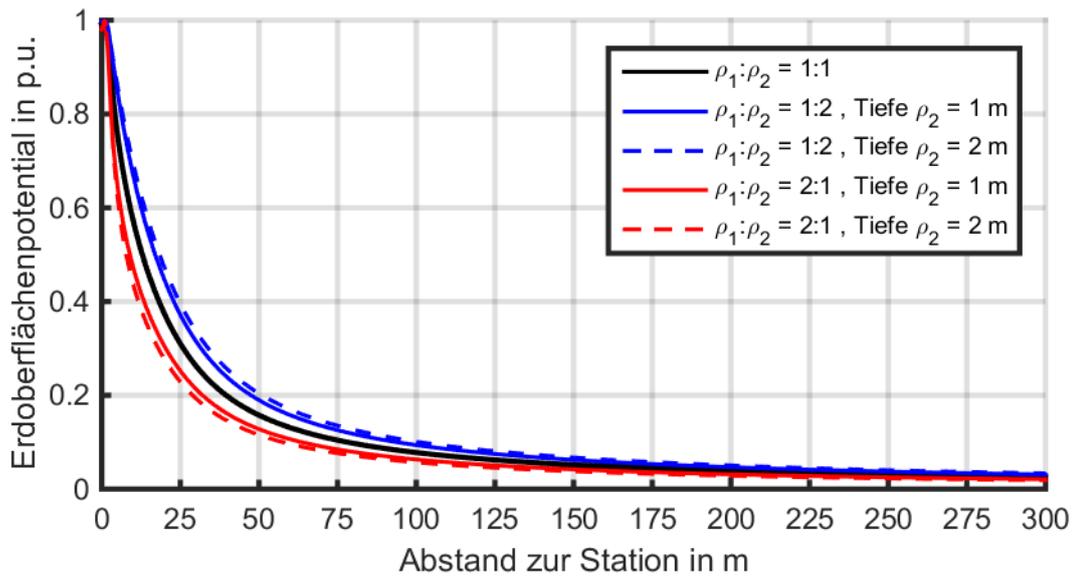


Abbildung 4.17: Erdoberflächenpotential bei Variation der spezifischen Erdwiderstände von Ober- und Unterschicht bei einer Mächtigkeit der Oberschicht von 1 m

Die Abbildung 4.18 zeigt eine detaillierte Ansicht der ersten 50 m der Abbildung 4.17.

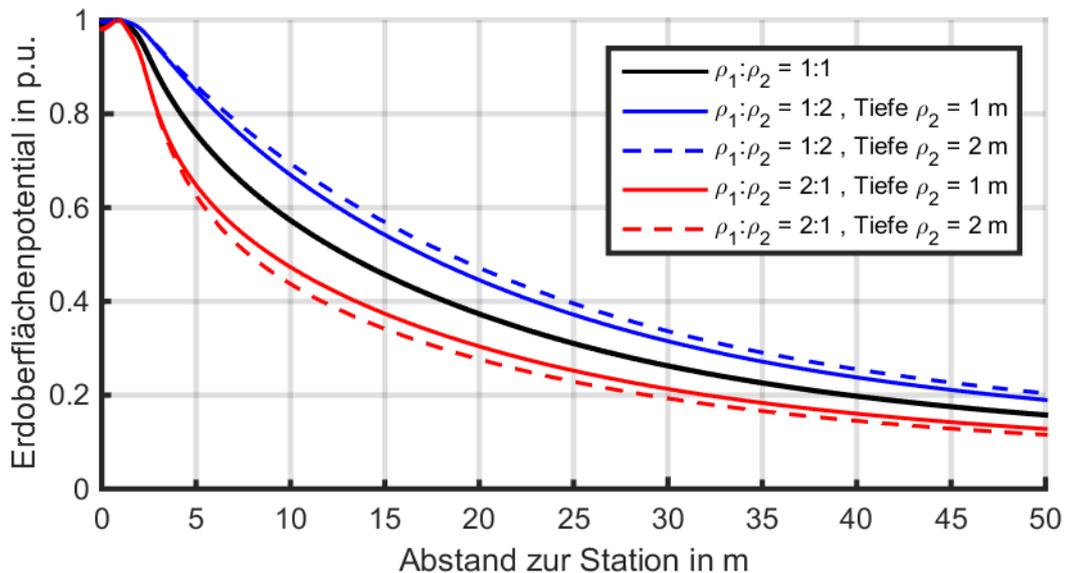


Abbildung 4.18: Detailansicht - Erdoberflächenpotential bei Variation der spezifischen Erdwiderstände von Ober- und Unterschicht bei einer Mächtigkeit der Oberschicht von 1 m

In Abbildung 4.18 ist ersichtlich, dass bei höheren spezifischen Erdwiderständen der oberen Bodenschichten das Erdoberflächenpotential schneller abbaut wird als bei der Betrachtung eines homogenen Erdreichs. Im Umkehrschluss ist ersichtlich, dass Potentiale bei niedrigeren spezifischen Erdwiderständen in der oberen Bodenschicht im Vergleich zur Unterschicht, langsamer abfallen.

5 Modellbildung globaler Erdungssysteme

5.1 Modell zur Nachbildung eines Erdungssystems

5.1.1 Einleitung

Zur Beurteilung von Verteilernetzen im Mittel- und Niederspannungsbereich hinsichtlich der Eignung eines globalen Erdungssystems zur Minimierung von Berührungsspannungen werden laut aktueller normativer Lage Fälle gelistet, welche typisch für ein solches Erdungssystem sein können. Diese Fälle stellen jedoch keine klaren Kriterien sondern lediglich prädestinierte Konstellationen für ein solches Erdungssystem dar.

Um nun präzisere Aussagen über das Vorliegen eines globalen Erdungssystems bezogen auf die Netzstruktur von Verteilernetzen treffen zu können, werden die einzelnen erdungswirksamen Anlagenkomponenten der Mittel- und Niederspannung separat und in Folge als Gesamtsystem untersucht und die zu erwartenden Berührungsspannungen beurteilt [1].

5.1.2 Komponenten

Das Gesamtmodell zur Analyse des Erdungssystems setzt sich aus den erdungswirksamen Komponenten des Mittel- und Niederspannungsverteilstromnetzes zusammen. Diese werden im ersten Schritt unabhängig voneinander modelliert und analysiert. Zusätzlich erfolgt durch Zusammenfügen aller beteiligten Komponenten eine Gesamtsystembetrachtung.

Komponenten des Modells:

- 20/0,4-kV-Verteiltransformatorstation (Erdungsanlage der Station)
- Mittelspannungskabelanspeisung (beidseitig an die Erdungsanlagen angeschlossene Kabelbegeleiterder, beidseitig geerdete Kabelschirme)
- 0,4-kV-Niederspannungsabgänge:
 - Kabelabgang (PEN-Leiter, Kabelverteilschrankerdungen, beidseitig geerdete Begleiterder)
 - Freileitungsabgang (PEN-Leiter, Masterdungen)
- Kundenanlagen im TN-System

Ziel der Gesamtsystembetrachtung stellt die Analyse des Verteilstromnetzes hinsichtlich der Eignung eines globalen Erdungssystems, beziehungsweise die Eignung hinsichtlich eines Zusammenschlusses der Mittel- und Niederspannungserdungen zu einem gemeinsamen Erdungssystem, dar.

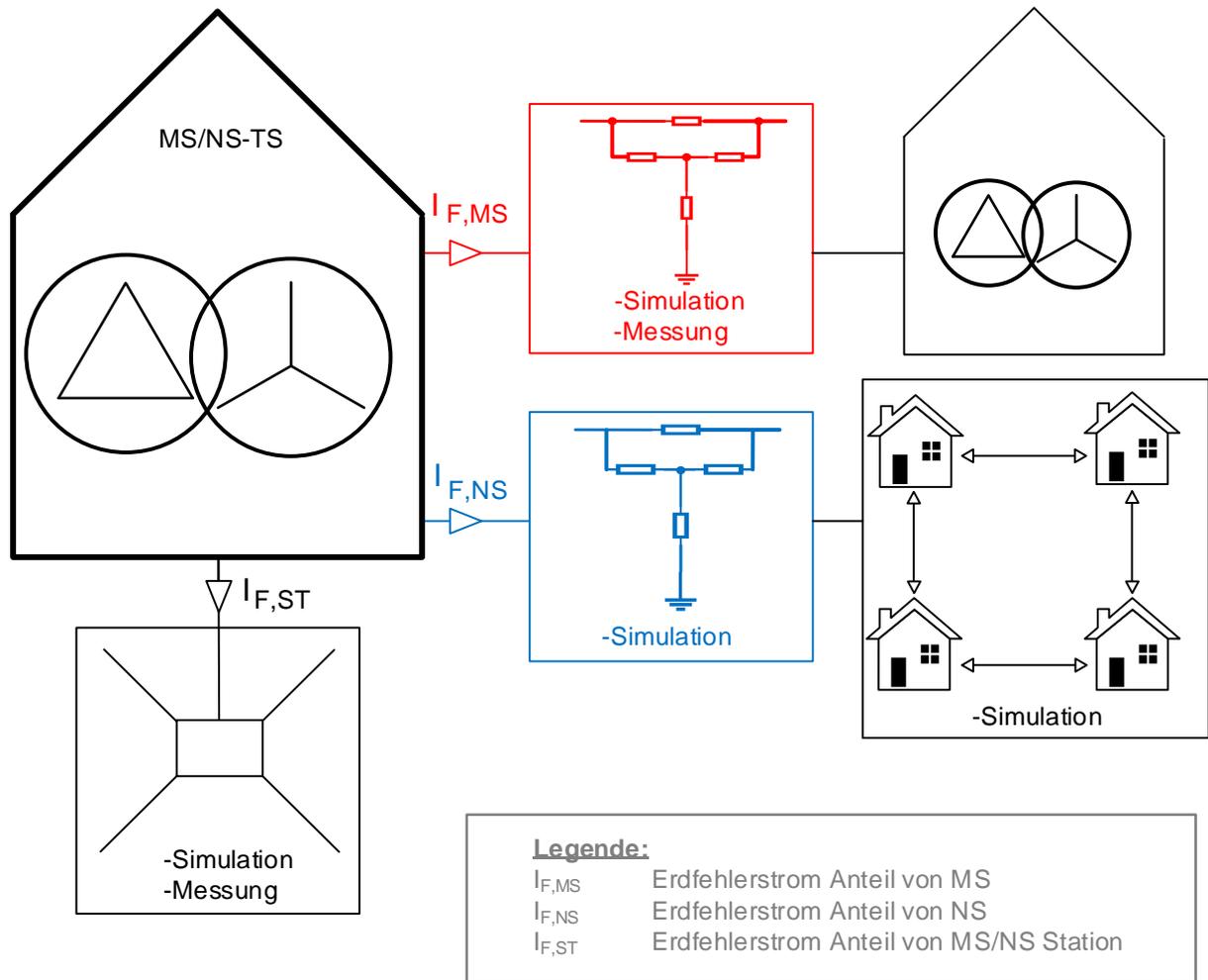


Abbildung 5.1: Modell der erdungswirksamen Komponenten im MS/NS- Verteilnetz

5.1.3 Modellannahmen der Erderwirkung von Begleiterdern

Oberflächenerder, wie beispielsweise mitverlegte Kabelbegleiterder, werden in den Schaltbildern der nachfolgenden Modelle durch Nachbildung einer T-Ersatzschaltung implementiert. Die Längswiderstände ergeben sich aus den ohmschen Widerständen der verwendeten Materialien für die jeweils gegebenen Längen und Querschnitte. Der Querwiderstand wird in der Mitte der jeweiligen Erderlänge angenommen und berücksichtigt die Erderwirkung.

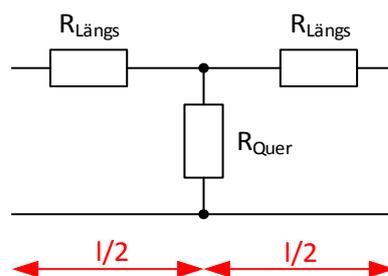


Abbildung 5.2: Nachbildung eines Oberflächenerders als T-Ersatzschaltung

Zur Bestimmung der Erderwirkung von verlegten Bänderderrn werden die in der Norm (ÖVE/ÖNORM EN50522:2011, Anhang J bzw. ÖVE/ÖNORM E8383:2000, Anhang K) angegebenen Formeln verwendet. Die verringerte Erderwirkung bei sehr langen Bänderderrn wird gemäß Diagramm K.3 (ÖVE/ÖNORM E8383:2000) bzw. Diagramm J.3 (ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011) berücksichtigt.

Ausbreitungswiderstand von Oberflächenerderrn [2], [4]:

$$R_{EB} = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} \quad (5.1)$$

R_{EB}	Ausbreitungswiderstand	Ω
L	Länge des Oberflächenerderr (Bänderderr)	m
d	Halbe Breite des Erdungsbandes	m
ρ	spez. Erdwiderstand	Ωm

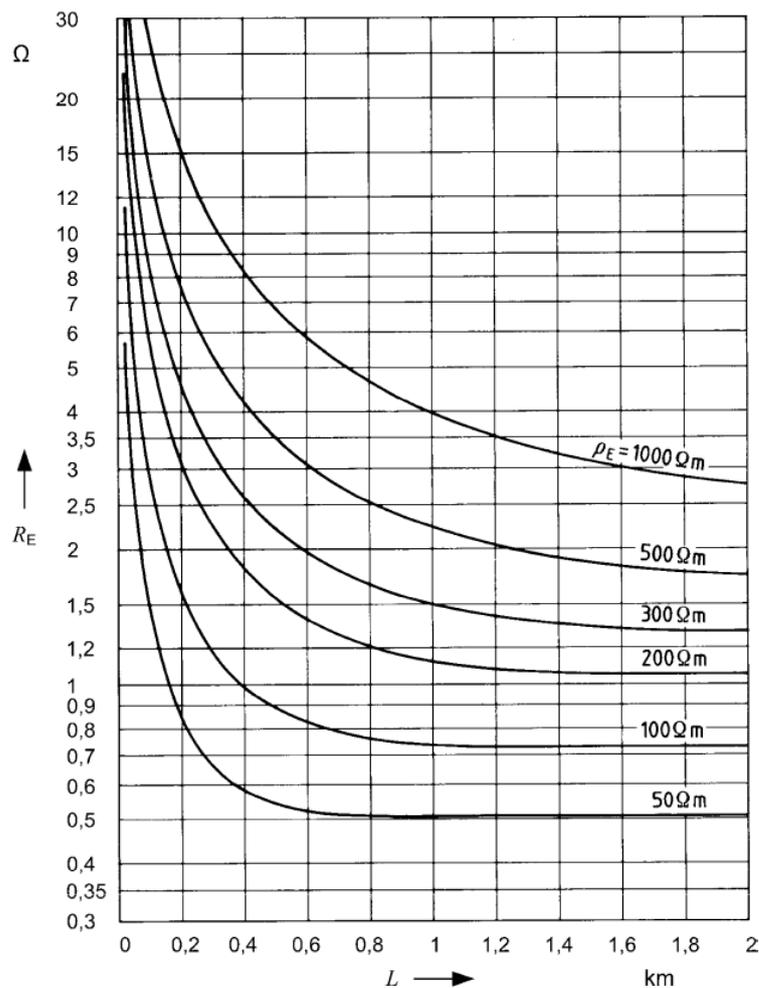


Abbildung 5.3 Ausbreitungswiderstand sehr langer Oberflächenerderr gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [2] bzw. ÖVE/ÖNORM E8383:2000 [4]

Die Längswiderstände der T-Schaltung werden jeweils wie folgt berechnet:

$$R_{Längs}' = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot 1000 \text{ m}}{A} \quad (5.2)$$

$R_{Längs}'$ (Längs-) Widerstandsbelag Ω/km
 l Leiterlänge m
 ρ spez. Widerstand des Materials $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
 A Querschnittsfläche des Leiters mm^2

Für den verwendeten Begleiterder (tZn Stahl 40 mm x 4 mm) bedeutet dies:

$$R_{L, Band}' = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot 1000 \text{ m}}{A} = \frac{0,17 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ m}}{40 \text{ mm}^2 \cdot 4 \text{ mm}^2} = 1,06 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (5.3)$$

	Material	A	$R_{Längs}'$
	-	mm^2	Ω/km
Bandeisen	tZn Stahl	40x4	1,06

Tabelle 5.1: Längs- Widerstandsbelag der verwendeten Begleiterder

5.2 Erdungsanlagen von Mittelspannungstransformatorstationen

5.2.1 Ausführung von Stationserdungsanlagen mit Horizontalerdern

Aufgrund einer Vielzahl an baulichen Ausführungsvarianten von Erdungsanlagen der Transformatorstationen beschränken sich die nachfolgenden Untersuchungen auf einige aktuell eingesetzte Standarderdungsanlagen. Diese Standarderdungsanlagen der Verteilnetztransformatorstationen werden je nach Art (Mast-, Freileitungs-, Kabel-, Kompakttransformatorstation) mit einem oder zwei Potentialsteuerringen und zusätzlich ca. 100 m Oberflächenerder ausgeführt. Je nach örtlicher Gegebenheit und Möglichkeit werden diese 100 m auf mehrere Strahlen aufgeteilt.

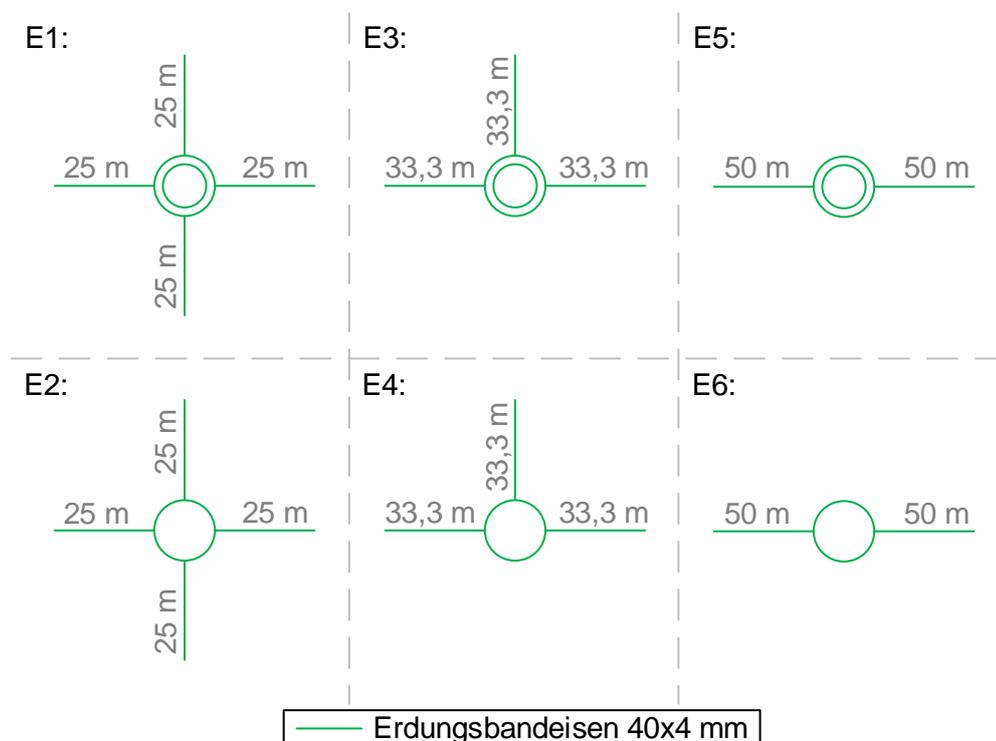


Abbildung 5.4: Ausführungsvarianten von Standarderdungsanlagen

5.2.2 Widerstand, Erdoberflächenpotential und Schrittspannungen von Stationserdungsanlagen mit Horizontalerdern

Die Berechnungen der Stationserdungswiderstände erfolgen mittels OBEIN 2 [15]. Die für die Berechnung herangezogenen unterschiedlichen Ausführungsvarianten sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

Die Tabelle 5.2 zeigt die berechneten Erdausbreitungswiderstände der unterschiedlichen Stationserdungsanlagen aus Abbildung 5.4.

Erdungsanlage		Erdungswiderstand in Ω		
		$\rho = 200 \Omega\text{m}$	$\rho = 1000 \Omega\text{m}$	$\rho = 3000 \Omega\text{m}$
4 Strahlen 2 Ringe	E1	4,3	21,5	64,6
3 Strahlen 2 Ringe	E3	4,1	20,5	61,4
2 Strahlen 2 Ringe	E5	3,8	19,2	57,6
4 Strahlen 1 Ring	E2	4,3	21,6	64,7
3 Strahlen 1 Ring	E4	4,1	20,6	61,7
2 Strahlen 1 Ring	E6	3,9	19,3	57,9

Tabelle 5.2: Erdungswiderstände R_ρ unterschiedlicher Stationsausführungsvarianten

Für weitere spezifische Erdwiderstände können die Ergebnisse aus Tabelle 5.2 (Spalte 2) näherungsweise linear skaliert werden.

$$R_\rho = \frac{\rho}{1000 \Omega\text{m}} \cdot R_{1000 \Omega\text{m}} \tag{5.4}$$

Eine weitere Möglichkeit bietet die analytische Berechnung des Erdungswiderstandes anhand der Berechnung der einzelnen Teilerder, mit anschließender Berechnung des Gesamterdungswiderstandes durch Parallelschaltung der einzelnen Teilwiderstände. Der Nachteil dieser Berechnung liegt in der fehlenden Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung durch die ohmschen Kopplungen der einzelnen Erder zueinander. In Tabelle 5.3 sind die Abweichungen der Ergebnisse beider Berechnungsvarianten gegenübergestellt.

ρ	analytisch berechnet				OBEIN:	
	$R_{\text{Ring 1}}$	$R_{\text{Ring 2}}$	$R_{\text{Strahl, 100 m}}$	$R_{S, \text{Rechnung}}$	$R_{S, \text{OBEIN}}$	Abweichung
Ωm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	%
200	65,3	36,2	5,0	4,1	4,3	4,9
1000	326,4	180,8	24,9	20,5	21,5	4,9
3000	979,2	542,3	74,7	61,5	64,6	4,9

Tabelle 5.3: Vergleich der Ergebnisse aus analytischer Berechnung und Berechnung mittels OBEIN (Erdungsausführung E1 gemäß Abbildung 5.4)

Die auftretenden Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen einer Erdungsanlage hängen unter anderem von der Anlagenkonfiguration, vom Erdungsstrom und dem spezifischen Erdwiderstand ab. Beispielhaft sind diese für die Ausführungsvariante E1 (siehe Abbildung 5.4) dargestellt. Die Ergebnisse der Ausführungsvarianten E2 bis E6 können dem Anhang (Kapitel 8) entnommen werden.

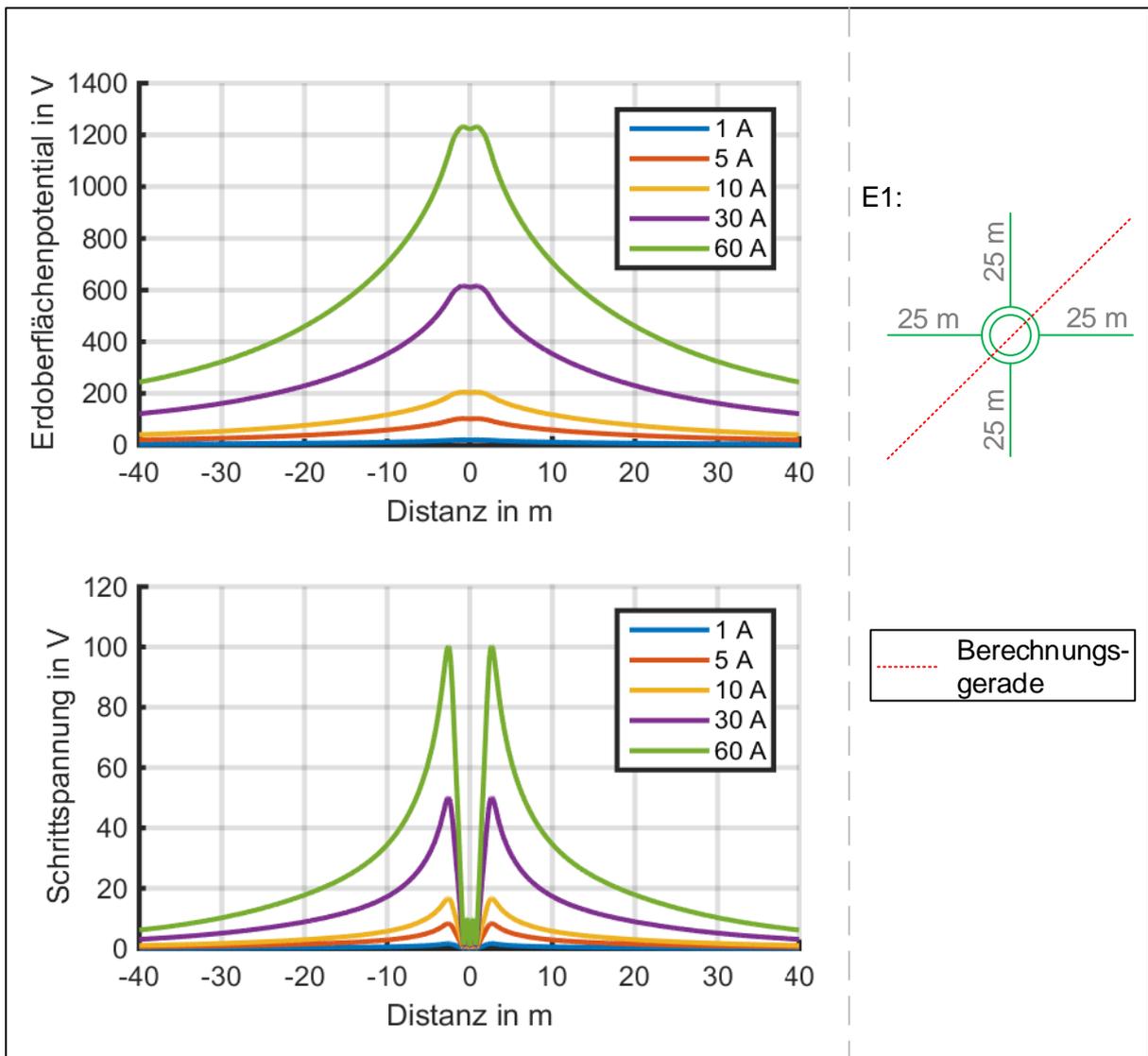


Abbildung 5.5: Stromvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E1 (zwei Potentialsteuerringen und vier Erdungsstrahlen) bei $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ entlang der Berechnungsgeraden

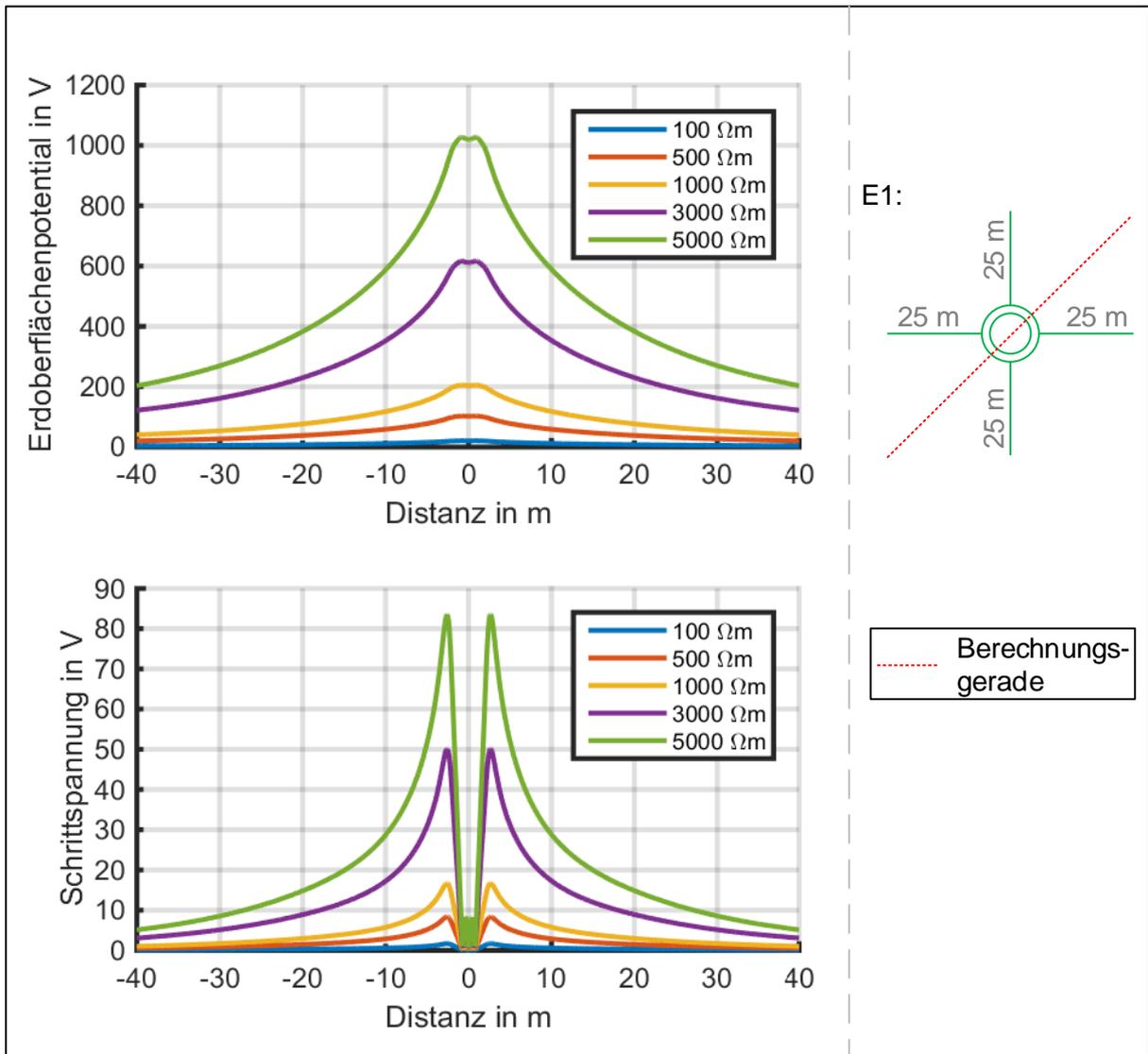


Abbildung 5.6: Erdwiderstandsvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E1 (zwei Potentialsteuerringen und vier Erdungsstrahlen)

5.2.3 Ausführung von Stationserdungsanlagen mit Tiefenerdern

Neu errichtete Stationen werden häufig als sogenannte Kompakttransformatorstationen ausgeführt. Diese weisen, im Vergleich zu herkömmlichen Transformatorstationen, einen geringen Platzbedarf auf. Ist aus Platzgründen eine Ausführung der zur Station zugehörigen Erdungsanlage mit Oberflächen- und Strahlenerder nicht möglich, wird diese mit zusätzlichen Tiefenerdern realisiert. Ebenso ist diese Variante bei guten Bodenverhältnissen mit geringen spezifischen Erdwiderständen der unteren Bodenschichten gebräuchlich.

Analog zu Erdungsanlagen in Oberflächenerderausführung (Kapitel 5.2.1), sind auch bei Tiefenerderanlagen zahlreiche bauliche Ausführungsvarianten möglich, deshalb werden die in Abbildung 5.7 dargestellten Ausführungen exemplarisch zur Untersuchung herangezogen.

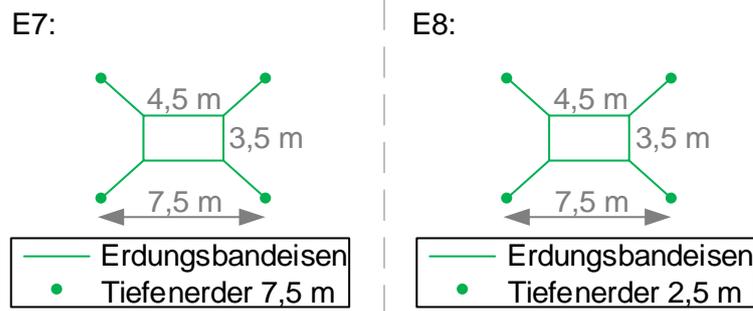


Abbildung 5.7: Mögliche Ausführungsvarianten von Tiefenerder-Erdungsanlagen

5.2.4 Widerstand, Erdoberflächenpotential und Schrittspannungen von Stationserdungsanlagen mit Tiefenerdern

Hinsichtlich der Potentialverläufe und der auftretenden Schrittspannungen weisen Stationen mit Tiefenerdern andere charakteristische Erdoberflächenpotentialverläufe als Stationen, welche als Oberflächenerder realisiert sind, auf.

Die Berechnungen der Stationserdungswiderstände erfolgten mittels OBEIN 2. Die für die Berechnung herangezogenen unterschiedlichen Ausführungsvarianten sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

Erdungsanlage		Ausbreitungswiderstand in Ω		
		$\rho = 200 \Omega\text{m}$	$\rho = 1000 \Omega\text{m}$	$\rho = 3000 \Omega\text{m}$
7,5 m Tiefenerder	E7	6,7	33,5	100,5
2,5 m Tiefenerder	E8	8,9	44,3	133,0

Tabelle 5.4: Erdungswiderstände unterschiedlicher Tiefenerder-Ausführungsvarianten von Kompakttransformatorstationen

Erneut kann auch hier der Widerstand der Erdungsanlage analytisch durch Berechnung der einzelnen Teilerder mit anschließender Berechnung des Gesamterdungswiderstandes unter Vernachlässigung ohmscher Kopplungen berechnet werden. Nachfolgend sind die Abweichungen der Ergebnisse beider Berechnungsvarianten gegenübergestellt.

ρ	analytisch berechnet				OBEIN:	
	$R_{\text{Ring 1}}$	R_{Strahlen}	$R_{\text{Tiefe 7,5 m}}$	R_S	R_S	Abweichung
Ωm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	%
200	29,4	21,2	8,5	5,0	6,7	33,3
1000	146,8	106,1	42,5	25,1	33,5	33,2
3000	440,3	318,2	127,4	75,4	100,5	33,2

Tabelle 5.5: Vergleich der Ergebnisse aus analytischer Berechnung und OBEIN (Erdungsausführ. E7)

Die größere Abweichung als beim Vergleich der Oberflächenerder in Tabelle 5.3 resultiert aus den größeren ohmschen Kopplungen bei der gewählten Tiefenerder-Ausführungsform.

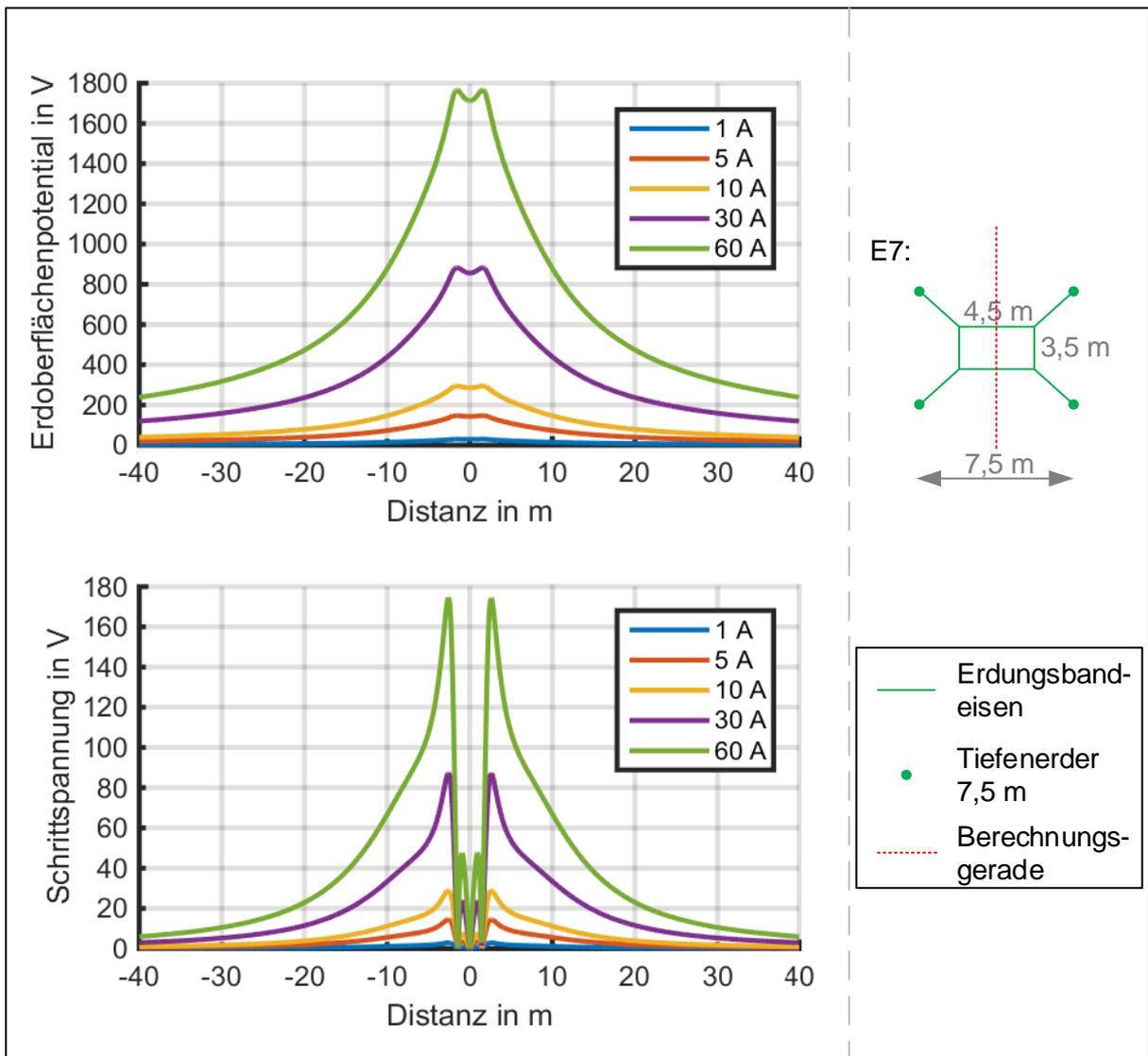


Abbildung 5.8: Stromvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E7 (vier 7,5m Tiefenerder) bei $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ entlang der Berechnungsgeraden

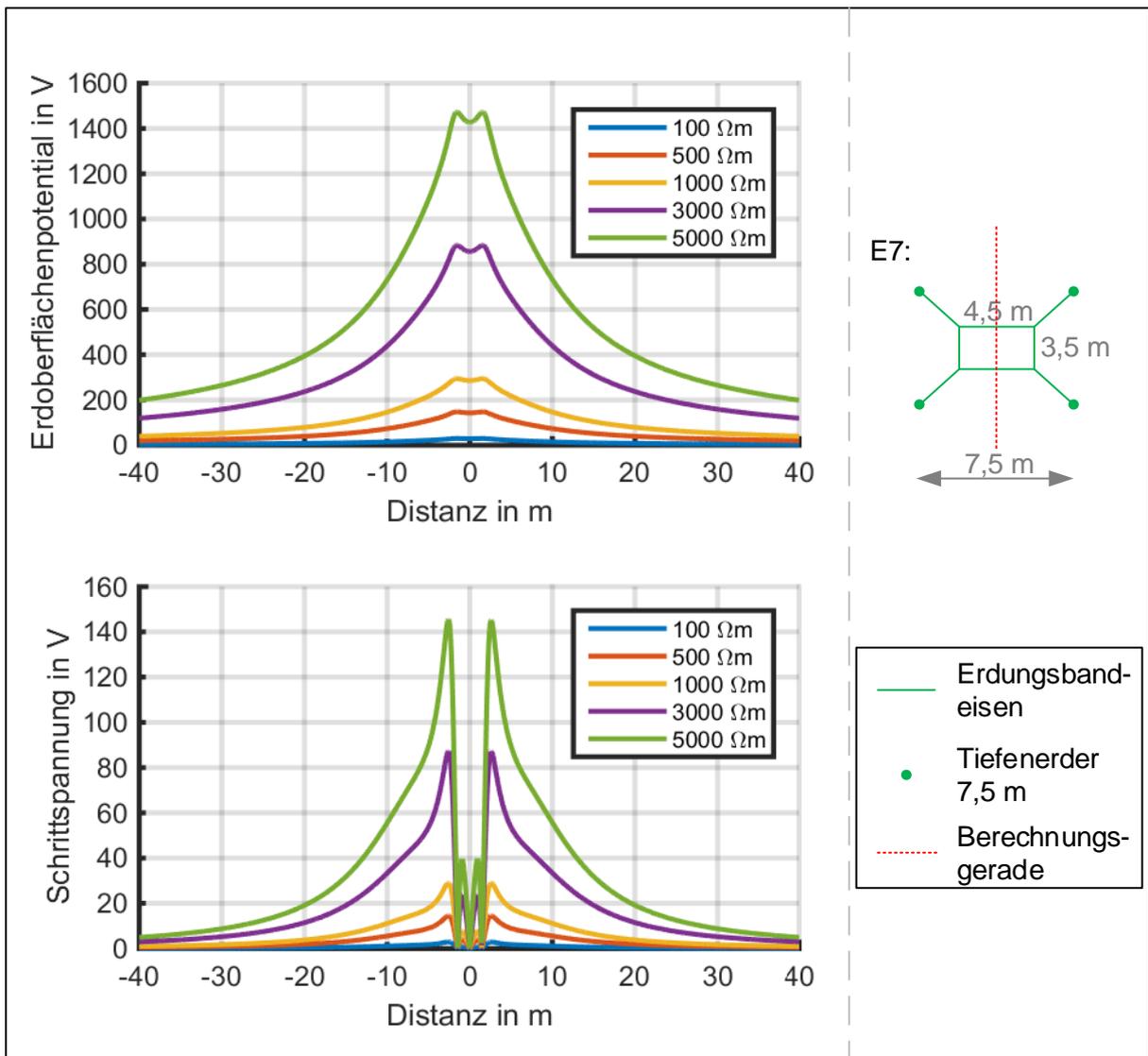


Abbildung 5.9: Erdwiderstandsvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E7 (vier 7,5 m Tiefenerder) entlang der Berechnungsgeraden

5.2.5 Betrachtung von Mehrschichtböden

Die bisherigen Ergebnisse beruhen auf der Annahme, dass der spezifische Erdwiderstand unabhängig von der Tiefe des Erdbodens konstant bleibt. Da dieser zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern (siehe Kapitel 2.2) sich ebenfalls mit der Tiefe ändert, wird nachfolgend die Auswirkung von Mehrschichtböden auf den Erdungswiderstand der Station betrachtet. Die Nachbildung erfolgt in OBEIN 2 [15] unter der Berücksichtigung eines Zweischichtbodens mit den spezifischen Erdwiderständen ρ_1 für die Oberschicht und ρ_2 für die Unterschicht.

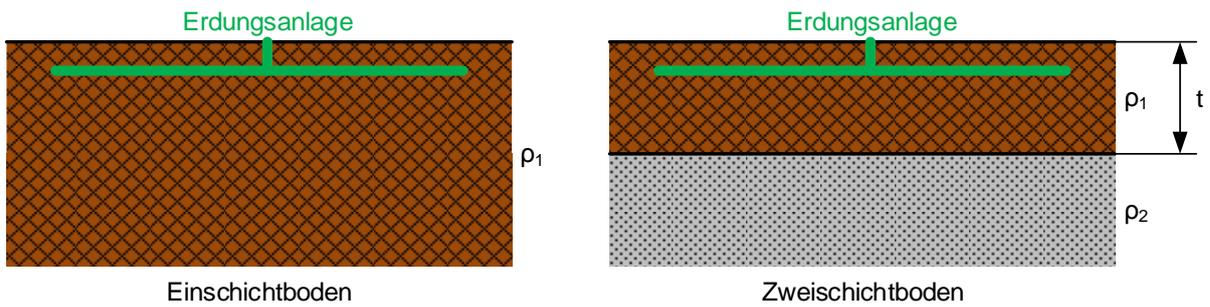


Abbildung 5.10: Modell Einschicht- und Zweischichtboden
t ... Tiefe von ρ_2

Die Berechnungen werden mit der Erdungsanlage E1 (Abbildung 5.4), bestehend aus zwei Potentialsteuerringen und vier Strahlen zu je 25 m, durchgeführt. Die Erdungsanlage befindet sich in 0,7 m Tiefe.

Variation des spezifischen Erdwiderstands ρ_2 der Unterschicht:

Für bekannte Tiefen t und bekannte spezifische Erdwiderstände ρ_2 der Unterschicht kann der Erdungswiderstand der Station im Vergleich zum Einschichtmodell mit Hilfe des nachfolgenden Diagramms berechnet werden.

Im Vergleich zum Einschichtmodell ergeben sich beim Zweischichtbodenmodell abhängig vom Verhältnis ρ_2/ρ_1 wesentlich höhere Erdungswiderstände der Station.

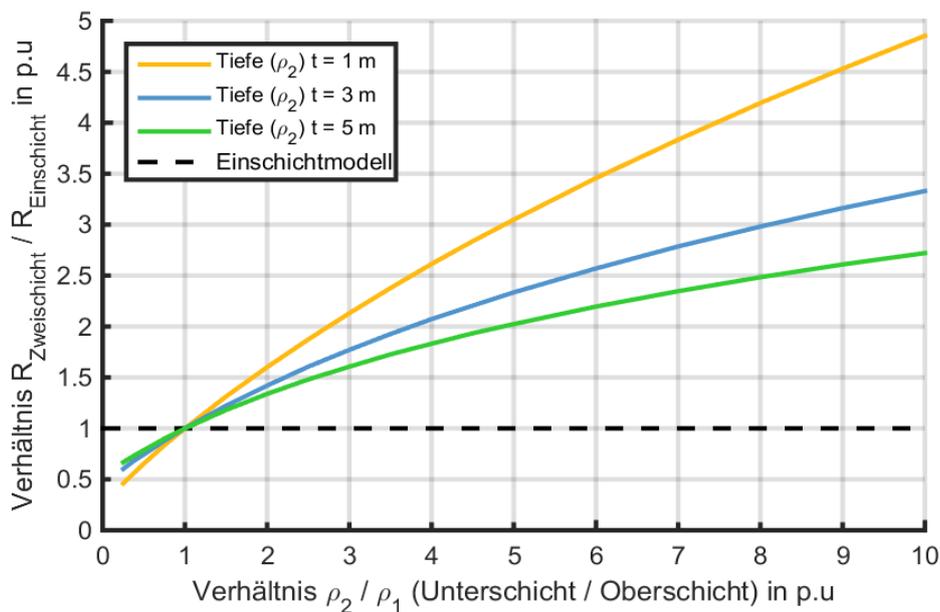


Abbildung 5.11: Vergleich des Erdungswiderstandes zwischen Ein- und Zweischichtboden bei Variation von ρ_2 und ρ_1 und vorgegebener Tiefe t der Unterschicht bei Horizontalerdungsanlagen

Variation der Tiefe t der Unterschicht:

Ebenso kann für bekannte spezifische Erdwiderstände der Ober- und Unterschicht (ρ_1 und ρ_2) und variierende Tiefen t der Unterschicht der Erdungswiderstand der Station im Vergleich zum Einschichtmodell berechnet werden. Dies erfolgt mittels nachfolgendem Diagramm.

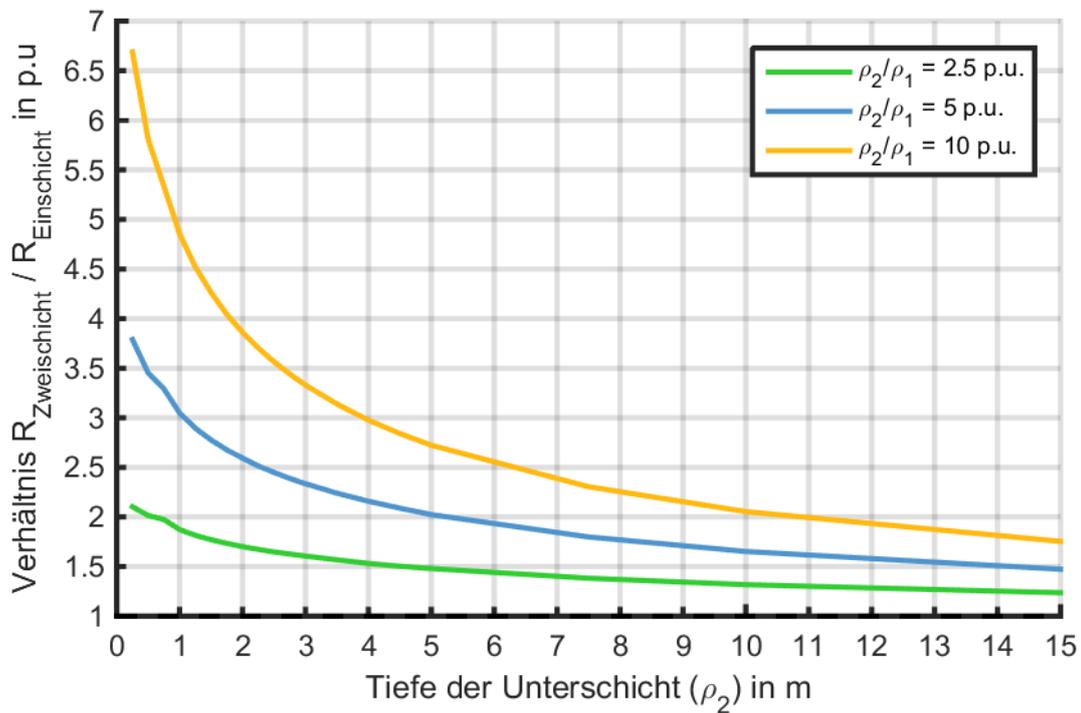


Abbildung 5.12: Variation der Tiefe t der Unterschicht für gewählte Verhältnisse der spezifischen Erdwiderstände ρ_2 zu ρ_1

Bei geringen Tiefen t der Unterschicht beziehungsweise großen Verhältnissen von ρ_2 / ρ_1 ergeben sich für das Zweischichtmodell wesentlich höhere Erdungswiderstände der Station als beim Einschichtmodell.

Diese Umstände sind bei der Planung von Erdungsanlagen zu berücksichtigen. Starke Schwankungen der Bodenschichten, einerseits vom Ort und andererseits von der Tiefe, erschweren eine genaue Aussage bezüglich des Ausbreitungswiderstandes von Erdungsanlagen und die genaue Nachbildung der Verhältnisse in Modellen.

5.3 Mittelspannungsteilnetz mit zwei Kabelanspeisungen

5.3.1 Modellbeschreibung und Annahmen

Das betrachtete Modell eines Mittelspannungsverteilsnetzes setzt sich aus drei erdungsmäßig miteinander verbundenen MS/NS-Verteilnetztransformatorstationen zusammen. Da in der Mittelspannung bei Freileitungen prinzipiell kein Erdseil mitgeführt wird, werden im Modell ausschließlich Transformatorstationen mit Kabelanspeisungen berücksichtigt, da in diesem Falle die Erdungsanlagen benachbart liegender Stationen verbunden sind. Die betrachtete Station stellt jeweils die in der Mitte befindliche Station (Tr. Station 2) dar, die über zwei Kabelanspeisungen, je eine pro benachbarte Verteilnetzstation, verfügt. Die Erdungsanlage dieser Station wird im Gesamtkonzept gesondert (siehe Kapitel 5.2.2) berücksichtigt und wird daher in diesem Modell nicht mit dargestellt.

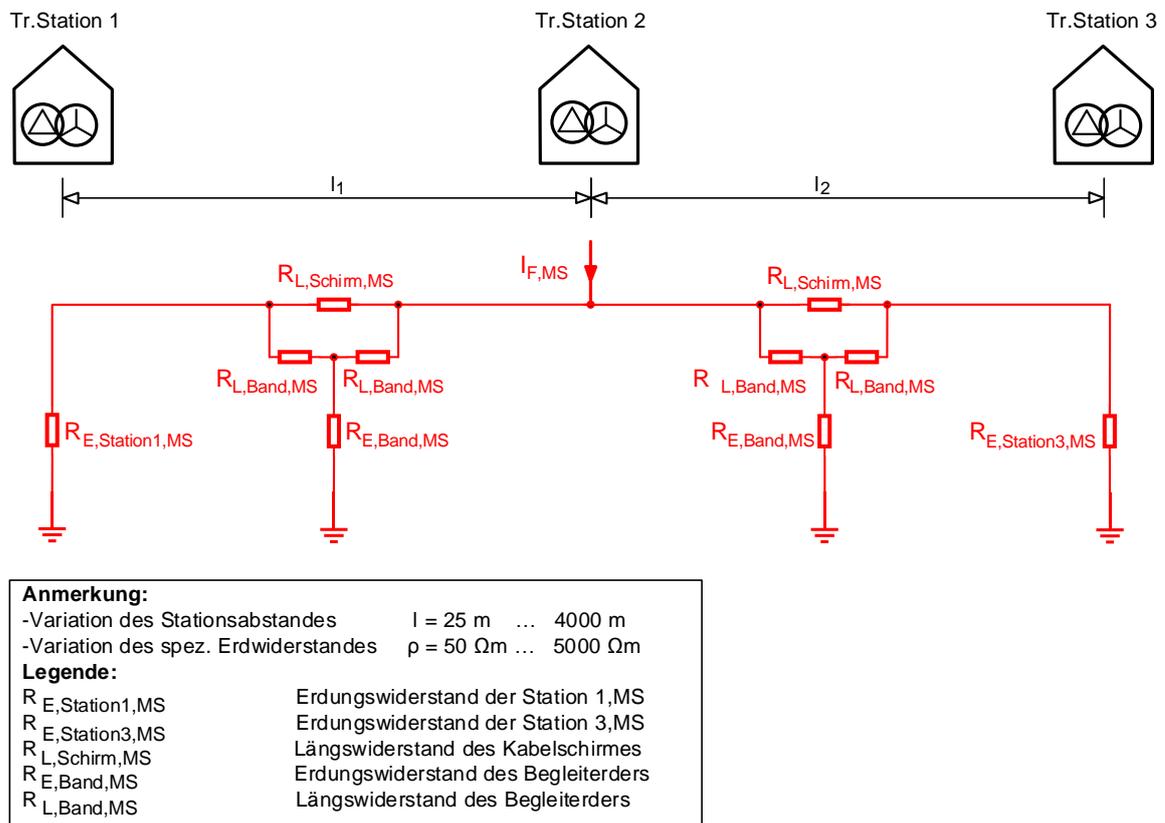


Abbildung 5.13: Modell eines Mittelspannungsverteilsnetzes mit zwei Kabelanspeisungen

Variiert wird einerseits der Abstand der benachbarten Stationen zur betrachteten Station ($l = 5 \text{ m} \dots 4000 \text{ m}$) und andererseits auch der spezifische Erdwiderstand ($\rho_E = 50 \Omega\text{m} \dots 5000 \Omega\text{m}$).

Stationserdungswiderstände ($R_{E,Station1,MS}$, $R_{E,Station3,MS}$):

Berechnung des jeweiligen Stationserdungswiderstandes erfolgt nach Kapitel 5.2.

Die Berücksichtigung des Stationserdungswiderstandes der zur Gesamtbeurteilung betrachteten Station (Tr.Station 2) erfolgt separat.

Kabelschirmwiderstände ($R_{L,Schirm,MS}$):

Der Widerstand der Kabelschirme wird als Parallelschaltung aller drei Kabelschirme mit je einem Ersatzquerschnitt von 16 mm² Kupfer berücksichtigt.

Begleiterder ($R_{L,Band,MS}$, $R_{E,Band,MS}$):

Die Begleiterder (tZn Stahl 40 mm x 4 mm) werden nach Kapitel 5.1.3 als T- Ersatzschaltung modelliert. Die Längswiderstände ergeben sich aus den ohmschen Widerständen der verwendeten Materialien für die jeweils gegebenen Längen und Querschnitte. Die Erderwirkung selbst wird durch das Querglied berücksichtigt, welches sich in der Mitte der gesamten Erderlänge befindet.

Anmerkung:

Die Nachbildung des Erdungssystems erfolgt durch ein rein ohmsches Modell. Dies ist zulässig, da die Blindkomponenten gegenüber den Wirkkomponenten für den betrachteten Fall vernachlässigt werden können. Dies kann näherungsweise wie folgt gezeigt werden:

Ohm'scher Längswiderstand des Kabelschirms [16]:

$$R_{SchirmCu16}' = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{0,0172 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot 1000 m}{16 mm^2} = 1,1 \frac{\Omega}{km} \quad (5.5)$$

Kapazitiver Schirmblindwiderstand (Nachbildung mittels Zylinderkondensator [16]):

$$\begin{aligned} X_{C_{Schirm}}' &= \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{l}{\ln \frac{R_a}{R_i}} \right)} \\ &= \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 Hz \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 3 \frac{As}{Vm} \cdot \frac{1000 m}{\ln \frac{2,5 cm}{2,2 cm}} \right)} = 2,4 \frac{k\Omega}{km} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Induktiver Schirmblindwiderstand [16]:

$$X_{L_{Schirm}} = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{93,2 \cdot \sqrt{\rho}}{R_i} = \frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{93,2 \cdot \sqrt{100 \Omega\text{m}}}{2,5} = 0,6 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}} \quad (5.7)$$

5.3.2 Ergebnisse Mittelspannungsteilnetz

Abbildung 5.14 zeigt den berechneten wirksamen MS-Erdungswiderstand bei zweifacher MS-Kabelanspeisung inklusive Begleiterder in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Stationen sowie dem spezifischen Erdwiderstand.

Bei größer werdenden Abständen zwischen den Stationen reduziert sich aufgrund länger werdender Begleiterder der Gesamterdungswiderstand. Bei sehr langen Oberflächenerdern nähert sich der Ausbreitungswiderstand schließlich einem Endwert (siehe Kapitel 5.1.3). Bei weiterer Erhöhung der Abstände steigt der Gesamtwiderstand durch Einfluss der steigenden Längswiderstände der Begleiterder sowie der Kabelschirme wieder leicht an. Die Ergebnisse der Berechnung verdeutlichen, dass die Längswiderstände der Kabelschirme und der Begleiterder im betrachteten Bereich innerhalb von 4000 m, lediglich einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis des wirksamen Erdungswiderstandes der Mittelspannungsabgänge haben.

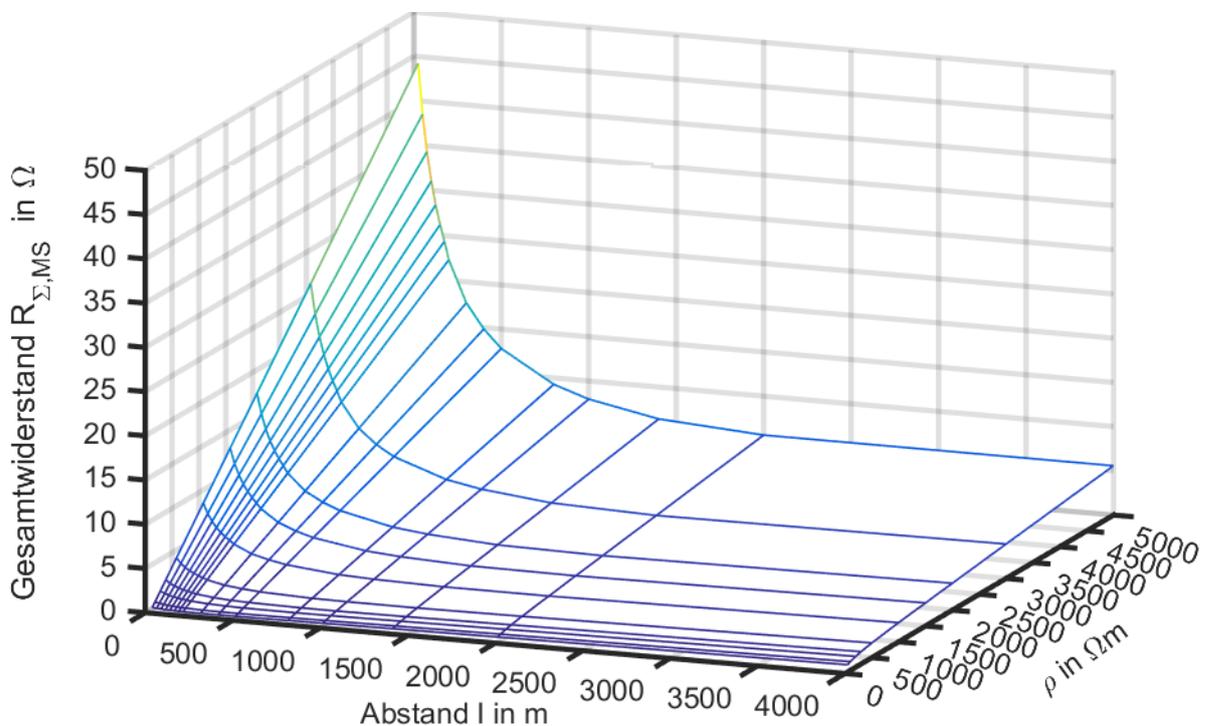


Abbildung 5.14: Gesamterdungswiderstand zweier MS- Kabelanbindungen inkl. Nachbarstationen in Abhängigkeit der Stationsabstände sowie des spezifischen Erdwiderstandes

Abbildung 5.15 zeigt den wirksamen Gesamterdungswiderstand, für ausgewählte Werte des spezifischen Erdwiderstandes.

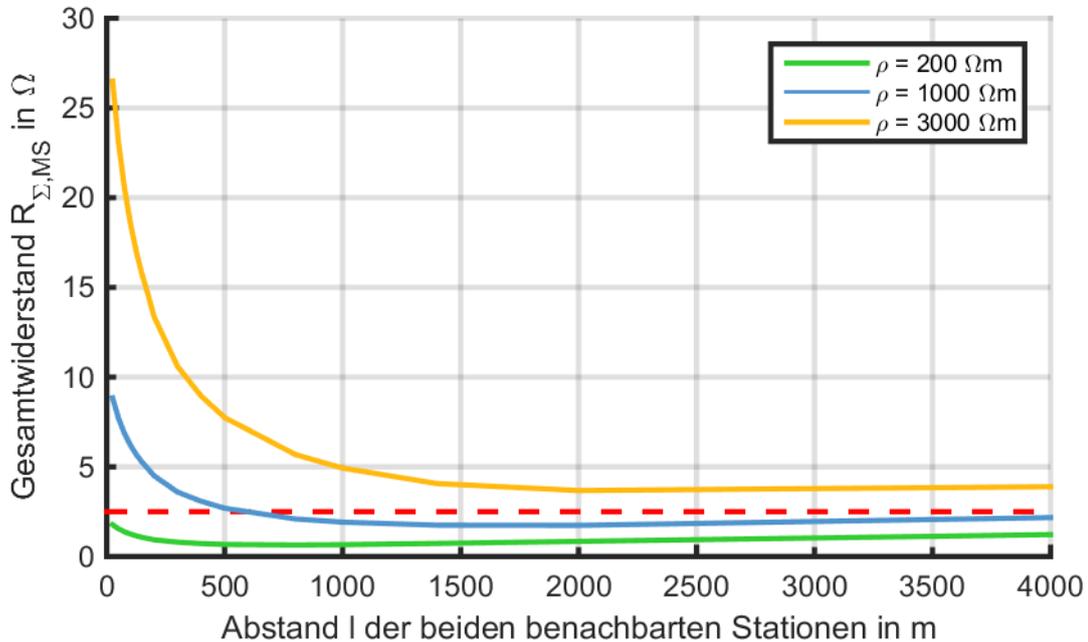


Abbildung 5.15: Gesamterdungswiderstand zweier MS-Kabelanbindungen inkl. Nachbarstationen in Abhängigkeit der Stationsabstände für drei spezifische Erdwiderstände

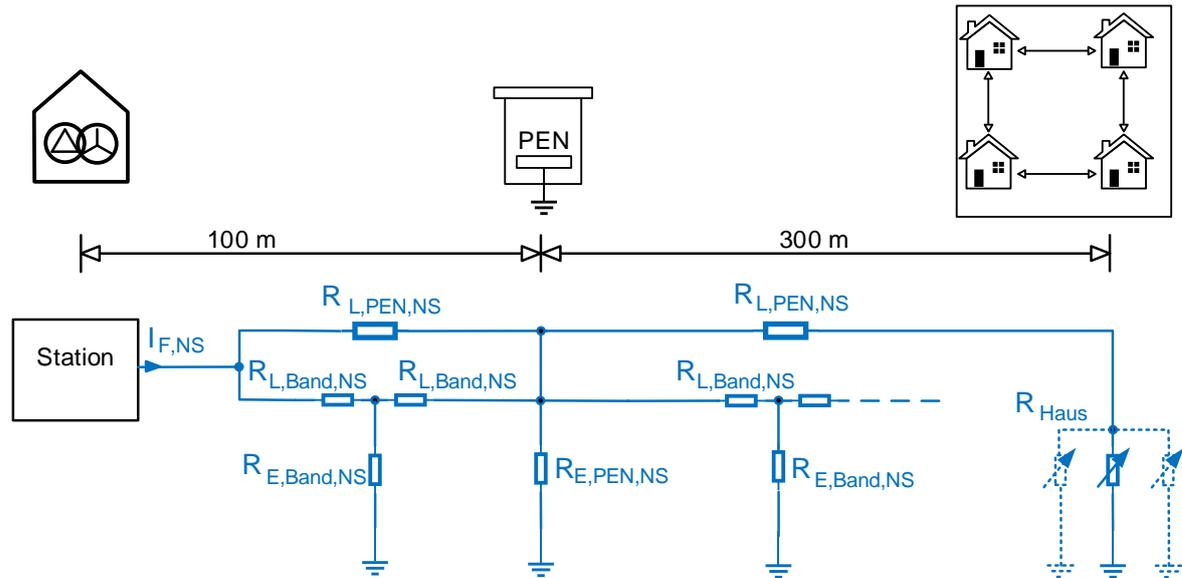
5.4 Niederspannungsnetz – Kabelabgang

5.4.1 Modellbeschreibung und Annahmen

Erfolgt die Anspeisung der Verbraucher im Niederspannungsnetz über ein Kabelnetz, so wird zusätzlich zu den Phasenleitern der in der Transformatorstation geerdete Sternpunkt des Verteiltransformators als PEN-Leiter mitgeführt. Dieser wird abhängig von der Ausdehnung des Leitungsabganges an den Kabelverteilkästen geerdet.

Weiters wird zusätzlich mit den Kabeln ein Bänderder (tZn Stahl 40 mm x 4 mm) als Kabelbegleiterder mitverlegt.

Das Modell berücksichtigt Kabelabzweige ab der Transformatorstation bis zur Verbrauchereinrichtung, welche mehrfach pro Station vorkommen können. Der Abgang ist mit einer typischen Länge von 400 m berücksichtigt, wobei der erste Kabelverteilkasten mit 100 m Entfernung gewählt wird und diese Länge zusätzlich mit einem Begleiterder verbunden ist. Nach diesen ersten 100 m werden stellvertretend für das restliche, möglicherweise verzweigte Kabelnetz, weitere 150 m Begleiterder berücksichtigt.



Anmerkung:
 -Variation der Häuseranzahl bzw. des Summenerdungswiderstandes $R_{Haus} = 1 \Omega \dots 100 \Omega$
 -Variation des spez. Erdwiderstandes $\rho = 50 \Omega m \dots 5000 \Omega m$

Legende:
 $R_{L,PEN,NS}$ Längswiderstand des PEN Leiters
 $R_{E,PEN,NS}$ Erdungswiderstand des PEN Leiters
 $R_{L,Band,NS}$ Längswiderstand des Begleiterders
 $R_{E,Band,NS}$ Erdungswiderstand des Begleiterders
 R_{Haus} Erdungswiderstand der Häuser

Abbildung 5.16: Modell der Erdungsverhältnisse eines Niederspannungs-Kabelabganges

Im Modell (siehe Abbildung 5.16) wird sowohl der Summenwiderstand ($R_{Haus} = 1 \Omega \dots 100 \Omega$) aller Verbraucheranlagen, als auch der spezifische Erdwiderstand ($\rho = 50 \Omega m \dots 5000 \Omega m$) variiert. Die pro Abgang vorhandene Länge an Oberflächenerdern, welche das Gesamterdungssystem des Niederspannungsnetzes bilden, beträgt 50 m Bandeisen (tZn Stahl 40 mm x 4 mm) plus die Länge des mitverlegten Begleiterders, welche im Modell 100 m + 150 m = 250 m beträgt.

$$R_{Haus} = 1 \Omega \dots 100 \Omega$$

$$\rho = 50 \Omega m \dots 5000 \Omega m$$

Längswiderstand des PEN-Leiters ($R_{L,PEN,NS}$):

Der Längswiderstand des PEN-Leiters wird anhand folgender Formel mit einem Querschnitt von 50 mm² Aluminium berechnet:

$$R_{L,PEN,NS}' = \frac{\rho_{Al} \cdot l}{A} = \frac{0,02733 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot 1000 m}{50 mm^2} = 0,55 \frac{\Omega}{km} \tag{5.8}$$

Erdungswiderstand der Betriebserdung (Zwischenerdungen) des PEN-Leiters ($R_{E,PEN,NS}$):

Der Widerstand der als Oberflächenerder ausgeführten Betriebserdung wird nach folgenden Zusammenhang [2] bzw. [4] berechnet:

$$R_{E,PEN,NS} = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} \quad (5.9)$$

$R_{E,PEN,NS}$	Ausbreitungswiderstand	Ω
L	Länge des Bänderders	m
d	Halbe Breite des Erdungsbandes	m
ρ	spez. Erdwiderstand	Ωm

Begleiterder ($R_{L,Band,NS}$, $R_{E,Band,NS}$):

Die Begleiterder (tZn Stahl 40 mm x 4 mm) werden nach Kapitel 5.1.3 als T-Ersatzschaltung modelliert. Die Längswiderstände ergeben sich aus den ohmschen Widerständen der verwendeten Materialien für die jeweils gegebenen Längen und Querschnitte. Die Erderwirkung selbst wird durch das Querglied berücksichtigt, welches sich vereinfacht in der Mitte der gesamten Erderlänge befindet.

5.4.2 Ergebnisse Niederspannung – Kabelabgang

Abbildung 5.17 zeigt die Entwicklung des wirksamen Niederspannungs-Erdungswiderstandes eines NS-Kabelabganges in Abhängigkeit vom Gesamterdungswiderstand aller in diesem Abzweig vorkommenden NS-Verbraucheranlagen, sowie dem spezifischen Erdwiderstand.

Bei schlechter werdenden Erdungsverhältnissen und damit verbundenen größer werdenden spezifischen Erdwiderständen erhöht sich aufgrund der verringerten Erdungswirkung der Betriebserdung und Erdung der Verbraucheranlagen der Gesamterdungswiderstand. Durch eine hohe Anzahl an mit dem Abgang verbundenen Verbraucheranlagen (Nullung als Fehlerschutz) kann der Gesamtwiderstand deutlich gesenkt werden.

Die Ergebnisse der Berechnung verdeutlichen, dass die Längswiderstände des PEN-Leiters und der Kabelbegleiterder im betrachteten Bereich innerhalb 400 m lediglich einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis des wirksamen Gesamterdungswiderstandes des NS-Kabelabganges haben. Entscheidend für den Gesamterdungswiderstand sind somit der Erdwiderstand, die Begleiterder und die Hauserder.

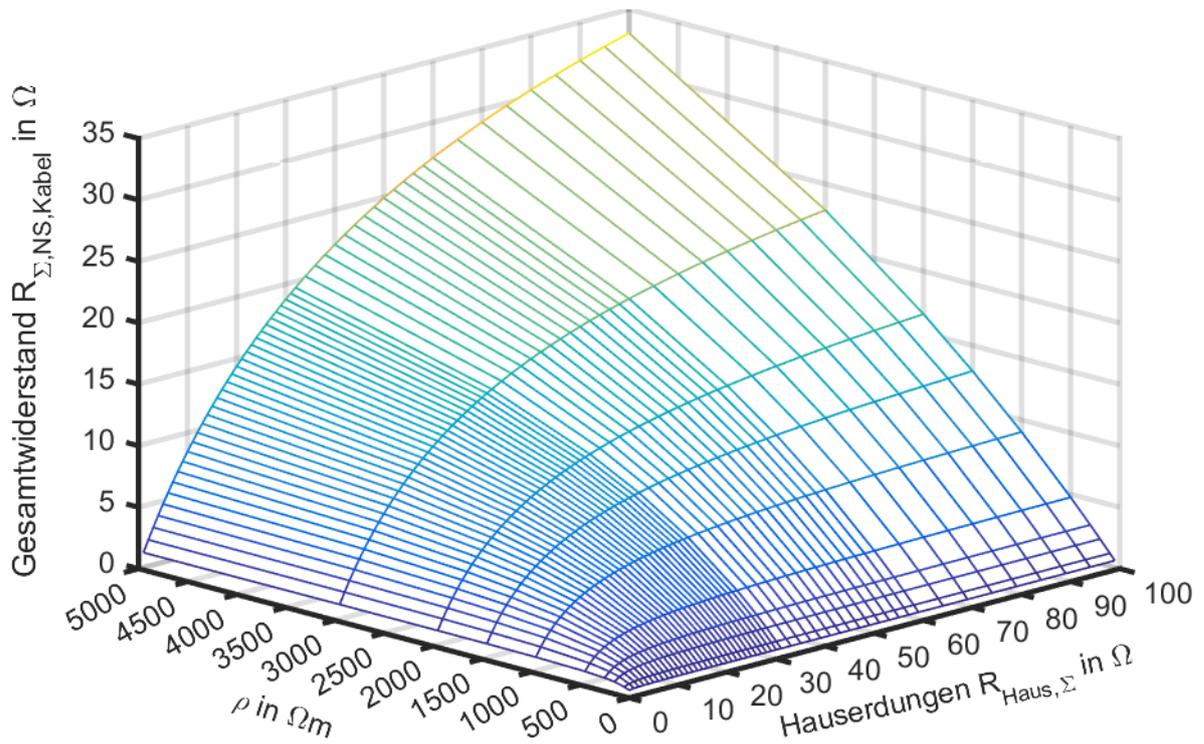


Abbildung 5.17: Gesamterdungswiderstand eines NS-Kabelabganges in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes und des Summenerdungswiderstandes aller Verbrauchieranlagen

Abbildung 5.18 zeigt den wirksamen Gesamterdungswiderstand für ausgewählte Werte des spezifischen Erdwiderstandes.

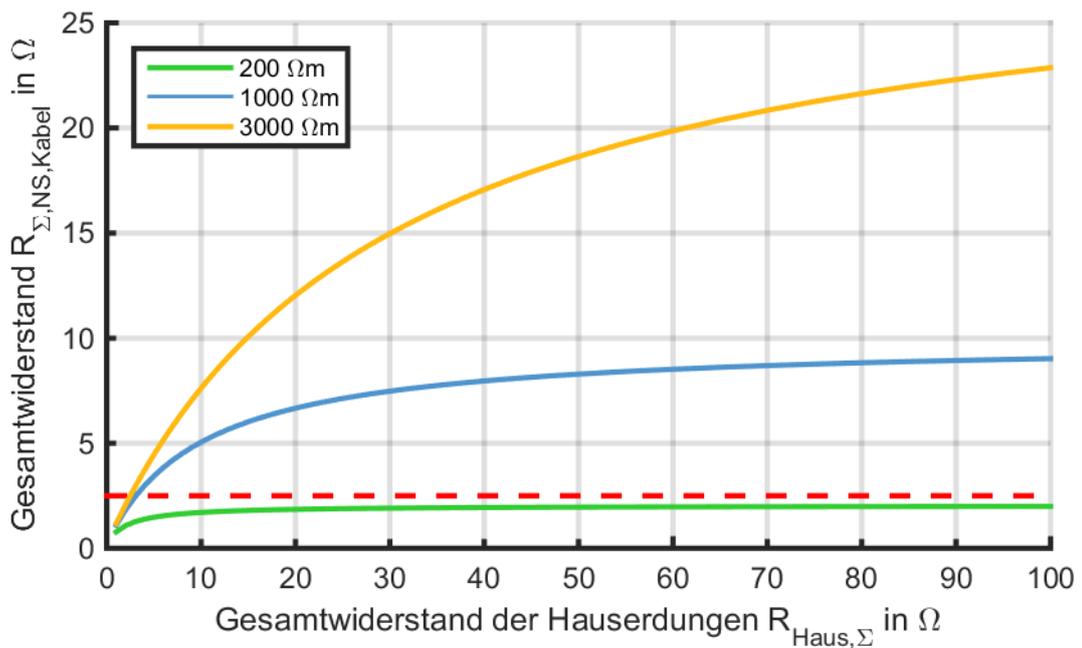


Abbildung 5.18: Gesamterdungswiderstand eines NS-Kabelabganges in Abhängigkeit des Summenerdungswiderstandes aller Verbrauchieranlagen für ausgewählte spez. Erdwiderstände

5.5 Niederspannungsnetz – Freileitungsabgang

5.5.1 Modellbeschreibung und Annahmen

Erfolgt die Anpeisung der Verbraucher im Niederspannungsnetz über ein Freileitungsnetz, so wird zusätzlich zu den Phasenleitern der in der Transformatorstation geerdete Sternpunkt des Verteiltransformators als PEN Leiter mitgeführt. Das Modell berücksichtigt Freileitungsabgänge ab der Transformatorstation bis zur Verbraucheranlage, welche mehrfach pro Station vorkommen können. Der Abgang ist mit einer Länge von 400 m berücksichtigt, wobei zu erwähnen ist, dass aufgrund sehr geringer Längswiderstände die Länge in Bezug auf den Widerstand des Abzweigs keine signifikante Auswirkung hat.

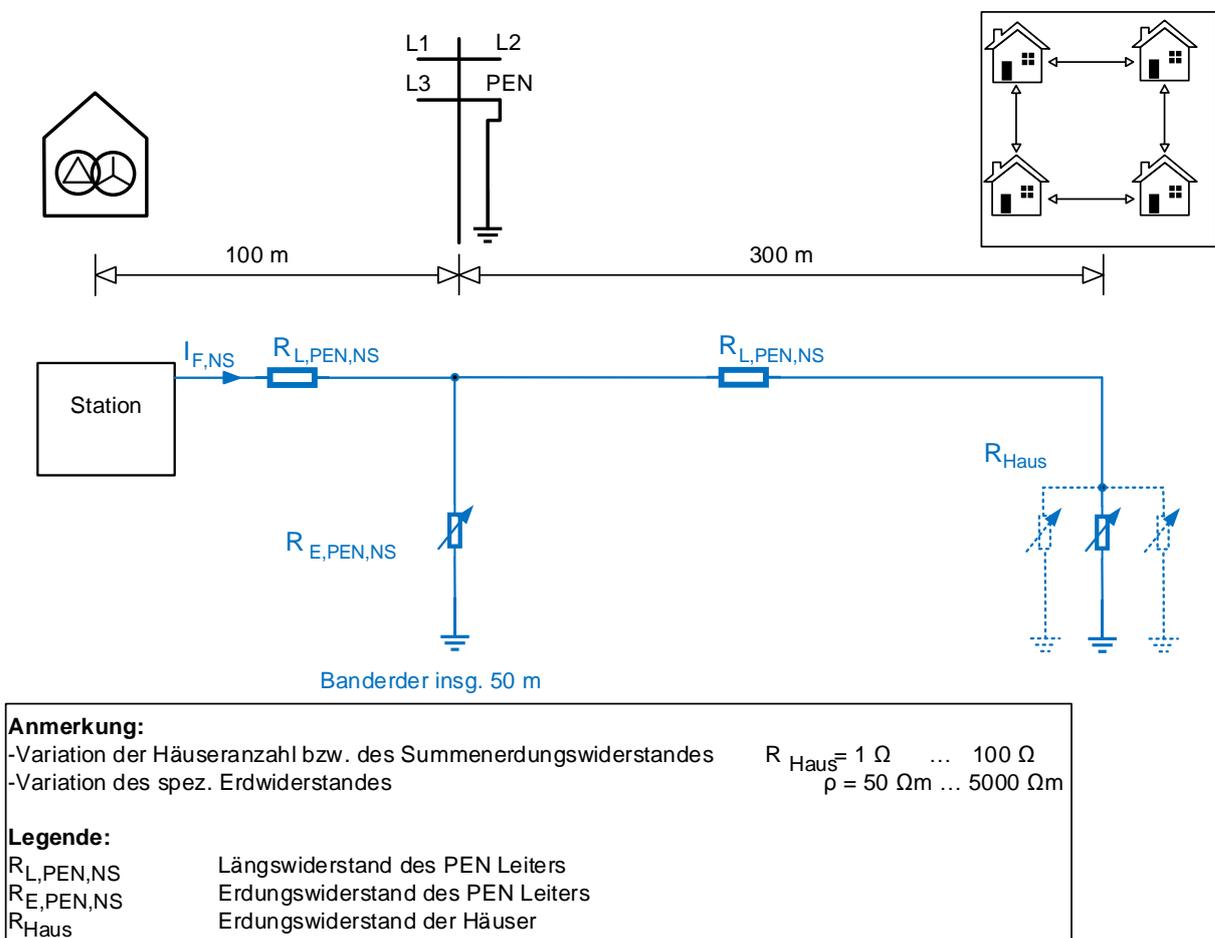


Abbildung 5.19: Modell der Erdungsverhältnisse eines Niederspannungs-Freileitungsabganges

Im Modell wird sowohl der Summenwiderstand ($R_{Haus} = 1 \Omega \dots 100 \Omega$) aller Verbraucheranlagen, als auch der spezifische Erdwiderstand ($\rho = 50 \Omega\text{m} \dots 5000 \Omega\text{m}$) variiert. Die pro Abgang vorhandene Länge an Oberflächenerdern, welche die Betriebserdung des Niederspannungsnetzes bilden, beträgt 50 m Bandeisen (tZn Stahl 40 mm x 4 mm).

$$R_{Haus} = 1 \Omega \dots 100 \Omega$$

$$\rho = 50 \Omega m \dots 5000 \Omega m$$

Längswiderstand des PEN-Leiters ($R_{L,PEN,NS}$):

Der Längswiderstand des PEN-Leiters wird anhand folgender Formel mit einer Berücksichtigung des Querschnitts von 50 mm² Aluminium berechnet:

$$R_{L,PEN,NS}' = \frac{\rho_{Al} \cdot l}{A} = \frac{0,02733 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot 1000 m}{50 mm^2} = 0,55 \frac{\Omega}{km} \quad (5.10)$$

Erdungswiderstand Erdung (Zwischenerdungen) des PEN-Leiters ($R_{E,PEN,NS}$):

Der Widerstand der als Oberflächenerder ausgeführten Betriebserdung wird nach folgenden Zusammenhang [2], [4] berechnet:

$$R_{E,PEN,NS} = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} \quad (5.11)$$

$R_{E,PEN,NS}$	Ausbreitungswiderstand	Ω
L	Länge des Banderders	m
d	Halbe Breite des Erdungsbandes	m
ρ	spez. Erdwiderstand	Ωm

5.5.2 Ergebnisse Niederspannung – Freileitungsabgang

Abbildung 5.20 zeigt die Entwicklung des wirksamen Niederspannungs-Erdungswiderstandes eines NS-Freileitungsabganges in Abhängigkeit vom Gesamterdungswiderstand aller in diesem Abzweig vorkommenden NS-Verbraucheranlagen, sowie dem spezifischen Erdwiderstand (siehe Abbildung 5.19).

Bei schlechter werdenden Erdungsverhältnissen und damit verbundenen größer werdenden spezifischen Erdwiderständen, erhöht sich aufgrund der verringerten Erdungswirkung der Betriebserdung und Erdung der Verbraucheranlagen der Gesamterdungswiderstand. Durch eine hohe Anzahl an mit dem Abgang verbundenen Verbraucheranlagen (bei Nullung als Schutzmaßnahme) kann der Gesamterdungswiderstand deutlich gesenkt werden.

Die Ergebnisse der Berechnung verdeutlichen, dass die Längswiderstände des PEN-Leiters im betrachteten Bereich innerhalb 400 m lediglich einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis des wirksamen Gesamterdungswiderstandes des NS-Freileitungsabganges haben.

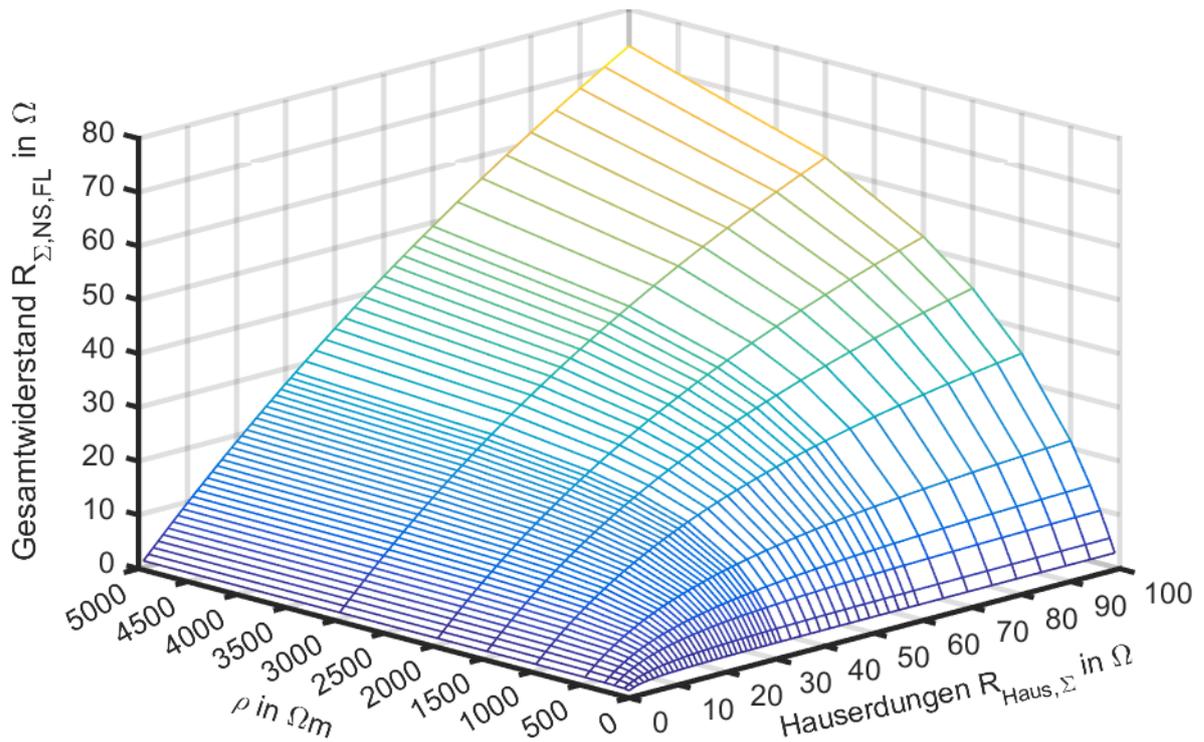


Abbildung 5.20: Gesamterdungswiderstand eines NS-Freileitungsabganges in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes und des Summenerdungswiderstandes aller Verbrauchieranlagen;

Abbildung 5.21 zeigt den wirksamen Gesamterdungswiderstand für ausgewählte Werte des spezifischen Erdwiderstandes.

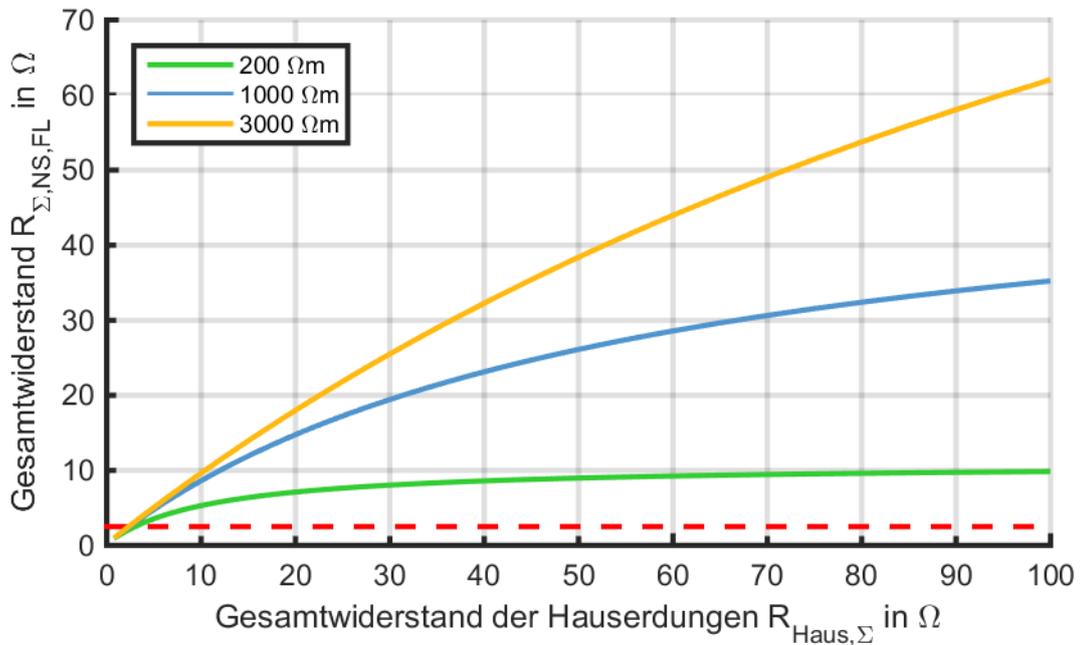


Abbildung 5.21: Gesamterdungswiderstand eines NS-Freileitungsabganges in Abhängigkeit des Summenerdungswiderstandes aller Verbrauchieranlagen für ausgewähl spez. Erdwiderstände;

5.6 Verbraucheranlagen

Die Nachbildung der Erdungsanlagen von Verbraucheranlagen zur Beurteilung einer Gesamtsystembetrachtung erfolgt nach dem Mindestausmaß gemäß [5], wonach eine Erdungsanlage bestimmte Mindestkriterien erfüllen muss. Diese umfassen eine dauerhafte, ausreichend korrosionsbeständige Ausführung mit folgenden Mindestlängen der Erder [5]:

- 10 m Horizontalerder oder
- 4,5 m Vertikalerder oder
- gleichwertige Erderkombination

Betrachtet werden nachfolgend Verbraucheranlagen, bei welchen als Schutzmaßnahme Nullung gemäß [5] angewandt wird. Die Berechnung erfolgt rein analytisch nach [4] bzw. [2].

ρ	Horizontalerder	Vertikalerder	4 Häuser	9 Häuser	15 Häuser
	$R_{\text{Horizontal},10\text{ m}}$	$R_{\text{Vertikal},4.5\text{ m}}$	$R_{\text{Haus},\Sigma}$	$R_{\text{Haus},\Sigma}$	$R_{\text{Haus},\Sigma}$
Ωm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
50	11,0	12,0	2,9	1,3	0,8
100	22,0	24,1	5,8	2,6	1,5
200	44,0	48,1	11,5	5,1	3,1
300	66,0	72,2	17,3	7,7	4,6
500	109,9	120,3	28,8	12,8	7,7
1000	219,9	240,6	57,6	25,6	15,3
1500	329,8	360,9	86,3	38,4	23,0
2000	439,8	481,2	115,1	51,2	30,7
3000	659,6	721,8	172,7	76,7	46,0
5000	1099,4	1202,9	287,8	127,9	76,7

Tabelle 5.6: Erdungswiderstand von verschiedenen Verbraucheranlagenkonfigurationen

Als Erdungswert wird der Mittelwert der berechneten Ergebnisse aus Horizontalerderausführung und Vertikalerderausführung herangezogen.

$$R_{\text{Haus},\Sigma} = \frac{R_{\text{Horizontalerder},10\text{ m}} + R_{\text{Vertikalerder},4.5\text{ m}}}{2} \quad (5.12)$$

Die Berücksichtigung mehrerer Häuser (mit der Anzahl n) in einem Abzweig erfolgt durch Parallelschaltung der entsprechenden Anzahl an Verbraucheranlagen.

$$R_{\text{Haus},\Sigma,n\text{-Häuser}} = \frac{R_{\text{Haus},\Sigma}}{n} \quad (5.13)$$

5.7 Gesamtmodell einer Erdungsanlage zur Beurteilung globaler Erdungssysteme

Um Aussagen zur Erdungssituation eines unabhängigen Netzbereiches im Verteilnetz zu tätigen, ist eine Gesamtsystembetrachtung, bei der die jeweiligen zuvor berechneten Teilbereiche (Kapitel 5.2 bis Kapitel 5.6) zusammen analysiert werden, notwendig. Dies ist im Allgemeinen sehr schwierig, da zwar die beteiligten Netzkomponenten meist ausreichend genau erfasst werden können, jedoch die spezifischen Erdwiderstände, vor allem bei weiter ausgedehnten Erdungskonstellationen, lokal stark variieren können (siehe Kapitel 2.2). Die nachfolgende Betrachtung stellt eine vereinfachte Betrachtungsweise mit annähernd konstant bleibenden spezifischen Erdwiderständen im Bereich des untersuchten Netzes dar [1].

5.7.1 Szenarien

Betrachtet werden verschiedene Konstellationen eines Verteilnetzes, Fokus der Betrachtung stellt die mittlere Transformatorstation dar. Die Niederspannungsabgänge der übrigen beiden Stationen werden vernachlässigt. Verbunden sind die Stationen mittels Kabel und mitverlegtem Kabelbegleiter. Der Niederspannungsabgang der betrachteten Station kann sowohl als Kabelabgang, als auch als Freileitungsabgang ausgeführt werden. Weiteres variiert die Anzahl genullter Häuser in diesem Abgang. Alle Szenarien werden für verschiedene spezifische Erdwiderstände und verschiedene Abstände der Mittelspannungsstationen berechnet und werden nachfolgend (siehe Kapitel 5.7.2) dargestellt.

Untersuchte Szenarien (alle Konstellationen inklusive dreier erdungsseitig miteinander verbundener Mittelspannungsverteilstromtransformatorstationen):

- Ein 400 m NS-Kabelabgang, 4 Verbraucheranlagen
- Ein 400 m NS-Kabelabgang, 9 Verbraucheranlagen
- Ein 400 m NS-Kabelabgang, 15 Verbraucheranlagen
- Ein 400 m NS-Freileitungsabgang, 4 Verbraucheranlagen
- Ein 400 m NS-Freileitungsabgang, 9 Verbraucheranlagen
- Ein 400 m NS-Freileitungsabgang, 15 Verbraucheranlagen

Gewählte Abstände der beiden benachbarten Mittelspannungsstationen zur betrachteten Station:

- 300 m, 500 m, 800 m, 1400 m, 2000 m

Gewählte spezifische Erdwiderstände:

- 500 Ω m, 1000 Ω m, 1500 Ω m, 2000 Ω m, 3000 Ω m

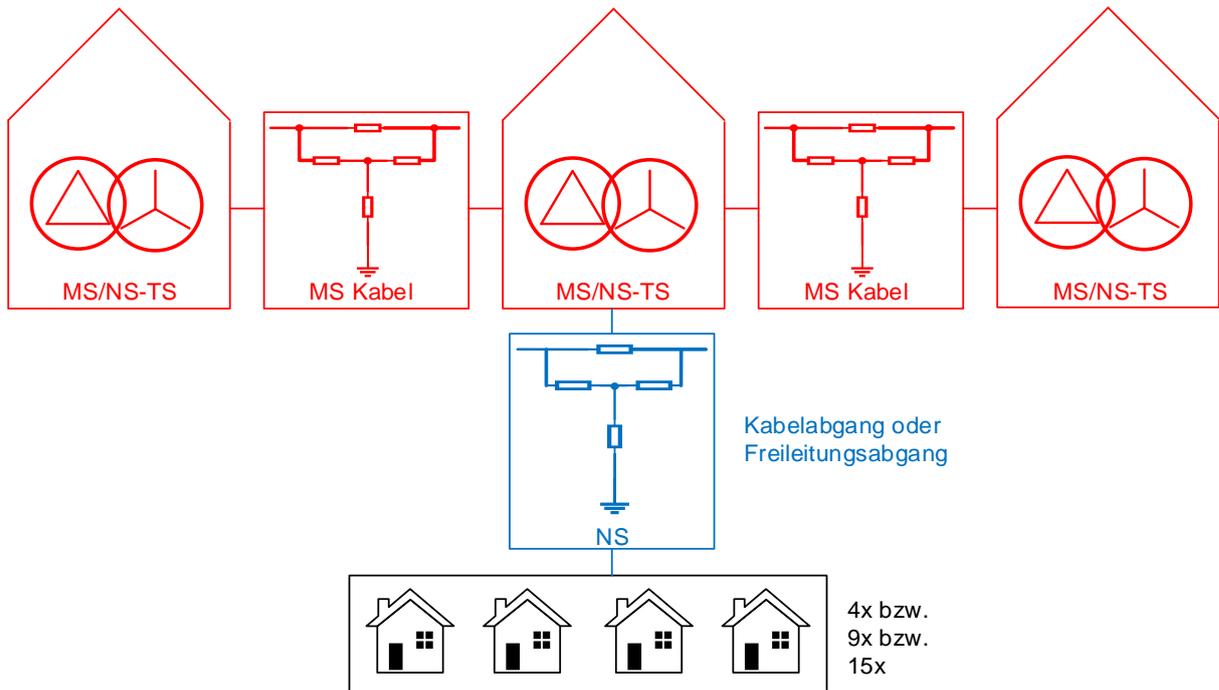


Abbildung 5.22: Betrachtete Netzkonstellationen

5.7.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen der Konfigurationen aus Kapitel 5.7.1 sind nachfolgend dargestellt. Geeignete Konfigurationen für einen Zusammenschluss der Hoch- und Niederspannungserdung beziehungsweise der Eignung hinsichtlich der Betrachtung eines globalen Erdungssystems sind grün, nicht geeignete Konfigurationen sind rot hinterlegt. Als Kriterium wird der Gesamtwiderstand des Erdwiderstandes des Netzabschnitts herangezogen, wobei von einem maximalen einpoligen Fehlerstrom von 60 A ausgegangen wird. Im betrachteten Fall eines maximalen Erdausbreitungswiderstandes von $2,5 \Omega$ werden die normativen Kriterien hinsichtlich maximal zulässiger Berührungsspannung als erfüllt angesehen (siehe Kapitel 3.3.1 bzw. [2], [4]), die Erdungsspannung überschreitet nicht das Zweifache der zulässigen Berührungsspannung von 75 V beziehungsweise 80 V.

Die Ergebnisse beruhen auf einer Betrachtung konstant bleibender spezifischer Erdwiderstände des betrachteten Bereichs. Bei stärker abweichenden spezifischen Erdwiderständen innerhalb des betrachteten Netzbereiches können die Ergebnisse von den nachfolgend berechneten Ergebnissen stark abweichen.

		spez. Erdwiderstand	Niederspannung: 400 m Abgang					
			Kabel	FL	Kabel	FL	Kabel	FL
			4 Häuser	4 Häuser	9 Häuser	9 Häuser	15 Häuser	15 Häuser
Mittelspannung: Abstand der beiden benachbarten Stationen zur betrachteten Station	300 m	500 Ωm	1,15 Ω	1,41 Ω	1,09 Ω	1,33 Ω	1,04 Ω	1,26 Ω
	500 m		0,97 Ω	1,16 Ω	0,94 Ω	1,10 Ω	0,90 Ω	1,05 Ω
	800 m		0,87 Ω	1,01 Ω	0,84 Ω	0,97 Ω	0,81 Ω	0,93 Ω
	1400 m		0,83 Ω	0,97 Ω	0,81 Ω	0,93 Ω	0,78 Ω	0,89 Ω
	2000 m		0,88 Ω	1,03 Ω	0,85 Ω	0,99 Ω	0,82 Ω	0,94 Ω
	300 m	1000 Ωm	2,26 Ω	2,78 Ω	2,16 Ω	2,62 Ω	2,04 Ω	2,45 Ω
	500 m		1,87 Ω	2,21 Ω	1,80 Ω	2,11 Ω	1,71 Ω	1,99 Ω
	800 m		1,56 Ω	1,79 Ω	1,51 Ω	1,72 Ω	1,45 Ω	1,64 Ω
	1400 m		1,36 Ω	1,53 Ω	1,32 Ω	1,48 Ω	1,27 Ω	1,42 Ω
	2000 m		1,35 Ω	1,52 Ω	1,31 Ω	1,47 Ω	1,27 Ω	1,42 Ω
	300 m	1500 Ωm	3,37 Ω	4,14 Ω	3,22 Ω	4,01 Ω	3,05 Ω	3,66 Ω
	500 m		2,76 Ω	3,26 Ω	2,66 Ω	3,18 Ω	2,54 Ω	2,95 Ω
	800 m		2,25 Ω	2,57 Ω	2,18 Ω	2,52 Ω	2,10 Ω	2,38 Ω
	1400 m		1,85 Ω	2,06 Ω	1,80 Ω	2,03 Ω	1,75 Ω	1,93 Ω
	2000 m		1,79 Ω	1,99 Ω	1,75 Ω	1,96 Ω	1,70 Ω	1,87 Ω
	300 m	2000 Ωm	4,48 Ω	5,50 Ω	4,28 Ω	5,20 Ω	4,06 Ω	4,87 Ω
	500 m		3,65 Ω	4,30 Ω	3,52 Ω	4,12 Ω	3,37 Ω	3,91 Ω
	800 m		2,95 Ω	3,35 Ω	2,86 Ω	3,24 Ω	2,76 Ω	3,11 Ω
	1400 m		2,34 Ω	2,59 Ω	2,29 Ω	2,53 Ω	2,22 Ω	2,45 Ω
	2000 m		2,22 Ω	2,44 Ω	2,17 Ω	2,38 Ω	2,11 Ω	2,31 Ω
	300 m	3000 Ωm	6,69 Ω	8,21 Ω	6,39 Ω	7,76 Ω	6,05 Ω	7,27 Ω
	500 m		5,43 Ω	6,39 Ω	5,23 Ω	6,11 Ω	5,00 Ω	5,80 Ω
	800 m		4,33 Ω	4,92 Ω	4,20 Ω	4,75 Ω	4,05 Ω	4,56 Ω
	1400 m		3,32 Ω	3,66 Ω	3,25 Ω	3,57 Ω	3,16 Ω	3,46 Ω
	2000 m		3,06 Ω	3,34 Ω	2,99 Ω	3,26 Ω	2,92 Ω	3,17 Ω

Tabelle 5.7: Geeignete Konfigurationen hinsichtlich eines Zusammenschlusses zwischen Hoch- und Niederspannungserdung beziehungsweise hinsichtlich Betrachtung eines globalen Erdungssystems

6 Zusammenfassung

Erkenntnisse welche aus den vorangegangenen Kapiteln gewonnen werden konnten, werden nachfolgend gesammelt und strukturiert zusammengefasst.

Zulässige Berührungsspannungen:

Durch Design der Erdungsanlage und Einbauten im Boden, ist die Berührungsspannung rund um die Station nicht konstant. Bei messtechnischer Überprüfung ist daher die Erfahrung des Ausführenden von großer Bedeutung.

Der Vorteil zusammengeschlossener Erdungsanlagen wird ebenfalls deutlich, da diese Stationen nicht annähernd an die erlaubten Grenzwerte der maximal erlaubten Berührungsspannung herankommen.

Zulässige Schrittspannungen (siehe Kapitel 4.2.2):

Besondere Beachtung sollte auf Stationserdungsanlagen gelegt werden, welche hohe Erdungsimpedanzen, Erdungsspannungen und Schrittspannungen aufweisen. Es ist zu beachten, dass trotz guter Potenzialsteuerung in der unmittelbaren Umgebung der Station bei Stationen mit hohen Erdungsspannungen in Bereich der Steuererder erhöhte Schrittspannungen auftreten können.

Ausführung der Erdungsanlage (siehe Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.3):

Je nach Ausführung der Erdungsanlage ergeben sich günstigere Eigenschaften der Varianten in Bezug auf deren Ausbreitungswiderstand, Schritt- und Berührungsspannungen.

Der Ausbreitungswiderstand der Erdungsanlage beläuft sich bei allen untersuchten Ausführungsvarianten ca. 100 m aufgeteilten Horizontalerdern in der gleichen Größenordnung. Durch geringere ohmsche Kopplungen weisen Stationen mit zwei Strahlenerdern geringfügig niedrigere Ausbreitungswiderstände auf. Achtung: Diese Betrachtung bezieht sich auf 50 Hz Wechselspannung, transiente Vorgänge weisen aufgrund der maximalen Wirkungslänge von Erdern andere Charakteristiken auf.

Die Berührungsspannungen werden durch die verlegten Potentialsteuerringe um die Stationen stark reduziert. Trotz teilweise hoher Ausbreitungswiderstände können die Anforderungen gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 eingehalten werden.

Durch die Messungen konnte ein starkes Schwanken der auftretenden Berührungsspannungswerte in Abhängigkeit des Messpunktes um die Station gezeigt werden. So variieren die Werte je nach Messpunkt erheblich, weshalb zur sicheren Beurteilung mehrere Messpunkte um die Station aufgenommen und erfahrene Meßtechniker eingesetzt werden sollten. Eine stichprobenartige Überprüfung, wie sie laut Norm (ÖVE/ÖNORM

E50522:2011 bzw. ÖVE/ÖNORM E8383:2000) vorgegeben ist, könnte rasch zur falschen Beurteilung der Station führen.

Zusammenschluss von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen (siehe Kapitel 4.2.3):

Durch einen Zusammenschluss der Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen können die Berührungs- und Schrittspannungen und Personengefährdung im Bereich von Mittelspannungsstationen stark reduziert werden. Die normativen Vorgaben für einen sicheren Zusammenschluss müssen dabei aber beachtet werden, um Gefährdungen durch Spannungsverschleppung im Bereich der Niederspannung durch Fehler in der Mittelspannung zu vermeiden.

Besondere Bodenverhältnisse, d.h. Böden mit besonders hohem spezifischem Bodenwiderstand sollten im Bedarfsfall gesondert betrachtet werden, da je nach Schichtung, das Erdoberflächenpotential teils mehr oder weniger schnell abfällt (siehe Kapitel 4.3.3). Dies hat maßgebenden Einfluss auf auftretende Schritt- und Berührungsspannungen.

Messung von Erdungsanlagen:

Die durchgeführten Messungen, sowohl mittels Erdungsmessbrücke, als auch mittels Stromeinspeisung über einen Anpassungstransformator haben gezeigt, dass die Messabweichungen je nach Ausführung der Erdungsanlagen variieren.

Die Messung lokal begrenzte Erdungsanlagen geringer Ausdehnung, wie beispielsweise Stationserdungsanlagen bei getrennter Betriebserdung der Niederspannung, liefert bei beiden Messverfahren zuverlässige Ergebnisse.

Einfluss aufgrund unterschiedlicher Bodenschichten (siehe Kapitel 5.2.5):

Die berechneten Ausbreitungswiderstände hängen maßgebend von der Bodenbeschaffenheit und somit von den unterschiedlichen Bodenschichten und deren Tiefe ab. Die Anordnung der Schichten wirkt sich darüber hinaus auf den Verlauf des Erdoberflächenpotentials aus.

Modelle zur Nachbildung der Erdungsimpedanz (siehe Kapitel 5):

Durch die Nachbildung der einzelnen erdungswirksamen Komponenten eines Verteilnetzes können die Anteile, welche die Komponenten zur Bildung der Erdungsimpedanz liefern, bestimmt werden.

Beim Mittelspannungsmodell sinkt die Erdungsimpedanz mit steigenden Abständen benachbarter Stationen, wenn parallel zu den Kabeln Begleiterder verlegt sind. Zu beachten ist dabei die verringerte Erderwirkung langer Begleiterder und steigende Längswiderstände bei größeren Abständen.

Die Niederspannungsmodelle liefern, aufgrund ihres unterschiedlichen Aufbaus bedingt, unterschiedlich starke Beiträge zur Bildung einer niedrigen Erdungsimpedanz. Niederspannungs- Kabelnetze weisen aufgrund des mitverlegten Begleiterders

dementsprechend geringere Erdungsimpedanzen als vergleichsweise Niederspannungs-Freileitungsnetze auf.

Der anzustrebende Erdungswert von $2,5 \Omega$ wird bei Freileitungsausführung der Niederspannung vorwiegend über die Erdungssysteme des Mittelspannungsnetzes erreicht.

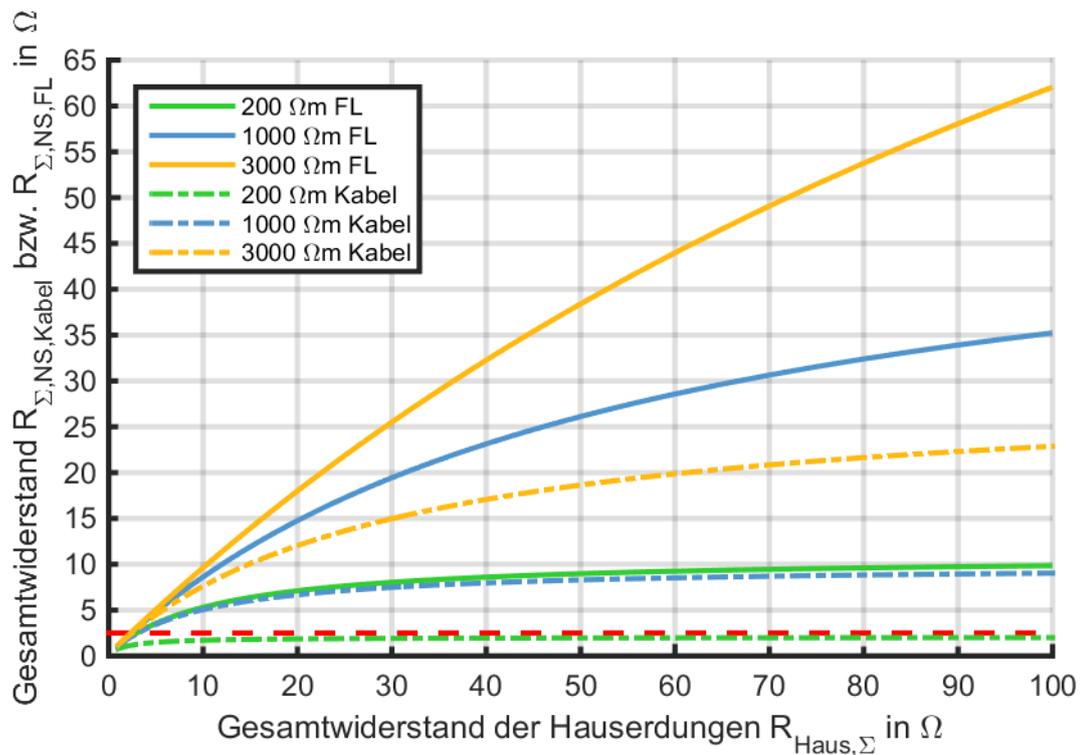


Abbildung 6.1: Gegenüberstellung der Erdungsimpedanz des NS-Freileitungsmodells (siehe Kapitel 5.5) und des NS-Kabelabganges (siehe Kapitel 5.4)

Gesamtmodell im Hinblick auf eine zu erreichende Erdungsimpedanz von $2,5 \Omega$ (siehe Kapitel 5.7):

Entsprechende Erdungswerte werden bei geringen spezifischen Erdwiderständen $\leq 500 \Omega$ m oder bei höheren spezifischen Erdwiderständen aber längeren Leitungslängen der Begleiterder des Mittelspannungsnetzes erreicht. NS – Kabelnetze weisen diesbezüglich Vorteile gegenüber Freileitungsnetzen auf, wenngleich auch Freileitungsnetze mit einer genügenden Anzahl an erdungsseitig verbundenen Verbraucheranlagen und entsprechendem Erdungswert der Mittelspannung, den angestrebten Erdungswert von $2,5 \Omega$ erreichen.

Unterschiedliche Bodenschichten und gegenseitige, ohmsche Kopplungen bei eng vermaschten Erdungssystemen über das Strömungsfeld im Erdreich, müssen separat betrachtet werden.

7 Literaturverzeichnis

Normen- und Literaturverzeichnis:

- [1] T. Mallits, *Kriterien für globale Erdungsnetze*, Graz, 2016.
- [2] ÖVE/ÖNORM EN50522, "Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV", 2010-11.
- [3] Fickert, Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar, "Schutz und Versorgungssicherheit elektronischer Energieesysteme" - Skriptum, TU Graz, 2008.
- [4] ÖVE/ÖNORM E8383, "Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV", 2000-03-01.
- [5] ÖVE/ÖNORM E 8001-1, "Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V; Begriffe und Schutz gegen den elektrischen Schlag", 2010-03-01.
- [6] Klajn, Prof. Henryk Markiewicz und Dr. Antoni, 6.3.1 Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit, Erdungssysteme - Grundlagen der Berechnung und Auslegung, Deutschland: Deutsches Kupferinstitut, 08.2004.
- [7] VDB - Verband deutscher Blitzschutzfirmen E.V., „Prüfung von Blitzschutzsystemen, Messen in der Praxis - Hinweise,“ 04 2009. [Online]. Available: http://www.vdb.blitzschutz.com/mhb/MHB_2012-10//12%20Pruefungen/12-4%20Pruefung%20von%20Blitzschutzsystemen%20-%20Messen%20in%20der%20Praxis.pdf. [Zugriff am 2016 02 01].
- [8] I. Kasikci, Planung von Elektroanlagen - Theorie, Vorschriften, Praxis, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014 - 2.Auflage.
- [9] C. Arnoux, „Leitfaden zur Erdungsprüfung, Erdungsprüfung und Messung des spezifischen Erdwiderstandes,“ Chauvin Arnoux Group GmbH, Deutschland, 09/2010, Ausgabe 1.
- [10] L. Instruments, *EARTH GROUND TESTER SATURN GEO X - Operating Instructions*, LEM NORMA GmbH, Liebermannsstrasse F01, A-2345 Brunn am Gebirge.

- [11] „Bräunlich, Dr. Reinhold, "Die messtechnische Überprüfung von grossen Erdungsanlagen",“ Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH, Voltastr. 9, 8044 Zürich.
- [12] *CEI/IEC 60479-1, "Effects of current on human beings and livestock - Part 1:General aspects", 1994-09.*
- [13] *CEI/IEC/TS 60479-1, " Effects of current on human beings and livestock - Part 1:General aspects", 2007-05.*
- [14] V. Crastan, Elektrische Energieversorgung 1 - Netzelemente, Modellierung stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik, Springer - Verlag, 2012 - 3. Auflage.
- [15] R. Iskra, E. Schmutzer und W. Schöffler, Programm OBEIN2, TU Graz, Institut für elektrische Anlagen.
- [16] Fickert, Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar, "Elektrische Energiesysteme 1" - Skriptum, TU Graz, 2008.
- [17] ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61, "Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500V; Prüfungen - Erstprüfungen", 2001-07-01.
- [18] ÖVE/ÖNORM E 8014-1, "Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennwechselspannung bis AC 1000 V und DC 1500 V; Allgemeine Anforderungen und Begriffe", 2006-08-01.

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1.1: Übersicht über die Systemlängen des österreichischen Stromnetzes (Daten: e-control, Marktbericht 2010, Stand August 2010, Tabelle siehe Kapitel 8, Anhang)	11
Abbildung 1.2: Störungen je 100 km Netzlänge im 10-kV-, 20-kV- und 110-kV-Netz gemäß [3] (für die zugehörige Tabelle siehe Kapitel 8, Anhang)	12
Abbildung 2.1: Graphische Darstellung der physikalischen Bedeutung des spezifischen Erdwiderstandes [6]	16
Abbildung 2.2: Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes von der Jahreszeit (ohne Beeinflussung durch Niederschläge) gemäß [7] (überarbeitet)	17
Abbildung 2.3: TN-System	18
Abbildung 2.4: TT-System	19
Abbildung 2.5: spezifische Erdwiderstandsmessung nach dem Wenner – Verfahren	21
Abbildung 2.6: spezifische Erdwiderstandsmessung nach dem Schlumberger – Verfahren	22
Abbildung 2.7: Messmethode zur Messung des Erdausbreitungswiderstandes eine Anlage mithilfe einer Erdungsmessbrücke nach dem Strom-Spannungsverfahren [10]	22
Abbildung 2.8: Ersatzschaltung einer Berührungsspannungsmessung ohne Berücksichtigung von Schuhwerk (R_{F1}) und mit Berücksichtigung des Erdausbreitungswiderstandes (R_{F2})	25
Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau zur Durchführung von Berührungsspannungsmessungen (links) mit und (rechts) ohne Berücksichtigung zusätzlicher Widerstände	26
Abbildung 3.1: Strom-Zeitkennlinie c_2 mit 5% Wahrscheinlichkeit für Kammerflimmern nach [12] Abbildung 14, bzw. [13] Abbildung 20 (überarbeitet)	28
Abbildung 3.2: Körperimpedanz, bestehend aus Hautübergangsimpedanz und innerer Impedanz nach IEC 60479-1:2007 [13], Abbildung 1	29
Abbildung 3.3: Vergleich der Körperimpedanz für einen Stromweg 50/60 Hz von Hand zu Hand, große Flächen (10000 mm ²) und trockene Verhältnisse	30
Abbildung 3.4: Maßgebende Ströme für die Bemessung von Erdungsanlagen [2] (überarbeitet)	32
Abbildung 3.5: Auslegungsschema von Erdungsanlagen [2]	34
Abbildung 3.6: Vergleich maximal zulässiger Berührungsspannungen gemäß ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 und ÖVE/ÖNORM E8383:2000 (Originalkurven der Normen siehe Kapitel 8)	36
Abbildung 3.7: zulässige Leerlaufberührungsspannung bei Berücksichtigung von Zusatzwiderständen	37
Abbildung 3.8: Minimalanforderungen für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs- Erdungsanlagen gemäß [2]	38
Abbildung 3.9: Zusammenhang zwischen Fehlerspannung U_F und unbeeinflusster Berührungsspannung U_{TP} gemäß ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010 [5]	40
Abbildung 3.10: Erdschluss in einem geerdeten Verteilungsnetz und einer Verbraucheranlage im TT – System gemäß ÖVE/ÖNORM E8001-1:2010 [5], (überarbeitet)	42
Abbildung 3.11: Gegenüberstellung der Bezeichnungen für die Berührungsspannung	43

<i>Abbildung 3.12: Berechnungsweg zur Bestimmung zulässiger Schrittspannungen bezüglich Herzkammerflimmern.....</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 3.13: Berechnete, theoretisch zulässige Schrittspannungen für Herzkammerflimmern.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 3.14: gemäß Abbildung 3.12 berechnete maximal zulässige „Schrittspannungen“ in Abhängigkeit der Einwirkdauer, ohne Berücksichtigung von Zusatzwiderständen.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 3.15: Ersatzschaltung zur Berechnung belasteter Schrittspannungen.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 3.16: Nachbildung des Ausbreitungswiderstandes mittels Halbkugelerder.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 3.17: berechnete, belastete Schrittspannung für eine Stromeinwirkdauer über 10 s und einen Stromweg von Hände – Füße und Hände – Gesäß (siehe auch Tabelle 3.14) bei einer Stromeinwirkdauer von > 10.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 4.1: Messaufbau der Erdungsmessungen bei zusammengeschlossenen MS/NS - Erdungsanlagen.....</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 4.2: Messaufbau der Erdungsmessungen bei getrennten MS/NS - Erdungsanlagen.....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 4.3: Beispiel eines gemessenen Potentialverlaufs rund um eine Station (Position am Rande des Waldstreifens in der Bildmitte).....</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 4.4: Gegenüberstellung der Potentialverläufe einzelner Stationen.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der Potentialverläufe einzelner Stationen.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 4.6: Detailansicht der Potentialtrichter einzelner Stationen.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 4.7: Detailansicht der Potentialtrichter einzelner Stationen.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 4.8: Gegenüberstellung der Schrittspannungen einzelner Stationen.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 4.9: Gegenüberstellung der Schrittspannungen einzelner Stationen.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 4.10: Potentialverläufe nach Verbindung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen.....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 4.11: Schrittspannungen nach Verbindung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen.....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 4.12: Schrittspannungen nach Verbindung von Hoch- und Niederspannungserdungsanlage.....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 4.13: Vergleich der auftretenden Schrittspannungen vor (in schwarz) und nach dem Verbinden von Hoch- und Niederspannungserdungsanlagen.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 4.14: Modellvarianten von Stationserdungsanlagen mit Darstellung der Berechnungsgeraden denen entlang die Oberflächenpotentiale berechnet werden.....</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 4.15: Mittels OBEIN berechnete Erdoberflächenpotentialverläufe von Stationserdungsanlagen (E1, E3, E5 gemäß Abbildung 4.14) bei $I_F = 60 \text{ A}$ und $\rho = 1000 \Omega\text{m}$.....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 4.16: Schrittspannungen der Stationserdungsanlagen (E1, E3, E5 gemäß Abbildung 4.14) bei $I_F = 60 \text{ A}$ und $\rho = 1000 \Omega\text{m}$.....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 4.17: Erdoberflächenpotential bei Variation der spezifischen Erdwiderstände von Ober- und Unterschicht bei einer Mächtigkeit der Oberschicht von 1 m.....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 4.18: Detailansicht - Erdoberflächenpotential bei Variation der spezifischen Erdwiderstände von Ober- und Unterschicht bei einer Mächtigkeit der Oberschicht von 1 m.....</i>	<i>66</i>

<i>Abbildung 5.1: Modell der erdungswirksamen Komponenten im MS/NS- Verteilnetz</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 5.2: Nachbildung eines Oberflächenerders als T-Ersatzschaltung.....</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 5.3 Ausbreitungswiderstand sehr langer Oberflächenerder gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [2] bzw. ÖVE/ÖNORM E8383:2000 [4].....</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 5.4: Ausführungsvarianten von Standarderdungsanlagen</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 5.5: Stromvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E1 (zwei Potentialsteuerringen und vier Erdungsstrahlen) bei $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ entlang der Berechnungsgeraden.....</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 5.6: Erdwiderstandsvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E1 (zwei Potentialsteuerringen und vier Erdungsstrahlen)</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 5.7: Mögliche Ausführungsvarianten von Tiefenerder-Erdungsanlagen.....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 5.8: Stromvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E7 (vier 7,5m Tiefenerder) bei $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ entlang der Berechnungsgeraden.....</i>	<i>76</i>
<i>Abbildung 5.9: Erdwiderstandsvariation - Erdoberflächenpotentiale und Schrittspannungen der Erdungsanlage E7 (vier 7,5 m Tiefenerder) entlang der Berechnungsgeraden</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 5.10: Modell Einschicht- und Zweischichtboden $t \dots$ Tiefe von ρ_2</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 5.11: Vergleich des Erdungswiderstandes zwischen Ein- und Zweischichtboden bei Variation von ρ_2 und ρ_1 und vorgegebener Tiefe t der Unterschicht bei Horizontalerdungsanlagen</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 5.12: Variation der Tiefe t der Unterschicht für gewählte Verhältnisse der spezifischen Erdwiderstände ρ_2 zu ρ_1</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 5.13: Modell eines Mittelspannungsverteilstromnetzes mit zwei Kabelanspeisungen... </i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 5.14: Gesamterdungswiderstand zweier MS- Kabelanbindungen inkl. Nachbarstationen in Abhängigkeit der Stationsabstände sowie des spezifischen Erdwiderstandes</i>	<i>82</i>
<i>Abbildung 5.15: Gesamterdungswiderstand zweier MS-Kabelanbindungen inkl. Nachbarstationen in Abhängigkeit der Stationsabstände für drei spezifische Erdwiderstände</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 5.16: Modell der Erdungsverhältnisse eines Niederspannungs-Kabelabganges.. </i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 5.17: Gesamterdungswiderstand eines NS-Kabelabganges in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes und des Summenerdungswiderstandes aller Verbraucheranlagen</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 5.18: Gesamterdungswiderstand eines NS-Kabelabganges in Abhängigkeit des Summenerdungswiderstandes aller Verbraucheranlagen für ausgewählte spez. Erdwiderstände.....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 5.19: Modell der Erdungsverhältnisse eines Niederspannungs-Freileitungsabganges.....</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 5.20: Gesamterdungswiderstand eines NS-Freileitungsabganges in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes und des Summenerdungswiderstandes aller Verbraucheranlagen;</i>	<i>89</i>
<i>Abbildung 5.21: Gesamterdungswiderstand eines NS-Freileitungsabganges in Abhängigkeit des Summenerdungswiderstandes aller Verbraucheranlagen für ausgewählt spez. Erdwiderstände;.....</i>	<i>89</i>

Abbildung 5.22: Betrachtete Netzkonstellationen	92
Abbildung 6.1: Gegenüberstellung der Erdungsimpedanz des NS-Freileitungsmodells (siehe Kapitel 5.5) und des NS-Kabelabganges (siehe Kapitel 5.4)	96

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 2.1: Spezifische Erdwiderstände unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten gemäß [6] (überarbeitet)	16
Tabelle 3.1: Herzstromfaktor für unterschiedliche Strompfade gemäß IEC 60479-1:2007, Tabelle 12	29
Tabelle 3.2: Mindestquerschnitte für Erdungsleiter gemäß ÖVE/ÖNORM EN50522:2011 aus Gründen mechanischer Festigkeit [2].....	31
Tabelle 3.3: Werkstoffkonstanten zur Bestimmung der Strombelastbarkeit [2] (β für 0 °C)...	31
Tabelle 3.4: Vergleich maximal zulässige Berührungsspannung [2], [4].....	35
Tabelle 3.5: Zulässige Berührungsspannung für eine Fehlerdauer $\gg 10$ s gemäß [2], [4]... 35	
Tabelle 3.6: Zulässige Leerlaufberührungsspannungen für eine Fehlerdauer über 10 s (Bewertungsbasis ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011).....	37
Tabelle 3.7: Gegenüberstellung der Begriffskürzel Verschiedener Bezeichnungen.....	40
Tabelle 3.8: Bedingungen, um die Auslegung hinsichtlich zulässiger Berührungsspannungen sicherzustellen	43
Tabelle 3.9: Gewichtung berücksichtigter Konfigurationen zur Berührungsspannungsberechnung	44
Tabelle 3.10: Einflussfaktoren unterschiedlicher Schrittspannungskonfigurationen.....	47
Tabelle 3.11: gemäß Abbildung 3.12 berechnete maximal zulässige „Schrittspannungen“ für verschiedene Ausprägungen des Stromweges, ohne Berücksichtigung von Zusatzwiderständen.....	48
Tabelle 3.12: Vergleich Ausbreitungswiderstand Halbkugelerder und $x \cdot$ spez. Bodenwiderstand zur Berechnung des Standortübergangswiderstands.....	51
Tabelle 3.13: Angenommene Zusatzwiderstände zur Berechnung belasteter Schrittspannung	52
Tabelle 3.14: laut Berechnung zulässige „Schrittspannungen“ für verschiedene Konfigurationen mit Berücksichtigung von Zusatzwiderständen bei einer Stromeinwirkdauer von >10 s.....	52
Tabelle 4.1: Angenommene Erdergeometrie für die Nachbildung der Stationserdungsanlagen in OBEIN 2S	63
Tabelle 5.1: Längs- Widerstandsbelag der verwendeten Begleiterder.....	70
Tabelle 5.2: Erdungswiderstände R_p unterschiedlicher Stationsausführungsvarianten	72
Tabelle 5.3: Vergleich der Ergebnisse aus analytischer Berechnung und Berechnung mittels OBEIN (Erdungsausführung E1 gemäß Abbildung 5.4)	72
Tabelle 5.4: Erdungswiderstände unterschiedlicher Tiefenerder-Ausführungsvarianten von Kompakttransformatorstationen	75

<i>Tabelle 5.5: Vergleich der Ergebnisse aus analytischer Berechnung und OBEIN (Erdungsausführ. E7).....</i>	<i>75</i>
<i>Tabelle 5.6: Erdungswiderstand von verschiedenen Verbraucheranlagenkonfigurationen ...</i>	<i>90</i>
<i>Tabelle 5.7: Geeignete Konfigurationen hinsichtlich eines Zusammenschlusses zwischen Hoch- und Niederspannungserdung beziehungsweise hinsichtlich Betrachtung eines globalen Erdungssystems.....</i>	<i>93</i>

8 Anhang

8.1 Tabellen Kapitel 1: Einleitung

Systemlängen des österreichischen Stromnetzes:

Spannungseben		Freileitung		Kabelleitung		Summe
		Länge	Anteil	Länge	Anteil	Länge
		km	%	km	%	km
$110 \text{ kV} \leq U_N \leq 380 \text{ kV}$	Hochspannung	16874	6,8%	672	0,3%	17546
$1 \text{ kV} \leq U_N < 110 \text{ kV}$	Mittelspannung	31141	12,5%	35338	14,2%	66479
$U_N < 1 \text{ kV}$	Niederspannung	40937	16,5%	123235	49,7%	164172

Zugehörige Tabelle zu Abbildung 1.1 – Übersicht über die Systemlängen des österreichischen Stromnetzes

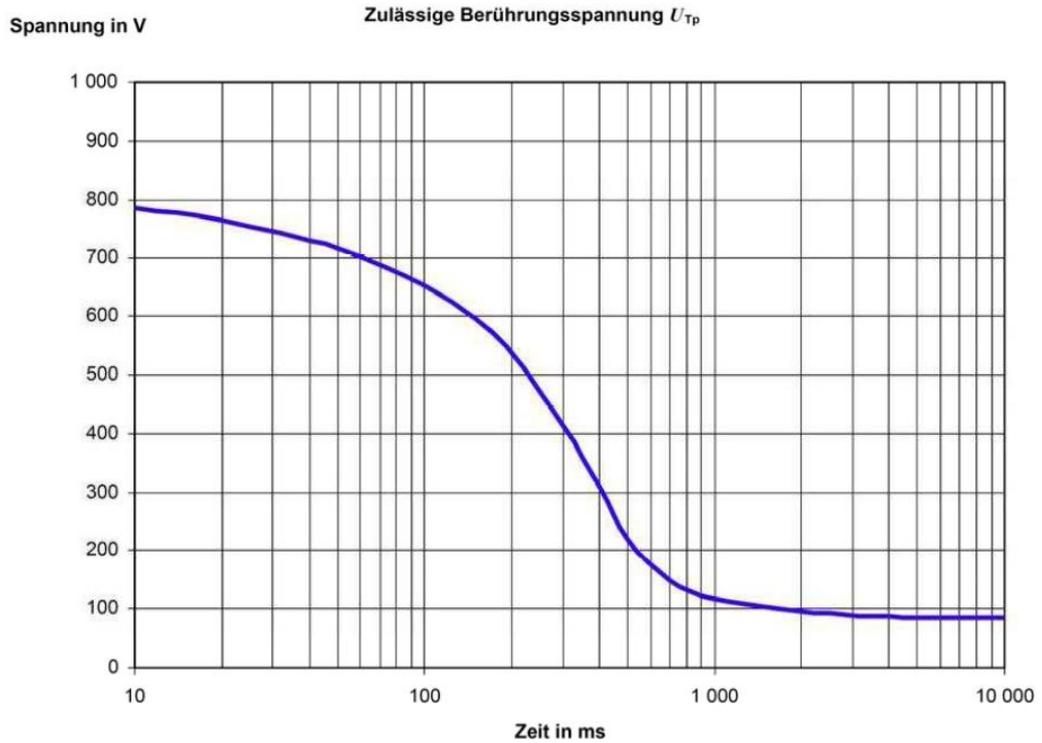
Störungen je 100 km Netzlänge:

Spannungs- ebene	Kurzschlüsse je 100 km Netzlänge	Erdschlüsse je 100 km Netzlänge	Bemerkung
110 kV	0,6	4,8	sehr hoher Freileitungsanteil
20 kV	2,2	5,5	gemischt (Kabel / Freileitung)
10 kV	2,8	1,4	reine Kabelnetze

Zugehörige Tabelle zu Abbildung 1.2 - Störung je 100 km Netzlänge im 110 kV / 20 kV / 10 kV Netz

8.2 Kurven zulässige Berührungsspannung in Abhängigkeit der Zeit

ÖVE/ÖNORM EN 50522:



ÖVE/ÖNORM E8383:

