

# Fehlerstromaufteilung und Potentialverhältnisse in komplexen (Globalen-) Erdungssystemen und deren Einfluss auf die Beurteilung

Dissertation



Institut für Elektrische Anlagen und Netze  
Technische Universität Graz

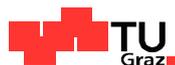
Autor  
DI Thomas Mallits

Betreuer  
Univ.-Prof. DI Dr. Lothar Fickert  
DI Dr. Ernst Schmutzner

1. Begutachter  
Univ.-Prof. DI Dr. Lothar Fickert  
Technische Universität Graz

2. Begutachter  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik

Institutsvorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Dr. techn. Robert Schürhuber  
A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I  
Tel: (+43 316) 873 – 7551  
Fax: (+43 316) 873 – 7553  
<http://www.ifea.tugraz.at>  
<http://www.tugraz.at>



Graz 2018



**Diese Arbeit widme ich meiner Familie**

## **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 10.11.2018

Thomas Mallits

## **Abstract**

**Title:** Current distribution and earth potential conditions in complex (global) earthing systems and the effects on their evaluation

**Keywords:** complex (global) earthing systems, modelling of current distribution in MV/LV earthing systems, resistive interference, potential coefficient method, finite element method, evaluation of earthing systems through measuring and calculation, inductive coupling

This thesis deals with the evaluation of complex MV/LV earthing systems by measurements and calculation methods. The change from resonant grounding to medium resistance neutral earthing, which entails significantly higher earth fault currents and earth potential rise, requires a careful evaluation of the respective earthing system.

The proposed modular calculation model allows the analyzation of the current dispersion and earth potential conditions in complex medium voltage earthing systems while taking into account the effects of inductive coupling. In a further step, the conditions within low voltage earthing systems during earth faults are analyzed. In this context a practical application of two simplified calculation methods is developed. The boundary conditions for those simplified calculation methods are discussed.

Weaknesses of existing methods presented in the literature are shown and discussed with respect to technical and organizational factors.

The developed methods are based on the potential-coefficient and the finite-element-method. Based on the findings obtained, a practice-oriented approach for the verification of people safety in complex earthing systems is proposed.

## **Kurzfassung**

Titel: Fehlerstromaufteilung und Potentialverhältnisse in komplexen (Globalen-) Erdungssystemen und deren Einfluss auf die Beurteilung

Schlüsselwörter: komplexe (globale) Erdungssysteme, Modellierung der Stromaufteilung in MS/NS-Erdungssystemen, ohmsche Beeinflussung, Potentialkoeffizientenmethode, Finite Elemente Methode, rechnerische und messtechnische Beurteilung von Erdungssystemen

Diese Arbeit behandelt das Thema der Beurteilung von komplexen MS/NS-Erdungssystemen mittels messtechnischer und rechnerischer Methoden. Eine besondere Herausforderung ergibt sich hierbei durch die Berücksichtigung einer MS-Sternpunktumstellung von einem gelöschten auf einen mittel- oder niederohmig geerdeten Sternpunkt des Mittelspannungsnetzes und den damit verbunden deutlichen Anstieg des Erdschlussstromes. Mit Hilfe eines entwickelten modularen Phasengrößenmodells, werden unter Berücksichtigung der induktiven Verkopplung die Strom- und Potentialverhältnisse in komplexen MS-Erdungssystemen anhand von Modellen analysiert. In einem weiteren Schritt wird hierbei die zusätzliche Bedeutung von NS-Erdungssystemen im Erdschlussfall behandelt. Für praxisnahe Anwendungen wurden zwei vereinfachte Berechnungsverfahren entwickelt und deren Anwendungsgrenzen aufgezeigt.

Aufbauend auf vorhandener Literatur zur messtechnischen Überprüfung von Erdungssystemen werden unter Berücksichtigung technischer und organisatorischer Faktoren derzeit existierende Schwachstellen aufgezeigt. Die Erarbeitung von Lösungen basiert hierbei auf der Anwendung der Potentialkoeffizienten- sowie der Finiten-Elemente-Methode.

Als Ergebnis wird, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, ein wissenschaftlich fundierter, Vorschlag für den Nachweis der Personensicherheit in komplexen Erdungssystemen vorgestellt.



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Motivation und Relevanz	5
1.1.1	Allgemeines	5
1.1.2	Spannungsbeanspruchung der Kabelisolation abhängig von der Sternpunktsbehandlung	5
1.1.3	Alterung von Kabelsystemen	7
1.1.4	Charakteristika unterschiedlicher Erdschlusserfassungsverfahren	8
1.2	Stand der Technik	11
1.2.1	Allgemeines zum aktuellen Stand der Normung	11
1.2.2	Anzuwendende Normen	11
1.2.3	Begriffsdefinition	13
1.2.4	Spannungsgrenzen hinsichtlich Personensicherheit	14
1.2.5	Beurteilung der korrekten Ausführung von Erdungsanlagen	16
1.2.6	Normative Situation bezüglich eines Globalen Erdungssystems	18
1.3	Forschungsfragen	19
1.4	Publikationsüberblick	20
<b>2</b>	<b>Stromaufteilung in Erdungssystemen – Modell, Datenbasis</b>	<b>23</b>
2.1	Beschreibung der Ziele sowie der verwendeten Analysemethodik	23
2.2	Aufbau typischer Netzstrukturen	25
2.2.1	Allgemeines	25
2.2.2	Literaturrecherche zur Erhebung simulationsrelevanter Netzparameter	25
2.2.3	Aufbau ausgewählter MS-Netzstrukturen	26
2.2.4	Aufbau ausgewählter NS-Netzstrukturen	29
2.3	Realisierung eines Simulationsmodells zur rechnerischen Bestimmung der Strom- und Potentialverhältnisse in Kabelnetzen	30
2.3.1	Grundlagen	30
2.3.2	Modellrealisierung	34
2.4	Modellparametersensitivitäten	41
2.4.1	Einfluss der Erdrückstromtiefe auf die berechnete Stromaufteilung im Erdschlussfall	41
2.4.2	Einfluss der Frequenz auf die berechnete Stromaufteilung im Fehlerfall	43
2.5	Stromaufteilung und Potentialverhältnisse im Erdschlussfall in MS-Kabel-Netzstrukturen	45
2.5.1	Allgemeines	45
2.5.2	Einfluss der Kabellänge und des Verlegeabstandes auf die Schirmstromaufteilung einer Stickleitung	45
2.5.3	Einfluss der Spannungsebene sowie des Schirmquerschnittes auf den Reduktionsfaktor einer Stickleitung	48
2.5.4	Einfluss des Fehlerortes und des Stationsabstandes auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stickleitung	50
2.5.5	Einfluss der Anzahl an MS-Abgängen und deren Anbindung an das UW auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stickleitung	56
2.5.6	Beitrag von unterschiedlichen Begleiterderstrukturen auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stickleitung	60
2.5.7	Einfluss von unterschiedlichen Stationserdungswiderständen (symmetrische Variation) auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stickleitung	63
2.5.8	Einfluss von unterschiedlichen Stationserdungswiderständen (unsymmetrische Variation) auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stickleitung	66
2.5.9	Einfluss des Fehlerortes auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer offenen Ringleitung	68
2.5.10	Einfluss eines zusätzlichen Stichabganges auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer offenen Ringleitung	70



2.5.11	Einfluss zusätzlicher Parallelzweige auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer offenen Ringleitung	72
2.6	Stromaufteilung und Erdungsspannungsverteilung in Erdungssystemen unter Berücksichtigung von MS- und NS-Netzstrukturen	75
2.6.1	Stichleitung im ländlichen Raum	75
2.6.2	Ringleitung im städtischen Raum	81
2.7	Vereinfachte Berechnungsmethode zur Bestimmung der Strom- und Erdungsspannungsverhältnisse entlang der ONS im Erdschlussfall	84
2.7.1	Grundlagen zur vereinfachten Berechnungsmethode	84
2.7.2	Analyse der Zulässigkeit einer einphasigen Modellierung im Rahmen der vereinfachten Berechnungsmethode	86
2.7.3	Analyse netzstrukturbedingter Anwendungsgrenzen der vereinfachten Berechnungsmethode	88
2.7.4	Analyse der Stromaufteilung abhängig vom Fehlerort bei Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethode	89
2.8	Anwendung der Telegraphengleichung zur Bestimmung von Stationspotentialen bei stichförmigen Netzstrukturen	93
2.8.1	Allgemeines	93
2.8.2	Herleitung der abgewandelten Telegraphengleichung	93
2.8.3	Vergleich der Berechnungsergebnisse aus dem vollständigen Modell mit den Ergebnissen aus der abgewandelten Leitungsgleichung	95
2.9	Messtechnische Analyse der Fehlerstromaufteilung im Rahmen realer Erdschlussversuche	98
<b>3</b>	<b>Einflussfaktoren auf die messtechnische Überprüfung von Erdungssystemen</b>	<b>101</b>
3.1	Beschreibung der Analysemethode und der Ziele	101
3.2	Grundlagen - Messprinzip	102
3.2.1	Allgemeines - Messabweichung	103
3.2.2	Analyse der Vor- und Nachteile der einzelnen Messmethoden zur Überprüfung von Erdungssystemen	104
3.2.3	Einflussfaktoren bei der messtechnischen Untersuchung von Erdungssystemen unter Berücksichtigung praktischer Erfahrungen	104
3.3	Einfluss des Einspeiseortes	106
3.4	Personengefährdung als Begrenzung des maximalen Messstromes (Quellenleistung)	108
3.5	Einfluss der gegenseitigen ohmschen Beeinflussung	110
3.5.1	Grundlagen	110
3.5.2	Die 62-%-Regel zur Bestimmung der Erdungsspannung	114
3.5.3	Vergleich Halbkugelerder mit einem Maschenerder	114
3.5.4	Einfluss des Abstandes zwischen Erdern auf die Erfassung der realen Erdungsspannung	120
3.5.5	Einfluss der Nullungsverbindung von NS-Kundenanlagen	125
3.6	Einfluss der Belastung auf die Schrittspannungsmessung	131
<b>4</b>	<b>Beurteilungsverfahren von Erdungssystemen</b>	<b>135</b>
4.1	Allgemeines	135
4.2	Flussdiagramm zur rechnerischen bzw. messtechnischen Evaluierung eines Erdungssystems	135
4.3	Entscheidungsprozess Berechnung vs. Messung	137
4.4	Messprozess	137
4.5	Berechnung	138
4.6	Bewertung	139
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>141</b>
5.1	Allgemeines	141



5.2	Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem entwickeltem Modell zur Berechnung der Strom- und Potentialverhältnisse in verbundenen Erdungssystemen	141
5.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse hinsichtlich technischer Einflussfaktoren bei messtechnischem Nachweis der Personensicherheit von Erdungssystemen	144
5.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem erarbeiteten Beurteilungsverfahren	145
<b>6</b>	<b>Ausblick – Risikobasierter Ansatz zur Beurteilung von Erdungsanlagen</b>	<b>147</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>149</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>153</b>
8.1	Ohmsche Koppelfaktoren von einfachen Erdern	153
8.1.1	Allgemeines	153
8.1.2	Tiefenerder	154
8.1.3	Ringerder	157
8.2	Stromaufteilung und Potentialverhältnisse in Erdungssystemen unter Berücksichtigung von MS-Netzstrukturen bei reduzierter ONS-Anzahl	159
8.2.1	Beitrag von unterschiedlichen Begleiterderstrukturen auf die Spannungsverteilung entlang einer Stichleitung bei reduzierter ONS-Anzahl	159
8.2.2	Einfluss der Stationserdungswiderstände (symmetrische Variation) auf die Spannungsverteilung einer Stichleitung bei reduzierter ONS-Anzahl	159
8.2.3	Einfluss des Fehlerortes auf die Spannungsverteilung entlang einer offenen Ringleitung bei reduzierter ONS-Anzahl	161
8.2.4	Einfluss zusätzlicher Stichabzweige auf die Spannungsverteilung entlang einer offenen Ringleitung bei reduzierter ONS-Anzahl	162
8.2.5	Einfluss zusätzlicher Parallelzweige auf die Strom- und Spannungsverteilung in den ONS entlang einer offenen Ringleitung bei reduzierter ONS Anzahl	162





# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Relevanz

### 1.1.1 Allgemeines

Bedingt durch die Altersstruktur vieler Kabelverteilnetze und die damit verbundene verminderte Isolationsfestigkeit (siehe Kapitel 1.1.3) ist es immer häufiger erforderlich – speziell in urbanen Gebieten, wo die Reparatur bzw. der Austausch von Kabeln mit besonders hohem Aufwand verbunden ist, alternative Schutzkonzepte (KNOPE, KNOSPE) zur Fehlerortung umzusetzen. Diese Verfahren führen jedoch, im Gegensatz zum Verfahren der Kompensation des kapazitiven Anteiles des einpoligen Fehlerstroms mittels Petersenspule (klassische resonante Sternpunktserdung), wegen der stromstarken Fehlerortungskonzepte (siehe Kapitel 1.1.4) und der damit in Zusammenhang stehenden Erhöhung der Erderspannungen, zu erhöhten Anforderungen an die Erdungsanlagen.

Speziell bei Betreibern urbaner Verteilernetze und den dort vorwiegend vorhandenen Kabelnetzen findet derzeit ein Umdenken hinsichtlich der Sternpunktsbehandlung der Mittelspannungsnetze statt, wobei die Wirkmechanismen sowie die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Strom- und Potentialverhältnisse oft nicht eindeutig sind und die normative Beurteilung der Personensicherheit (Einhaltung der maximal zulässigen Berührungsspannung) in der Praxis aufgrund mangelnder Erfahrungen ein Problem darstellt. Daraus ergeben sich die in Kapitel 1.3 angeführten Forschungsfragen, welche im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden.

### 1.1.2 Spannungsbeanspruchung der Kabelisolation abhängig von der Sternpunktsbehandlung

Im Folgenden soll kurz auf die Thematik der Spannungsverhältnisse (quasistationärer Zustand) im Bereich der Erdungsanlagen am Fehlerort im Falle eines Erdschlusses, in Abhängigkeit von der Sternpunktsbehandlung eingegangen werden.

Dies ist wichtig, da die Leiterspannungsanhebung im Erdschlussfall bei gelöschtem Netzbetrieb zu einer erhöhten Beanspruchung der Isolation führt und speziell in gealterten Kabelnetzen vermehrt Doppelerdschlüsse die Folge sein können (siehe auch Kapitel 1.1.3).

Die Abbildung 1-1 zeigt das Modell eines 3 km langen 10-kV-Kabelstiches mit zehn Stationen, an dessen Ende ein einpoliger Erdschluss angenommen wird.

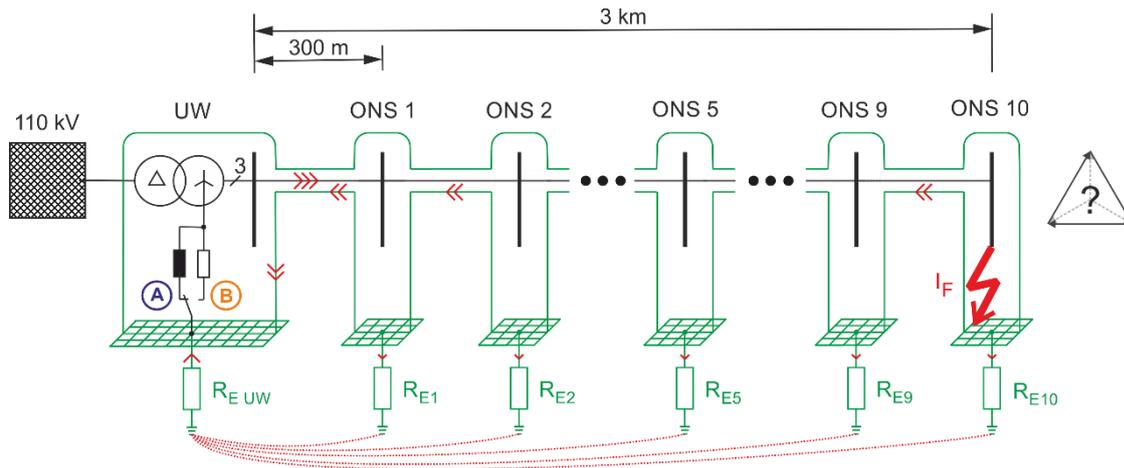


Abbildung 1-1: Übersicht der Fehlersituation

Betrachtet man das Spannungsdreieck im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Sternpunktbehandlung so geht aus Abbildung 1-2 hervor, dass die Variante mit niederohmig geerdetem Sternpunkt die deutlich bessere Variante hinsichtlich der Isolationsbeanspruchung im Falle eines einpoligen Erdschlusses gegenüber der Spannungsbeanspruchung in einem gelöschten Netz darstellt. Weiters ist im rechten Zeigerdiagramm neben der Verlagerungsspannung „ $U_E$ “ des Spannungsdreiecks durch den lokalen Erdungswiderstand eine leichte Asymmetrie in Form einer vertikalen Verschiebung des Spannungsdreiecks nach oben zu erkennen. Dies lässt sich am einfachsten mithilfe der symmetrischen Komponenten erklären, wobei es durch Addition von Null-, Mit- und Gegensystem zu der dargestellten Asymmetrie kommt.

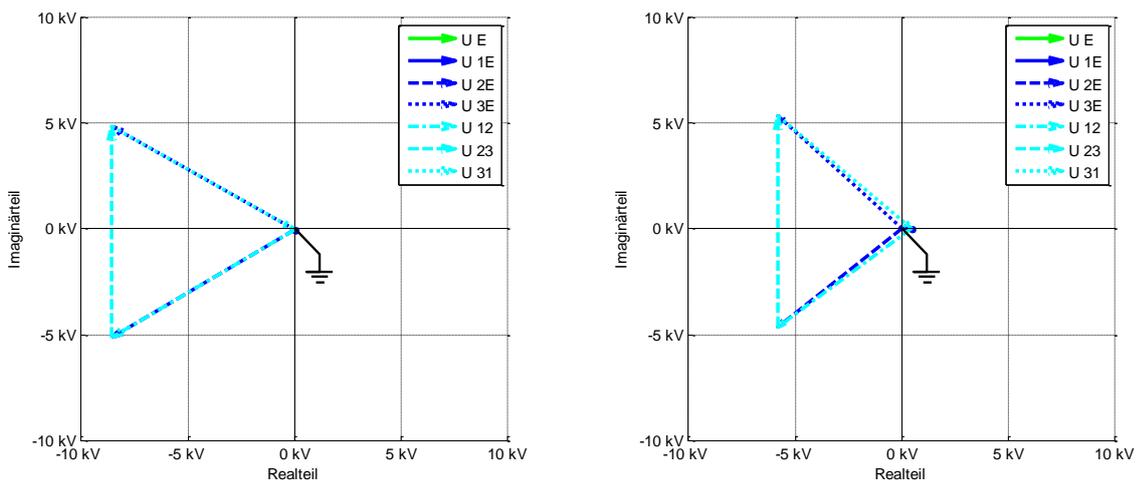


Abbildung 1-2: Zeigerdiagramm am Fehlerort bei einpoligem Erdschluss einer 10-kV-Stichleitung, links: gelösch  $I_F = 60$  A, rechts: niederohmig geerdet  $I_F = 1$  kA

### 1.1.3 Alterung von Kabelsystemen

Die Alterung von Kabeln und Kabelmuffen stellt einen sehr komplexen Vorgang dar, wodurch eine gesicherte Prognose der Lebensdauer nur begrenzt möglich ist. Die Einflussfaktoren welche die Alterung beeinflussen, können wie folgt eingeteilt werden:

- thermische Belastung
- elektrische Belastung
- umweltbedingte Belastung
- mechanische Belastung

Die einzelnen Effekte könne hierbei auch in Kombination auftreten und somit die Alterung deutlich beschleunigen.

Der Zusammenhang zwischen der Alterung und der elektrischen Feldstärke kann durch das Invers-Power-Gesetz in Form folgender Gleichung ausgedrückt werden ([13], S 51).

$$A(E) = k_e \cdot E^N \quad (\text{Gl. 1-1})$$

$A(E)$	...	Alterung abhängig von der elektrischen Feldstärke
$k_e$	...	Konstante der thermischen Alterung
$E$	...	Elektrische Feldstärke in V/m
$N$	...	Alterungsfaktor

Zur sprungförmigen Reduzierung der Lebensdauer der Kabel kommt es durch Überlastung in Form von z.B. Blitz- und Schaltüberspannungen sowie zeitweiligen Überspannungen (siehe Abbildung 1-3, Zeitpunkte  $t_1$  bis  $t_3$ ). Jede Überlastung führt im gezeigten Beispiel zu einem Schaden und in Folge zu einer akkumulierten Lebensdauererringerung.

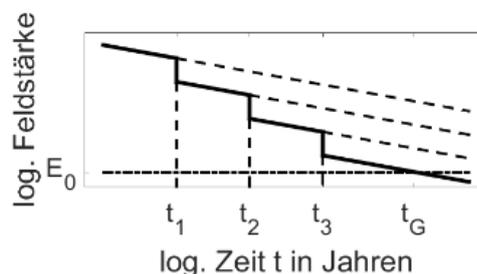


Abbildung 1-3: Lebensdauerverbrauch

Weiterführende Analysen zu diesem Thema siehe [13].



### 1.1.4 Charakteristika unterschiedlicher Erdschlussverfahrsverfahren

In Tabelle 1-1 werden die gängigen Erdschlussdetektionsverfahren in Mittelspannungsnetzen unter Angabe der jeweils notwendigen Sternpunktsbehandlung und der Ortungsstromhöhe zusammengefasst.

Tabelle 1-1: Übersicht Sternpunktsbehandlung und Erdschlussortungsverfahren im MS Netz [12]

Nr.	Verfahren	Ortungsstromhöhe	Sternpunktsbehandlung
1.	klassisches Wattreststromverfahren	ca. 10 A	Erdschlusslöschung
2.	Oberschwingungsverfahren	Oberschwingungsgehaltsabhängig	Erdschlusslöschung
3.	Wattmetrische KNOSPE	ca. 60 A	Erdschlusslöschung
4.	Amperemetrische KNOSPE	ca. 300 A bis 1 kA	Erdschlusslöschung unterbrochen durch kurzzeitig niederohmige Sternpunktserdung
5.	KNOPE	ca. 1 kA	Erdschlusslöschung gefolgt von kurzzeitiger niederohmiger Phasenerdung einer nicht fehlerbehafteten Phase
6.	Überstromzeitschutz	ca. 1kA	(starre) niederohmige Sternpunktserdung

Die Verfahren 1 bis 4 setzen auf das Prinzip der Erdschlusslöschung, mit dem Vorteil der Möglichkeit, das Netz im Erdschlussfall eine begrenzte Dauer (bis zu einigen Stunden) weiter betreiben zu können. Die Anforderungen an die Erdungssysteme hinsichtlich Personensicherheit aufgrund der verhältnismäßig kleinen Fehlerstromhöhe im Fehlerfall sind meist ohne größere Probleme beherrschbar. Die Nachteile dieser Methoden liegen in der erhöhten Spannungsbeanspruchung der Betriebsmittel (siehe auch Kapitel 1.1.2) durch die Phasenspannungsanhebung im Fehlerfall und die damit verbundene beschleunigte Alterung (siehe 1.1.3) sowie der technischen Ortungsgrenzen (siehe [12], [42]).

Die Verfahren 4 und 5 setzen auf ein zweistufiges Konzept (siehe auch Kapitel 1.1.4.1 sowie Kapitel 1.1.4.2) in denen durch kurzzeitige Wattreststromerhöhung die Erdschlussdetektion deutlich verbessert wird. Die Betriebsmittelbeanspruchung unter der Voraussetzung einer Schnellabschaltung und somit der Möglichkeit der Vernachlässigung thermischer Effekte ist deutlich geringer als bei den vorangegangenen Varianten (siehe auch Kapitel 1.1.2).

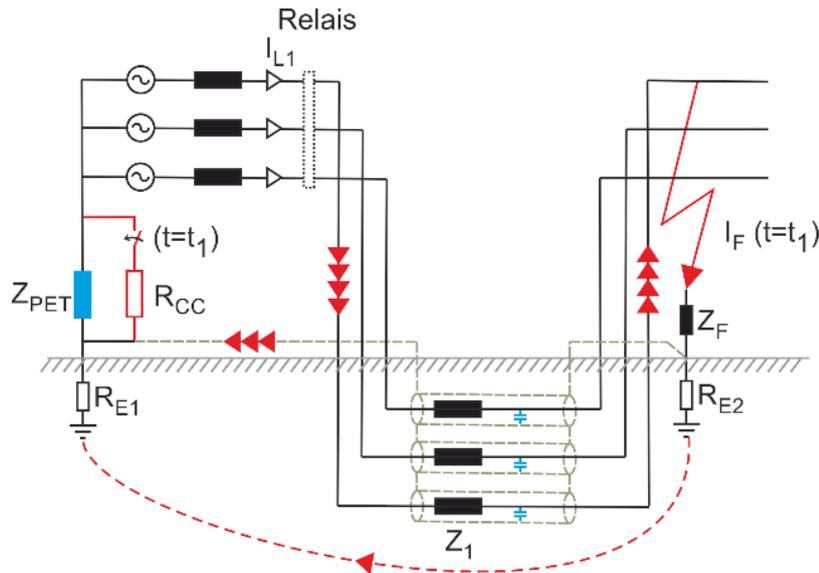


Da die Detektionsvarianten 4 und 5 zu einer Abschaltung bzw. AWE (Automatische Wiedereinschaltung) führen, jedoch im Vergleich zur Methode einer niederohmig geerdeten Sternpunktbehandlung mehrere Betriebsmittel (Petersenspule, ...) benötigen, stellt sich speziell im urbanen Gebieten mit überwiegender Kabelanteil immer häufiger die Frage ob die Ausführung einer niederohmigen Sternpunktserdung nicht die bessere Variante darstellt.

Auch hat sich in reinen Kabelnetzen die Erdschlusslöschung und der Weiterbetrieb des fehlerbehafteten Netzes nicht bewährt, da in Kabelnetzen einpolige Erdschlüsse meist physikalische Kabelfehler darstellen und der Vorteil der Erdschlusslöschung, d. h. das selbstständige Löschen des Lichtbogens, wie man es in Freileitungsnetzen beobachten kann, nicht stattfindet. Hierzu ist zu klären ob und unter welchen Bedingungen diese hochstromigen Verfahren (Tabelle 1-1, Nr.4 ff.) die Personensicherheit gefährden und gegebenenfalls entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten sind.

#### 1.1.4.1 Prinzip der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunktserdung

Das Verfahren der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunktserdung (KNOSPE) stellt eines der bekanntesten Verfahren zur kurzzeitigen Fehlerstrom-Erhöhung in Mittelspannungsnetzen dar. Bei diesem Verfahren wird der ohmsche Anteil des Erdfehlerstromes  $I_F$  durch kurzzeitiges Parallelschalten eines Widerstandes  $R_{CC}$  zur Erdschlusskompensationsspule  $Z_{PET}$  erhöht. Bei entsprechender Stromtragfähigkeit der Hilfswicklung kann auch eine sekundärseitige zusätzliche Stromerhöhung über eine Leistungshilfswicklung der Petersenspule erfolgen, wenn deren Stromgröße in Kabelnetzen für ein sicheres Ansprechen der Schutzeinrichtung nicht ausreicht. Die Abbildung 1-4 zeigt das prinzipielle Verfahren der KNOSPE.



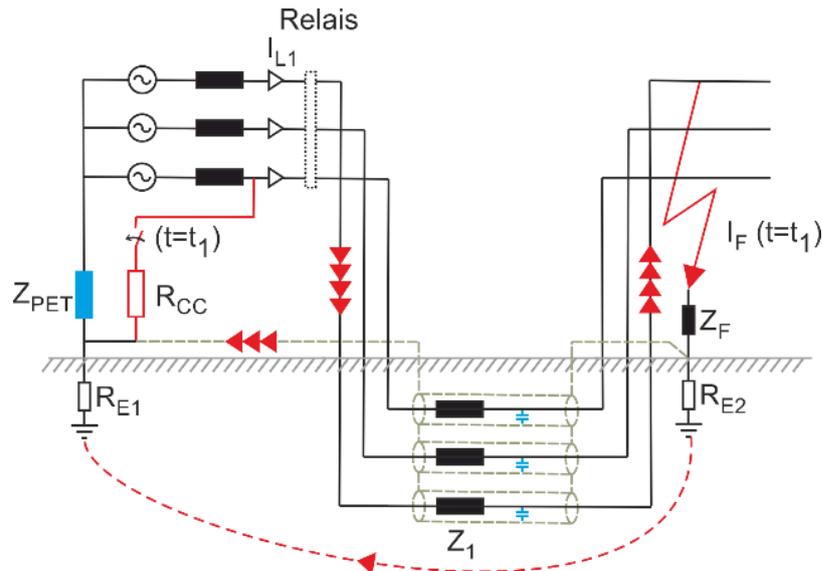
Legende:

- $Z_{PET}$  ... Erdschlusskompensationsspule
- $R_{CC}$  ... KNOSPE Strombegrenzungswiderstand
- $R_{E1}$  ... Ausbreitungswiderstand des Erders im Quellenbereich
- $R_{E2}$  ... Ausbreitungswiderstand des Erders am Fehlerort
- $Z_F$  ... Fehlerübergangsimpedanz
- $I_F$  ... Erdfehlerstrom
- $Z_1$  ... Kabelimpedanz

Abbildung 1-4: Prinzipdarstellung der kurzzeitigen niederohmigen Sternpunktserdung (KNOSPE) in einem Kabelnetz

#### 1.1.4.2 Prinzip der kurzzeitigen niederohmigen Phasenerdung

Das Verfahren der kurzzeitigen niederohmigen Phasenerdung (KNOPE) entspricht aus systemischer Sicht einem künstlich herbeigeführten Doppelerdschluss, wobei ein Fußpunkt bekannt ist, der im Umspannwerk durch eine Automatik zeit- und strombegrenzt über einen Widerstand ( $R_{CC}$ ) herbeigeführt wird. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass das Verfahren als „eingepögte“ Stromquelle mit einer höheren treibenden Spannung (Betriebsspannung) bei gleichzeitig höherem Zusatzwiderstand  $R_{CC}$  arbeitet und dadurch – speziell in urbanen Kabelnetzen – die Abhängigkeit des Fehlerstroms von den Leitungsimpedanzen und insbesondere dem Nullsystem der Transformatoren geringer wird. Die Abbildung 1-5 zeigt das prinzipielle Verfahren der KNOPE.



Legende:

- $Z_{PET}$  ... Erdschlusskompensationsspule
- $R_{CC}$  ... KNOSPE Strombegrenzungswiderstand
- $R_{E1}$  ... Ausbreitungswiderstand des Erdsers im Quellenbereich
- $R_{E2}$  ... Ausbreitungswiderstand des Erdsers am Fehlerort
- $Z_F$  ... Fehlerübergangsimpedanz
- $I_F$  ... Erdfehlerstrom
- $Z_1$  ... Kabelimpedanz

Abbildung 1-5: Prinzipdarstellung der kurzzeitig niederohmigen Phasenerdung (KNOPE)

## 1.2 Stand der Technik

### 1.2.1 Allgemeines zum aktuellen Stand der Normung

Die normative Situation hinsichtlich der Beurteilung der Personensicherheit von Erdungsanlagen im Fehlerfall stellt, bedingt durch die Einteilung nach Spannungshöhen (größer bzw. kleiner 1 kV), aufgrund der meist vorhandenen elektrisch leitfähigen Verbindung von Nieder- und Hochspannungserdungsanlagen einen Umstand dar, welcher im Rahmen der praktischen Beurteilung von Erdungsanlage oft zu Unsicherheiten führt. In den folgenden Kapiteln werden daher in kompakter Form die wesentlichen Punkte des aktuellen Standes der Normung behandelt.

### 1.2.2 Anzuwendende Normen

Aus rein physikalischer Sicht erfordert die Beurteilung von Erdungssystem hinsichtlich der Personensicherheit speziell im TN-System immer eine gemeinsame Betrachtung der Mittelspannungs- und der Niederspannungserdungssysteme. Die maßgebenden Normen für die Beurteilung von Erdungssystemen sind jedoch in Spannungsbereiche gegliedert.



## Niederspannung

Für die Beurteilung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis 1 kV AC bzw. 1,5 kV DC ist hinsichtlich Erdung, Potential-Ausgleich, Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag und Blitzschutz in Österreich grundsätzlich die verbindliche Vorschrift ÖVE ÖNORM E 8001-1:2010 heranzuziehen [27]. Weitere zum Thema gehörenden Vorschriften sind:

- ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61:2001 [28] → Erstprüfung
- ÖVE/ÖNORM E 8001-6-62:2001 [29] → Wiederkehrende Prüfung
- ÖVE/ÖNORM E 8014-1:2006 [30] → Erdungsanlagen, Allgemeines
- ÖVE/ÖNORM E 8014-2:2006 [33] → Fundamenterder
- ÖVE/ÖNORM E 8014-3:2006 [31] → Erdung hinsichtlich EMV

## Hochspannung

Für die Beurteilung der Erdungssituation, der Erdungsspannungen sowie der Gefährdungspotentiale durch Berührungs- und Schrittspannungen bei Starkstromanlagen mit Spannungen über 1 kV, ist in Österreich derzeit gemäß Elektrotechnikverordnung 2002 (Stand Aug. 2017) grundsätzlich die verbindliche ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [32] heranzuziehen. Diese wird in Zukunft durch die Bestimmung ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35]<sup>1</sup> abgelöst, welche dem Stand der Technik als aktuellere Norm entspricht (Unterschied zum Thema Berührungsspannungsgrenzen siehe Kapitel 1.2.4). Weitere zum Thema gehörenden Hochspannungsbestimmungen:

- ÖVE/ÖNORM E8348:2007 [34] → Erdung Hochspannungsanlagen
- ÖVE-B1/1976 [39] → Beeinflussung Fernmeldeanlagen

## Weitere Normen zum Thema Erdung

- ÖVE/ÖNORM EN 62305-1 [36] → Blitzschutz Allgemeines
- ÖVE/ÖNORM EN 62305-2 [37] → Blitzschutz Risikomanagement
- ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 [38] → Blitzschutz Anlagen und Personen
- ÖVE/ÖNORM EN 50310 [26] → Erdung und Potentialausgleich, Gebäude mit Informationstechnik
- IEEE Std. 80 [15] → AC Substation Grounding
- IEEE Std. 81.2-1991 [16] → Measuring

---

<sup>1</sup> Entsprechend dem Stand der Technik wird folgend nur mehr die ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 berücksichtigt.

### 1.2.3 Begriffsdefinition

Zur Sicherstellung einer einheitlichen Begriffsverwendung sind folgend die wichtigsten Begriffe zum Thema Erdung gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] angeführt

**„Erdungsspannung (EPR),  $U_E$**

*Spannung zwischen einer Erdungsanlage und der Bezugserde“ [35]*

**„Berührungsspannung,  $U_T$**

*Spannung zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese gleichzeitig berührt werden“ [35]*

**„Schrittspannung,  $U_s$**

*Spannung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche, die 1 m voneinander entfernt sind, was als Schrittlänge eines Menschen angenommen wird“ [35]*

**„Erdungsstrom,  $I_E$**

*Strom, der über die Erdungsimpedanz in die Erde fließt“ [35]*

Anmerkung: Beinhaltet (gemäß [35], Bild 2) Strom über lokalen Anlagenerder sowie weitere angebundene Erder (z.B. Kettenleiter Freileitung)

**„Erdfehlerstrom,  $I_F$**

*Strom, der vom Betriebsstromkreis zur Erde oder zu geerdeten Teilen an der Fehlerstelle (Ort des Erdfehlers) fließt“ [35]*

**„Erdungsimpedanz,  $Z_E$**

*Impedanz bei einer gegebenen Frequenz zwischen einem Punkt in einem System oder einer Anlage oder einem Betriebsmittel und der Bezugserde“ [35]*

**„Ausbreitungswiderstand,  $R_E$**

*Realteil der Erdungsimpedanz“ [35]*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden folgende weitere Begriffe definiert

**Anlagenerdungsstrom,  $I_A$**

Strom der über die Erdungsimpedanz des lokalen Anlagenerders fließt

## 1.2.4 Spannungsgrenzen hinsichtlich Personensicherheit

### Niederspannung

Die ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010 [27] behandelt das Thema der Personensicherheit primär aus Sicht der Niederspannungsschutzmaßnahmen. Für geerdete Systemleiter gilt in diesem Zusammenhang, dass der Betriebserder so zu dimensionieren ist, dass folgende normative Bedingung eingehalten wird (siehe auch Abbildung 1-6):

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{65 \text{ V}}{U_N - 65 \text{ V}} \quad (\text{Gl. 1-2})$$

- $R_B$  ... Erdungswiderstand der Gesamtheit aller Betriebserder
- $R_E$  ... kleinster abschätzbarer Erdausbreitungswiderstand der nicht mit einem Schutzerdungsleiter verbundenen, fremden leitfähigen Teile, über die ein Erdschluss entstehen kann
- $U_N$  ... Nennspannung gegen geerdete Leiter

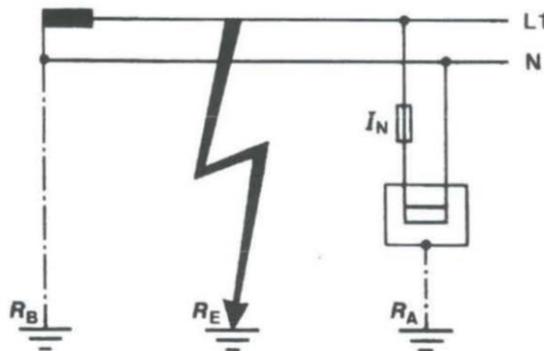


Abbildung 1-6: Erdschluss in einem geerdeten Verteilungsnetz und einem Verbraucher im TT-System [27]

Hierdurch wird sichergestellt, dass der geerdete Systemleiter keine Spannungen größer 65 V im Fehlerfall annehmen kann.

## Hochspannung

Der wesentliche Unterschied zwischen ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [32] und ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] liegt in den Grenzwerten hinsichtlich der maximal zulässigen Berührungsspannungen im Fehlerfall (siehe Abbildung 1-7). Für gelöscht betriebene Netze, in welchen einpolige Erdschlüsse über einen längeren Zeitraum anstehen können, ergibt sich im Zusammenhang mit der normativ maximal zulässigen Berührungsspannung der Unterschied, dass gemäß ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [32] für Fehlerdauern länger zehn Sekunden 75 V und gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] 80 V zulässig sind.

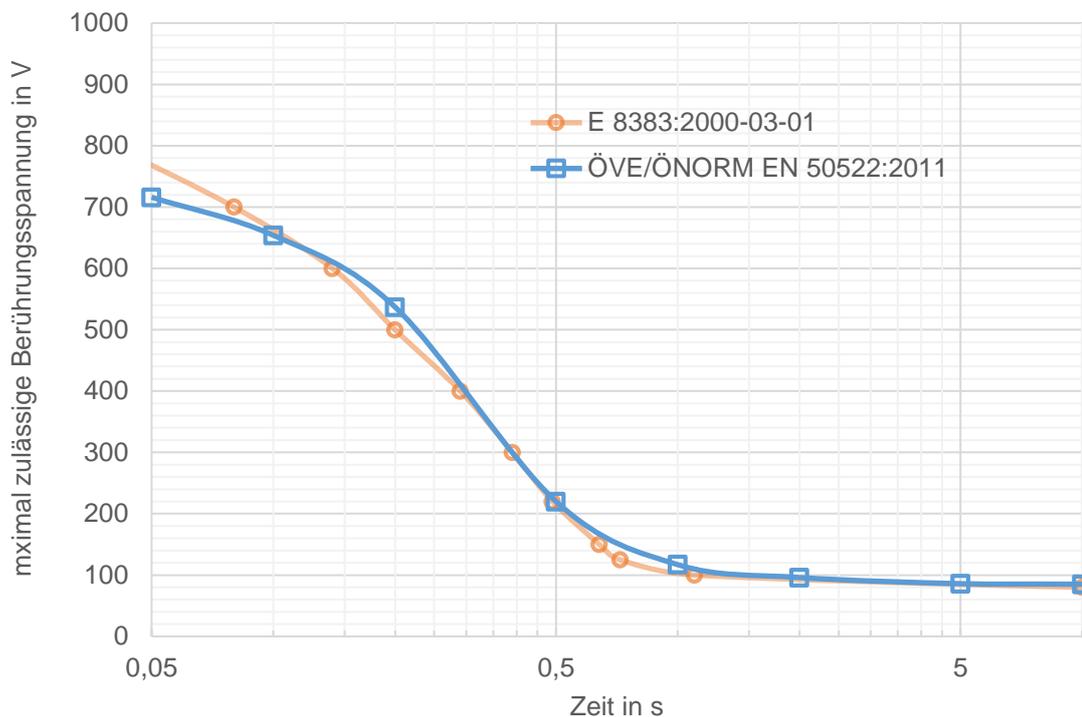


Abbildung 1-7: Darstellung der maximal zulässigen Berührungsspannung gemäß ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 sowie ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35]

## Zusammenschluss von Nieder- und Hochspannungserdungsanlagen

Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] gelten die in Tabelle 1-2 angeführten Minimalforderungen für den Zusammenschluss von Nieder- und Hochspannungserdungsanlagen. Für das TN-System wird hierzu ein Faktor F definiert welcher den Zusammenhang zwischen der im Fehlerfall zu erwartenden Erdungsspannung und der maximal normativ zulässigen Berührungsspannung festlegt. Gemäß der Anmerkung in Tabelle 1-2 kann die Erdungsspannung hierbei Werte bis zum Fünffachen der zulässigen Berührungsspannung annehmen.

Zusammengefasst ist auch beim Zusammenschluss von Nieder- und Hochspannungserdungsanlagen das Ziel die Einhaltung der maximal zulässigen



Berührungsspannung, wobei die Hinweise bezüglich des Faktors F (siehe Tabelle 1-2) in der Praxis keine rechtlich fundierte Erleichterung für jene Person bringt, welche die Überprüfung und Bewertung der Erdungsanlage durchführt.

Tabelle 1-2: Minimalanforderung für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungserdungsanlagen basierend auf der Erdungsspannung gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35]

Art des Niederspannungssystems <sup>a, b</sup>		Anforderungen zur Erdungsspannung (EPR)		
		Berührungsspannung	Beanspruchungsspannung <sup>c</sup>	
			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	$EPR \leq 1\,200 \text{ V}$	$EPR \leq 250 \text{ V}$

<sup>a</sup> Definition der Arten der Niederspannungssysteme siehe **HD 60364-1**.

<sup>b</sup> Für Telekommunikationsanlagen sollten die ITU-Richtlinien beachtet werden.

<sup>c</sup> 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.

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

<sup>e</sup>  $U_{Tp}$  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.

### 1.2.5 Beurteilung der korrekten Ausführung von Erdungsanlagen

Die Beurteilung der normativ korrekten Ausführung von Erdungsanlagen im Spannungsbereich größer 1 kV ist in der ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] geregelt und verfolgt einen stufenweisen Ansatz.

Im Rahmen der ersten Stufe wird hierzu die Erdungsspannung durch Berechnung oder Messung bestimmt. Liegt diese unterhalb des zweifachen oder vierfachen (anerkannte Maßnahmen erforderlich) Wertes der maximal zulässigen Berührungsspannung (siehe Abbildung 1-7), so erfüllt die Anlage die normativen Forderungen. Der hierbei verwendete Faktor 2 setzt voraus, dass die Erdungsspannung kleiner als das doppelte der Berührungsspannung ist (Einflussfaktoren und Zusammenhänge siehe auch Kapitel 3.5). Kann diese Bedingung nicht erfüllt werden, so muss im Rahmen der zweiten Stufe überprüft

werden, ob sämtliche Berührungsspannungen (bzw. der Körperstrom) unter der normativ zulässigen Grenze liegen.

Für die messtechnische Überprüfung einer Erdungsanlage stellt die Bestimmung der Erdungsimpedanz einen deutlich geringeren Aufwand als die Bestimmung sämtlicher Berührungsspannungen dar. Ein damit verbundener Vorteil hinsichtlich der Personensicherheit liegt darin, dass die maximal zu erwartende Berührungsspannung im Fehlerfall auch bei ungünstigen Verhältnissen (z.B. Spannungsverschleppungen durch IKT-Leitungen usw.) begrenzt ist und somit ein Maximum an Sicherheit gewährleistet werden kann. Zumal es in der Praxis nur bei kleinen Anlagen möglich ist, sämtliche Berührungsspannungen messtechnisch zu erfassen.

Weitere Betrachtungen bezüglich des Zusammenhanges zwischen Erdungsspannung und Berührungsspannung siehe Kapitel 3.5.

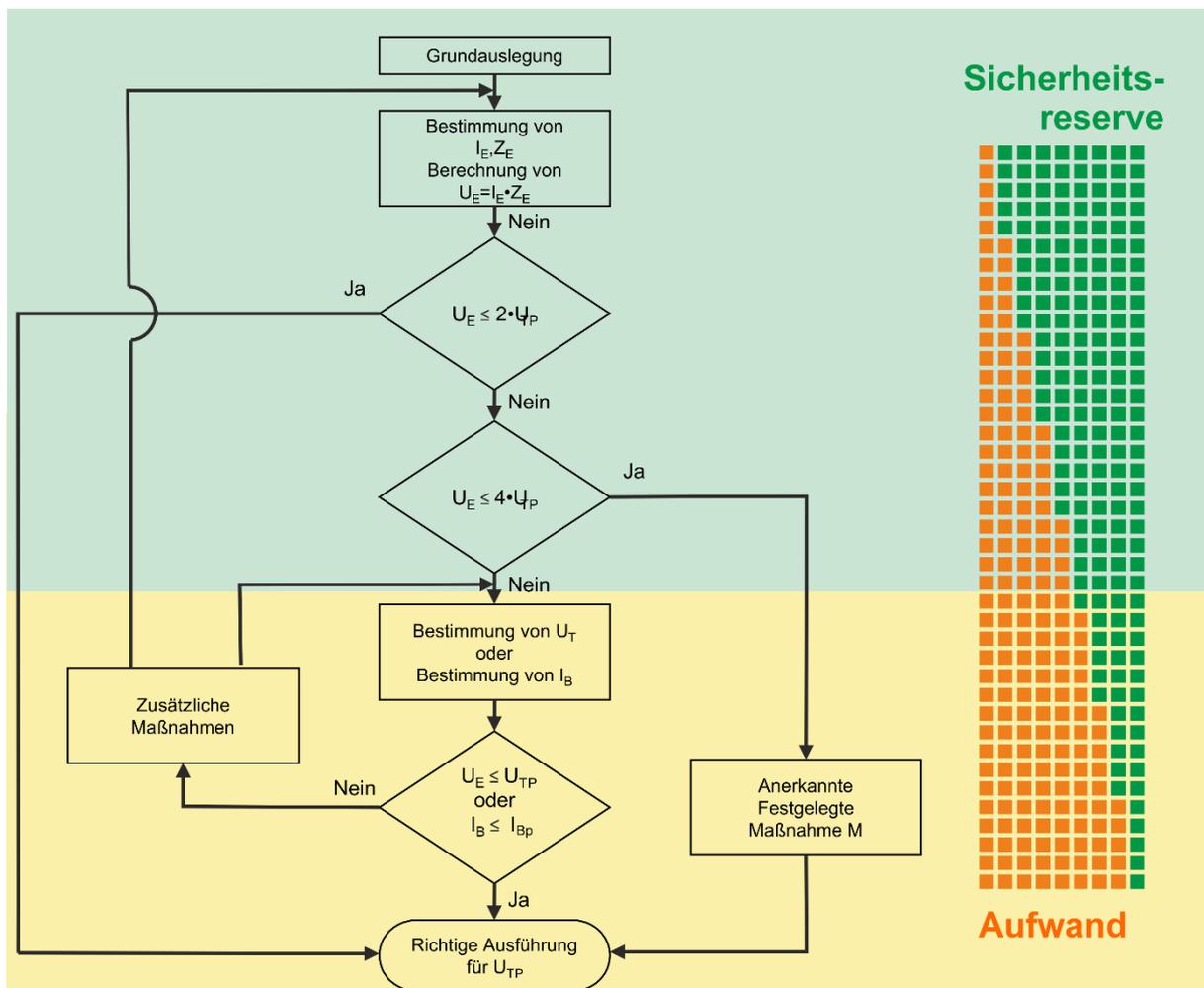


Abbildung 1-8: Auslegung von Erdungsanlagen, die nicht Teil eines „Globalen Erdungssystems“ sind gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011



Der in der ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] gewählte Ansatz zur Beurteilung der korrekten Ausführung einer Erdungsanlage gliedert sich somit nach dem Aufwand mit dem Ziel eines Maximums an Sicherheit (siehe auch Kapitel 1.2.6).

### 1.2.6 Normative Situation bezüglich eines Globalen Erdungssystems

Der Begriff des Globalen Erdungssystems ist gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 [35] wie folgt definiert:

#### **„Globales Erdungssystem**

*ein durch die Verbindung von örtlichen Erdungsanlagen hergestelltes Erdungssystem, das sicherstellt, dass durch den geringen gegenseitigen Abstand dieser Erdungsanlagen keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten“ [35]*

Gemäß der angeführten Definition liegt der Kern in der Einhaltung der Berührungsspannung. Diese Bedingung findet sich auch im Flussdiagramm (siehe Abbildung 1-8). Bei der Begriffsdefinition eines Globalen Erdungssystems gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 finden sich weiters folgende ergänzende Anmerkungen.

*„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.*

*ANMERKUNG 2 Das Bestehen eines globalen Erdungssystems **kann** durch **Muster-Messungen** oder **Berechnungen** für **typische Anordnungen** nachgewiesen werden. Typische Beispiele für globale Erdungssysteme sind Stadtzentren, städtische oder industrielle Bereiche mit verteilten Nieder- und Hochspannungserdungen (siehe Anhang O).“ [35]*

Die Schwierigkeit in der Praxis liegt nun in der Umsetzung des messtechnischen Nachweises (Messaufbau/Messschaltung, Auswahl der Messpunkte, Sicherstellung einer möglichst lückenlosen Erfassung).

Beachtet man in diesem Zusammenhang die Hinweise im Anhang O gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 zum Begriff des Globalen Erdungssystems so ergibt sich die Frage ob eine normative Einführung des Begriffes „Globales Erdungssystem“ sinnvoll ist, zumal sich daraus für die praktische Beurteilung von Erdungsanlagen keine Vorteile (Vereinfachungen) für den Beurteiler/Überprüfer ergeben und das maßgebende Kriterium (Berührungsspannung) ohnedies im Flussdiagramm (siehe Abbildung 1-8) enthalten ist.



### 1.3 Forschungsfragen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die in Tabelle 1-3 angeführten Forschungsfragen behandelt.

Tabelle 1-3: Forschungsfragen

Nr.	Frage	Behandlung im Kapitel
<b>Forschungsfragen zum Thema: Stromaufteilung</b>		
1)	Welche typischen Parameter von Mittel.- und Niederspannungsnetzen sind bei der rechnerischen Bestimmung der Stromaufteilung und der Potentialverhältnisse im urbanen Kabelnetzen relevant?	Kapitel 2.2
2)	Welche technischen Anforderungen (physikalische Wirkmechanismen) muss ein Berechnungsmodell beinhalten, und wie können diese möglichst effizient und flexibel in einem Berechnungsmodell umgesetzt werden?	Kapitel 2.3
3)	Welche Sensitivitäten sind hinsichtlich der Kernparameter des Modells zu berücksichtigen?	Kapitel 2.4
4)	Welche Betriebsmittel beeinflussen im Erdschlussfall in welchem Ausmaß die Stromaufteilung und somit die Potentialverteilung im urbanen Kabelnetz	Kapitel 2.5
5)	Welche Strom- und Potentialverhältnisse sind in typischen <sup>2</sup> urbanen und suburbanen MS/NS-Kabelnetzen im Erdschlussfall bei niederohmig geerdetem Sternpunkt zu erwarten?	Kapitel 2.6
6)	Ist eine vereinfachte Modellierung zur Berechnung der Stromaufteilung in verbunden Erdungssystemen möglich?	Kapitel 2.7 Kapitel 2.8
<b>Forschungsfragen zum Thema: Messung und Potentialverteilung</b>		
7)	Welche Messmethode ist unter Berücksichtigung der Messunsicherheit, der praktischen Handhabung und den technischen Anforderungen die geeignetste Methode? Und welche Anforderungen ergeben sich in der Praxis für die Messstromquelle?	Kapitel 3.1
8)	Wie beeinflusst die Lage des Einspeiseortes des Messstroms die Messung?	Kapitel 3.3
9)	Welche Anforderung ergeben sich an die Messstromquelle unter Berücksichtigung der Personensicherheit?	Kapitel 3.4
10)	Wie beeinflusst die ohmsche Verkopplung von Erdungssystemen die Potentialverhältnisse bei Messungen?	Kapitel 3.5
11)	Welchen Einfluss übt die lokale Überbrückung des Erdoberflächenpotentialverlaufs durch eine Person aus?	Kapitel 3.6
<b>Forschungsfragen zum Thema: Beurteilung von Erdungssystemen</b>		
12)	Wie muss der Prozess zur Beurteilung von Erdungssystemen unter Berücksichtigung realer technischer und organisatorischer Rahmenbedingungen aufgebaut sein und wie kann er gegenüber dem Stand der Technik verbessert werden?	Kapitel 4

<sup>2</sup> Im Rahmen der Arbeit werden die in Kapitel 2.2 erarbeiteten Strukturen als typisch definiert.



## 1.4 Publikationsüberblick

Im Rahmen der Erarbeitung des Themas dieser Arbeit entstanden folgende wissenschaftliche Publikationen:

### 2018

- Fickert L; Mallits T.: Earth Fault Current Distribution of Proof Method of Global Earthing System – in: International Scientific Conference EPE 2018

### 2017

- Mallits, T.; Fickert, L.; Schmutzer E.: Globales Erdungssystem in urbanen Kabelsysteme - in: e&i - Elektrotechnik und Informationstechnik 2017

### 2016

- Schmutzer E.; Fickert L.; Emmer, W.; Muratovic R.; Mallits T.; Sigl C.; Keskic A., Strom im Tunnel - Ist alles sicher? – in: Leoben, Vortrag und Publikation im Tagungsband 19. Mai 2016
- Schmutzer E.; Emmer W; Mallits T.: Potentialausgleichs- und Erdungsanlagen: Anforderungen an die Symmetrie von PE/PE-Systemen zur Vermeidung von EMV-Störungen - in: Tagungsunterlagen ÖVE. p. 1-40 19. April 2
- Mallits T.; Schmutzer E.; Fickert, L.; Höhn T.; Muratovic R.; Gether J.: Die Rolle von Globalen Erdungssystemen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit elektrischer Netze - in: Symposium der Energieinnovation 12 Feb 2016
- Höhn T.; Mallits T.; Javernik F.; Schmutzer E.; Fickert L.; Einfalt A.; Zeilinger F.; Hafner G.; Steurer H; Restrukturierung im 10/20-kV-Netz - in: Symposium der Energieinnovation 11. Feb. 2016

### 2015

- Fickert L; Mallits T.: Erdschlüsse im Netzbetrieb, Anlagen- und Personenschutz, Beherrschung des Potentials – in: Omicron Anwendertagung Juni 2015
- Mallits T.; Hufnagl E.; Schmutzer E.: Reflections on global earthing systems – in: Komunalna Energetika Mai 2015
- Fickert L.; Mallits T.; Schmutzer E.: Effiziente Berechnung von Erdschlussströmen in gelöschten Netzen und Betrachtungen zu globalen Erdungssystemen – in: IEWT Wien 2015



- Fickert L.; Mallits T.; High Current Earth Fault in Resonant Grounded Networks under Aspects of a Global Earthing System, CIRED 2015

## 2014

- Muratovic, R.; Mallits, T.; Schmutzger E.: Berechnung der wechselseitigen ohmschen und induktiven Beeinflussung durch Höchstspannungs-Kabelsysteme - in : e&i - Elektrotechnik und Informationstechnik 2014
- Mallits T.; Raunig C.; Schwingshackl M.; Schmutzger E.; Fickert L.: Einflussfaktoren auf die Stromaufteilung, Berühr- und Schrittspannungen im Erdschlussfall – in: ETG Fachtagung 2014
- Fickert L.; Schmutzger E.; Mallits T.: Globale Erdungssysteme – in: ETG Fachtagung 2014
- Fickert, L., Schmutzger, E. & Mallits, T., Short circuits and earth faults: calculation for protection application and judging fault consequences concerning safety of people – in: Asia-Pacific Protection & Testing Conference 2014





## 2 Stromaufteilung in Erdungssystemen – Modell, Datenbasis

### 2.1 Beschreibung der Ziele sowie der verwendeten Analysemethodik

Die Abbildung 2-1 zeigt in kompakter Form die Ziele sowie die wichtigsten Schritte der für die Lösung der Aufgabenstellung angewandten Methodik.

#### Zielformulierung (siehe Abbildung 2-1, orange Hinterlegung)

Ziel dieses Teilbereiches der Arbeit ist die Verbesserung des Verständnisses hinsichtlich der maßgebenden Wirkmechanismen welche für die Strom- und Spannungsverhältnisse in MS-Kabelnetzen bei einpoligen Erdschlüssen verantwortlich sind. In weiter Folge werden praxisrelevante Aussagen hinsichtlich den Wirkungen sowie den Grenzen von Globalen Erdungssystem bei stromstarken Fehlern hinsichtlich Personensicherheit erarbeitet.

#### Erhebung von Netzstrukturen (siehe Abbildung 2-1, grüne Hinterlegung)

Die Fragestellungen sollen mittels Simulationsrechnungen mit Modellen beantwortet werden, welche die Realität möglichst gut nachbilden. Hierzu muss zunächst die Frage geklärt werden, welche Netzstrukturen in der Praxis relevant sind. Im Rahmen von Literaturrecherchen wird hierzu eine sinnvolle Netzstrukturgliederung sowie Basisszenarien erarbeitet, welche dann für die Modellierung dienen.

#### Modellierung, Auswertung (siehe Abbildung 2-1, blaue Hinterlegung)

Den Kern der Methodik stellt die Modellierung dar. Um ein Modell, welches die Realität möglichst gut abbildet, zu entwickeln, werden im ersten Schritt die Grundlagen erarbeitet, bevor im nächsten Schritt die Realisierung strategisch geplant und durchgeführt wird. Zur Sicherstellung der korrekten Funktion sowie Verbesserung der Modellstabilität hinsichtlich Simulation erfolgt eine Testreihe. Anschließend werden die erarbeiteten Szenarien modelliert. Durch die Kombination von Sensibilitätsanalysen und der Ergebnisse aus den Szenarien Rechnungen wird die Fragestellung hinsichtlich der maßgebenden Einflussfaktoren auf die Strom- und Spannungsverhältnisse im Erdschlussfall, sowie praxisrelevante Erkenntnisse bzw. Regelungen hinsichtlich der Bedeutung für die Personensicherheit abgeleitet.

#### Vereinfachtes Berechnungsverfahren

Im Rahmen weiterer Analysen wird ein vereinfachtes Berechnungsverfahren zur schnellen und praxisnahen Analyse der Strom- und Potentialverhältnisse bei einpoligen Erdschlüssen in MS-Ortsnetzstationen entwickelt.

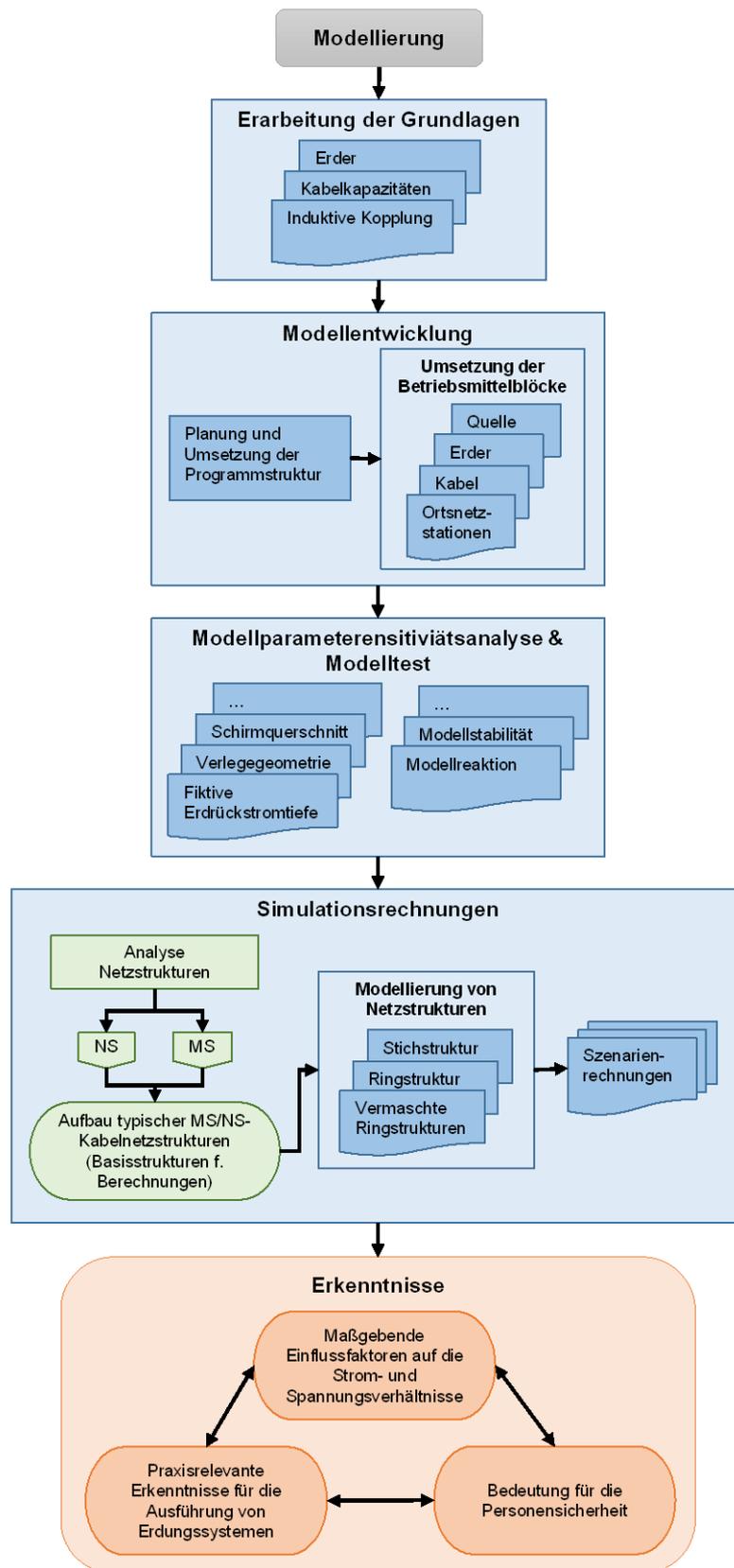


Abbildung 2-1: Darstellung der Analysemethode zur Bestimmung der Strom- und Spannungsverhältnisse im Bereich von Erdungsanlagen im Erdschlussfall

## 2.2 Aufbau typischer Netzstrukturen

### 2.2.1 Allgemeines

Die Stromaufteilung und somit die Potentialverteilung im Fehlerfall stellt sich innerhalb des Netzes entsprechend den wirksamen Impedanzverhältnissen ein. Diese ist physikalisch durch die Netzstruktur, die Netzausdehnung bzw. durch die Distanzen zwischen den Stationen, der MS- und NS-Erdungsanlagen sowie der induktiven Verkopplung zwischen Phasenleiter und parallelen Potential-Ausgleichsleiter (Kabelschirmen, durchgängigen Begleiterdern) gegeben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Erdungssysteme der Mittelspannungsebene und in einem weiteren Schritt die der Niederspannungsebene berücksichtigt.

### 2.2.2 Literaturrecherche zur Erhebung simulationsrelevanter Netzparameter

Bezüglich der Kategorisierung und Erhebung von Netzen finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Arbeiten (z.B. [2], [19], [20], [43], [47]) in welchen systematische Gliederungen bzw. Kategorisierungen von Netzen ausgearbeitet wurden. Die Daten dieser Modellnetze wurden durch Mittelung von realen Netzdaten ähnlicher Strukturen gewonnen. Eine einheitliche Gliederungsstruktur konnte in der Literatur nicht gefunden werden, die Gliederungsvielfalt bzw. die Anzahl der Gliederungskategorien variiert sehr stark. Die Ergebnisse der zuvor angeführten Arbeiten verdeutlichen jedoch, dass eine vollständige Abdeckung sämtlicher Netzstrukturvarianten für die vorliegende Aufgabenstellung durch ein einheitliches Modell nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurden Basisstrukturen (siehe Kapitel 2.2.3 sowie Kapitel 2.2.4) festgelegt, welche für die Simulationen herangezogen werden können.



Abbildung 2-2: Übersicht über die Zusammenfassung von MS/NS-Netzstrukturen



Tabelle 2-1: Erhobene simulationsrelevante MS-Netzdaten ([2], [19], [20], [43], Kategorisierung gemäß Abbildung 2-2)

	rurale Bebauung	urbane Bebauung
Abstände der Ortsnetzstationen	ca. 2 km	ca. 300 m

Tabelle 2-2: Erhobene simulationsrelevante Niederspannungs-Netzdaten ([2], [19], [20], [43], Kategorisierung gemäß Abbildung 2-2)

	rurale Bebauung	urbane Bebauung
Anzahl NS-Abgänge	4 Stk.	7 Stk.
Abstand benachbarter Hausanschlüsse	ca. 35 m	ca. 22 m
Länge der Kundenanschlussleitung	ca. 18 m	ca. 11 m
Kundenanzahl (Wohneinheiten)	56 Stk.	165 Stk.
Gebäudeanzahl	56 Stk.	10 Stk.

### 2.2.3 Aufbau ausgewählter MS-Netzstrukturen

Im Allgemeinen werden Mittelspannungsnetze vorwiegend im Spannungsbereich zwischen 6 kV und 30 kV betrieben, wobei im ländlichen Bereich aufgrund der größeren Distanzen auch noch höhere Spannungen zum Einsatz kommen können. Die Ausführung der Mittelspannungsleitungen erfolgt in sehr dünn besiedelten Gebieten meist in Form von Freileitungen, während in dichter besiedelten Gebieten meist Kabel zum Einsatz kommen. Hinsichtlich der vorliegenden Thematik, Fehlerstromaufteilung und Potentialverhältnisse im einpoligen Mittelspannungs-Erdschlussfall, verbessern Mittelspannungs-Kabelnetze (bei vorhandenem und beidseitig aufgelegten Kabelschirmen) die Potentialsituation hinsichtlich Berührungs- und Differenzspannungen. Daher werden Mittelspannungs-Freileitungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter analysiert.

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, sind die in der Literatur dargestellten Netzkategorien hinsichtlich Struktur nur bedingt für die vorliegende Arbeit geeignet. Daher wurden neue Strukturen festgelegt, welche einerseits zur Identifikation der maßgebenden Beeinflussungsfaktoren auf die Stromaufteilung sowie für die Validierung des Modells geeignet sind und andererseits aus schutztechnischer Sicht sinnvoll sind (siehe auch KNOPE Kapitel 1.1.4.2, KNOSPE Kapitel 1.1.4.1).

Mittelspannungsnetze werden aus Gründen der Versorgungssicherheit meist in offenen Ringen betrieben, welche je nach Bebauungsdichte zusätzlich auch teilvermascht sein können.

Für die folgenden Simulationen wurden die in Abbildung 2-3 bis Abbildung 2-7 dargestellten MS-Netzstrukturen gewählt.

- **A1:**

Die Mittelspannungs-Netzstruktur A1 (siehe Abbildung 2-3) besteht aus einer einzelnen ONS (Ortsnetzstation), welche über eine Stickleitung versorgt wird. Ziel dieser Variante ist die Analyse des Einflusses der Verlegeart (Anordnung und Abstand) von Einleiterkabeln sowie der Kabellänge auf die Stromaufteilung.

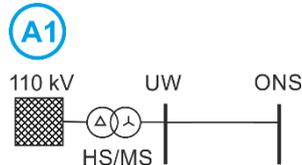


Abbildung 2-3: Übersicht über die festgelegte Mittelspannungs-Netzstruktur A1 (Kabelstich mit einer ONS)

- **A2:**

Die Mittelspannungs-Netzstruktur A2 (siehe Abbildung 2-4) stellt die Erweiterung von der Anordnung A1 bezüglich der Anzahl der ONS dar. Ziel dieser Variante ist die Analyse der Fehlerstromaufteilung sowie der Potentialverhältnisse im Fehlerfall abhängig vom Fehlerort sowie der Erdungswiderstandsverhältnisse.



Abbildung 2-4: Übersicht über die festgelegte Mittelspannungs-Netzstruktur A2 (Kabelstich mit mehreren ONS)

- **B1:**

Die Mittelspannungs-Netzstruktur B1 (siehe Abbildung 2-5) stellt die in der Praxis typische, offen betriebene Ringstruktur dar. Ziel der Variante ist die Analyse der Fehlerstromaufteilung sowie der Potentialverhältnisse im Fehlerfall abhängig vom Fehlerort für diese Netzform.

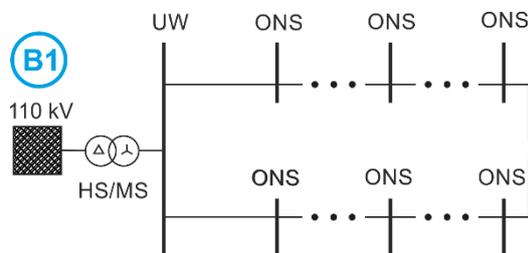


Abbildung 2-5: Übersicht über die festgelegte Mittelspannungs-Netzstruktur B1 (offene Ringstruktur)

- **B2:**

Die Mittelspannungs-Netzstruktur B2 (siehe Abbildung 2-6) stellt eine Erweiterung zur Variante B1 in Form von zusätzlichen Parallelzweigen (geringe Vermaschung) dar. Ziel dieser Variante ist die Analyse der Fehlerstromaufteilung sowie der Potentialverhältnisse im Fehlerfall abhängig vom Fehlerort für diese Netzform.

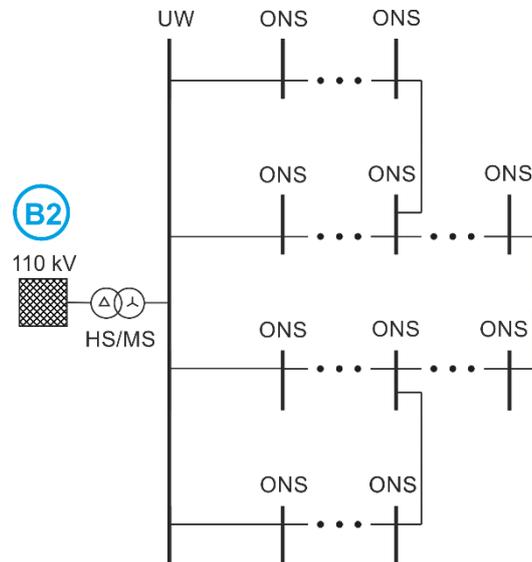


Abbildung 2-6: Übersicht über die festgelegte Mittelspannungs-Netzstruktur B2 (offene, vermaschte Ringstruktur)

- **B3:**

Die Mittelspannungs-Netzstruktur B3 (siehe Abbildung 2-7) stellt eine Erweiterung zur Variante B1 in Form eines an den offenen Ring angebundenen Stichabzweiges (z.B. Netz eines größeren Industriebetriebes). Ziel der Variante ist die Analyse der Fehlerstromaufteilung sowie der Potentialverhältnisse im Fehlerfall abhängig vom Fehlerort.

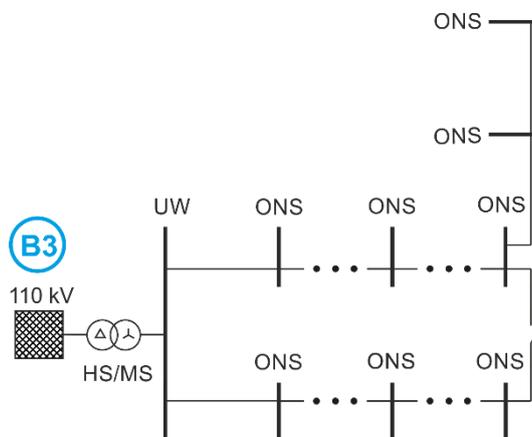


Abbildung 2-7: Übersicht über die festgelegte Mittelspannungs-Netzstruktur B3 (offene Ringstruktur mit Stichabgang)



**Anmerkung 1:** Eine exakte Beschreibung der untersuchten Varianten findet sich in den folgenden Kapiteln in denen Simulationsergebnisse dargestellt werden.

**Anmerkung 2:** Die Anzahl der ONS ergibt sich durch den festgelegten Abstand zwischen den ONS unter Berücksichtigung der Näherung [10], so, dass die Spannungsebene in kV zirka der maximalen Leitungslänge in km entspricht (Abweichungen sind abhängig von der Simulationsvariante möglich). Im Anhang (siehe Kapitel 8.2) finden sich daher weitere Berechnung mit reduzierter ONS Anzahl.

#### 2.2.4 Aufbau ausgewählter NS-Netzstrukturen

Das Niederspannungsnetz dient im Bereich von Haushaltskunden zur flächigen Versorgung mit elektrischer Energie. Hierbei orientiert sich die Struktur (Lage der Leitungen) des öffentlichen Netzes meist an der Bebauungsstruktur. Kabel folgen hierbei üblicherweise dem Straßenverlauf, während Freileitungen über größere Entfernungen meist entlang von Grundstücksgrenzen verlaufen. In ländlichen Regionen kommen aufgrund geringer Investitionskosten sowie einfacher Betriebsführung meist Strahlennetze zum Einsatz. Diese Strahlennetze weisen jedoch den Nachteil einer geringeren Versorgungssicherheit auf, daher werden mit zunehmender Verbraucherdichte offen betriebene Ringnetze realisiert [18]. Bedingt durch das historische Wachstum von NS-Netzen ergibt sich abhängig von der Bebauungsstruktur ein breites Spektrum an Netz-Topologien.

Die Abbildung 2-8<sup>3</sup> zeigt die typischen Netzaufbauten für öffentliche Netze:

- A: Durchlaufende oder abzweigende Netzstrahlen im Kabelkasten
- B: Netzkunde über eigenen Anschlussstrahl angebunden
- C: Über Seitenstrahl angebundener Netzkunde

Maßgebend für die Erderwirkung der gesamten Niederspannungs-Netztopologie ist die Netzform. Gemäß der Nullungsverordnung (BGBl. II Nr. 322/1998 [1]), sind Netzbetreiber in Österreich verpflichtet ihre ONS auf die Schutzmaßnahme Nullung umzustellen (die Übergangsfrist Umstellung seitens Verteilernetzbetreiber betrug 10 Jahre) bzw. sind ONS, bei denen dies aus technischen Gründen nicht möglich ist, zu melden. Für Kundenanlagen gilt bei Neubauten ebenfalls die Nullungsverordnung bzw. die Umstellungsverpflichtung auf Nullung, sofern eine wesentliche Änderung an der Anlage vorgenommen wird. Speziell in Siedlungen mit älteren Gebäuden (Bj. vor 1998) ergibt sich somit eine Informationslücke ob bzw. welche Gebäude (Erder, Fundamenterder) im Sinne eines globalen Niederspannungs-Erdungssystems im Fehlerfall wirksam sind.

---

<sup>3</sup> Abbildung basierend auf [43], erweitert um relevante Strukturen hinsichtlich Erdung

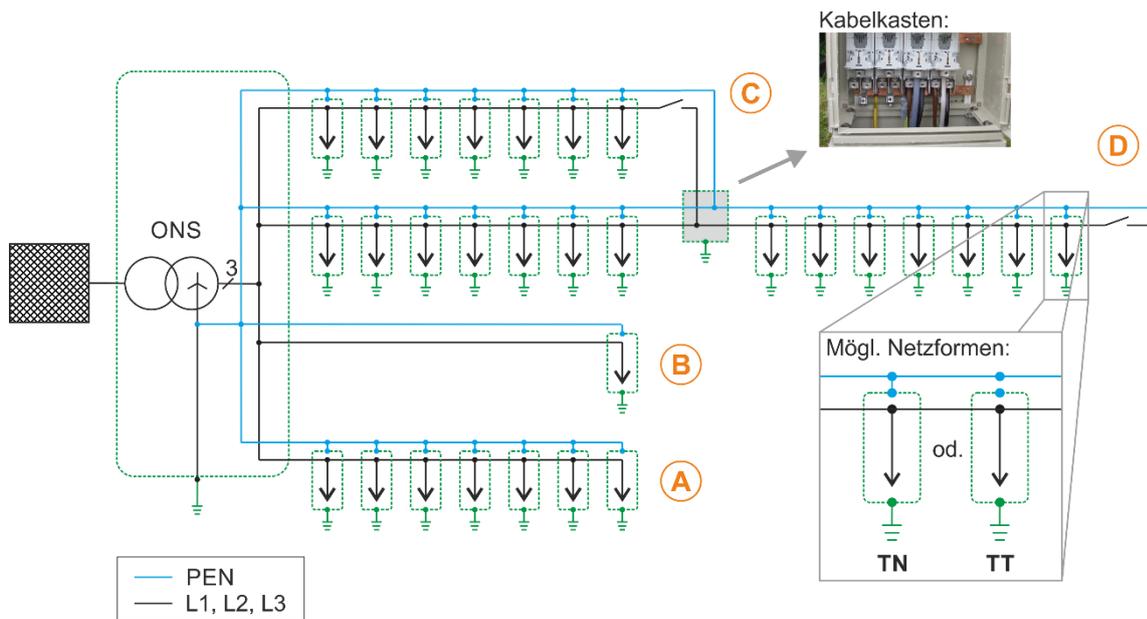


Abbildung 2-8: Vereinfachter schematischer Aufbau von öffentlichen NS-Netzen

## 2.3 Realisierung eines Simulationsmodells zur rechnerischen Bestimmung der Strom- und Potentialverhältnisse in Kabelnetzen

### 2.3.1 Grundlagen

#### 2.3.1.1 Induktive Kopplung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Thema der induktiven Kopplung zweier unendlich langer Leiterschleifen mit Erdrückleitung dargestellt, da die induktive Verkopplung zwischen den Aussenleitern und den Kabelschirmen die Aufteilung des Fehlerrückstroms auf die Erdungsanlage und die Kabelschirme maßgeblich beeinflusst.

Die ersten Grundlagen zur Berechnung von niederfrequent gekoppelten Leiterschleifen wurden von Carson bzw. Pollaczek Mitte der 20er des vorigen Jahrhunderts entwickelt. Das Formelwerk bestand hierbei aus komplexen unendlichen Integralen welche nur mit großem Aufwand durch Reihen Entwicklungen lösbar waren. Aus diesem Grund wurden im Laufe der Jahre verschiedene Näherungslösungen entwickelt (Gegenüberstellung unterschiedlicher Formelwerke siehe [8]).

Die Abbildung 2-9 zeigt das Basismodell zur Berechnung von induktiv gekoppelten Leiter-Erde-Schleifen. Die Quellenspannung  $U_1$  ruft hierbei in der beidseits geerdeten grünen Leiter-Erde-Schleife einen Stromfluss  $I_1$  hervor, welche durch die induktive Koppelimpedanz  $Z_{12}$  eine Spannung  $U_2$  in die blaue Leiter-Erde-Schleife induziert.

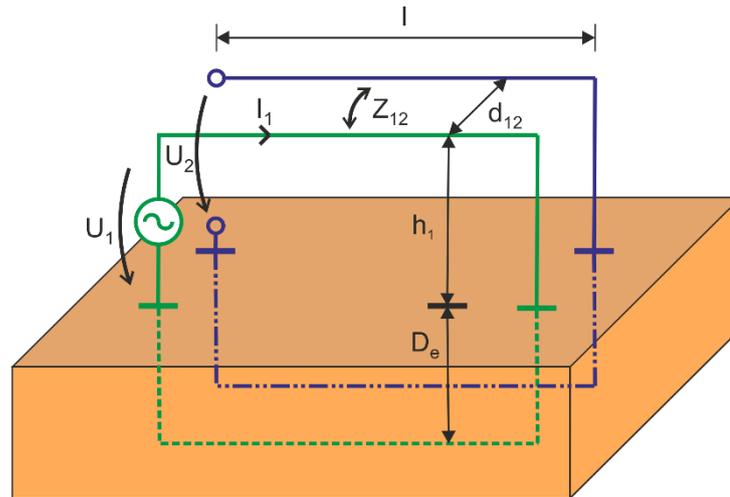


Abbildung 2-9: Prinzip Darstellung der induktiven Kopplung

Dieser Zusammenhang kann durch Aufstellen der Maschengleichungen wie folgt mathematisch formuliert werden:

$$U_1 = l \cdot Z_{11}' \cdot I_1 \quad (\text{Gl. 2-1})$$

$$U_2 = l \cdot Z_{12}' \cdot I_1 \quad (\text{Gl. 2-2})$$

- $U_1$  ... Treibende Quellenspannung der ersten Leiterschleife in V
- $U_2$  ... Durch  $I_1$  induzierte Spannung in die zweite Leiterschleife in V
- $l$  ... Länge der Leiterschleife in m
- $Z_{11}'$  ... Längenbezogene Eigenimpedanz der ersten Leiterschleife in  $\Omega/\text{m}$
- $Z_{12}'$  ... Längenbezogene Koppelimpedanz zw. der ersten und der zweiten Leiterschleife in  $\Omega/\text{m}$
- $D_e$  ... Erdrückstromtiefe in m
- $h_1$  ... Höhe der Leiterschleife in m
- $d_{12}$  ... Abstand der Leiterschleifen zueinander in m

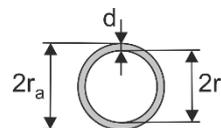
Für die Berechnung müssen somit im ersten Schritt die Selbst- sowie die Koppelimpedanzen des Leitungssystems bestimmt werden.

### Selbstimpedanz:

Bei Leitern, die im Boden liegen kann die Selbstimpedanz gemäß Muckenhuber R. ([22], S 3,1-16, siehe auch [23]) wie folgt berechnet werden:

$$Z'_{ii} = (R'_e + R') + j(X'_{ii} + X'_i) \quad (\text{Gl. 2-3})$$

	$Z'_{ii}$	... spezifische Selbstimpedanz in $\Omega/\text{m}$
$R'_e = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8}$		... spezifischer Erdwiderstand in $\Omega/\text{m}$
$R$		spezifischer ohmscher Widerstand des Leiters in $\Omega/\text{m}$
$X'_{ii} = K \cdot \ln \frac{D_e}{g_{11}}$		spezifische Selbstreaktanz der Leiter-Erde-Schleife in $\Omega/\text{m}$
$X'_i = K \cdot \frac{\mu_r}{4}$		spezifische innere Reaktanz Volleiter (z.B. Phasenleiter Kabel) in $\Omega/\text{m}$
$X'_i = K \cdot \frac{\mu_r}{4} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} + \left( \frac{2 \cdot r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \right)^2 \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \right]$		spezifische innere Reaktanz Hohlleiter (z.B. Kabelschirm) in $\Omega/\text{m}$
$K = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi}$		... Proportionalitätsfaktor in V/Am
$D_e = \frac{\sqrt{2 \cdot e}}{1,7811} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}}$		... Erdrückstromtiefe in m
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$		... Kreisfrequenz in 1/s
$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$		... Permeabilität des Vakuums
$\mu_r$		... Permeabilität des Materials
$\rho$		... spezifischer Erdwiderstand in $\Omega/\text{m}$
$r_a$		... Leiterradius in m
$r_i$		... Leiterhohlraumradius in m
$g_{11} \approx r_a \cdot e^{-\frac{4}{3} \frac{r_i(r_a-r_i)}{(r_a+r_i)^2}}$		Mittlerer geometrischer Abstand von Kreisringen in m



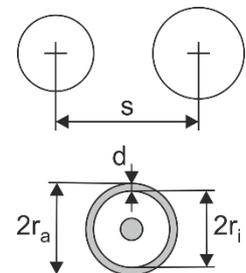
### Koppelimpedanz:

Für die Berechnung der Koppelimpedanz finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze (siehe [8], [17]). Wie aus der Arbeit von Emmer W. ([8], S116) über den Formelvergleich zur Berechnung der induktiver Beeinflussung hervorgeht, besteht zwischen dem Ansatz nach Dubanton und nach Carson hinsichtlich dem Ergebnis der Berechnung der Koppelimpedanzen kein relevanter Unterschied für Kopplungsabstände im Bereich unter mehreren 100 m. Für die

Berechnung wird daher der folgend angeführte Ansatz nach Carson (siehe auch [17]) verwendet.

$$Z'_{ik} = (R'_e + jX'_{ik}) \quad (\text{Gl. 2-4})$$

- $Z'_{ik}$  ... spezifische Koppelimpedanz in  $\Omega$   
 $R'_e = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8}$  ... spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega/\text{m}$   
 $X'_{ik} = K \cdot \ln \frac{D_e}{g_{12}}$  ... spezifische Koppelreaktanz in  $\Omega/\text{m}$   
 $K = \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi}$  ... spezifischer Proportionalitätsfaktor in  $\text{V}/\text{Am}$   
 $D_e = \frac{\sqrt{2 \cdot e}}{1,7811} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}}$  ... Erdrückstromtiefe in m  
 $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  ... Kreisfrequenz in  $1/\text{s}$   
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$  ... relative Permeabilität des Vakuums  
 $\mu_r$  ... Permeabilität des Materials  
 $\rho$  ... spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega$   
 $r_a$  ... Leiterradius in m  
 $r_i$  ... Leiterhohlraumradius in m  
 $g_{12} = s$  ... Mittlerer geometrischer Abstand zw. Kreislinie, -ringe oder -flächen in m  
 $g_{12} \approx r_a \cdot e^{\frac{-d}{2 \cdot r_i + d}}$  ... Mittlerer geometrischer Abstand eines Leiters zu einer Hülle  
 $s$  ... Abstand zwischen den Leitermittelpunkten



### 2.3.1.2 Grundlagen - Betriebskapazitäten

Im Rahmen der Modellierungen wurden primär nur PVC-isolierte Einleiterkabel mit Schirm berücksichtigt, da diese heute im Wesentlichen (2018) seitens der Netzbetreiber zum Einsatz kommen.

Aus physikalischer Sicht gilt somit für die Modellierung der Betriebskapazitäten, dass je Einleiterkabel eine Kapazität zwischen Phasenleiter und dem dazugehörigen Schirm wirksam ist (siehe Abbildung 2-10). Diese können in Form von Zylinderkondensatoren berücksichtigt werden. Um sicherzustellen, dass die errechneten Kapazitätswerte der Realität entsprechen, wurden diese mit Herstellerangaben verglichen. Weitere Modellierungsdetails finden sich in Kapitel 2.3.2.4.

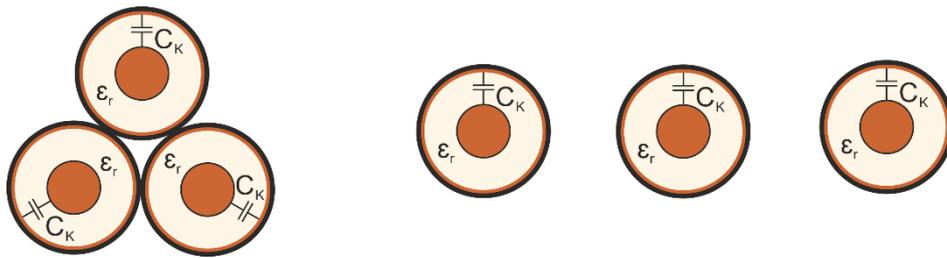


Abbildung 2-10: Kabelkapazität

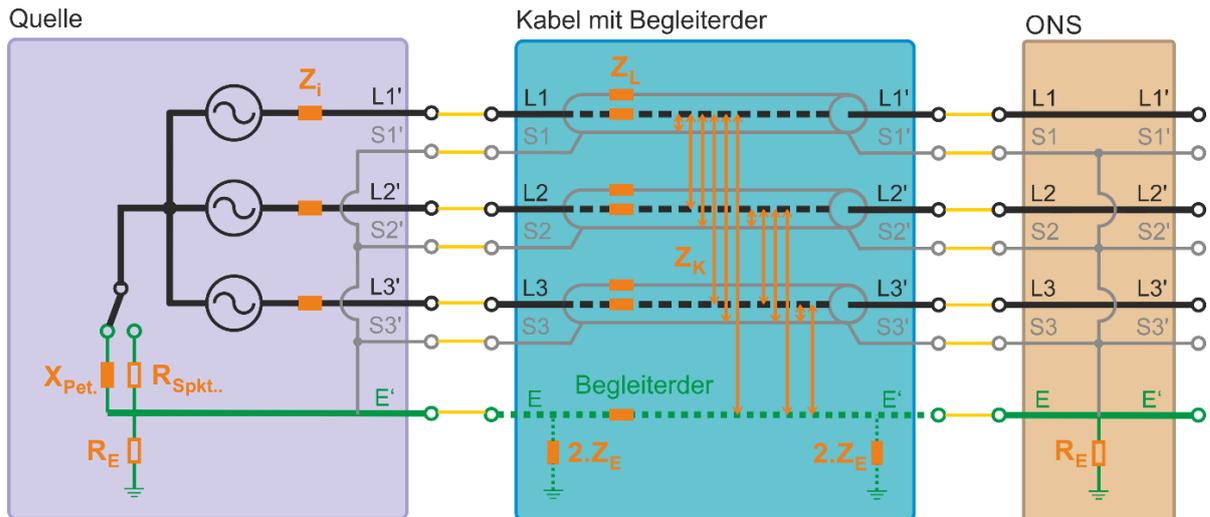
$$C'_K = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (\text{Gl. 2-5})$$

- $C'_K$  ... spezifische Leiter-Schirm-Kapazität in F/m  
 $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{As}{Vm}$  ... Permittivität des Vakuums  
 $\varepsilon_r = 2,4 \dots 5$  ... Permittivität der Isolationsmediums  
 $r_2$  ... Schirmradius in m  
 $r_1$  ... Leiterradius in m

## 2.3.2 Modellrealisierung

### 2.3.2.1 Allgemeines

Aus den Erläuterungen im Kapitel 2.1 geht hervor, dass eine hohe Modellflexibilität zur Lösung der Aufgabenstellungen erforderlich ist. Somit ist es für die Modellrealisierung zweckmäßig, eine Umsetzung in Form von funktional unterschiedlichen verschaltbaren Simulationsblöcken zu entwickeln, die dann zur Berechnung der Stromaufteilung und der Potentialdifferenzen (mittels MATLAB Simulink®) in Mittelspannungs- und in Niederspannungs-Verteilernetzen herangezogen werden können. Exemplarisch ist in Abbildung 2-11 eine Modellstruktur dargestellt.



Legende:

- $X_{Pet.}$  ... Erdschlusskompensationsspule
- $R_{Spkt.}$  ... Sternpunkts-Strombegrenzungswiderstand
- $R_E$  ... Erdausbreitungswiderstand (UW, ONS)
- $Z_K$  ... Koppelimpedanzen
- $Z_E$  ... Erdungsimpedanz des Begleiterders (siehe Kapitel 2.3.2.5)
- $Z_L$  ... Längsimpedanzen
- $Z_i$  ... Quellenimpedanz

Abbildung 2-11: Blockstruktur, Beispiel eines kurzen Stiches

Diese Modellstruktur bietet eine Reihe von Vorteilen:

- Gute Übersicht bei der Modellierung von Szenarien
  - einfache Verschaltung der benötigten Blöcke miteinander und somit schnelle Generierung verschiedener Szenarien
  - einfache Festlegung von Fehlerort und Fehlerfall
  - einfache Änderung der Quellenparameter sowie der Sternpunktsbehandlung
- Übersichtliche Auswertung durch einfache Bestimmung von Strom und Spannung an jedem relevanten Punkt der Netzstruktur
- Überschaubarer Programmieraufwand in Matlab 2013 unter Verwendung von Simulink
- Übersichtliche Programmierstruktur, da jeder Betriebsmittelblock unabhängig von anderen Strukturen ist
- Betriebsmittelblöcke können bei Bedarf nachträglich einzeln angepasst bzw. erweitert werden, ohne programmtechnisch globale Anpassungen vornehmen zu müssen.

Diesen Vorteilen steht nur der Nachteil einer erhöhten Solver-Anforderung und somit Rechenleistung gegenüber.

### 2.3.2.2 Beschreibung der Modellblöcke

#### Quellenblock

Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Modellblöcke erläutert.

Im realen Netz erfolgt die Versorgung von Mittelspannungs-Abzweigen in Österreich in der Regel aus der 110-kV-Ebene, wobei abhängig von der Netzausdehnung die Unterspannungsseite (MS-Netz) in 10 kV bzw. 20 kV ausgeführt wird.

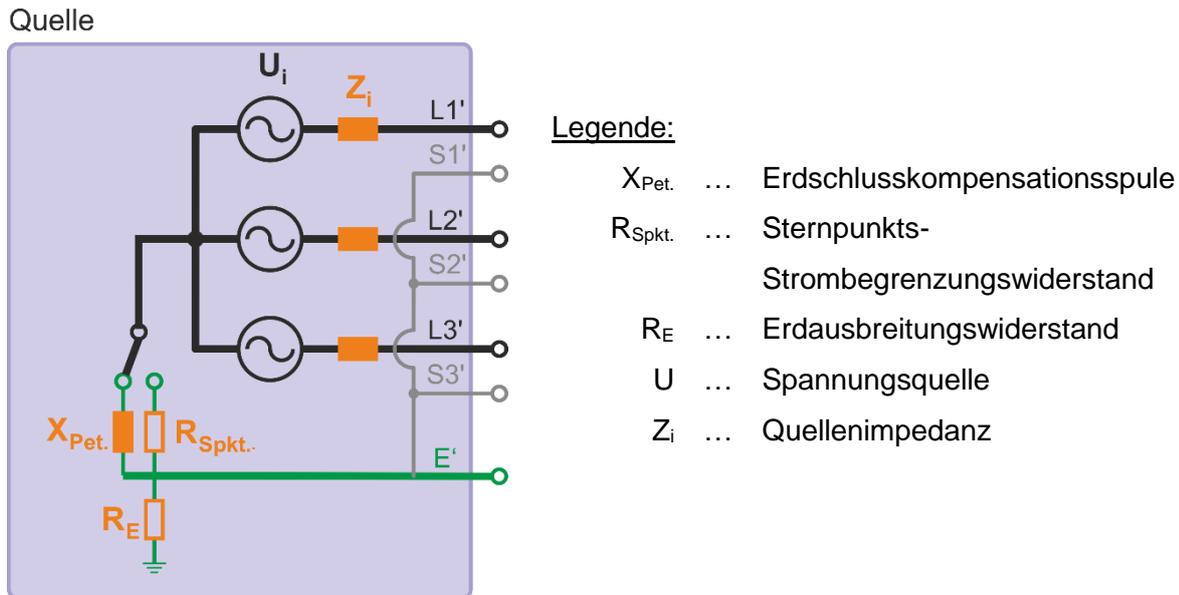
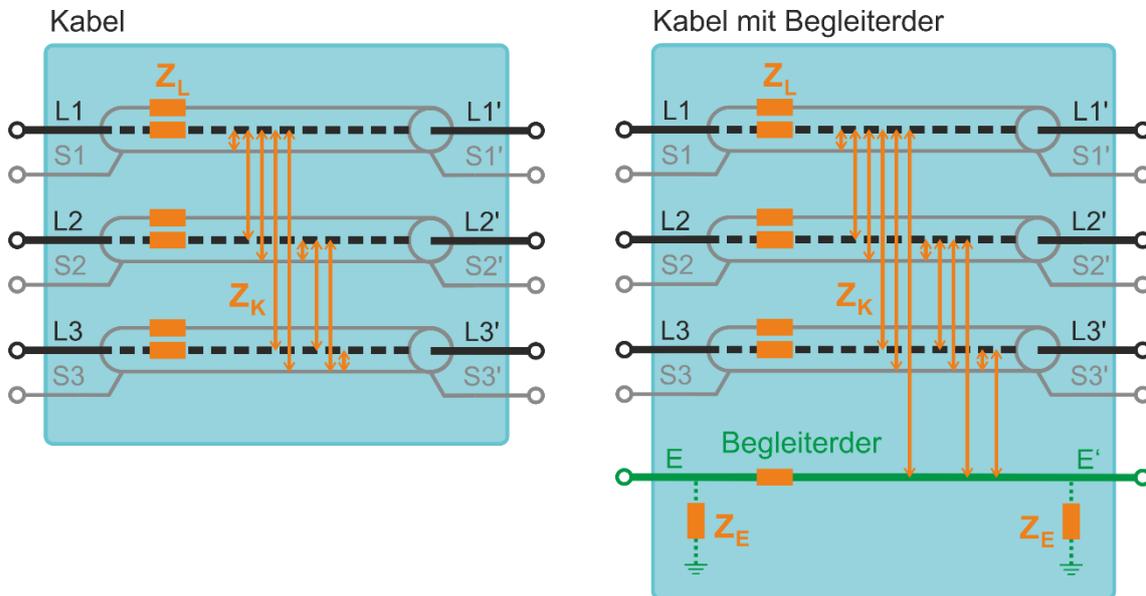


Abbildung 2-12: Darstellung Quellenblock

Die Basis des Quellenblocks (siehe Abbildung 2-12) besteht aus einer dreiphasigen Spannungsquelle mit Innenimpedanz, welche im realen Netz den (auf einen Längszweig reduzierten) HS/MS-Trafo nachbildet. Der Sternpunkt kann variabel angepasst werden, sodass neben dem in Österreich üblichen gelöschten Mittelspannungs-Netzbetrieb auch Varianten mit niederohmigem bzw. direkt geerdetem Sternpunkt simuliert werden können. Weiters beinhaltet der Quellenblock einen Erdausbreitungswiderstand (UW-Erder). Sämtliche Parameter sind variabel, um eine Anpassung an reale Bedingungen zu ermöglichen.

#### Kabelbetriebsmittelblock

Der Kabelbetriebsmittelblock (siehe Abbildung 2-13) beinhaltet ein vollwertiges Modell eines 3-phasigen Einleiter-Mittelspannungskabels. Die Hauptkomponenten bestehen aus den Längsimpedanzen, den Betriebskapazitäten sowie einer vollwertigen Modellierung aller Leiterverkopplungen.



Legende:

- $Z_K$  ... Koppelimpedanzen
- $Z_E$  ... Erdungsimpedanz
- $Z_L$  ... Längsimpedanzen

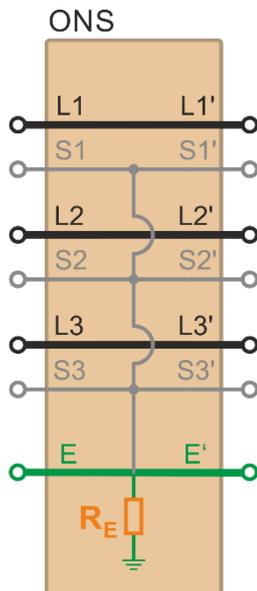
Abbildung 2-13: Darstellung Kabelblock, ohne Begleiterder (links), mit Begleiterder (rechts)

Durch Anpassung der Geometrie sowie der Materialparameter kann der Block im Modell an beliebige Kabeltypen angepasst werden. Basierend auf der Literaturrecherche hinsichtlich typischer MS-Kabellängen sowie modelltechnischer Anforderungen (z.B. Längsspannungsabfall in Kombination mit den Betriebskapazitäten) hat sich die Ausführung in Form von 100 m Kabelteilstücken bewährt.

Oft werden mit den Mittelspannungskabeln in der Praxis Begleiterder verlegt, daher wurde auch ein induktiv vollverkoppelter Kabelbetriebsmittelblock mit Begleiterder modelliert. Hierbei ist zu beachten, dass die ohmsche Verkopplung des Begleiterders mit der Stationserdungsanlage im Nahbereich der ONS nicht berücksichtigt wird, wodurch die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen. Die Umsetzung des Begleiterdermodells ist im Detail in Kapitel 2.3.2.5 beschrieben.

**ONS-Block**

Der ONS-Block (siehe Abbildung 2-14) übernimmt in dem Modell die Funktion eines Knotenpunktes, in welchem MS- sowie NS-Anbindungen zusammentreffen. In den ausgewählten Simulationsszenarien wird der Fehler in ihnen (ohne Fehlerübergangswiderstand) geschaltet und die Strom- sowie Spannungsverhältnisse am Stationserdungswiderstand berechnet.



Legende:

$R_E$  ... Erdausbreitungswiderstand

Abbildung 2-14: Darstellung Ortsnetzstation ONS

Die Modellierung umfasst eine Reihe weiterer Funktionsblöcke, um in erster Linie die Auswertung bzw. die Darstellung der Berechnungsergebnisse zu optimieren. Hierzu gehören div. Blöcke zur Messung der Ströme und Spannungen, der automatisierten Generierung von Zeigerdiagrammen uvm. Aufgrund ihrer sekundären Relevanz werden sie nicht im Detail erläutert.

### 2.3.2.3 Modellierung der induktiven Verkopplung mittels Kreuzschaltung nach Clarke

Die schaltungstechnische Modellierung der Verkopplungen erfolgt mittels einer Ersatzschaltung nach dem Ansatz von Edith Clarke [5]. In Abbildung 2-15 ist dieser für zwei

miteinander induktiv verkoppelte Leiter dargestellt (siehe auch induktive Kopplung von Leiter-Erde-Schleifen in Kapitel 2.3.1.1).

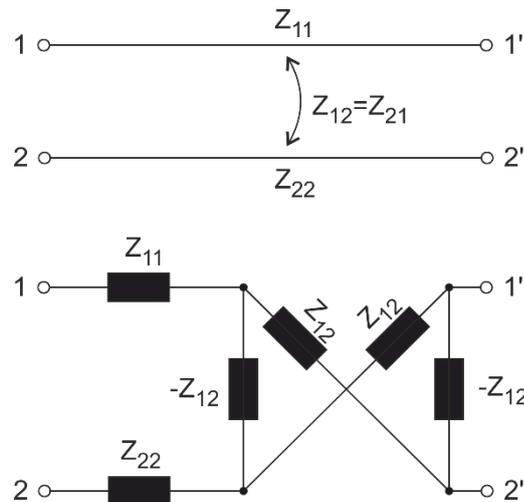


Abbildung 2-15: Kreuzschaltung nach Clarke

Wie aus Abbildung 2-15 hervorgeht, wird hierbei die Koppelimpedanz in Form einer kreuzförmigen Verschaltung realisiert. Diese Realisierungsvariante bietet bei unsymmetrischen Geometrien in Kombination mit den verwendeten Solvern rechentechnische Vorteile (siehe Dissertation Raunig C.[40], [5], [45]).

#### 2.3.2.4 Modellierung der Kabelbetriebskapazitäten

Bei der vollständigen modelltechnischen Realisierung ist hinsichtlich der Wirksamkeit der Kabelkapazitäten der Spannungsabfall entlang des Kabels berücksichtigt. Hierzu wurde im Rahmen der umgesetzten Kettenleiterstruktur für jeden gekoppelten Abschnitt (100 m) die Kapazität des Abschnittes auf zwei diskrete Kapazitätselemente am Anfang und am Ende des Elements verteilt.

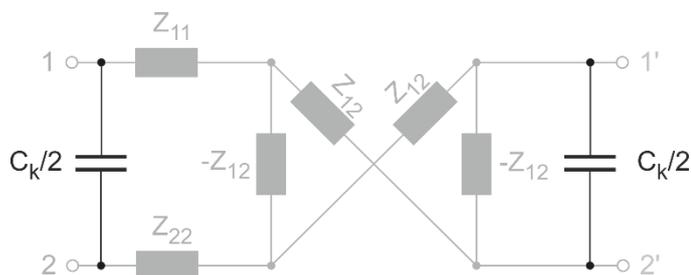


Abbildung 2-16: Übersicht, Anordnung der Kabelkapazitäten

### 2.3.2.5 Modellierung des Begleiterders

Die Modellierung des Begleiters erfolgt in Form einer PI-Ersatzschaltung. Diese beinhaltet die Längsimpedanz des Erders<sup>4</sup>.

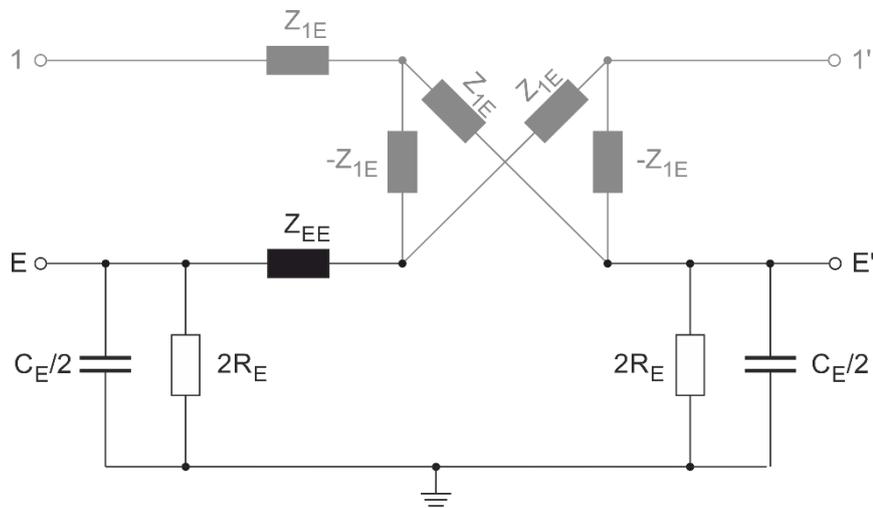


Abbildung 2-17: Modellierung des Begleiterders inkl. induktive Verkopplung zu einem weiteren Leiter

Zur Bestimmung der Querableitelemente bietet das Halbzylindermodell eines Erders die Möglichkeit, den Verlauf der Stromfäden in das Erdreich zu bestimmen. Hierbei wird angenommen, dass der Erder (rot) an der Oberfläche liegt und die Stromfäden radial vom Erder zu einer fiktiven halbzylinderförmigen Hülle (blau) verlaufen und sich dort über den Zylindermantel schließen (siehe Abbildung 2-18).

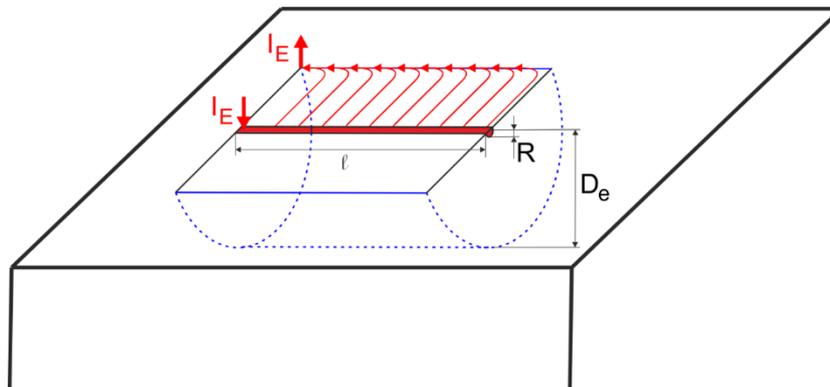


Abbildung 2-18: Halbzylindermodell eines Horizontalerders

<sup>4</sup> Im Rahmen der Simulationen wurden die Parameter für einen 4 mm x 40 mm verzinkten Stahl-Begleiterder herangezogen welcher in 20 cm Abstand zum Kabel verlegt wurde.

Für dieses Modell können die Modellkonstanten gemäß [46] wie folgt bestimmt werden:

$$R_E = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{D_e}{g}\right) \quad (\text{Gl. 2-6})$$

$$C_E = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{D_e}{R}\right)} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

$R_E$  ... Erdausbreitungswiderstand des Horizontalerders in  $\Omega$

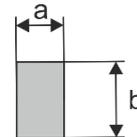
$\rho$  ... Spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega\text{m}$

$l$  ... Länge des Erders in m

$D_e$  ... Erdrückstromtiefe in m

Ersatzleiterradius f. rechteckförmigen

$g \approx 0,22353 \cdot (a + b)$  ... Querschnitt (Banderder) mit den  
 Seitenlängen „a“ und „b“ in m



$\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$  ... Permittivität des Vakuums

$\varepsilon_r$  ... relative Permittivität des Erdreichs

Die Kapazität gewinnt erst bei großen relativen Dielektrizitätskonstanten an Einfluss, sodass die Kapazität in der Luft gegenüber jener im Erdreich vernachlässigt werden kann und das Halbzylindermodell für den vorliegenden Zweck geeignet ist.

## 2.4 Modellparametersensitivitäten

### 2.4.1 Einfluss der Erdrückstromtiefe auf die berechnete Stromaufteilung im Erdschlussfall

Die Berechnung der Tiefe des fiktiven Erdrückleiters, ergibt sich wie bereits in Kapitel 2.3.1.1 angeführt zu:

$$D_e = \frac{\sqrt{2 \cdot e}}{1,7811} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}} \quad (\text{Gl. 2-8})$$

$D_e$  ... Erdrückstromtiefe in m

$\omega$  ... Kreisfrequenz in 1/s

$\mu_0$  ... Permeabilität des Vakuums in Vs/Am

$\rho$  ... spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega\text{m}$

Diese gilt, streng genommen nur für den unendlich langen Leiter ([23], 3.1-14). In der Literatur finden sich daher eine Vielzahl an weiteren Näherungsformeln für endlich lange Leiter. Tendenziell gilt für kurze Leitungslängen, dass die Erdrückstromtiefe  $D_e$  näherungsweise der Länge des Leiters  $l$  entspricht ([46], S52 ff.).

$$l \leq l_{\text{grenz}} = \sqrt{\frac{\rho}{\omega \cdot \mu_0}} \rightarrow D_e \cong l \quad (\text{Gl. 2-9})$$

Wie aus (Gl. 2-8) hervorgeht ist die Erdrückstromtiefe neben der Frequenz vom spezifischen Erdwiderstand abhängig. Für eine Netzfrequenz von 50 Hz ergibt sich die in Abbildung 2-19 dargestellte Abhängigkeit.

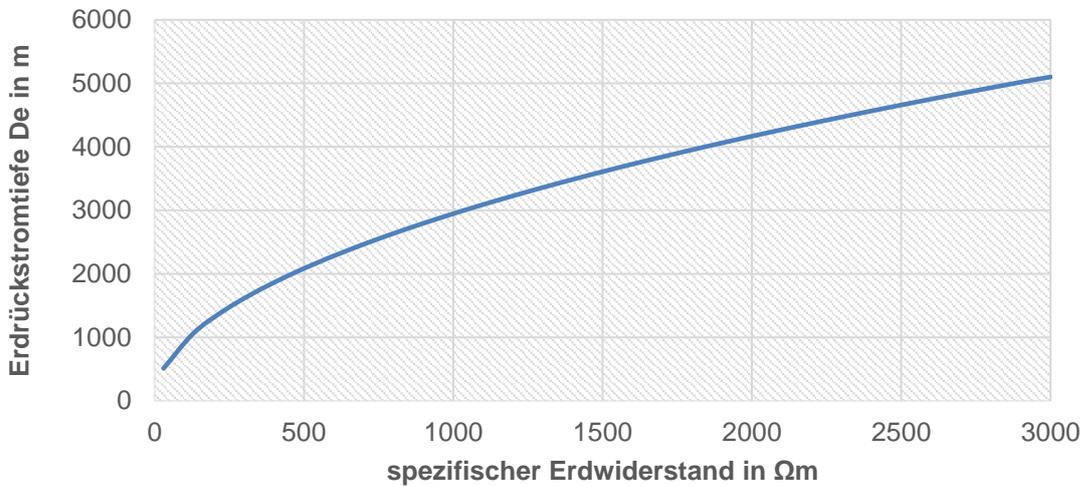


Abbildung 2-19: Erdrückstromtiefe als Funktion des spezifischen Erdwiderstandes

Die Bedeutung der Erdrückstromtiefe für den Reduktionsfaktor wird mittels Sensitivitätsanalyse anhand einer einfachen Struktur (siehe Abbildung 2-20) analysiert. Hierbei wird die Tiefe des fiktiven Erdrückleiters im Bereich von 100 m bis 1000 m sowie die Leitungslänge von 100 m bis 15 km variiert und die Auswirkung auf den Betrag des Reduktionsfaktors „r“ bestimmt.

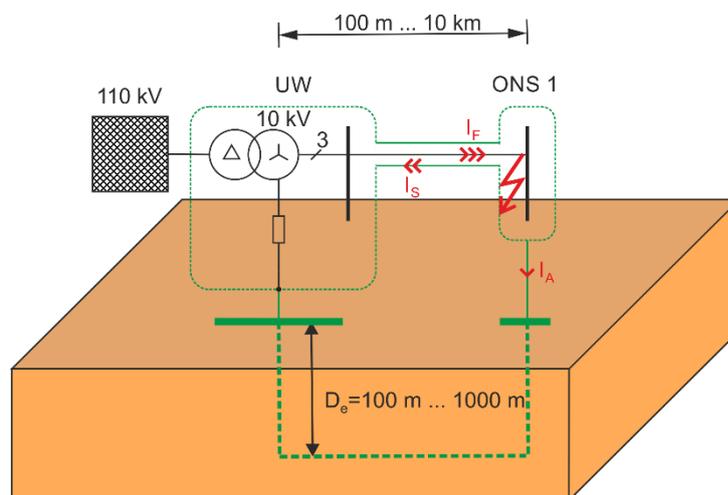


Abbildung 2-20: Übersicht Struktur für die Sensitivitätsanalyse

Abbildung 2-21 veranschaulicht die Abweichung des Reduktionsfaktors welcher wie folgt definiert wird:

$$|\Delta r| = \frac{|r(De = 932 \text{ m})| - |r(De)|}{|r(De = 932 \text{ m})|} \quad (\text{Gl. 2-10})$$

Das Ergebnis zeigt, dass die maximale Abweichung des Reduktionsfaktors auch bei ungünstiger Wahl der Tiefe des fiktiven Erdrückleiters unter 1,5 % bleibt (bezogen auf die Rückstromtiefe von 932 m). Für die weiteren Simulationen wird daher mit einer fiktiven Erdrückstromleitertiefe von 932 m gerechnet.

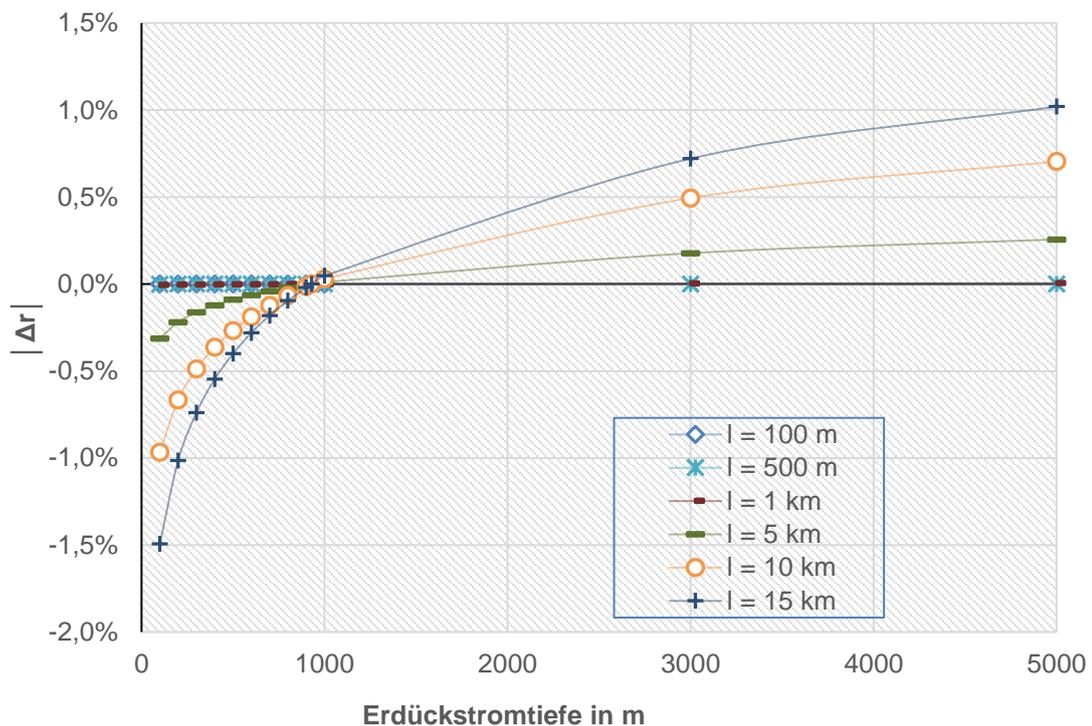
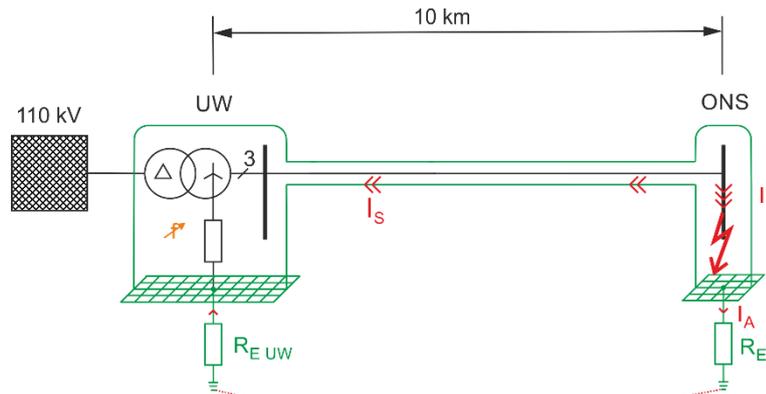


Abbildung 2-21: Einfluss der Erdrückstromtiefe auf den Reduktionsfaktor

### 2.4.2 Einfluss der Frequenz auf die berechnete Stromaufteilung im Fehlerfall

Bedingt durch nichtlineare Betriebsmittel sowie Fehlerübergangswiderstände können im Fehlerfall höherfrequente Stromanteile vorkommen. Daher soll in der der folgenden Analyse die Modellfunktionalität hinsichtlich der Frequenzabhängigkeit validiert werden.

Das in Abbildung 2-22 dargestellte Szenario besteht aus einer MS/NS-ONS welche über ein 10-kV-Mittelspannungskabel NA2XS(FL)2Y 3x240 RM/25E versorgt wird. Der Kabelschirm ist beidseitig aufgelegt und somit sind die Erdungsanlagen von UW und ONS leitend miteinander verbunden. Der Sternpunkt des 40-MVA-HS/MS-Trafos im UW ist niederohmig geerdet. Der Erdausbreitungswiderstand der ONS wurde mit  $R_E = 5 \Omega$ , der des UWs mit  $R_{E\text{ UW}} = 0,2 \Omega$  angenommen. Die Frequenz der Quellenspannung wird von 0 Hz bis 1 kHz variiert.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-22: Modellstruktur für die Analyse der Fehlerstromaufteilung abhängig von der Frequenz bei stichförmiger Netzstruktur

Die Abbildung 2-23 zeigt den Reduktionsfaktor

$$|r| = \left| \frac{I_A}{I_F} \right| \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 2-11})$$

in Abhängigkeit von der Frequenz.

Im Fall der beschriebenen Simulationsparameter fließt im einpoligen Erdschlussfall bei Gleichstrom 30 % des Fehlerstromes über die lokale Erdungsanlage der ONS, 70 % des Fehlerstromes fließt über den Kabelschirm zurück. Zu beachten ist, dass der Reduktionsfaktor mit zunehmender Frequenz abnimmt, sodass bei 250 Hz (5. Harmonische) nur zirka 7 % des Fehlerstromes über die lokale Erdungsanlage der ONS fließt.

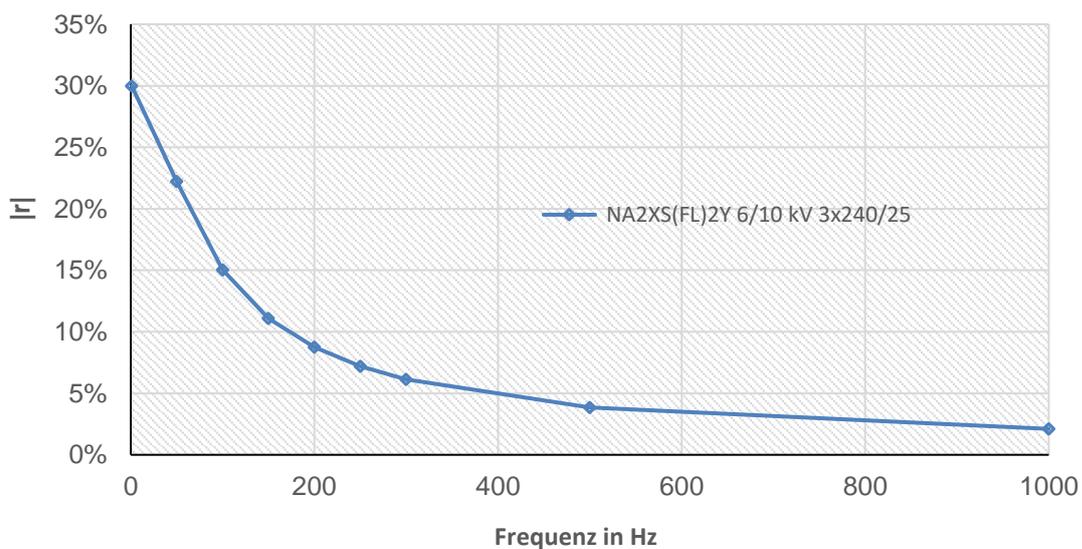


Abbildung 2-23: Betrag des Reduktionsfaktors in Abhängigkeit von der Frequenz

## 2.5 Stromaufteilung und Potentialverhältnisse im Erdschlussfall in MS-Kabel-Netzstrukturen

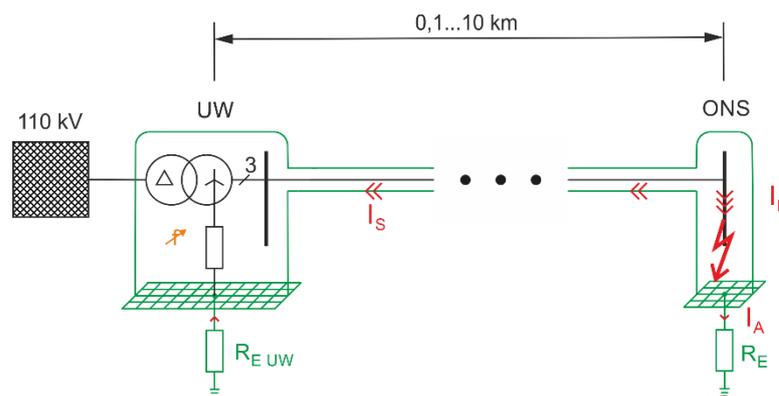
### 2.5.1 Allgemeines

Im folgenden Kapitel werden die maßgebenden Einflussparameter auf die Stromaufteilung und die Potentialverteilung (entlang von MS/NS-ONS) im Falle von Erdschlüssen in ausgewählten Mittelspannungs-Kabelnetztopologien (siehe Kapitel 2.2) analysiert. Ziel hierbei ist die Entwicklung eines grundsätzlichen Verständnisses sowohl für strahlenförmige als auch für vermaschte MS-Kabel- und Erdungssysteme im Erdschlussfall.

### 2.5.2 Einfluss der Kabellänge und des Verlegeabstandes auf die Schirmstromaufteilung einer Stickleitung

Das in Abbildung 2-24 dargestellte Szenario besteht aus einer MS/NS-ONS, welche über ein 10-kV-Mittelspannungskabel NA2XS(FL)2Y 3x240 RM/25E von einem UW versorgt wird. Der Kabelschirm ist beidseitig geerdet und somit sind die Erdungsanlagen von UW und ONS leitend miteinander verbunden. Der Sternpunkt des 110/10-kV-Trafos im UW ist niederohmig geerdet und der Sternpunktswiderstand so gewählt, dass der Fehlerstrom im einpoligen Erdschlussfall (ohne Übergangswiderstand) im 1-kA-Bereich (abhängig von der Kabellänge) liegt. Der Erdausbreitungswiderstand des UWs wurde mit  $R_{E\ UW} = 0,2\ \Omega$ , der der ONS mit  $R_E = 5\ \Omega$  angenommen.

Ziel des Szenarios ist die Darstellung der Stromaufteilung im Erdschlussfall auf die Erdungsanlagen und den Kabelschirmen abhängig von der Kabellänge sowie der Anordnung der Leiter (Geometrie und Leiterabstand).



Anmerkung:  
Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-24: Modellstruktur für die Analyse der Fehlerstromaufteilung, abhängig von der Leiteranordnung (Abstand, Anordnung) und der Kabellänge bei stichförmiger Netzstruktur

Abhängig von der Kabellänge sowie dem Leiterabstand ergibt sich in der dargestellten Konfiguration, dass im einpoligen Erdschlussfall  $< 1\%$  bis  $36\%$  des Fehlerstromes über die



Lokale ONS-Erdungsanlage ins Erdreich abgeleitet werden und der restliche Fehlerstromanteil über die Kabelschirme zurück zum speisenden Trafo fließt.

Aus der Abbildung 2-25 können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Bedingt durch die induktive Kopplung fließt im Schirm des fehlerstromführenden Leiters der größte Anteil des Fehlerstromes zurück zur Quelle.
2. Mit zunehmender Kabellänge nimmt der Fehlerstromanteil, welcher über die drei Schirme fließt, aufgrund der steigenden Längsimpedanz ab.
3. Bei dreieckförmiger Anordnung (symmetrischer Geometrie bzw. Koppelwirkungen) unterscheiden sich die Schirmrückströme der Phasen L2 und L3 ab einer Kabellänge von 5 km wesentlich.

**Anmerkung:** Durch die Spannungsunsymmetrie ergeben sich unterschiedlich hohe kapazitive Ladeströme, wodurch die in Abbildung 2-25 dargestellten Schirmstromamplituden (geometrische Summe aus Fehlerstromanteil und kapazitivem Ladestrom) unterschiedlich ausfallen. Da mit zunehmender Kabellänge der kapazitive Strom steigt, während der Summenfehlerstrom sinkt, nimmt der Effekt mit zunehmender Leitungslänge zu.

4. Bei einer ebenen Anordnung ergeben sich, zusätzlich zu dem im Pkt. 3 beschrieben Effekt, bedingt durch die unterschiedliche induktive Kopplung zwischen den Leitern, auch bei kurzen Kabellängen Unterschiede in der Rückstromaufteilung der einzelnen Schirme.

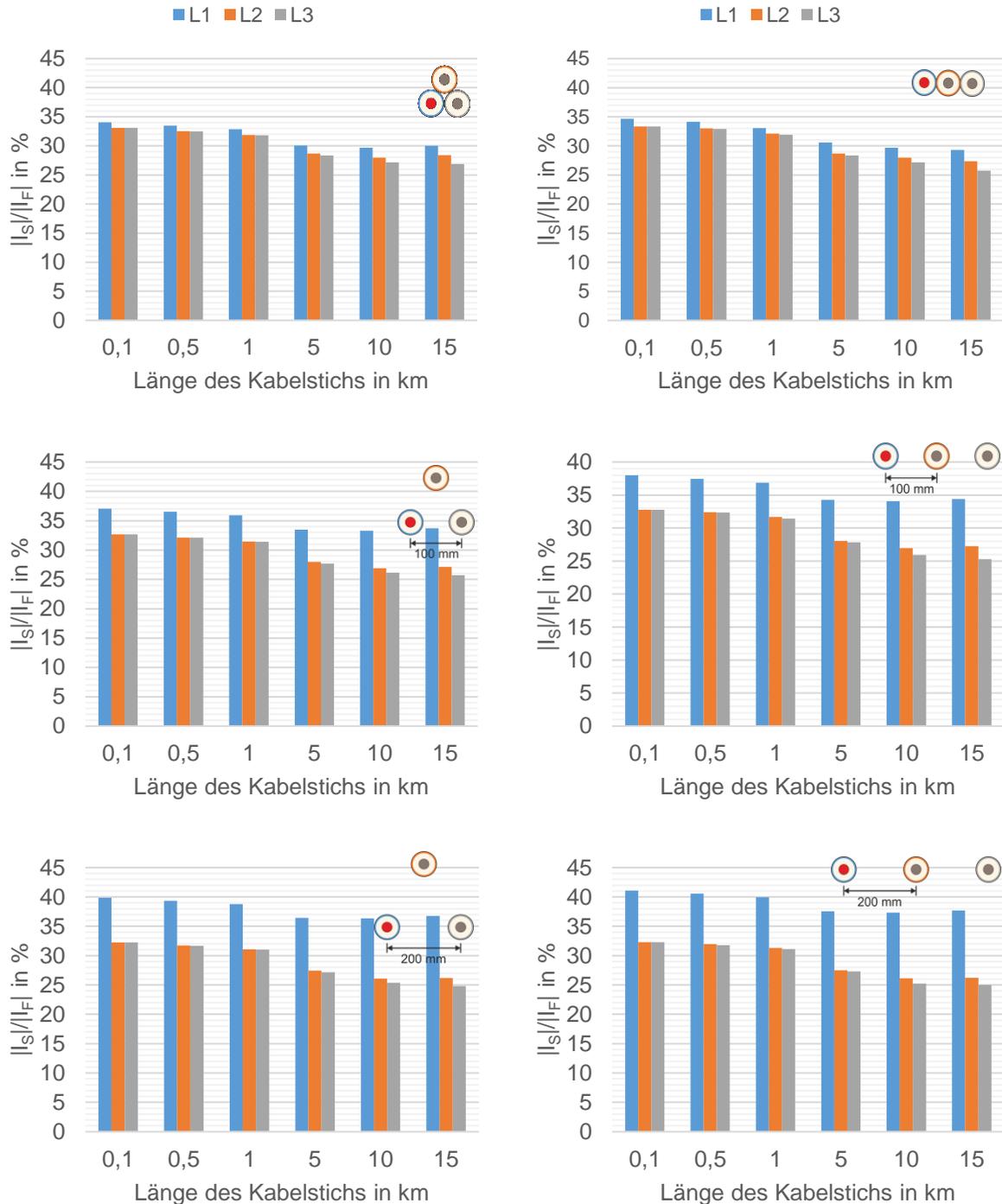


Abbildung 2-25: Darstellung der Schirmstromaufteilung abhängig von der Leiteranordnung sowie der Leiterlänge im einpoligen Erdschlussfall, fehlerstromführende Phase in **ROT** dargestellt, Bezugsstrom entspricht dem jeweiligen Gesamtfehlerstrom

### 2.5.3 Einfluss der Spannungsebene sowie des Schirmquerschnittes auf den Reduktionsfaktor einer Stichleitung

Das in Abbildung 2-24 dargestellte Szenario ist ident mit jenem aus Kapitel 2.5.2.

Ziel des Szenarios ist die Darstellung des Kabelschirm-Reduktionsfaktors abhängig vom Kabeltyp (somit Unterschiede in der Geometrie), der Spannungsebene (10 kV, 20 kV) sowie der Kabellänge.

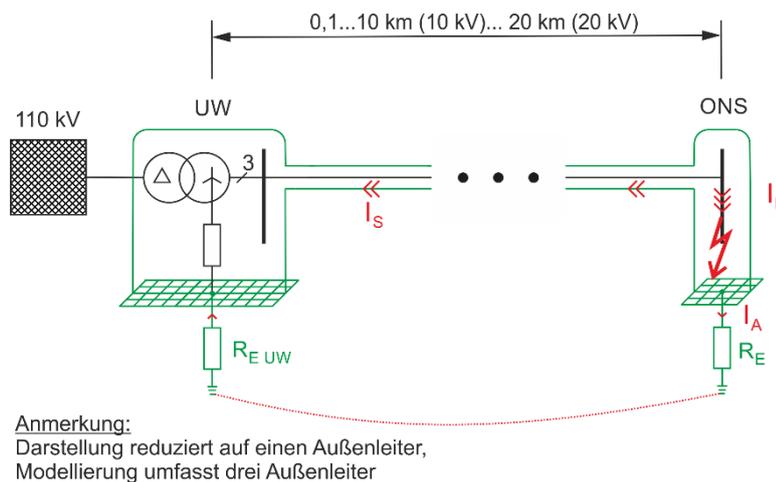


Abbildung 2-26: Modellstruktur für die Analyse der Fehlerstromaufteilung abhängig von der Spannungsebene, dem Kabeltyp sowie der Kabellänge bei stichförmiger Netzstruktur

Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich für 10-kV-Kabel die in Abbildung 2-27, für 20-kV-Kabel die in Abbildung 2-28 dargestellten komplexen Reduktionsfaktoren (Kabel im Dreieck angeordnet). Wie die Ergebnisse zeigen, sind die Reduktionsfaktoren in erster Linie von der Kabellänge sowie vom Schirmquerschnitt abhängig (bei konstanten Erdausbreitungswiderständen und Außenleiterabständen). Unterschiedliche Phasenleiterquerschnitte bzw. Phasenleitermaterialien (Aluminium, Kupfer) führen zwar, bedingt durch Änderung der Längsimpedanz, zu einer Beeinflussung des Fehlerstromes, jedoch nicht zu einer relativen Änderung der Rückstromhöhe über die Kabelschirme.

Auch der Einfluss der Spannungsebene (stärkere Isolationsschicht und somit Änderung der Impedanzen) ist zu vernachlässigen (vergl. Abbildung 2-27 und Abbildung 2-28).

Unter den angenommenen Simulationsszenarien ergibt sich somit ein maximaler Reduktionsfaktor von ca. 39 % (Worst Case hinsichtlich Potentialverhältnisse im 1-poligen Erdschlussfall).

**Anmerkung:** Die in den folgenden Abbildungen dargestellten Winkelverläufe sind auf die Quellenspannung bezogen. Ein Winkel von 180° kennzeichnet gemäß den im Modell gewählten Zählpfeilrichtungen einen Strom welcher Richtung Quelle fließt.

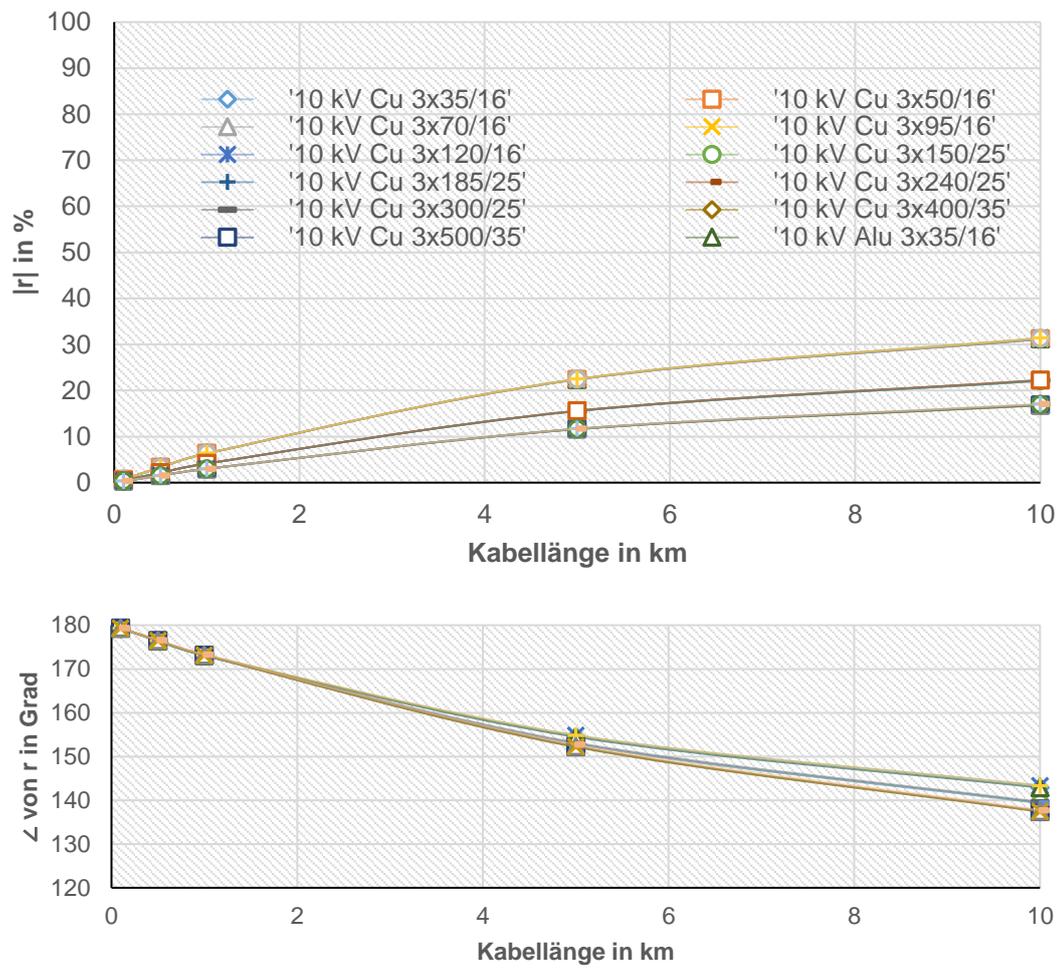


Abbildung 2-27: Darstellung des Reduktionsfaktors eines 10-kV-Kabels aufgeteilt in Betrag (oben) und Winkel (unten)

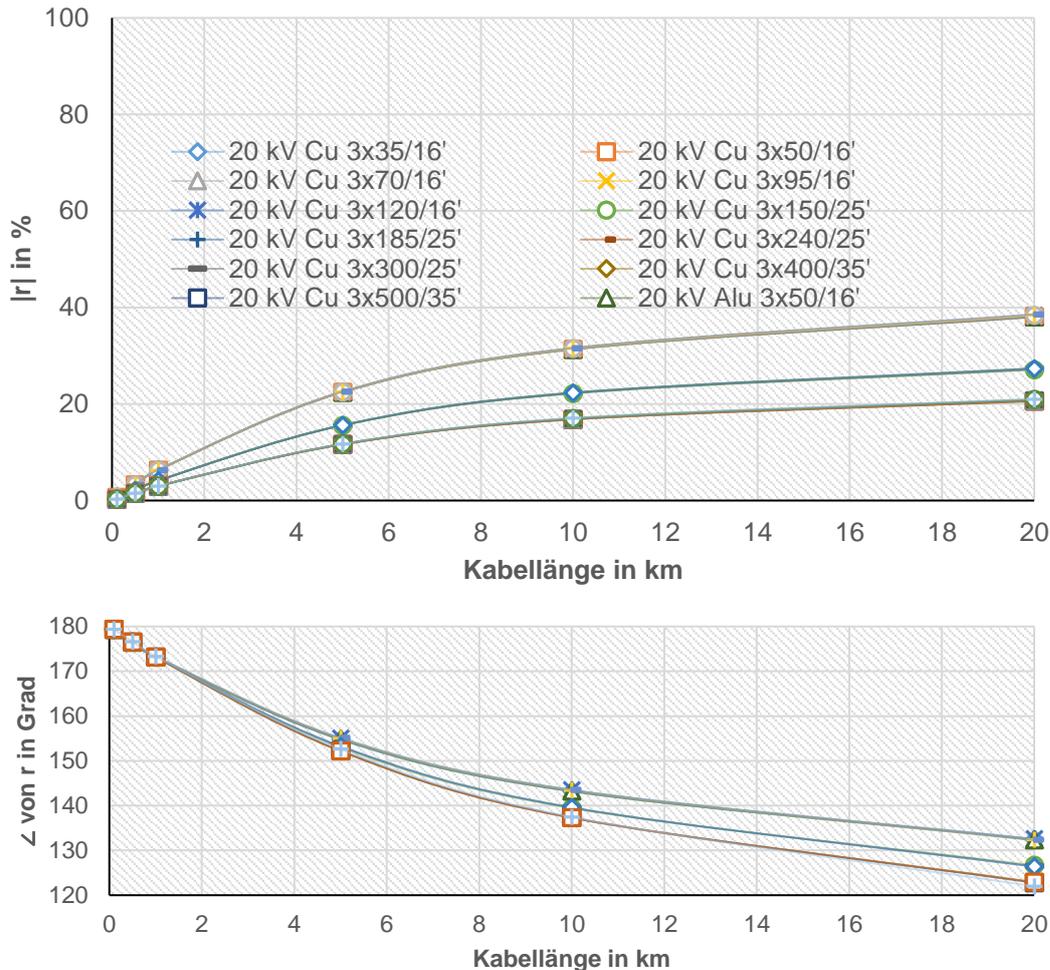


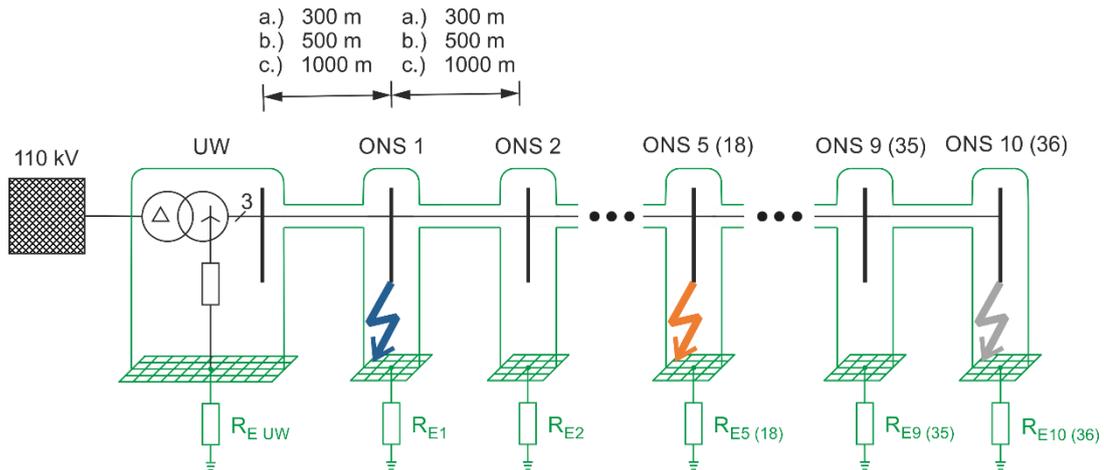
Abbildung 2-28: Darstellung des Reduktionsfaktors eines 20-kV-Kabels aufgeteilt in Betrag (oben) und Winkel (unten)

### 2.5.4 Einfluss des Fehlerortes und des Stationsabstandes auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Sticheitung

Ausgehend von einer stichförmigen Kabelnetzstruktur (siehe Abbildung 2-29) soll im Folgenden der Einfluss des Fehlerortes (Erdschluss in einer ONS) sowie des Stationsabstandes auf die Potentialverteilung entlang den ONS des Stiches analysiert werden. Hierzu wird im Rahmen einer Fallstudie ein niederohmiger Fehler einmal am Anfang (blau), in der Mitte (orange) und am Ende (grau) der Leitung bei unterschiedlichen Stichanordnungen angenommen:

- **Anordnung 1:** Stich bestehend aus 10 ONS (ONS Abstände 300 m, 500 m und 1 km)
- **Anordnung 2:** Stich bestehend aus 36 ONS (ONS Abstände 300 m)

Der Sternpunktswiderstand des 110/10-kV-Transformators gewählt, dass sich im 1-pol-Erdschlussfall in der ONS 10 (Anordnung 1) bzw. ONS 36 (Anordnung 2) ein Fehlerstrom von ca. 1 kA einstellt.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-29: Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  abhängig vom Ortsnetzstationsabstand und Fehlerort bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \text{ } \Omega$ ,  $R_E = 5 \text{ } \Omega$  (f. alle ONS ident)

### Ergebnisse Anordnung 1 (10 ONS):

- Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass ein Großteil des Fehlerstromes direkt über die Kabelschirme zurück zur Quelle fließt.
- Unter den angenommenen Szenarien ergibt sich bei einem ONS Abstand von 300 m und einem Schirmquerschnitt von  $3 \times 25 \text{ mm}^2$ , dass bei einem Erdschluss ( $I_F = 1 \text{ kA}$ ) in der ONS 10, ca. **94 %** des Fehlerstromes direkt über den Kabelschirm zurückfließt.
- Wird der Schirmquerschnitt auf  $3 \times 35 \text{ mm}^2$  erhöht so ergibt sich bei einem ONS Abstand von 300 m unter dem angenommenen Szenario, dass bei einem Erdschluss ( $I_F = 1,1 \text{ kA}$ ) in der ONS 10, ca. **97 %** des Fehlerstromes direkt über den Kabelschirm zurückfließt.

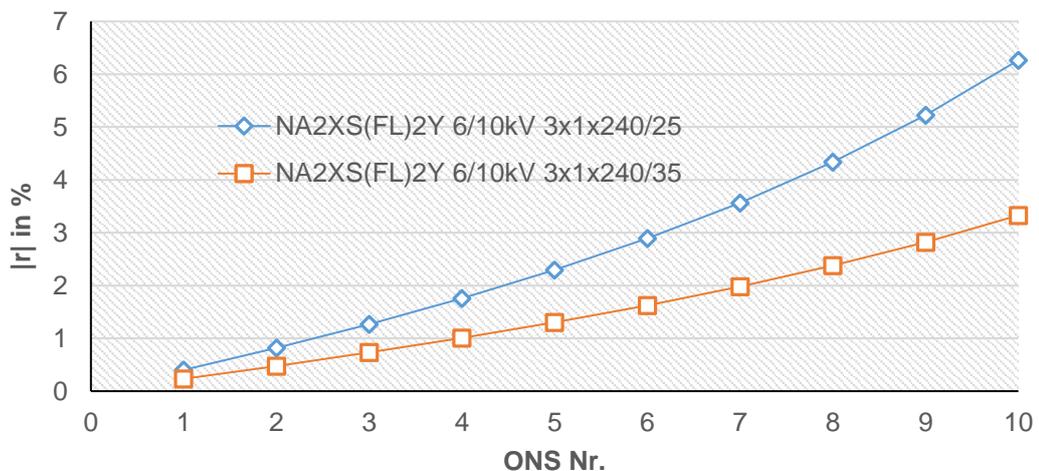


Abbildung 2-30: Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Kabelschirmquerschnitt und dem Fehlerort, Stationsabstand 300 m,  $3 \times 25 \text{ mm}^2$  Schirm (blau),  $3 \times 35 \text{ mm}^2$  Schirm (orange)

Wird der Abstand zwischen den Stationen vergrößert, so ergeben sich abhängig vom Fehlerort die in Abbildung 2-31 dargestellten Reduktionsfaktoren. Da mit zunehmendem Stationsabstand die Längsimpedanz immer größer wird, ergibt sich ein Impedanzverhältnis welches mit zunehmendem Abstand des Fehlerortes zu einer entsprechenden Vergrößerung des Reduktionsfaktors führt.

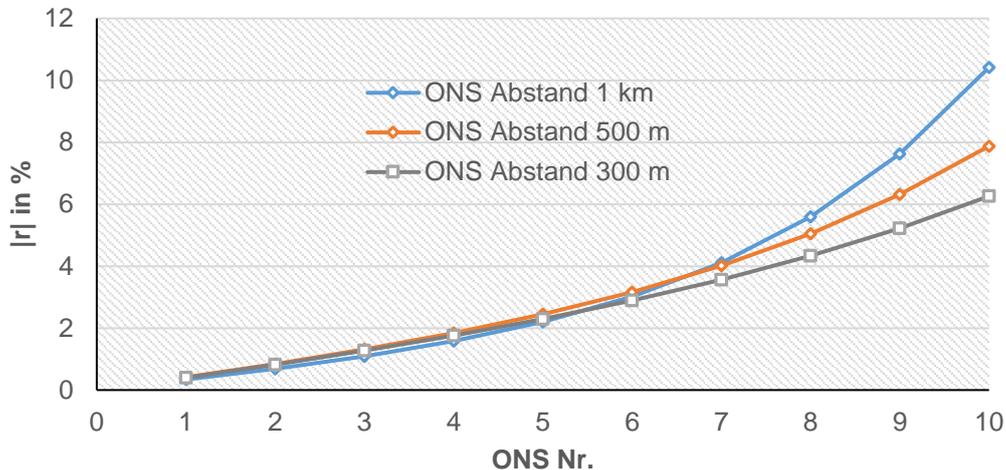


Abbildung 2-31: Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Ortsnetzstationen

Die Ergebnisse der Berechnungen (siehe Abbildung 2-30 und Abbildung 2-31) zeigen, dass unter den angenommenen Rahmenbedingungen auch bei Stationsabständen von einem Kilometer ca. 90 % des Fehlerstromes zurück über den Schirm zur Quelle fließen und somit nur ein geringer Teil des Fehlerstromes über den Stationserder ins Erdreich fließt

Die Aufteilung der Erdfehlerströme sowie der Erdungsspannungen je Station, bei einem ONS Abstand von 300 m (Anordnung 1), sind in Abbildung 2-32 dargestellt. Je geringer der Abstand zwischen Quelle und Fehlerort umso günstiger die Situation hinsichtlich der Stationspotentiale da in diesen Fällen nur ein kleiner Teil des Fehlerstroms in die Erdungsanlage abfließen. Entsprechend stellt ein Fehler am Ende des Kabelstiches das Worst-Case-Szenario dar.

Betrachtet man die Entwicklung der Erdungsspannung entlang der ONS zwischen UW und Fehlerort so ergibt sich ein nahezu linearer Anstieg der Spannung, dieses Verhalten besteht solange die Querimpedanzen (erderwirksame Strukturen) deutlich größer als die wirksamen Längsimpedanzen (inkl. induktiven Kopplung) sind. Der Verlauf der Erdungsspannungen jener ONS welche hinter der erdschlussbehafteten Station liegen nehmen entsprechend einem exponentiellen Verlauf ab (weitere Betrachtungen siehe auch Kapitel 2.8)

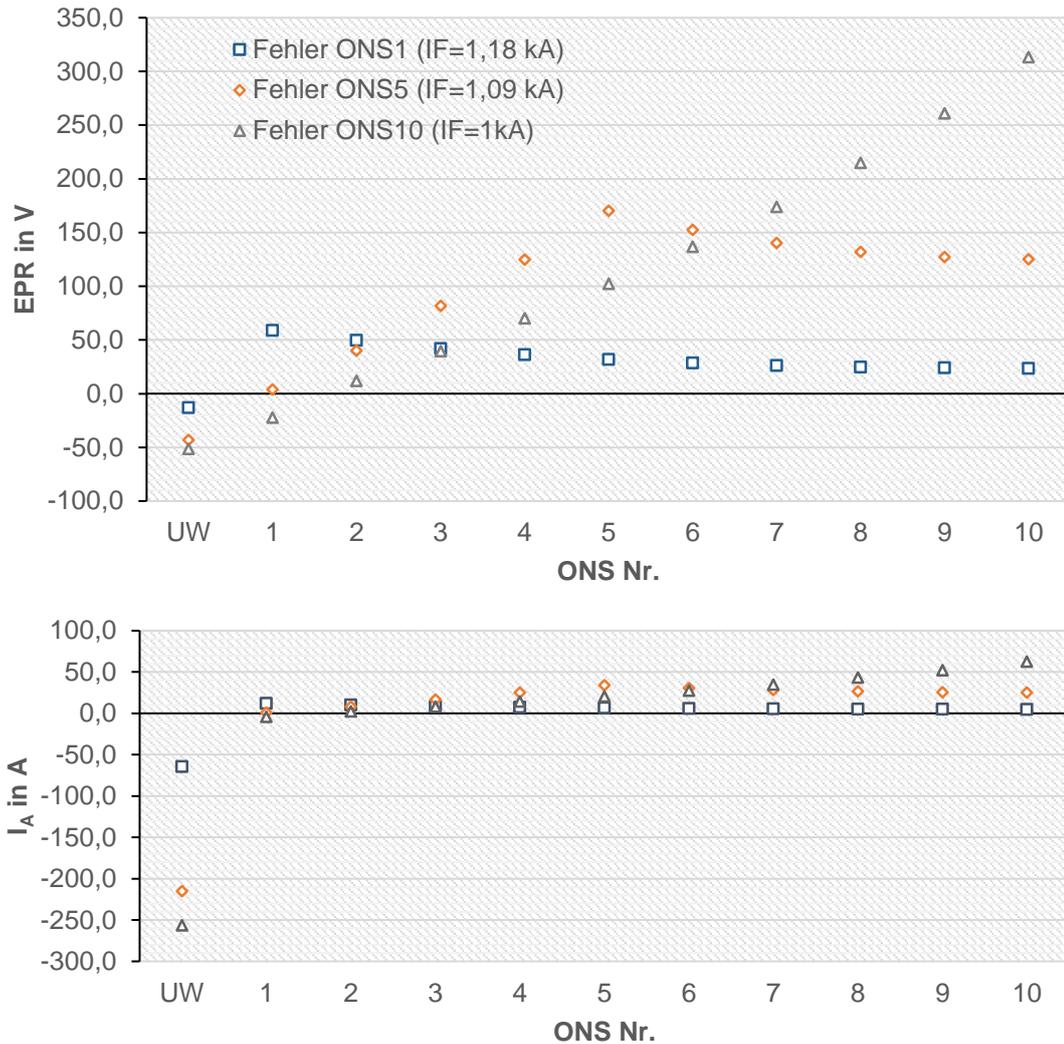


Abbildung 2-32: Erdungsspannungen<sup>5</sup> EPR (oben) und Anlagenerdungsströme I<sub>A</sub> (unten) je Station in Abhängigkeit vom Fehlerort bei stichförmiger Netzstruktur (Anordnung 1), I<sub>F</sub> = 1kA (bei Fehler in ONS 10)

Der Einfluss des Abstandes zwischen den Stationen auf die Erdungsspannungen für unterschiedliche Fehlerorte ist in Abbildung 2-33 dargestellt. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist der Zusammenhang zwischen der Zunahme der Erdungsspannungen, abhängig vom Abstand der Stationen, nicht linear. Besonders ausgeprägt ist dieser Zusammenhang bei Erdschlüssen in jenen ONS welche weit entfernt vom UW liegen (siehe Abbildung 2-29, Erdschluss in ONS 10).

<sup>5</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

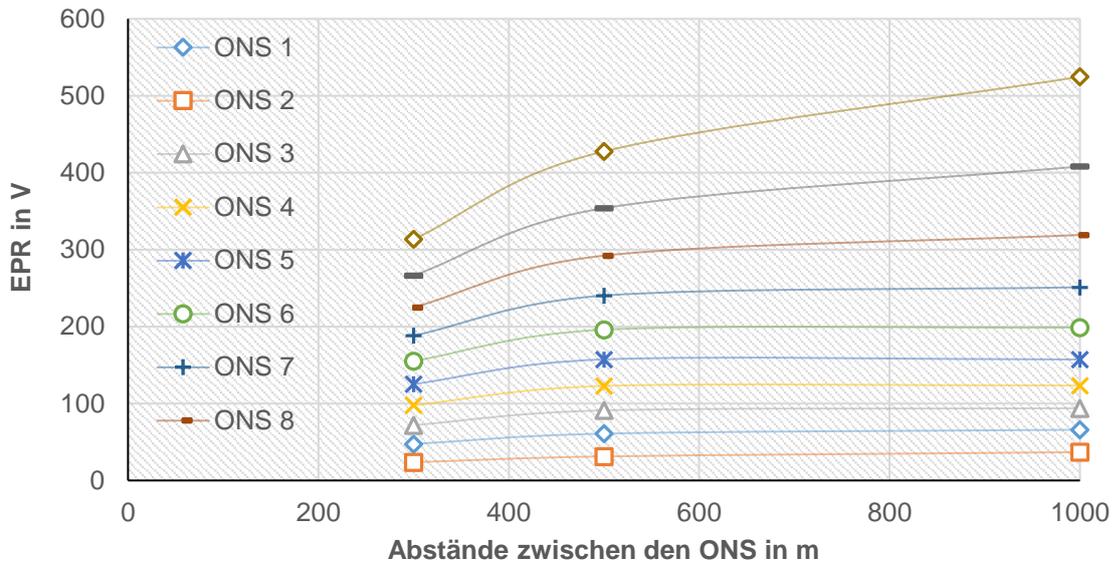


Abbildung 2-33: Erdungsspannungen EPR je Station in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Ortsnetzstationen ONS für unterschiedliche Fehlerorte

Analysiert man zusätzlich die Winkel des jeweiligen Stationspotentials so ergibt sich zum Beispiel bei einem Erdschluss in ONS 5 die in Abbildung 2-34 dargestellten Zeiger für die Stationspotentiale. Dieser Umstand ist speziell bei Messungen in verteilten Erdungssystemen zu berücksichtigen, wenn es darum geht, den ungünstigsten Fall hinsichtlich EPR sowie die Stromverteilungen stationsübergreifend zu erfassen und verdeutlicht die Notwendigkeit der zeitlichen Synchronisation örtlich verteilter Messsysteme.

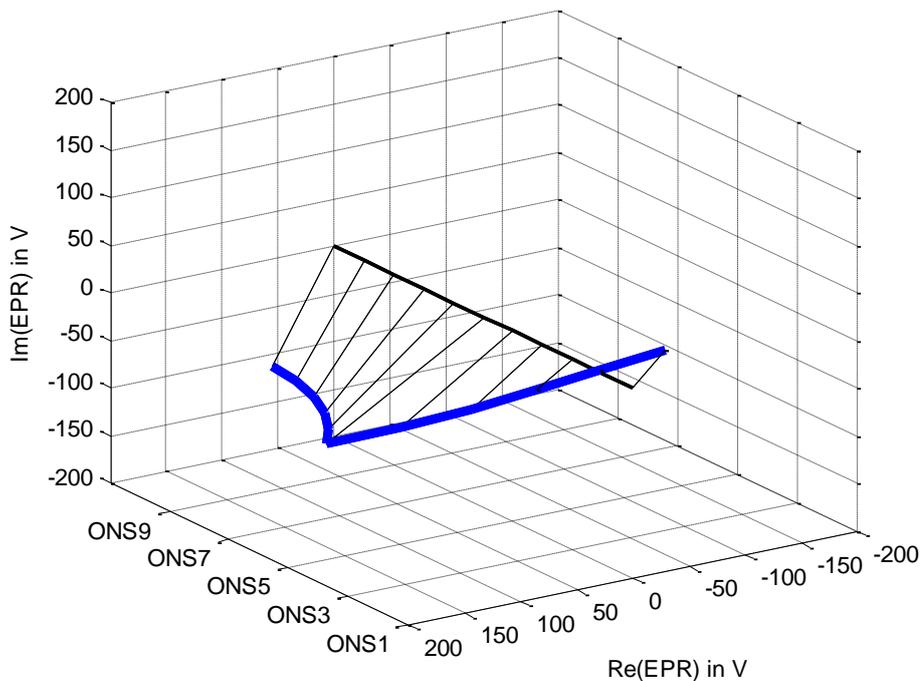


Abbildung 2-34: Erdungsspannungen EPR je ONS im Erdschlussfall als Funktion von Ort und Winkel, Fehlerort ONS 5,  $I_F = 1 \text{ kA}$

### Ergebnisse Anordnung 2 (36 ONS):

Die Aufteilung der Erdfehlerströme sowie der Erdungsspannungen je Station, bei einem ONS Abstand von 300 m (Anordnung 2), sind in Abbildung 2-35 dargestellt. Der Vergleich der Entwicklung der Erdungsspannung aus Anordnung 1 (siehe Abbildung 2-32) mit den Ergebnissen aus Anordnung 2 (Abbildung 2-35) verdeutlicht, dass mit zunehmender ONS Anzahl (und Entfernung) zwischen UW und Fehlerort der Anstieg der Erdungsspannungen sich immer weniger linear verhält. Im Verlauf der Erdungsspannungen jener ONS, welche hinter der erdschlussbehafteten Station liegt, ist der Effekt besonders ausgeprägt. Der Grund hierfür liegt wie bereits in den Simulationsergebnissen der Anordnung 1 erläutert wurde, im Verhältnis der wirksamen Längs- zu Querimpedanzen des im Vergleich zu Anordnung 1 deutlich ausgedehnten Kettenleiters.

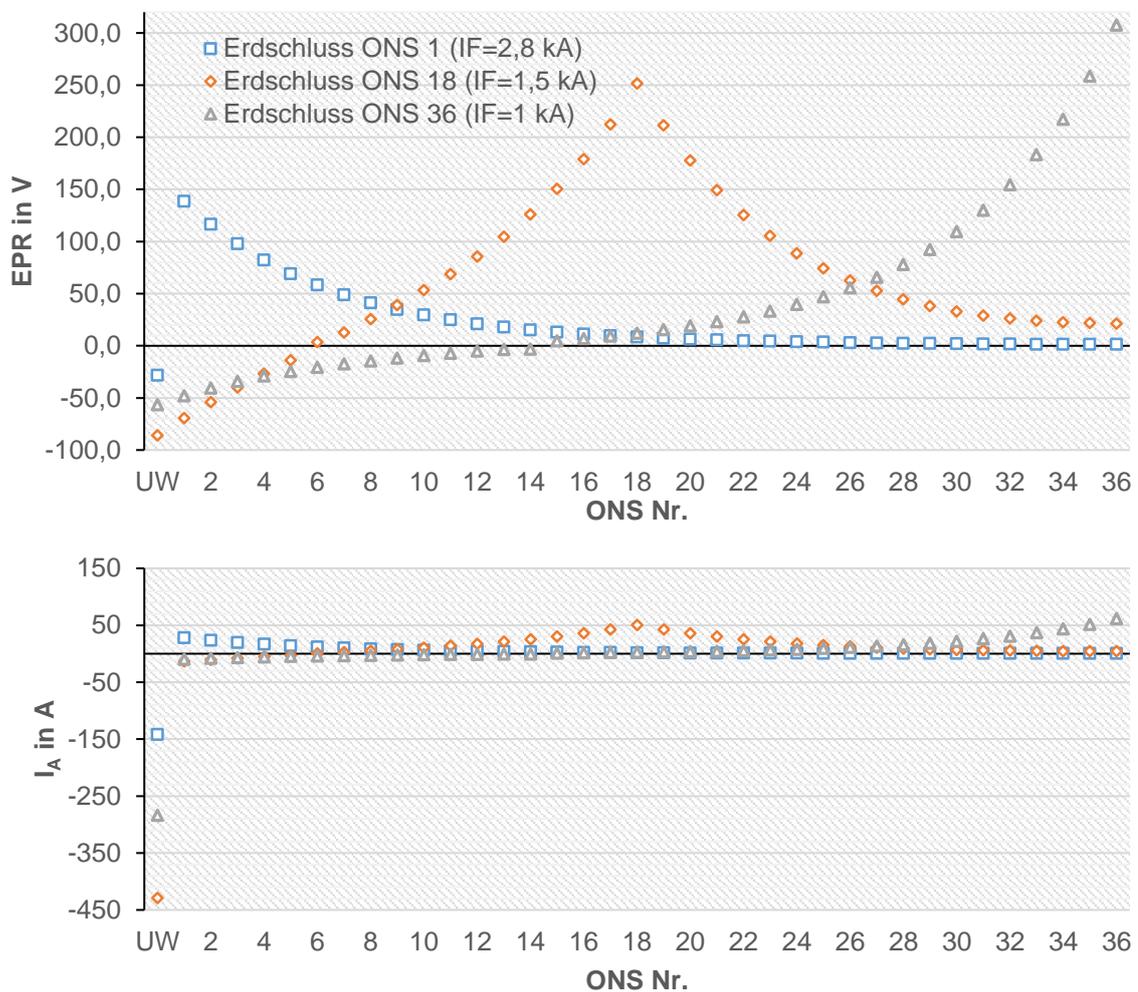


Abbildung 2-35: Erdungsspannungen<sup>6</sup> EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je Station in Abhängigkeit vom Fehlerort bei stichförmiger Netzstruktur (Anordnung 1),  $I_F = 1\text{ kA}$  (Fehler in ONS 10)

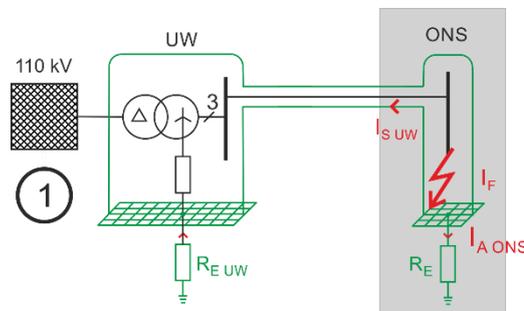
<sup>6</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

## 2.5.5 Einfluss der Anzahl an MS-Abgängen und deren Anbindung an das UW auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stichleitung

Im Folgenden wird der Einfluss der MS-Kabelabgangszahl auf die Schirmstromaufteilung sowie die Potentialverteilung der erdschlussbehafteten Ortsnetzstation analysiert. Der Sternpunktswiderstand des 110/10-kV-Transformators ist so gewählt, dass sich im Erdschlussfall in der ONS ein Fehlerstrom von 1 kA einstellt. Für die Analyse werden folgende Modellstrukturen verglichen:

### Modellstruktur Variante 1 (siehe Abbildung 2-36):

Diese Modellstruktur bildet die Basis der Analysen in denen die ONS in Form eines Kabelstiches versorgt wird. Der Fehlerstrom fließt im Erdschlussfall über die Kabelschirme und den lokalen Anlagenerder der Station zurück zur Quelle.

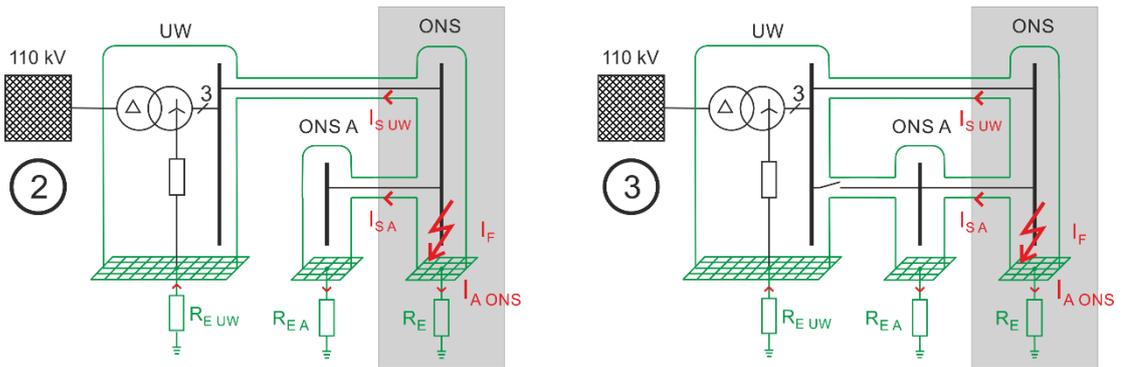


Anmerkung:  
Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-36: Modellstruktur Variante 1 für die Analyse des Einflusses der MS-Abgangszahl auf Erdungsspannung EPR und die Schirmströme  $I_S$  bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

### Modellstruktur Variante 2 und Variante 3 (siehe Abbildung 2-37):

Bei diesen Modellstrukturen verfügt die erdschlussbehaftete ONS neben dem speisenden MS-Kabelabgang über einen weiteren MS-Kabelabgang welcher die ONS A speist. Der Unterschied zwischen Variante 2 und Variante 3 liegt darin, dass in der Variante 3 die Möglichkeit eines Ringschlusses über ONS A besteht. Der Fehlerstrom in Variante 3 kann somit sowohl über die Anlagenerder der Ortsnetzstationen (ONS, ONS A), die MS-Kabelschirme der Speiseleitung als auch über die MS-Kabelschirme der zweiten Ringhälfte über ONS A zurück zum UW fließen.

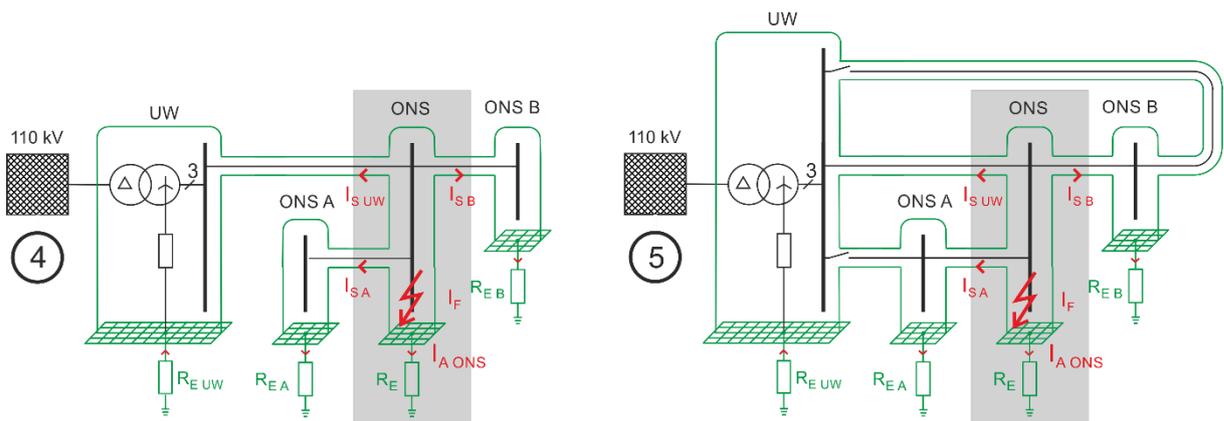


Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-37: Modellstruktur Variante 2 (links) und Variante 3 (rechts) für die Analyse des Einflusses der MS-Abgangsanzahl auf Erdungsspannung EPR und die Schirmströme  $I_s$  bei stichförmiger oder mit offenem Ring betriebener Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Modellstruktur Variante 4 und Variante 5 (siehe Abbildung 2-38):

Bei diesen Modellstrukturen verfügt die erdschlussbehaftete ONS im Vergleich zu den Varianten 4 und 5 über einen weiteren MS-Kabelabgang. Für die Fehlerstromaufteilung gilt somit sinngemäß die Beschreibung der Varianten 3 und 4.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-38: Modellstruktur Variante 4 (links) und Variante 5 (rechts) für die Analyse des Einflusses der MS-Abgangsanzahl auf Erdungsspannung EPR und die Schirmströme  $I_s$  bei stichförmiger oder mit offenem Ring betriebener Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Modellstruktur Variante 6 und Variante 7 (siehe Abbildung 2-38):

Bei diesen Modellstrukturen verfügt die erdschlussbehaftete ONS im Vergleich zu den Varianten sechs und sieben über einen weiteren MS-Kabelabgang. Für die Fehlerstromaufteilung gilt somit sinngemäß die Beschreibung der Varianten fünf und sechs.

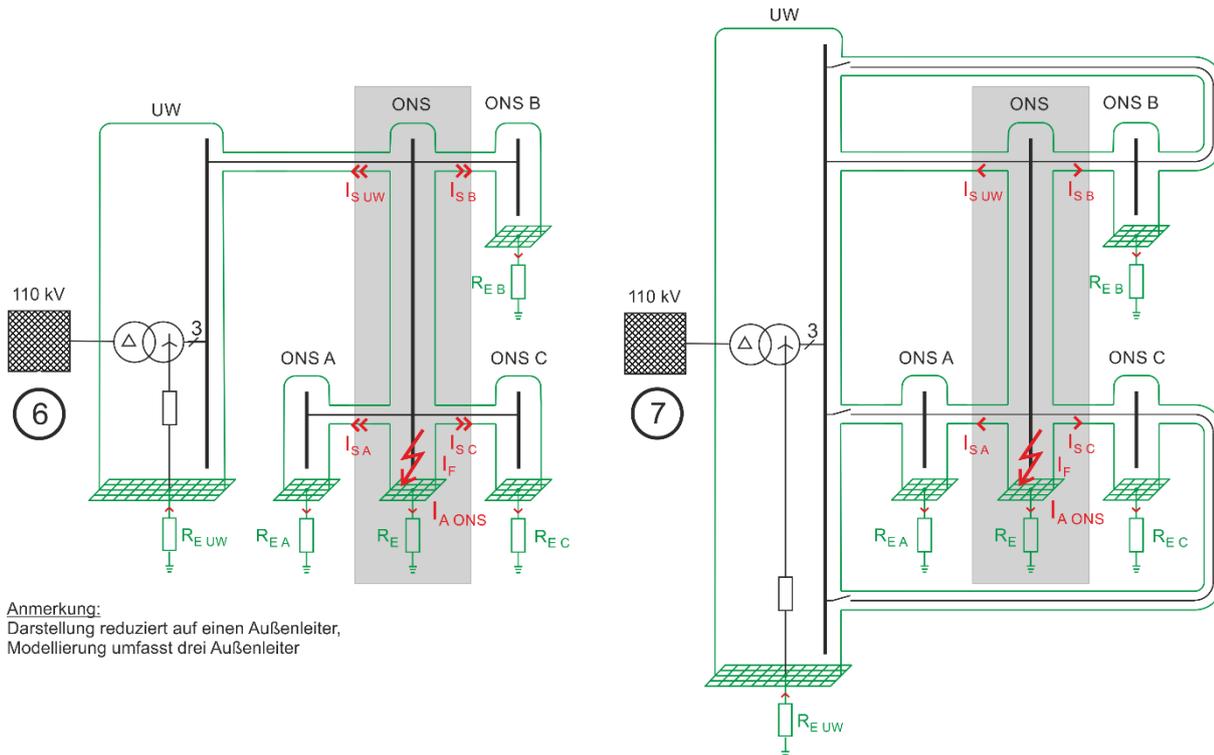


Abbildung 2-39: Modellstruktur Variante 6 (links) und Variante 7 (rechts) für die Analyse des Einflusses der MS-Abgangsanzahl auf Erdungsspannung EPR und die Schirmströme  $I_S$  stichförmiger oder mit offenem Ring betriebener Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Die Abbildung 2-40 zeigt die Schirmströme, welche über die Kabelschirme der ONS im Erdschlussfall abfließen. Die Berechnungen wurden für einen Abstand zwischen den Ortsnetzstationen von 300 m und 2 km durchgeführt, um den Einfluss der Kabellängsimpedanzen zu untersuchen. Wie aus den Abbildungen (siehe Abbildung 2-40 und Abbildung 2-41) hervorgeht, führt die Erhöhung der Kabellänge tendenziell immer zu einem Rückgang der Schirmströme und somit zu einem Anstieg der Erdungsspannung in der erdschlussbehafteten ONS.

Der Vergleich zwischen den Varianten 2 und 3, 4 und 5 sowie 6 und 7 verdeutlicht jeweils den Einfluss von Ringstrukturen. Der sich bei Ringstrukturen ergebende zusätzlich Fehlerstromrückpfad zur Quelle im UW führt bei den untersuchten Modellstrukturen zu einer Erhöhung der Schirmströme um zirka den Faktor zwei. Hierbei ist zu beachten, dass die Schirmströme je Abgang (Richtung ONS A, B und C) im Vergleich zum Schirmstromanteil welcher über das speisende Kabel zurück zur Quelle fließt, abhängig von der Modellstrukturvariante, bezogen auf den Effektivwert des Fehlerstromes, unter 16 % beträgt. Der Grund hierfür liegt in der induktiven Koppelwirkung zwischen fehlerstromführendem Außenleiter und den Schirmen des Kabels.

Der Vergleich zwischen den Varianten 2, 4, 6 und 3, 4, 7 verdeutlicht den Einfluss der MS-Kabelabgangsanzahl auf die Schirmstromaufteilung. Betrachtet man den Schirmstrom

Richtung ONS A (siehe Abbildung 2-40, links unten) so ist zu erkennen, dass sich bei den Modellvarianten ohne Ringschluss nur eine geringe Schirmstromreduzierung von zirka 12 % (Variante zwei vs. sechs, Stationsabstand 2 km) für den Abhang ergibt. Bei vorhandenem Ringschluss (des beidseitig aufgelegten Kabelschirms) ergibt sich mit ca. 50 % eine deutlich größere Schirmstromreduktionswirkung für den Abgang Richtung ONS A. Der Grund hierfür liegt darin, da der Längswiderstand der Kabelschirme in den gezeigten Modellvarianten deutlich kleiner als die Ausbreitungswiderstände der Anlagenerder der ONS sind und durch die Parallelschaltung somit deutlich wirksamer sind (mehr vom Fehlerstrom übernehmen).

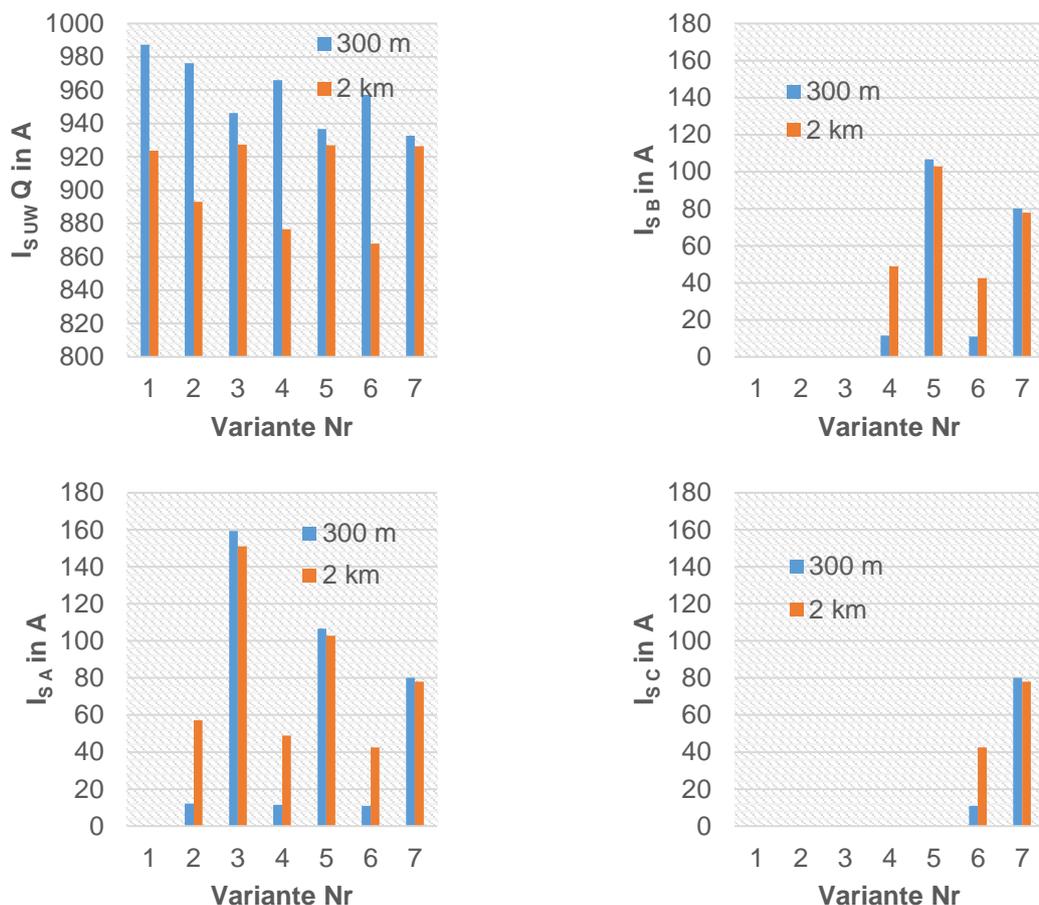


Abbildung 2-40: Von ONS abgehende Schirmströme<sup>7</sup>  $I_s$  im Erdschlussfall in Abhängigkeit von der Anzahl an MS-Kabelabgängen und dessen weiteren Anbindung sowie der Abständen zwischen den Ortsnetzstationen  $I_F = 1 \text{ kA}$

Die Auswirkung der unterschiedlichen Modellstrukturvarianten auf die Erdungsspannung der Fehlerbehafteten ONS ist in Abbildung 2-41 dargestellt. Der Vergleich der Variante 1 (ein zusätzlicher MS-Kabelabgang ohne Ringschluss) mit der Variante 7 (drei zusätzliche MS-

<sup>7</sup> Darstellung beinhaltet nur die Effektivwerte ohne Winkel, daher kann die Stromsumme größer 100% sein, die Darstellung soll primär die Unterschiede in Abhängigkeit von der Variante verdeutlichen.

Kabelabgänge mit Ringschluss) ergibt hierbei eine Reduktion der Erdungsspannung um einen Faktor von ca.3,6.

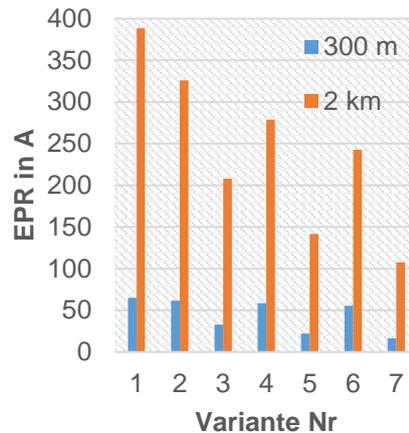


Abbildung 2-41: Erdungsspannungen in ONS in Abhängigkeit von der Anzahl an MS-Kabelabgängen und deren weiteren Anbindung sowie der Abständen zwischen den Ortsnetzstationen,  $I_F = 1 \text{ kA}$

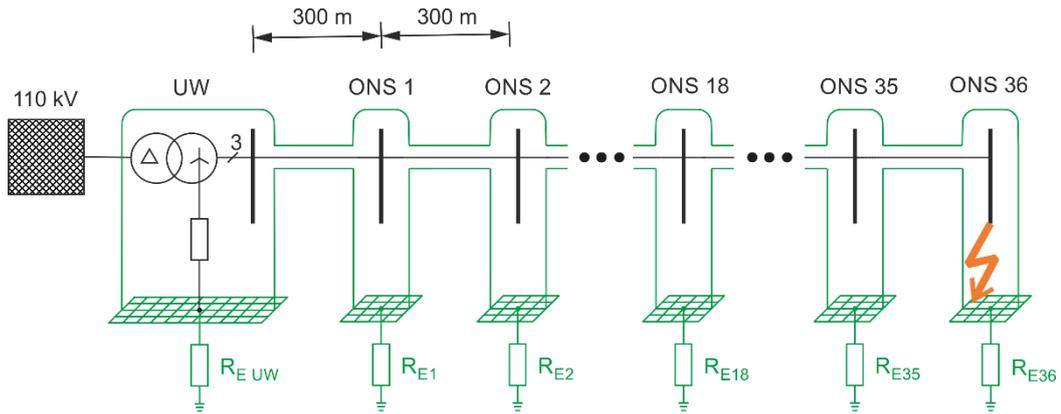
### 2.5.6 Beitrag von unterschiedlichen Begleiterderstrukturen auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Sticheitung

Ausgehend von einer stichförmigen Kabelnetzstruktur, wie sie bereits für die Analysen in Kapitel 2.5.4 verwendet wurde, wird im Folgenden der Einfluss von unterschiedlichen Begleiterderkonfigurationen im Fehlerfall (Erdschluss in ONS 36) auf die Fehlerstromaufteilung sowie die Potentialverteilung entlang der ONS des Stiches analysiert. Weitere Details zu den Simulationsrandbedingungen siehe Kapitel 2.5.4.

Für die Analyse werden folgende Varianten verglichen:

#### Ohne Begleiterder

Diese Modellstruktur (siehe Abbildung 2-42) bildet das Basis in welcher nur die drei Kabelschirme als metallischer Rückleiter fungieren.

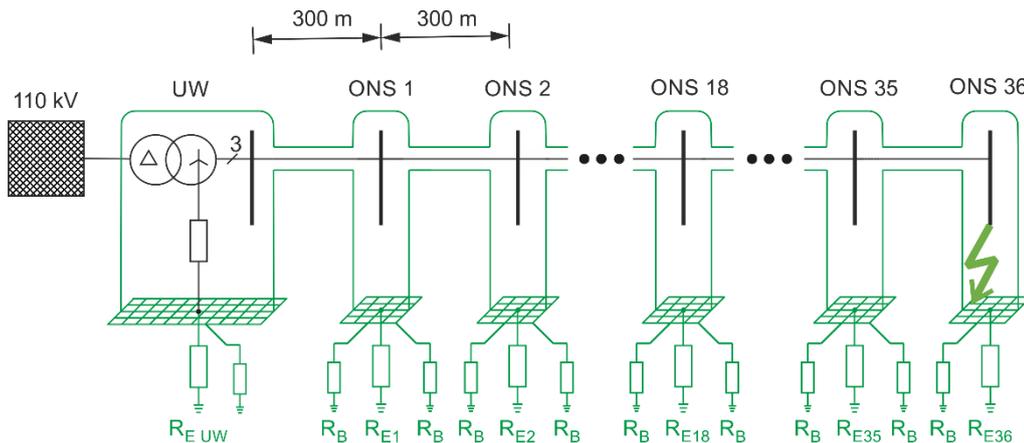


Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-42: Modellstruktur Variante 1 (Basis) für die Analyse des Einflusses der Begleiterderkonfiguration auf Erdungsspannungen  $EPR$  und Anlagenerdungsströme  $I_A$  bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Zwei Begleiterder von jeder Station ausgehend:

Im dieser Modellstruktur (siehe Abbildung 2-43) wurden je ONS zwei 100 m lange Begleiterder  $R_B$  berücksichtigt (Ausgenommen ONS 10 und UW jeweils nur ein Begleiterder).



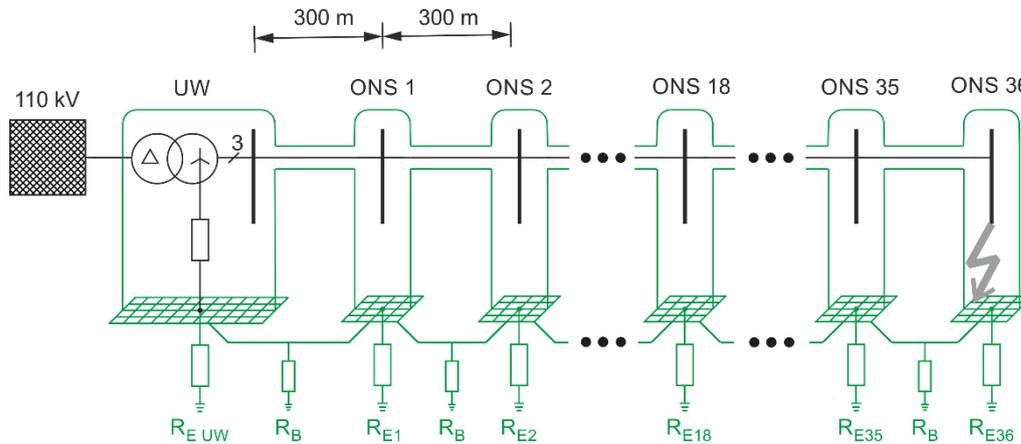
Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-43: Modellstruktur Variante 2 (2 x 100 m Begleiterder  $R_B$  je ONS) für die Analyse des Einflusses der Begleiterderkonfiguration auf die Erdungsspannungen  $EPR$  und Anlagenerdungsströme  $I_A$  bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Durchgehender Begleiterder, welcher an jeder Station angebunden ist

In dieser Modellstruktur (siehe Abbildung 2-44) wird angenommen, dass über die gesamte Kabelstrecke ein Begleiterder (20 cm Abstand zum Kabel) mit verlegt ist und dieser an jeder ONS angebunden ist. Die ohmsche Verkopplung im Nahbereich der ONS zwischen Begleiterder und ONS Erdungsanlage wird nicht berücksichtigt. In der Praxis führt diese, abhängig von der geometrischen Anordnung (Begleiterder und ONS Erdungsanlage), zu einer

hier vernachlässigbaren (siehe auch Kapitel 3.5), von der Erdergeometrie abhängigen Reduktion des tatsächlich wirksamen Erdausbreitungswiderstandes.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-44: Modellstruktur Variante 3 (durchgängiger Begleiterder) für die Analyse des Einflusses der Begleiterderkonfiguration auf die Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Aus der Abbildung 2-45 können folgende Erkenntnisse bezüglich des Einflusses von Begleiterdern auf die Stromaufteilung sowie die Potentialverhältnisse im Fehlerfall gewonnen werden:

1. Abhängig von der betrachteten ONS wird, unter den angenommenen Bedingungen, durch die Begleiterderwirkung die Erderspannung im Bereich der Station um bis zu zwei Drittel (siehe Abbildung 2-45, ONS 36, durchgehender Begleiterder) reduziert.
2. Wie aus Abbildung 2-45 entnommen werden kann, ergibt der Vergleich der Variante mit durchgehenden und mit unterbrochenen nur eine geringe Änderung der Erdungsspannungen. Der durchgehende Begleiterder führt im gezeigten Beispiel zirka 15 % vom Fehlerstrom zum UW zurück.

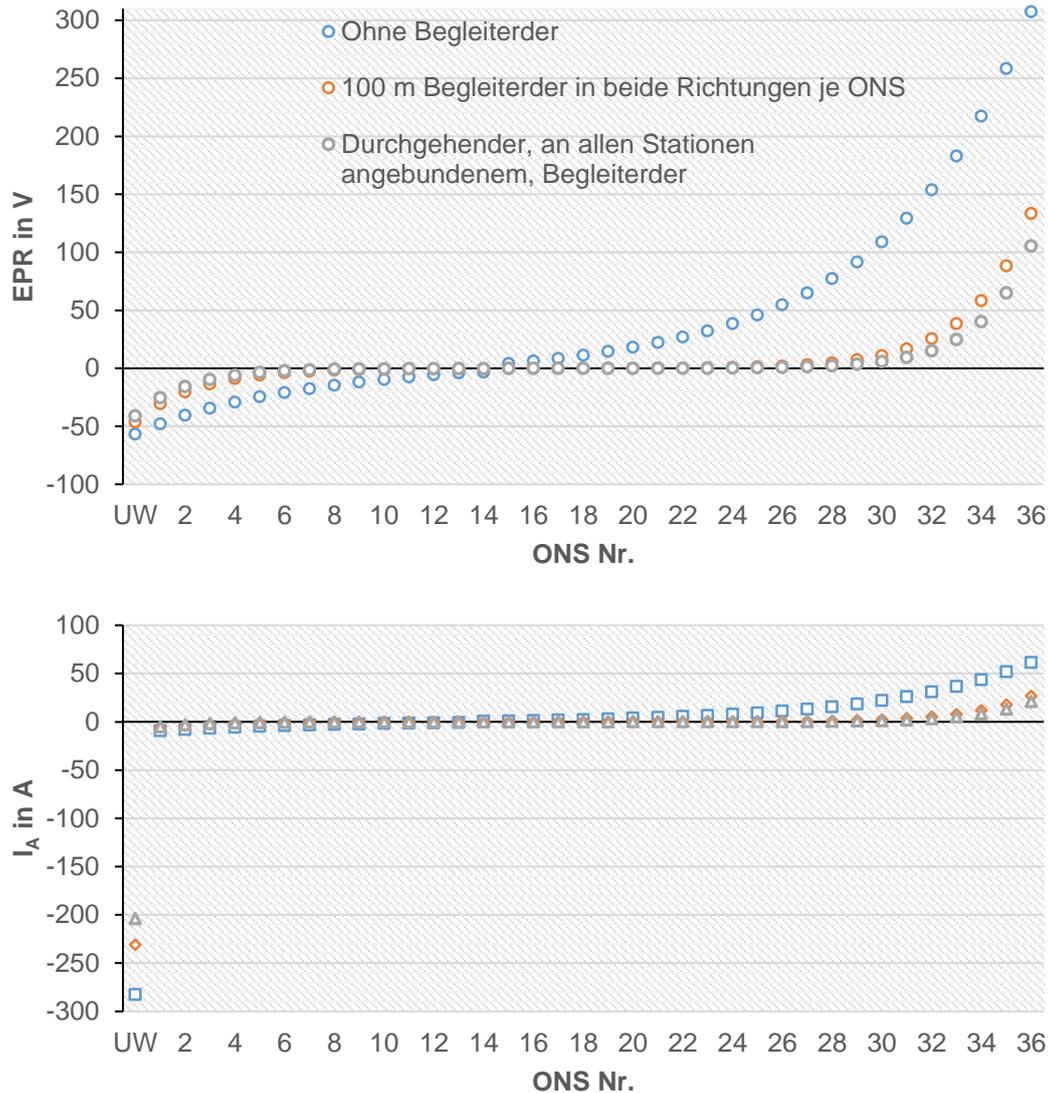


Abbildung 2-45: Erdungsspannung EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je Station bei unterschiedlichen Begleiterderkonfigurationen bei stichförmiger Netzstruktur, Fehler ONS 10,  $I_F = 1\text{ kA}$

### 2.5.7 Einfluss von unterschiedlichen Stationserdungswiderständen (symmetrische Variation) auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stichleitung

Ausgehend von einer stichförmigen Kabelnetzstruktur (siehe Abbildung 2-46), wie sie bereits für die Analysen in Kapitel 2.5.4 verwendet wurde, wird im Folgenden der Einfluss von unterschiedlichen Erdausbreitungswiderständen der ONS im Fehlerfall (Erdschluss in ONS 10) auf die Fehlerstromaufteilung sowie auf die Potentialverteilung entlang der ONS des Stiches analysiert. Der Erdausbreitungswiderstand des UW's wird mit  $0,2\ \Omega$  konstant gehalten, während die Erdausbreitungswiderstände aller ONS im Bereich von  $0,1\ \Omega$  bis  $500\ \Omega$  variiert werden. Weitere Details zu den Simulationsrandbedingungen siehe Kapitel 2.5.4.

**Anmerkung:** Kleine Erdausbreitungswiderstände ergeben sich in der Praxis durch den Zusammenschluss von lokalen erderwirksamen Strukturen (z.B. NS-Erdungsanlagen über den PEN-Leiter im TN-System).

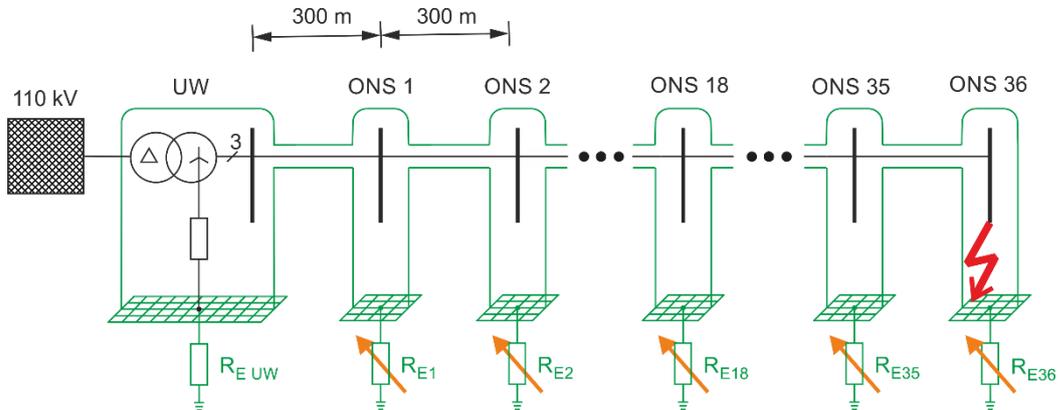


Abbildung 2-46: Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  in Abhängigkeit von den Ausbreitungswiderständen (symmetrische Variation) der Ortsnetzstationen bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \text{ } \Omega$ ,  $R_E = 0,01 \text{ } \Omega \dots 500 \text{ } \Omega$  (f. alle ONS ident)

Die Auswertung der Simulation verdeutlicht, dass die Variation der Einzelerdungswiderstände einen großen Einfluss auf die Stationspotentiale im Fehlerfall hat (siehe Abbildung 2-47) wobei sich mit Abnahme der Erdausbreitungswiderstände der ONS der Wendepunkt der Spannungswage in Richtung Fehlerort verschiebt.

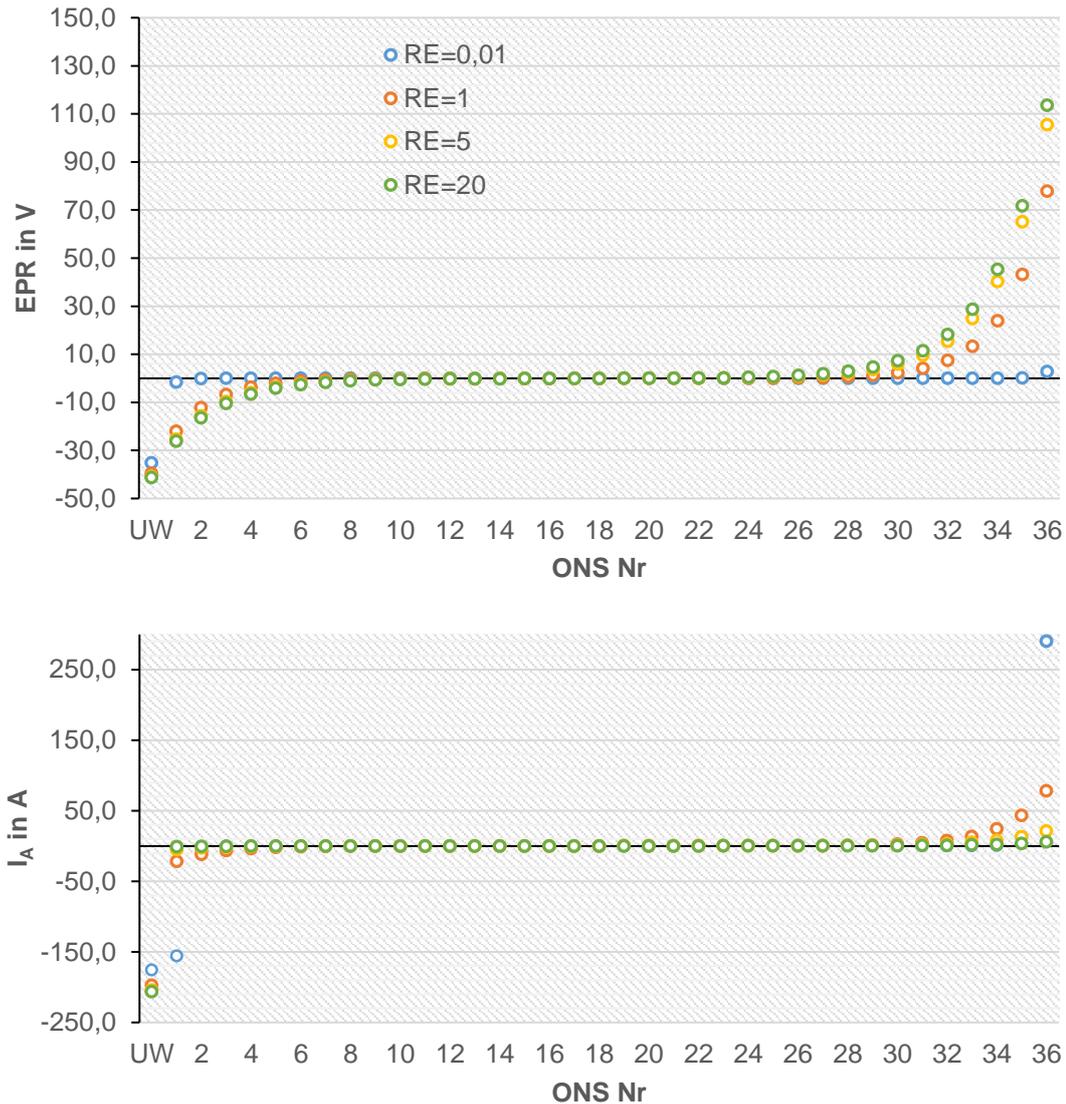


Abbildung 2-47: Erdungsspannungen EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je Station in Abhängigkeit von den Erdausbreitungswiderständen (symmetrische Variation) der ONS bei stichförmiger Netzstruktur, Erdschluss ONS 36,  $I_F = 1 \text{ kA}$

Aus Grenzwertüberlegungen stellt sich die Frage, was geschieht, wenn die Ortsnetzstationen ONS isoliert (nur Kabelkapazitäten wirksam) aufgebaut würden, da in diesem Fall der gesamte Fehlerstrom über die Kabelschirme zurückfließen muss. In Abbildung 2-48 ist das Erdoberflächenpotential sowie der Erdfehlerstrom abhängig von der Größe der Erdausbreitungswiderstände (symmetrische Variation aller ONS Erdausbreitungswiderstände) bei einem Erdschluss in ONS 36 dargestellt.

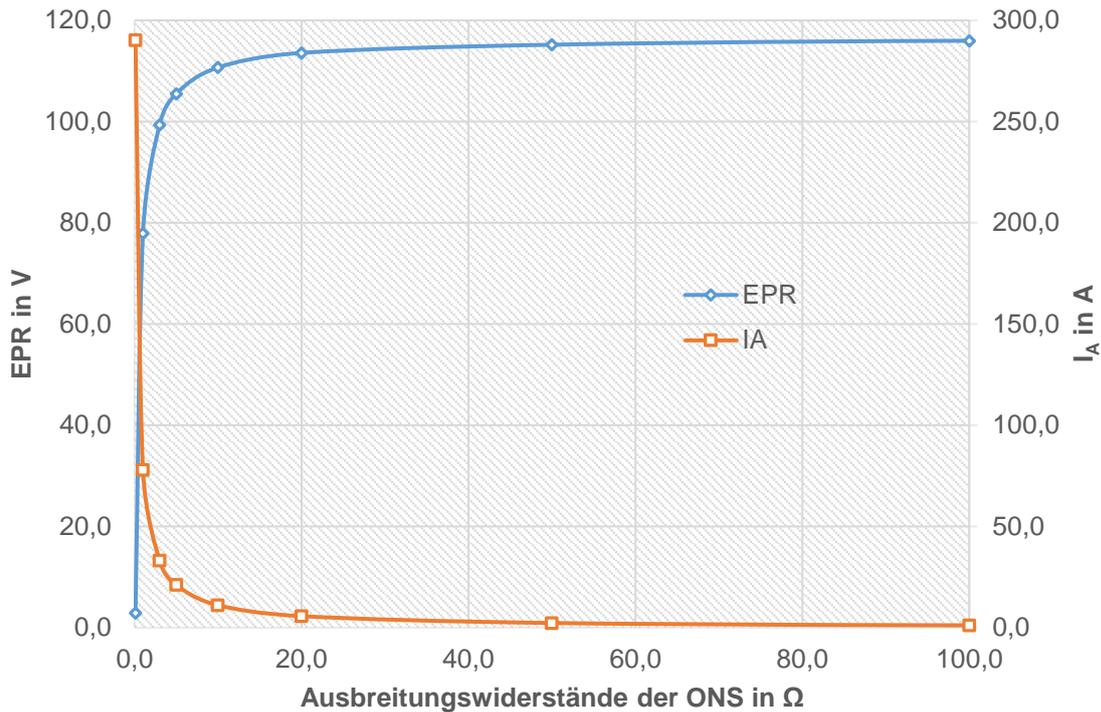
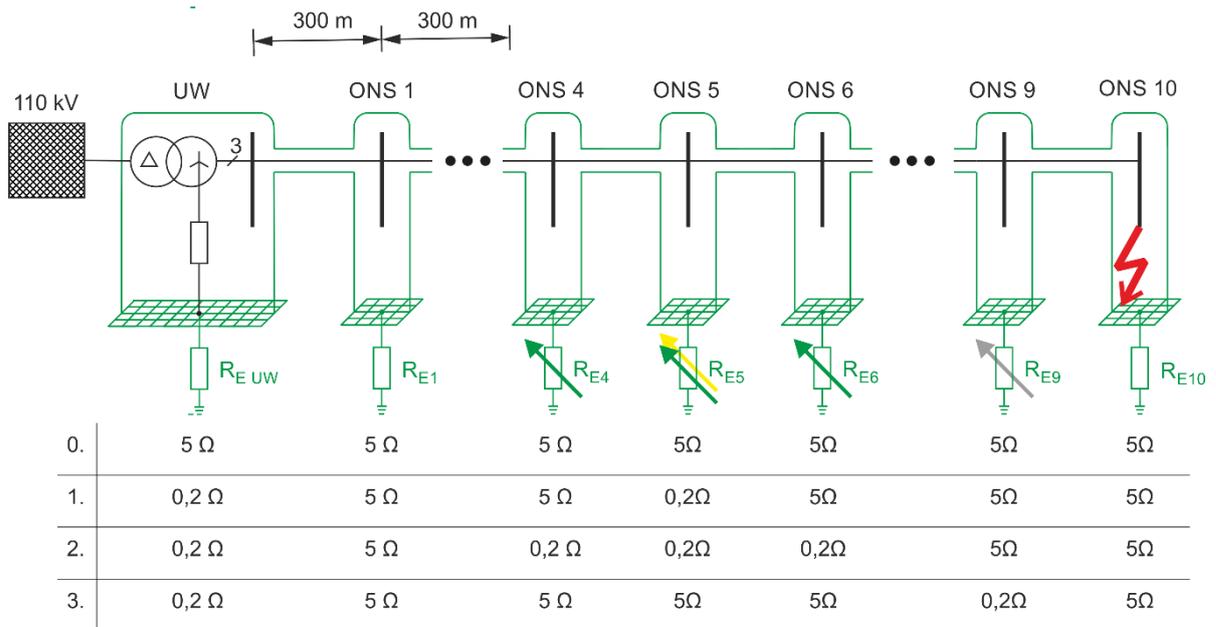


Abbildung 2-48: Erdungsspannungen EPR (blau) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (orange) in der ONS 36 bei einem Erdschluss in ONS 36 in Abhängigkeit von den Ausbreitungswiderständen der ONS,  $I_F=1$  kA

### 2.5.8 Einfluss von unterschiedlichen Stationserdungswiderständen (unsymmetrische Variation) auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer Stichleitung

Im Folgenden werden die Auswirkungen von unsymmetrisch verteilten Erdausbreitungswiderständen auf die Strom- und Potentialverhältnisse in den einzelnen Ortsnetzstationen im Erdschlussfall analysiert.

Das Basismodell besteht aus einem Kabelstich mit 10 ONS im Abstand von jeweils 300 m. Der Ausbreitungswiderstand des UW's wird mit  $0,2 \Omega$  konstant gehalten, während die Ausbreitungswiderstände der anderen ONS abhängig vom Szenario (siehe Tabelle in Abbildung 2-49) ausgehend von  $5 \Omega$  auf  $0,2 \Omega$  reduziert werden. Der Fehlerort ist bei allen Szenarien in der ONS 10 angenommen.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-49 Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  abhängig von der Ausbreitungswiderständen der ONS (unsymmetrische Variation) einer Stickleitung,  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$

Die Ergebnisse der Simulationen (siehe Abbildung 2-50) zeigen, dass in der vorliegenden Kabelstruktur jede Reduktion eines Erdausbreitungswiderstandes, einer beliebigen ONS, zu einer Verbesserung der Potentialverteilung des gesamten Stiches führt. Aufgrund der Kettenleiterstruktur des Kabels (Kabelschirm, Erdausbreitungswiderstände) führen lokale Asymmetrien in Form von kleinen Erdausbreitungswiderständen zwar lokal zu höheren Strömen über die Erdungsanlage (siehe Abbildung 2-50, unten), jedoch aufgrund der niederimpedanten Verbindung der Stationserdungsanlagen untereinander nicht zu erhöhten Stationspotentialen.

**Anmerkung:** Mit zunehmender Anzahl an ONS und zunehmender Entfernung jener ONS mit geringem Ausbreitungswiderständen (bezogen auf den Fehlerort) ist der Effekt geringer ausgeprägt. Daher wurde zu Veranschaulichung des Effektes die Stickleitung mit 10 ONS begrenzt.

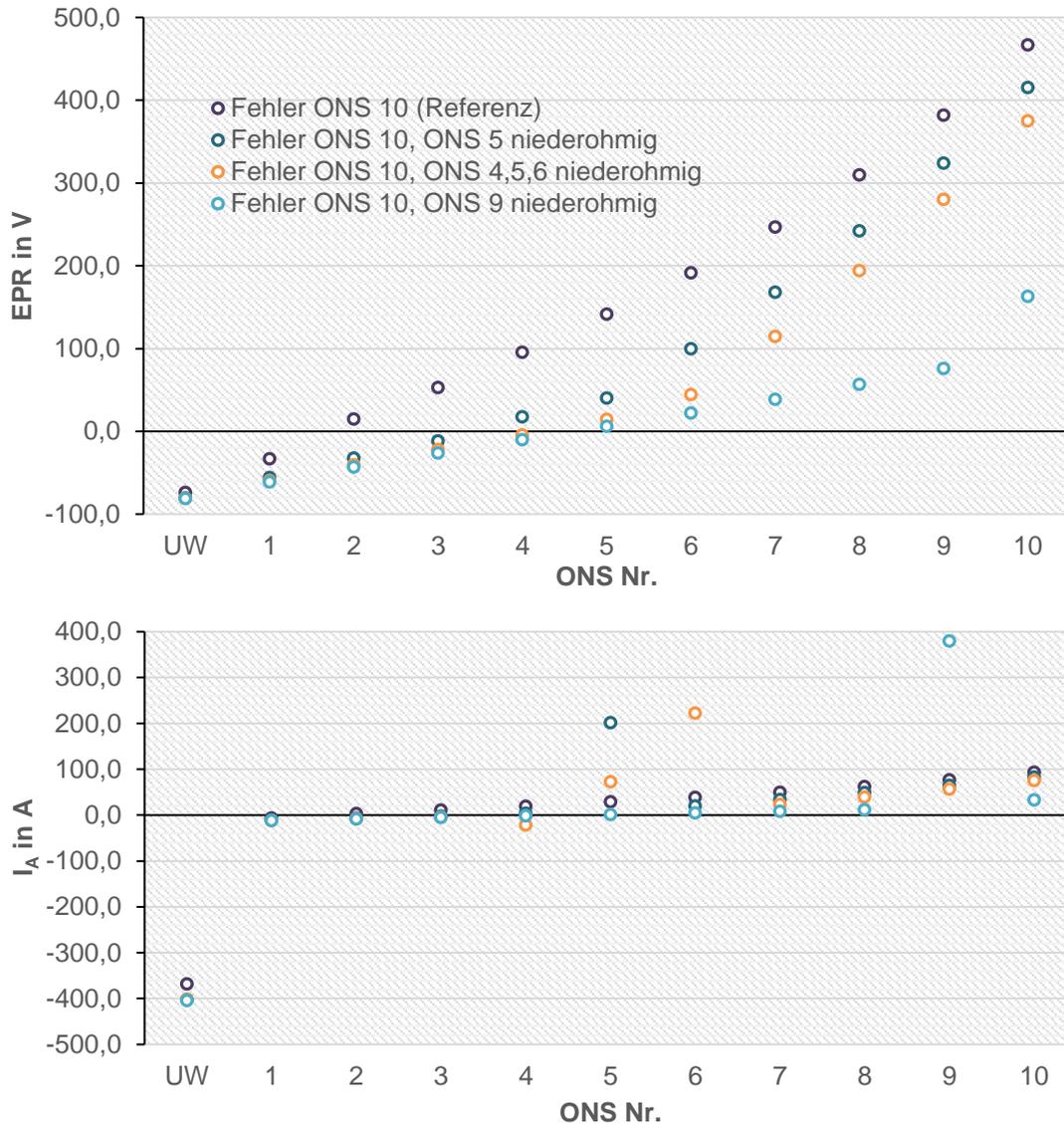
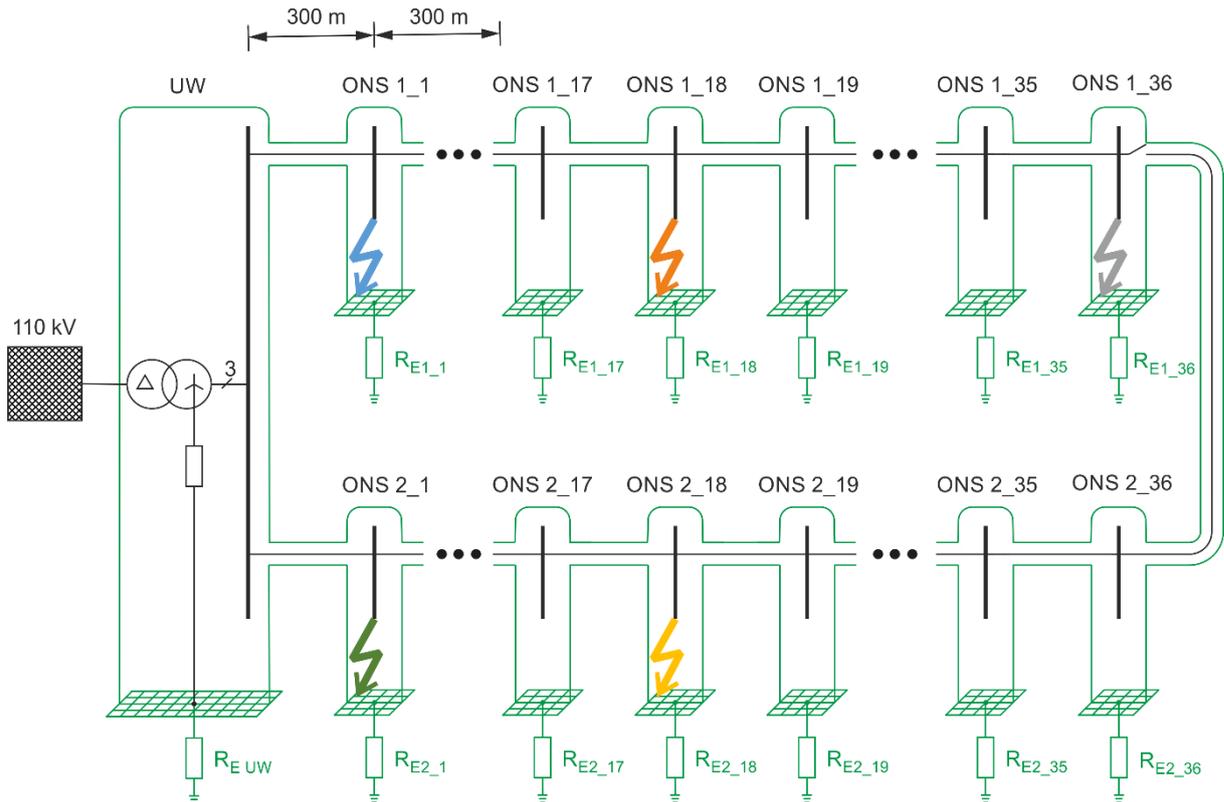


Abbildung 2-50: Erdungsspannungen EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je Station in Abhängigkeit vom Erdausbreitungswiderständen (symmetrische Variation) der ONS bei stichförmiger Netzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$

### 2.5.9 Einfluss des Fehlerortes auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer offenen Ringleitung

Ausgehend von einer ringförmigen Kabelnetzstruktur (siehe Abbildung 2-51) soll im Folgenden der Einfluss des Fehlerortes (Erdschluss in ONS) auf die Potentialverteilung entlang des Kabels in den ONS des Ringes analysiert werden. Hierzu wird im Rahmen einer Fallstudie ein niederohmiger Fehler einmal am Anfang (ONS 1, blau), in der Mitte (ONS 18, orange), am Ende (ONS 36, grau) sowie anordnungssymmetrisch in der zweiten Ringhälfte angenommen. Die Speisung des Stiches erfolgt mittels eines 110/10-kV-Transformators dessen Sternpunkt niederohmig geerdet ist, sodass sich im 1-pol-Erdschlussfall in der ONS 10 ein Fehlerstrom von 1 kA einstellt.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-51: Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  abhängig vom Fehlerort einer offen betriebener Ringnetzstruktur,  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$ ,  $R_E = 5 \Omega$  (f. alle ONS ident)

Die Ergebnisse der Simulation (siehe Abbildung 2-52) zeigen, dass bedingt durch die ringförmige Netzstruktur, die zu erwartenden Stationspotentiale im Erdschlussfall in ONS 1\_36, mit maximal 170 V deutlich geringer ausfallen als jene bei einer stichförmigen Netzstruktur (siehe Kap.2.5.4). Bedingt durch die symmetrische Struktur des offen betriebenen Ringes ergeben sich bei einem einpoligen Erdschluss in ONS 1\_36 entsprechend symmetrische Verhältnisse bezüglich der Erdungsspannungen in den anderen ONS. Betrachtet man für den genannten Fehlerfall (Fehler in der ONS 1\_36) die Schirmrückstromaufteilung, so fließen, bedingt durch die induktive Verkopplung zwischen dem fehlerstromführenden Phasenleiter und den drei Schirmen, im oberen Zweig der Ringstruktur 91 % und im unteren Zweig der Ringstruktur 5 % des Gesamtfehlerstromes zurück zur Quelle im UW. Bei den in der Praxis üblicherweise unsymmetrischen Ringstrukturen (unterschiedliche Kabellängen) ergeben sich entsprechend abweichende Potentialverhältnisse im Fehlerfall. Für Detailanalysen hinsichtlich der Verhältnisse im Fehlerfall sind somit individuelle Berechnungen erforderlich.

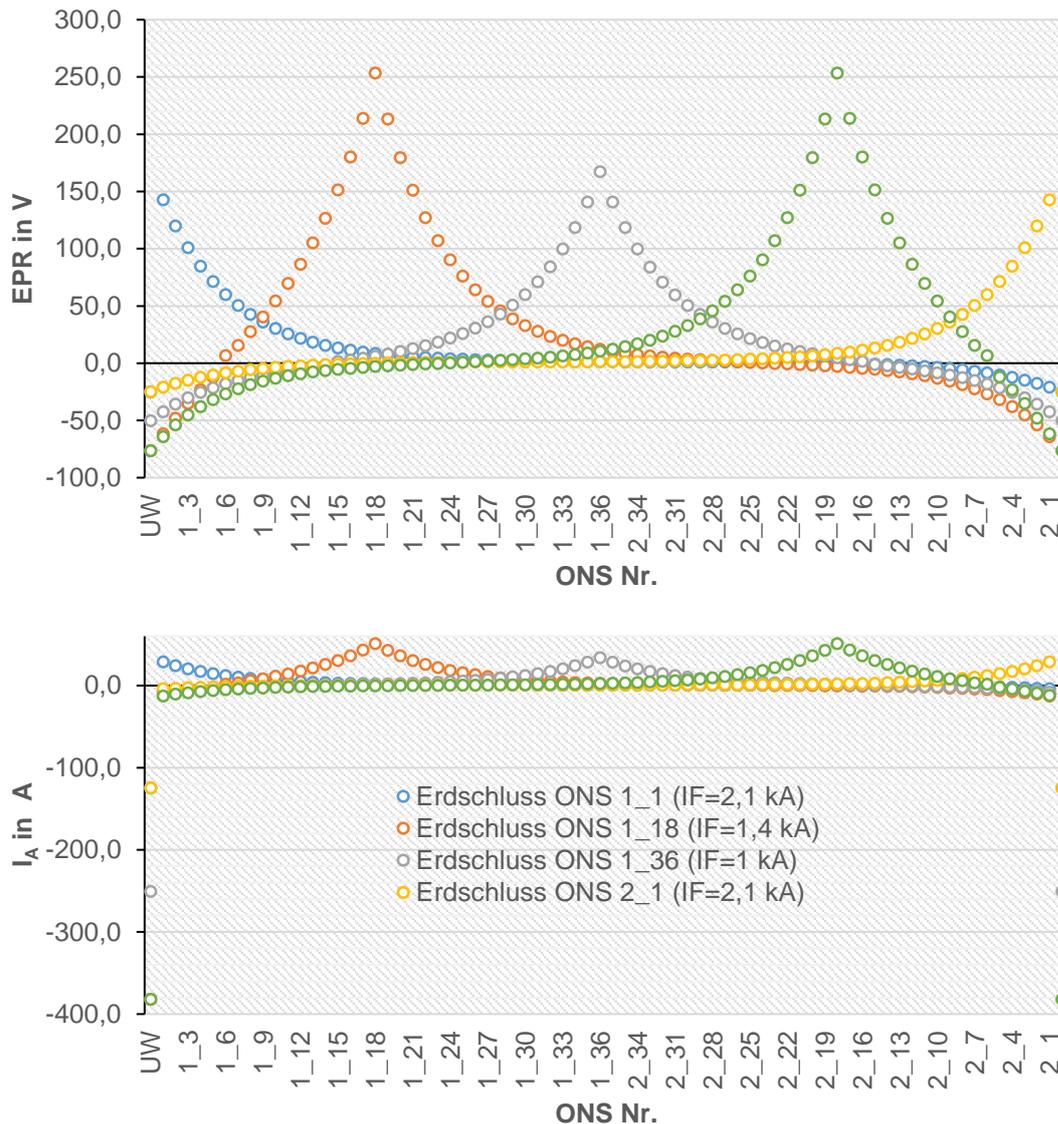


Abbildung 2-52: Erdungsspannungen<sup>8</sup> EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je ONS in Abhängigkeit vom Fehlerort bei offen betriebener Ringnetzstruktur,  $I_F = 1\text{ kA}$  (bei Fehler in ONS 1\_36)

### 2.5.10 Einfluss eines zusätzlichen Stichabganges auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer offenen Ringleitung

Ausgehend von einer erweiterten Ringstruktur in Form eines zusätzlichen Stichabzweiges (siehe Abbildung 2-53) soll im Folgenden der Einfluss des Fehlerortes (Erdschluss in ONS) auf die Potentialverteilung entlang der Leitung in den ONS des Ringes analysiert werden. In der Praxis kann der zusätzliche Stichabzweig z.B. das Netz eines Industriebetriebes oder auch ein Abzweig zu abseits gelegen Kunden darstellen. Hierzu wird im Rahmen einer Fallstudie ein niederohmiger Fehler einmal am Anfang (ONS 1\_1, blau), in der Mitte (ONS 1\_18, orange),

<sup>8</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

am Ende des Ringes (ONS 1\_36, grau) sowie am Ende des Stiches (ONS 5\_10) angenommen. Weitere Details zu den Simulationsrandbedingungen siehe Kapitel 2.5.9.

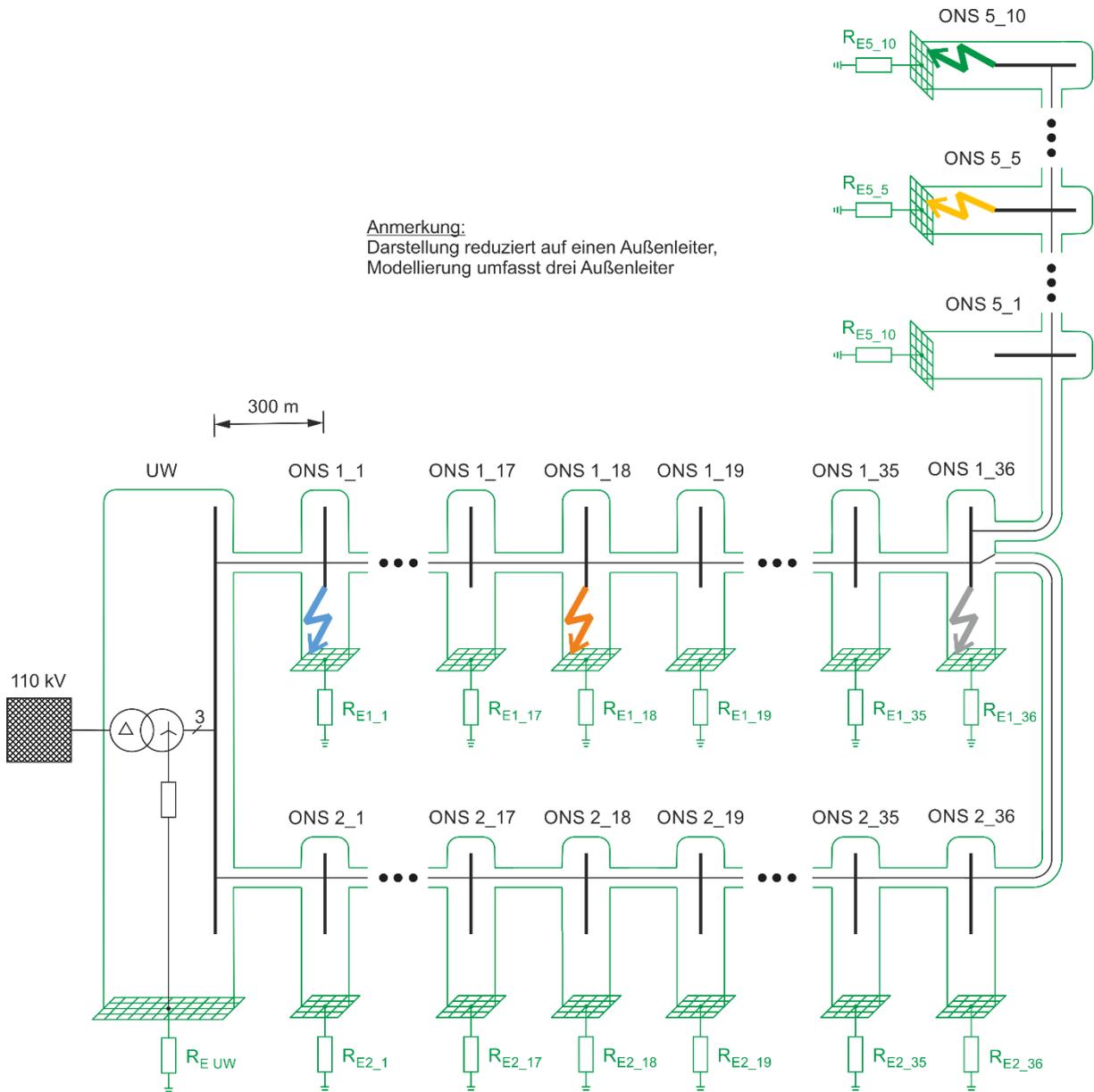


Abbildung 2-53: Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  abhängig vom Fehlerort einer offen betriebener Ringnetzstruktur mit Stichabzweig,  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E \text{ UW}} = 0,2 \Omega$ ,  $R_{EX\_X} = 5 \Omega$  (f. alle ONS ident)

Wie bereits im Rahmen der Simulation stichförmiger Netzstrukturen gezeigt (siehe Kapitel 2.5.4), stellen Fehler an Netzausläufern den Worst-Case-Fall hinsichtlich der Erdungsspannungen im Erdschlussfall dar. Entsprechend ergibt der Fehler in ONS S2 einen höheren Wert der Erdungsspannung (siehe Abbildung 2-54).

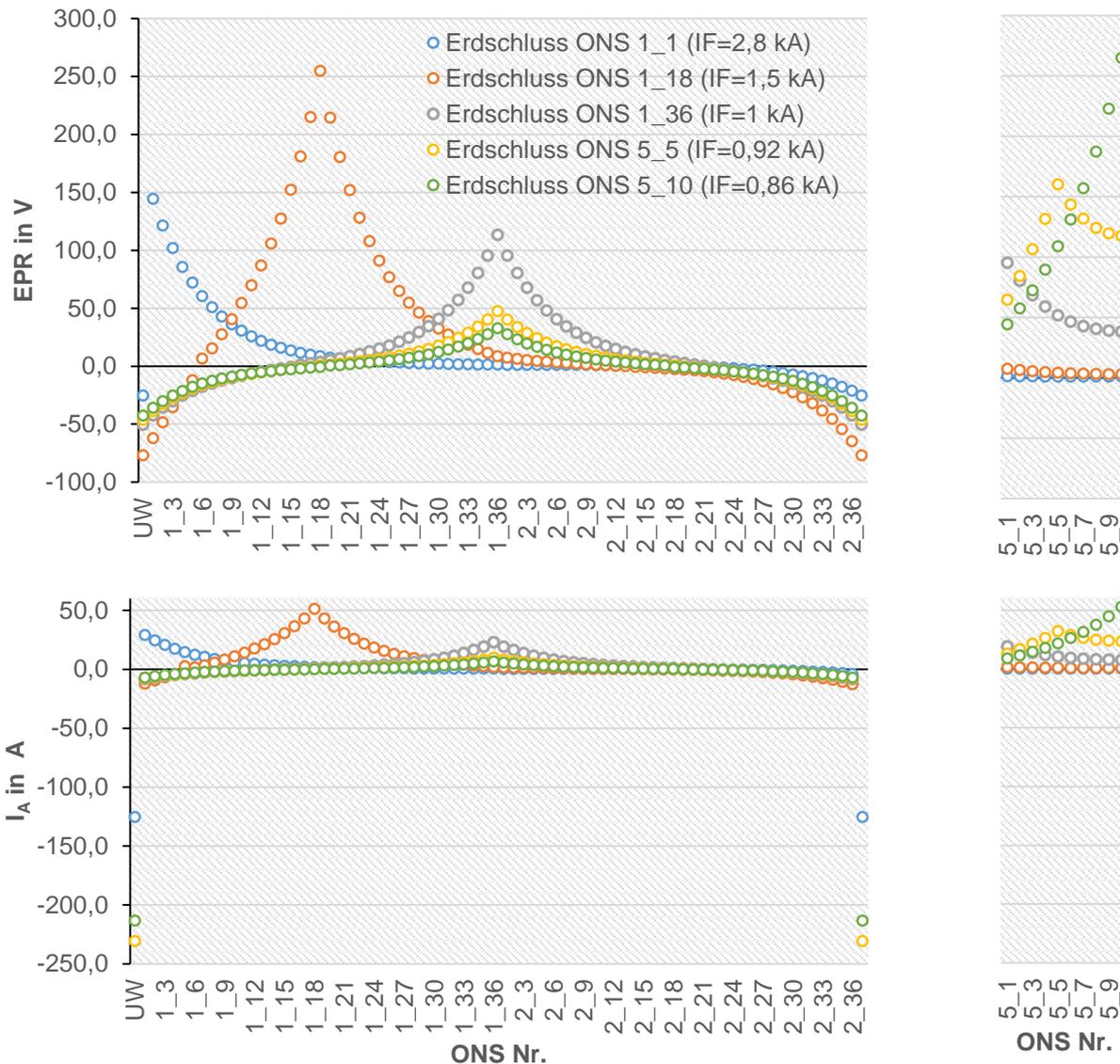


Abbildung 2-54: Erdungsspannungen<sup>9</sup> EPR (oben) je ONS in Abhängigkeit vom Fehlerort bei offener betriebener Ringnetzstruktur mit Stichabgang,  $I_F = 1\text{ kA}$  (bei Fehler in ONS 1\_36)

### 2.5.11 Einfluss zusätzlicher Parallelzweige auf die Strom- und Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS einer offenen Ringleitung

Ausgehend von einer vermaschten Ringstruktur in Form zweier zusätzlicher Abzweige (siehe Abbildung 2-55) soll im Folgenden der Einfluss des Fehlerortes (Erdschluss in ONS) auf die Potentialverteilung entlang der ONS des vermaschten Ringes analysiert werden. Speziell im urbanen Raum sind derartige Mehrfachvermaschungen zu finden. Hierzu werden im Rahmen einer Fallstudie Erdschlüsse in unterschiedlichen ONS (siehe Abbildung 2-55) angenommen. Weitere Details zu den Simulationsrandbedingungen siehe Kapitel 2.5.9.

<sup>9</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

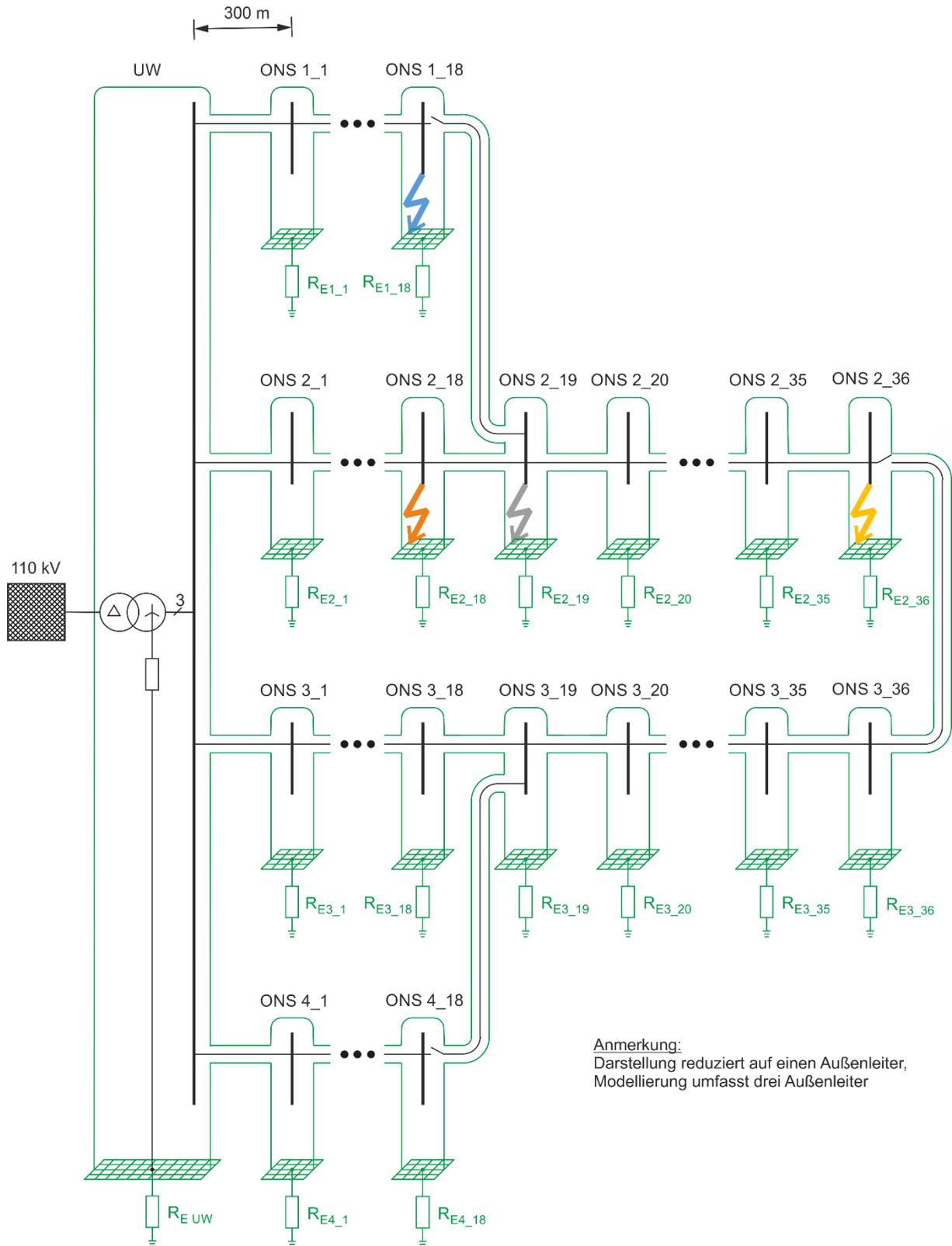


Abbildung 2-55: Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  abhängig vom Fehlerort einer offen betriebener Ringnetzstruktur mit Parallelzweigen,  $I_f = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$ ,  $R_E = 5 \Omega$  (f. alle ONS ident)

Die Abbildung 2-56 zeigt die Ergebnisse der Strom- und Spannungsverhältnisse im Erdschlussfall. Bezogen auf die Simulationsergebnisse der Ringstruktur (siehe Kap. 2.5.4) vermindert sich das Maximum der Erdungsspannung bei einem Erdschluss in ONS 2\_36 mit ca. 170 V nur gering obwohl zirka ein Drittel mehr an Erdungsanlagen vorhanden sind.

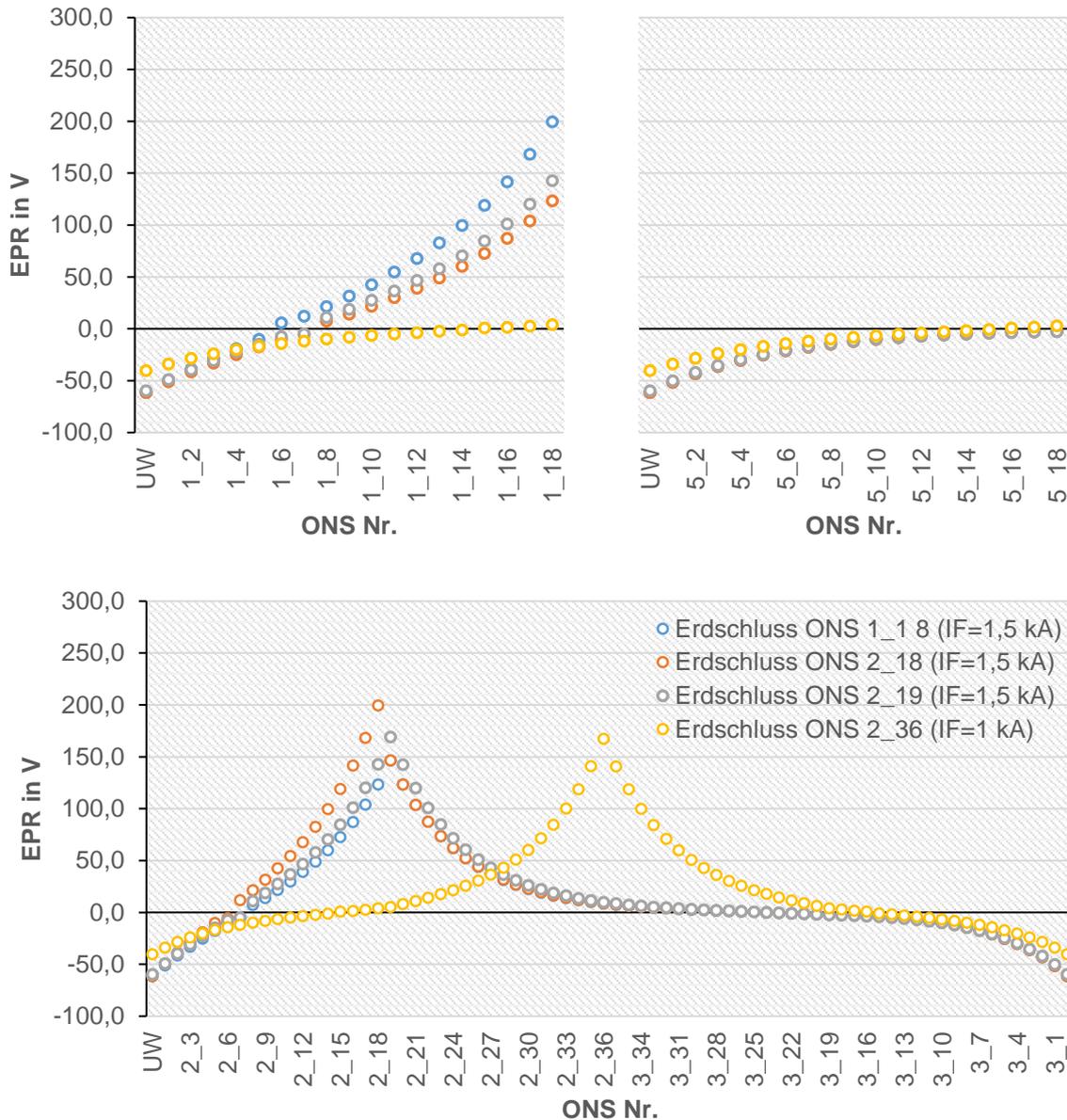


Abbildung 2-56: Erdungsspannungen<sup>10</sup> EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je Station in Abhängigkeit vom Fehlerort bei offen betriebener Ringnetzstruktur mit Parallelzweigen,  $I_F = 1\text{ kA}$  (bei Fehler in ONS 2\_36)

<sup>10</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

## 2.6 Stromaufteilung und Erdungsspannungsverteilung in Erdungssystemen unter Berücksichtigung von MS- und NS-Netzstrukturen

### 2.6.1 Stickleitung im ländlichen Raum

Ausgehend von einer stichförmigen Kabelnetzstruktur (siehe Abbildung 2-57) soll im Rahmen eines möglichst vollständigen Modellnetzes der Einfluss verschiedener Erdungssysteme bzw. die daraus folgenden unterschiedlichen Stromrückflussvarianten analysiert werden. Hierzu wurden die Parameter des Modellnetzes entsprechend der in Kapitel 2.2 erhobenen bzw. festgelegten Parameter modelliert.

Die NS-Netzstruktur wurde angelehnt an Kapitel 2.2.4 gewählt und umfasst 56 Niederspannungskunden je ONS. Die Hauptleitungen der NS-Abgänge wurden als 4x150 mm<sup>2</sup> Alu Kabel, die Hausanschlussleitungen als 4x25 mm<sup>2</sup> Alu Kabel modelliert. Zusätzlich wurden NS-Abgänge mit besonders langen NS-Zuleitungen (siehe Abbildung 2-57) modelliert. Ob in der Realität die normativ zulässigen Spannungsgrenzen eingehalten werden, ist hierbei zweitrangig, vielmehr geht es darum, die Potentialanhebungen im Fehlerfall von weit entfernten NS Kunden zu untersuchen.

Die Speisung des MS-Kabelstiches erfolgt mittels eines 110/20-kV-Transformators dessen Sternpunkt niederohmig geerdet ist, sodass sich im 1-pol Erdschlussfall in der ONS 10 ein Fehlerstrom von 1 kA einstellt.

#### Szenarien:

##### 1.) Variante 1:

- je ONS 56 Niederspannungskunden im TN-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme beidseitig geerdet

##### 2.) Variante 2:

- je ONS 28 Niederspannungskunden im TN-System, die weiteren Niederspannungskunden als TT-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme beidseitig geerdet

##### 3.) Variante 3:

- je ONS 11 Niederspannungskunden im TN-System, die weiteren Niederspannungskunden als TT-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme beidseitig geerdet



4.) Variante 4:

- je ONS 56 Niederspannungskunden im TN-System
- mit durchgängigem Begleiterder (an allen ONS angebunden)
- Kabelschirme beidseitig geerdet
- 

5.) Variante 5:

- je ONS 56 Niederspannungskunden im TN-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme nicht geerdet

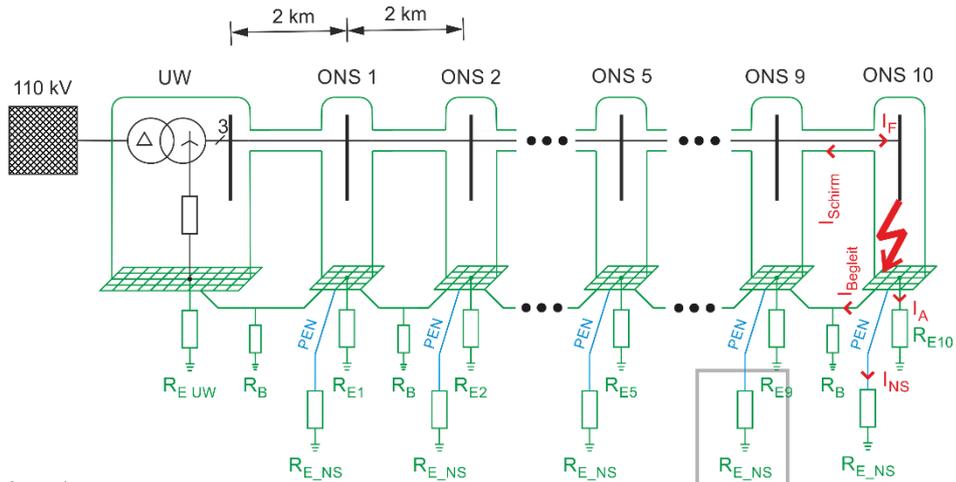
Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 2-57 dargestellt.

Der Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 4 verdeutlicht, dass bei beidseitig aufgelegten Kabelschirmen und Vorhandensein eines in Summe niederimpedanten NS-Erdungssystems im vorliegenden Szenario ein zusätzlicher Begleiterder die Erdungsspannung um zirka 25 % sinken lässt.

Der Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 3 verdeutlicht, dass ein Verfünfachen der als im TN-System betriebenen NS-Kunden im vorliegenden Szenario zu einer Reduktion der Erdungsspannung um 40 % führen kann.

Der Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 5 zeigt den Einfluss des Kabelschirms auf die Potentialverhältnisse im Fehlerfall, wobei bei fehlenden Kabelschirmen die Erdungsspannung ca. doppelt so hoch ausfällt. Wie aus Abbildung 2-59 hervorgeht, verschiebt sich der Stromrückfluss in Leitungssysteme der Niederspannung (PEN-Leiter, Begleiterder, Kabelschirme, weitere leitfähige Systeme).

Die Ergebnisse der Berechnung verdeutlichen die Wirkung der Parallelschaltung der unterschiedlichen Stromrückflusswege. Die Ergebnisse verdeutlichen dass es mehrere Möglichkeiten gibt sicherzustellen, dass auch bei hohen Fehlerströmen die maximal zulässigen Berührungsspannungen eingehalten werden können.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

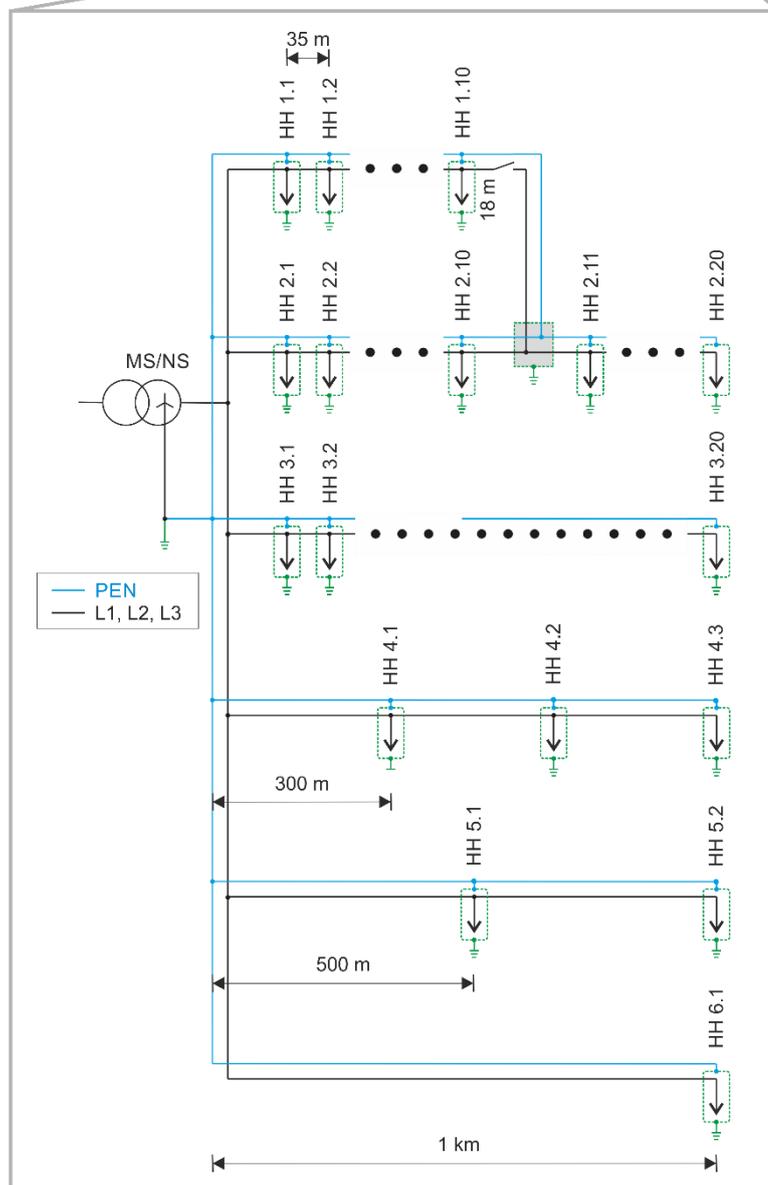


Abbildung 2-57: Übersicht Szenario, 20-kV-Stichleitung mit Begleiterder und NS-Erdungen, Fehlerort ONS 10

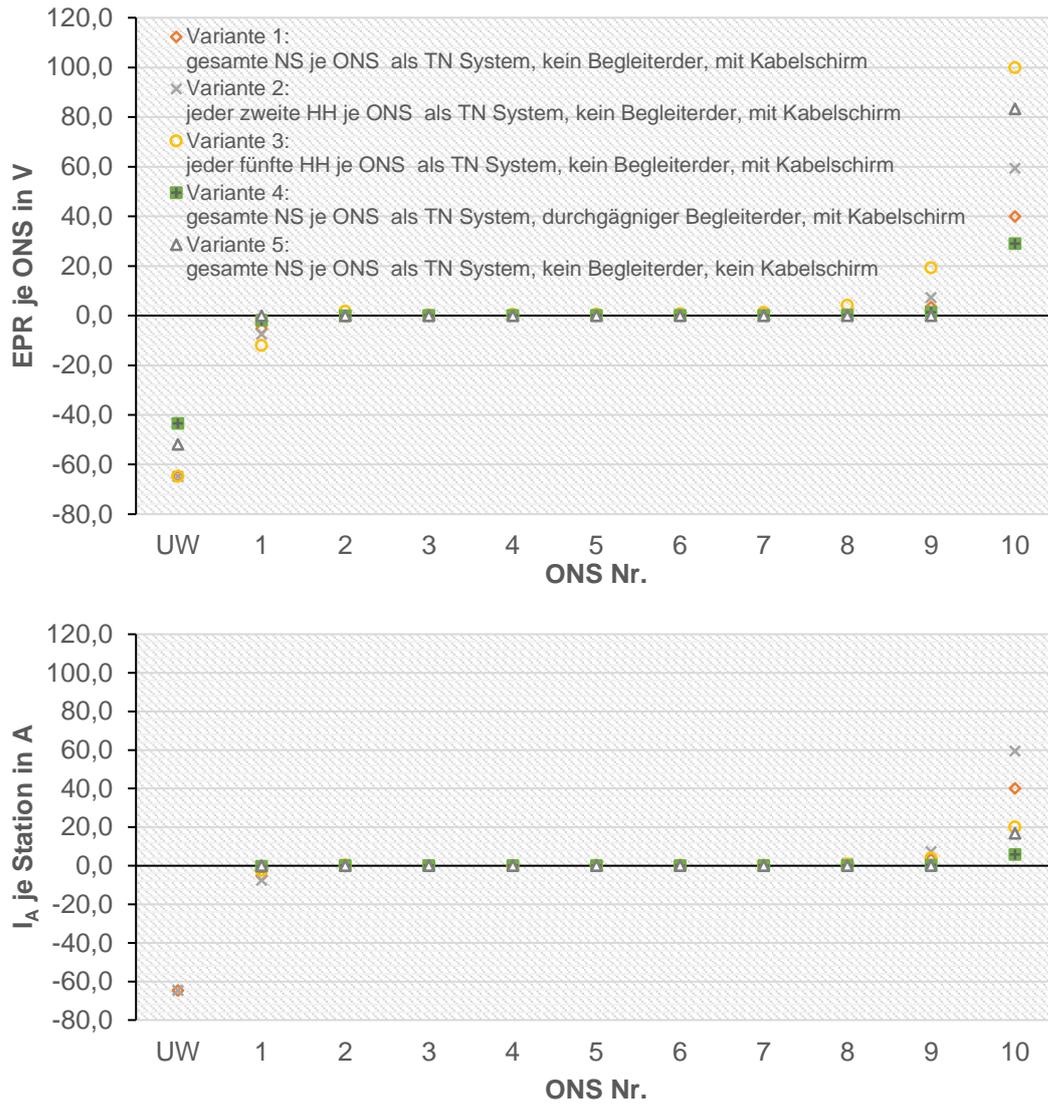


Abbildung 2-58: Erdungsspannungen EPR (oben) und Anlagenerdungsströme  $I_A$  (unten) je Station, Sticheitung, bei unterschiedlichen MS- und NS-Netzstrukturen, niederohmig geerdeter Sternpunkt,  $I_F=1 \text{ kA}$

Die Abbildung 2-59 veranschaulicht die Aufteilung des Fehlerstromes in ONS 10.

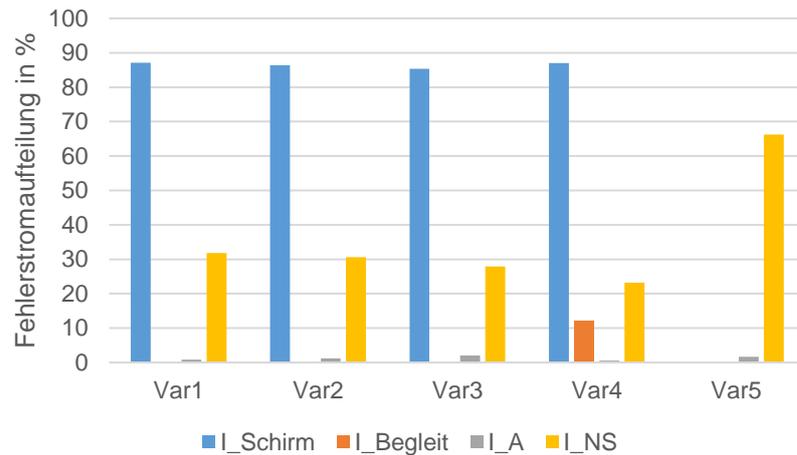


Abbildung 2-59: Fehlerstromaufteilung ONS 10

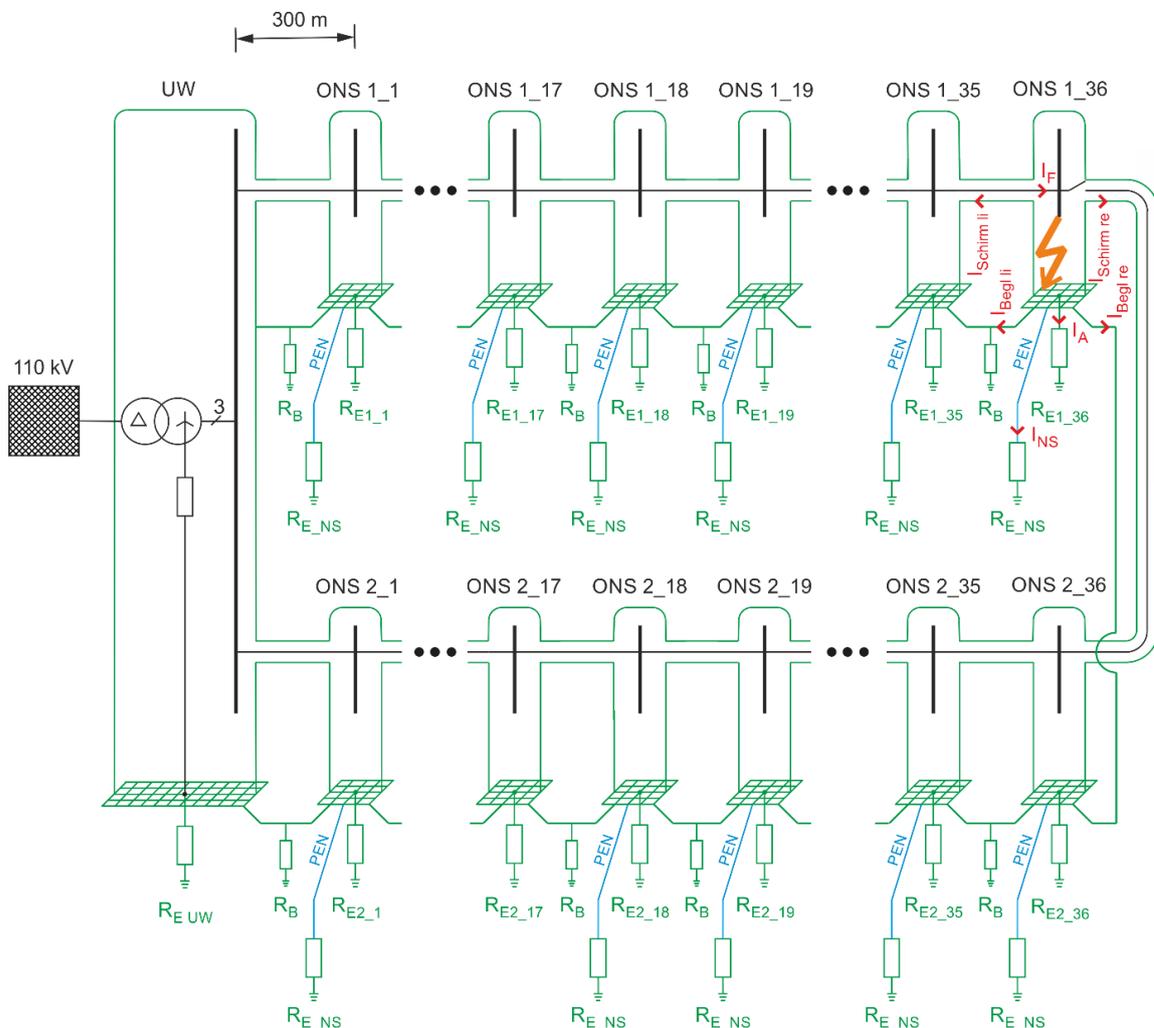
Die Spannungen gegen Bezugserde welche sich entlang der NS-Kunden einstellen, sind in Abbildung 2-60 dargestellt. Bedingt durch den Längsspannungsabfall an den Hauptleitungen ( $4 \times 150 \text{ mm}^2$ ) sowie den Hausanschlussleitungen ( $4 \times 25 \text{ mm}^2$ ) ergibt sich entsprechend der Kettenleiterstruktur eine Abnahme der Erdungsspannungen je Haushalt. Hierbei ist festzuhalten, dass mit zunehmender Entfernung zur Fehlerquelle (im gezeigten Szenario ONS 10) die Erdungsspannungen abnehmen. Somit ergibt sich, dass, wenn die zur fehlerbehafteten ONS nächstgelegenen Häuser die Anforderungen hinsichtlich Personensicherheit im MS-Erdschlussfall erfüllen, sämtliche weiteren am jeweiligen Abzweig angebunden Niederspannungskunden ebenfalls die Anforderungen eingehalten werden.



Abbildung 2-60: Erdungsspannungen der NS-Kunden bei unterschiedlichen MS- und NS-Netzstrukturen

## 2.6.2 Ringleitung im städtischen Raum

Ausgehend von einer ringförmigen Kabelnetzstruktur (siehe Abbildung 2-61) soll im Rahmen eines möglichst vollständigen Modellnetzes der Einfluss verschiedener Erdungssysteme bzw. die daraus folgenden unterschiedlichen Stromrückflussvarianten analysiert werden. Hierzu wurden die Parameter des Modellnetzes entsprechend der in Kapitel 2.2 erhobenen bzw. festgelegten Parameter modelliert. Die NS-Netzstruktur wurde angelehnt an Kapitel 2.2.4 gewählt und umfasst 10 Niederspannungskundenanlagen (mit 16 Wohneinheiten je Anlage) je ONS und sind galvanisch nicht mit benachbarten NS-Netzen verbunden. Die Hauptleitungen der NS-Abgänge wurden als  $4 \times 150 \text{ mm}^2$  Alu Kabel, die Hausanschlussleitungen als  $4 \times 25 \text{ mm}^2$  Alu Kabel modelliert. Die Speisung des MS-Kabelstiches erfolgt mittels eines 110/20-kV-Transformators, dessen Sternpunkt niederohmig geerdet ist, sodass sich im 1-pol Erdschlussfall in der ONS 18 ein Fehlerstrom von 1 kA einstellt.



Anmerkung:  
 Darstellung reduziert auf einen Außenleiter,  
 Modellierung umfasst drei Außenleiter

Abbildung 2-61: Modellstruktur für die Analyse der Erdungsspannungen EPR und Fehlerstromaufteilung in ONS 1\_18 abhängig von der Erdungssystemausführung,  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$ ,  $R_E = 5 \Omega$  (f. alle ONS ident)



## Szenarien:

### 1.) Variante 1:

- je ONS 10 Gebäude im TN-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme beidseitig geerdet

### 2.) Variante 2:

- je ONS 6 Gebäude im TN-System, die weiteren Niederspannungskunden als TT-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme beidseitig geerdet

### 3.) Variante 3:

- je ONS 3 Gebäude im TN-System, die weiteren Niederspannungskunden als TT-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme beidseitig geerdet

### 4.) Variante 4:

- je ONS 10 Gebäude im TN-System
- mit durchgängigem Begleiterder (an allen ONS angebunden)
- Kabelschirme beidseitig geerdet

### 5.) Variante 5:

- je ONS 5 Gebäude im TN-System
- kein Begleiterder
- Kabelschirme nicht geerdet

Die Abbildung 2-62 zeigt die berechneten Erdungsspannungen je Station bei einem Erdschluss in ONS 1\_18 (Übersicht siehe Abbildung 2-61) abhängig von der Ausführung des Erdungssystems. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ergeben sich aufgrund der Größe des wirksamen Erdungssystems für keine der Variante unzulässig hohe Erdungsspannungen entlang der ONS. Im gezeigten Beispiel ist zu beachten, dass nach den ersten drei ONS links und rechts vom Fehlerort, die Erdungsspannungen auch im ungünstigsten Fall deutlich bereits unter 10 V liegen.

Das Maximum der Erdungsspannungsverteilung entlang der ONS der Variante 5 ergibt sich mit 120 V aufgrund des nicht vorhandenen Kabelschirms sowie Begleiterders im Umspannwerk, da sich der Fehlerstromkreis hier über die Erdungsanlage des UW schließen muss.

Das Beispiel zeigt weiter, dass die Einhaltung der maximal zulässigen Erdungsspannungen auch bei Fehlerströmen im Bereich von 1 kA ohne Kabelschirme möglich ist.

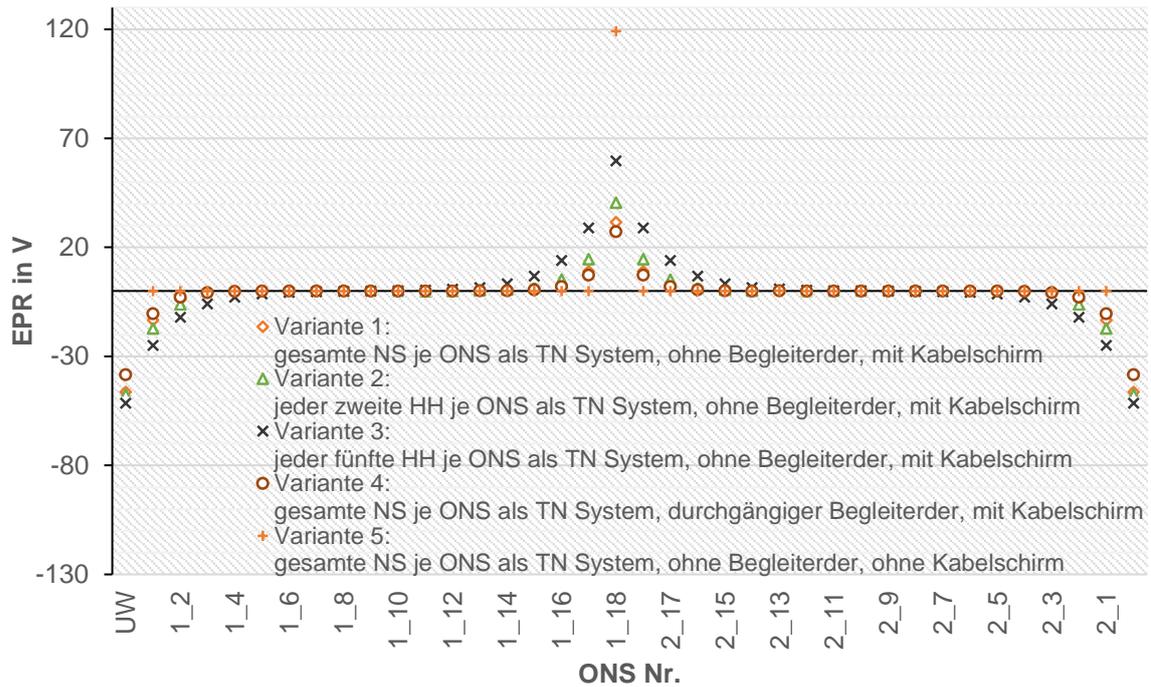


Abbildung 2-62: Erdungsspannungen EPR je Station in Abhängigkeit von der Erdungssystemausführung bei ringförmiger Netzstruktur,  $I_F \approx 1 \text{ kA}$

Für die Fehlerstromaufteilung der erdschlussbehafteten ONS ergeben sich abhängig von der Erdungssystemausführung die in Abbildung 2-63 dargestellten Verhältnisse. Die Ströme je Varianten sind auf den Fehlstrom der jeweiligen Variante bezogen. Die Darstellung soll einen vergleichenden Überblick hinsichtlich der Stromaufteilung ermöglichen, hierzu werden nur die Beträge dargestellt wodurch zu beachten ist, dass die Stromsumme je Variante größer 100 % sein kann.

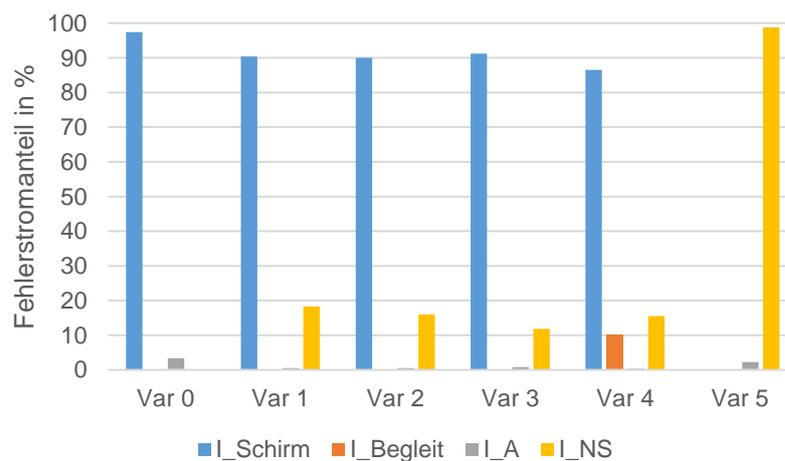


Abbildung 2-63: relative Fehlerstromaufteilung<sup>11</sup> in ONS 1\_36 bei unterschiedlichen Erdungssystemausführungen

<sup>11</sup>  $I_{\text{Schirm}} = I_{\text{Schirm li}} + I_{\text{Schirm re}}$  bzw.  $I_{\text{Begleit}} = I_{\text{Begl li}} + I_{\text{Begl re}}$  (siehe Abbildung 2-61)

Für die Potentialverhältnisse in den Niederspannungen ergeben sich sinngemäß dieselben Erkenntnisse wie bereits in Kapitel 2.6.1 dargestellt.

## 2.7 Vereinfachte Berechnungsmethode zur Bestimmung der Strom- und Erdungsspannungsverhältnisse entlang der ONS im Erdschlussfall

### 2.7.1 Grundlagen zur vereinfachten Berechnungsmethode

Im Folgenden wird für praktische Anwendungen eine vereinfachte Berechnungsmethode zur Bestimmung der Strom- und Potentialverhältnisse im Erdschlussfall vorgestellt. Basis hierfür bildet die in Abbildung 2-64 dargestellte Struktur. Diese besteht aus einer Quelle, welche über Kabel mit beidseitig aufgelegtem Schirm mit der erdschlussbehafteten ONS 1 verbunden ist. Ausgehend von ONS1 sind stichförmig weitere ONS angebunden.

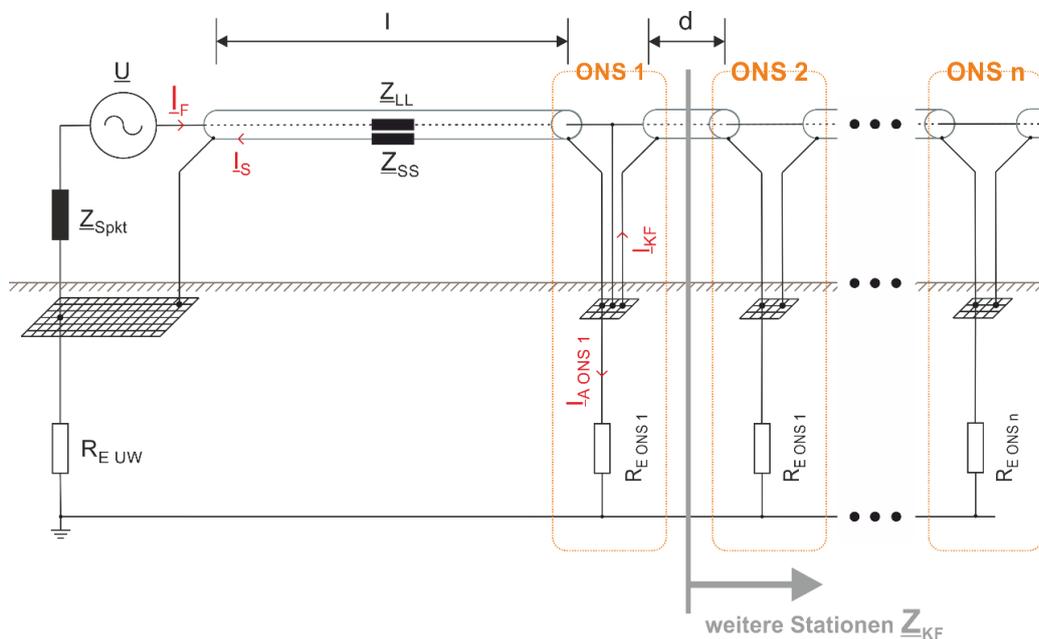


Abbildung 2-64: Prinzip Bild vereinfachtes Berechnungsmodell

Durch Anwendung der Maschenregel auf die in Abbildung 2-64 eingezeichneten Maschen lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:

$$\underline{U} = (\underline{Z}'_{LL} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW} + \underline{Z}_{Spkt}) \cdot \underline{I}_F - (\underline{Z}'_{LS} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}) \cdot \underline{I}_S \quad (\text{Gl. 2-12})$$

$$0 = (\underline{Z}_{SL} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}) \cdot \underline{I}_F - (\underline{Z}_{SS} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}) \cdot \underline{I}_S \quad (\text{Gl. 2-13})$$

$\underline{U}$  ... Quellenspannung in V

$\underline{I}_F$  ... Fehlerstrom in A

$\underline{I}_S$  ... Schirmstrom in A

$$\underline{Z}_E = \frac{R_{E\,ONS\,1} \cdot \underline{Z}_{KF}}{R_{E\,ONS\,1} + \underline{Z}_{KF}} \quad \dots \text{ In Summe wirksamer Ausbreitungsimpedanz des hinter dem Fehlerort liegenden Erdungssystems in } \Omega$$

... Kettenleiterimpedanz [25] bestehend aus

$$\underline{Z}_{KF} \approx \frac{\underline{Z}_{Schirm\,F}}{2} + \sqrt{R_{E\,ONS\,1} \cdot \underline{Z}_{Schirm\,F}} \quad \text{Kabelschirmimpedanz und Ausbreitungswiderstand in } \Omega$$

(Anmerkung: gültig für symmetrisch aufgebauten Kettenleiter, mit mindestens drei Gliedern [25], S746, Gl. 16.43b)

$R_{E\,ONS\,n}$  ... Ausbreitungswiderstand des Erders der ONS n in  $\Omega$

$R_{E\,UW}$  ... Ausbreitungswiderstand des Erders des UWs in  $\Omega$

$\underline{Z}'_{LL}$  ... Schleifenimpedanz des Phasenleiters in  $\Omega/m$  (siehe Kapitel 2.3.1)

$\underline{Z}'_{SS}$  ... Schleifenimpedanz des Kabelschirms in  $\Omega/m$  (siehe Kapitel 2.3.1)

$\underline{Z}'_{LS}$  ... Koppelimpedanz zwischen Phasenleiter und Kabelschirm in  $\Omega/m$  (siehe Kapitel 2.3.1)

$l$  ... Kabellänge in m

Durch Umformung von (Gl. 2-13) errechnet sich der Schirmstrom zu:

$$\underline{I}_S = \underline{I}_F \cdot \frac{\underline{Z}'_{SL} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}}{\underline{Z}'_{SS} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}} \quad (\text{Gl. 2-14})$$

Die lokale Potentialanhebung der ONS 1 ergibt sich zu

$$\underline{U}_{E\,ONS\,1} = \underline{I}_{A\,ONS\,1} \cdot R_{E\,ONS\,1} = (\underline{I}_F - \underline{I}_S - \underline{I}_{KF}) \cdot R_{E\,ONS\,1} \quad (\text{Gl. 2-15})$$

Der Reduktionsfaktor der in Abbildung 2-64 dargestellten Struktur ergibt sich zu:

$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_F - \underline{I}_S}{\underline{I}_F} = 1 - \frac{\underline{I}_S}{\underline{I}_F} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{SL} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}}{\underline{Z}'_{SS} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}} = \frac{(\underline{Z}_{SS} - \underline{Z}_{SL}) \cdot l}{\underline{Z}_{SS} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\,UW}} \quad (\text{Gl. 2-16})$$

In den folgenden Unterkapiteln wird nun geklärt, unter welchen Bedingungen die Zusammenhänge gültig sind und ob bzw. unter welchen Randbedingungen diese für eine schnelle Abschätzung der Strom- und Spannungsverhältnisse im Erdschlussfall in Kabelnetzen geeignet sind.



## 2.7.2 Analyse der Zulässigkeit einer einphasigen Modellierung im Rahmen der vereinfachten Berechnungsmethode

Um eine vereinfachte („händische“) Berechnung zu ermöglichen, ist es erforderlich, die Maschenanzahl soweit wie möglich zu reduzieren. Im Folgenden wird daher basierend auf der in Abbildung 2-26 dargestellten Netzstruktur analysiert, welcher Unterschied sich ergibt, wenn die drei Schirme, von eng aneinander liegenden Energiekabeln, zu einem Schirm mit dem dreifachen Querschnitt zusammengefasst werden. Für die Analyse wird wie folgt vorgegangen:

- Berechnung der Summe des Schirmstromes mittels vollständigem Simulink Modell (M1) im Erdschlussfall.
- Modifizierung des vollständigen Simulink Modells (M2) durch Zusammenfassen der drei Kabelschirmquerschnitte und Anordnung um den erdschlussstromführenden Außenleiter als einen konzentrierten Schirm. Berechnung des Schirmstromes im Erdschlussfall.
- Bestimmung der relativen Schirmstromdifferenz der beiden Modelle bei Variation der Querschnitte (Außenleiter, Schirm) und der Kabellänge.

Der Betrag der relativen Schirmstromabweichung ist hierbei wie folgt definiert

$$|\underline{\Delta I}_{\text{Schirm}}| = \frac{|I_{\text{Schirm } M1}| - |I_{\text{Schirm } M2}|}{|I_{\text{Schirm } M2}|} \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 2-17})$$

$|\underline{\Delta I}_{\text{Schirm}}|$  ... relative Schirmstromabweichung in %

$|I_{\text{Schirm } M1}|$  ... Beträge des Schirmstromes, berechnet mittels der vereinfachten Methode gemäß Kapitel 2.7.1 in A

$|I_{\text{Schirm } M2}|$  ... Beträge des Schirmstromes, berechnet mittels des vollständigen Modells gemäß Kapitel 2 in A

Die Winkeldifferenz des Schirmstromes ist wie folgt definiert

$$\angle I_{\text{-Schirm}} = \angle I_{\text{-Schirm } M1} - \angle I_{\text{-Schirm } M2} \quad (\text{Gl. 2-18})$$

Wie die Berechnungsergebnisse in Abbildung 2-65 zeigen, liegt die relative Abweichung der Schirmstromamplitude ermittelt nach den beiden Verfahren auch bei Kabellängen bis 20 km unter 4 %, während die Schirmstromwinkelabweichung unter 8° bleibt. Daraus folgt, dass, für den vorliegenden Zweck der Reduzierung der Maschenanzahl, für die Berechnung das Zusammenfassen der drei Kabelschirme zulässig ist.

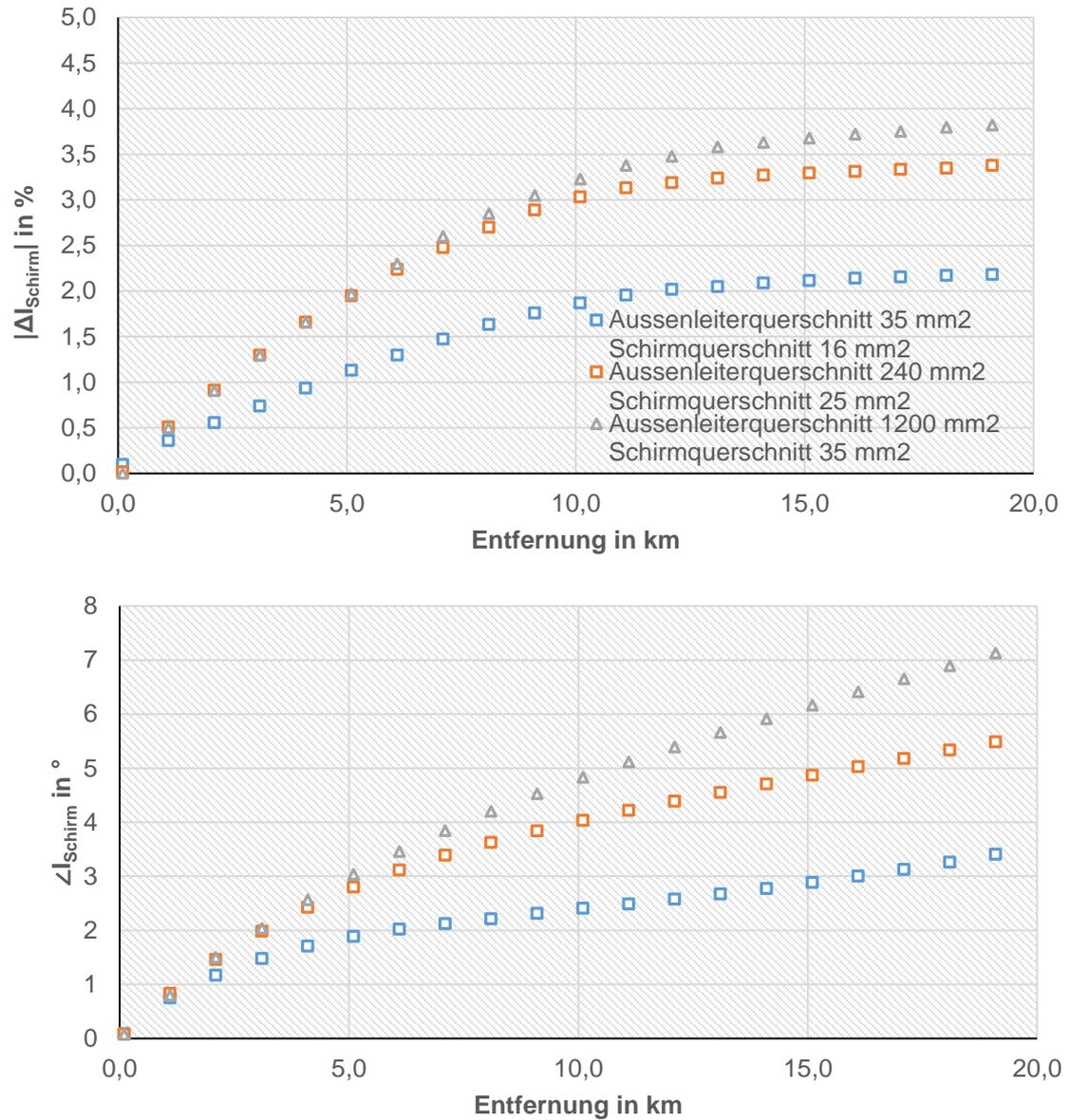


Abbildung 2-65: Relative Schirmstromamplitudenabweichung (oben) sowie Schirmstromwinkelabweichung (unten) bei Zusammenfassung der drei Kabelschirme zu einem Ersatz-Kabelschirm



### 2.7.3 Analyse netzstrukturbedingter Anwendungsgrenzen der vereinfachten Berechnungsmethode

Wie aus der Herleitung der vereinfachten Berechnungsvariante aus Kapitel 2.7.1 hervorgeht, gilt diese Herleitung für Stickleitungsstrukturen. Die Berechnungen der offenen Ringleitungsstruktur in Kapitel 2.5.9, welche mittels vollständigem Modell durchgeführt wurden, zeigen, dass durch die induktive Kopplung zwischen Außenseiter und Schirm im Fehlerfall nur 5 % des Betrages vom Fehlerstromes über den Schirm des zweiten Ringabschnittes (hinter dem Fehler liegend) fließt. Im Folgenden wird daher mittels vollständigem Modell analysiert, welche Auswirkung sich auf die Strom- und Potentialverhältnisse in den Stationen im Fehlerfall ergeben, wenn der Schirm des hinter dem Fehler liegenden Ringabschnittes im UW nicht verbunden ist.

Ausgehend von einem Erdschluss in der ONS 1 verringert sich gemäß der vereinfachten Berechnung die Erdungsspannung der folgenden ONS entsprechend der Kettenleiterstruktur (siehe auch Kapitel 0). Ein ähnliches Verhalten ergibt sich auch bei einer offen betriebenen Ringstruktur (siehe Abbildung 2-66, blaue vs. oranger Verlauf), mit dem Unterschied, dass sich die Phasenlage der Erdungsspannungen im offenen Ringbetrieb im Bereich der zweiten Ringhälfte dreht und somit die Stromflussrichtung über die ONS-Erdungsanlage ident mit jener über die UW-Erdungsanlage ist.

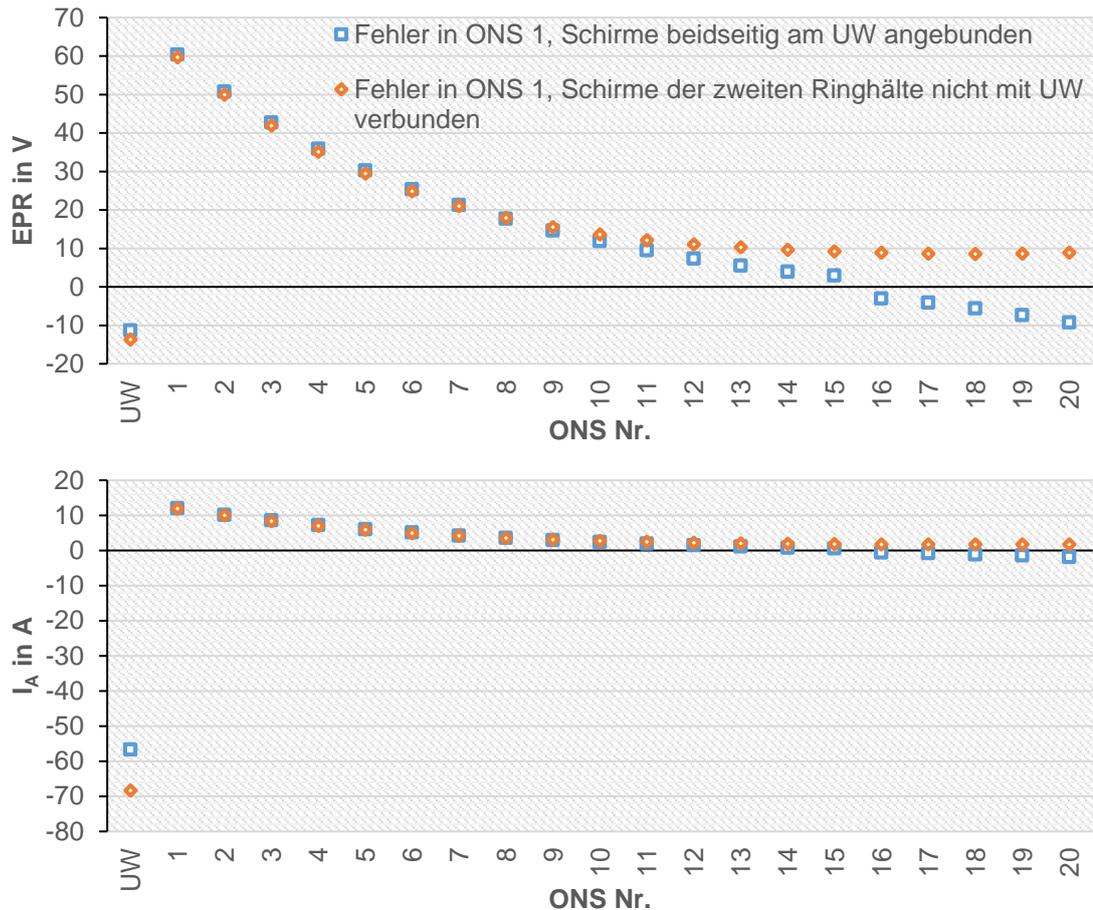


Abbildung 2-66: Erdungsspannungen<sup>12</sup> EPR (oben) und Anlagenerdungsströme I<sub>A</sub> (unten), Vergleich der Berechnungsergebnisse ermittelt aus dem vollständigen Modell und dem vereinfachten Berechnungsmodell

### 2.7.4 Analyse der Stromaufteilung abhängig vom Fehlerort bei Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethode

Im Rahmen der bisherigen Analysen im Zusammenhang mit der vereinfachten Berechnungsmethode wurde der Fehler in der ersten ONS nach dem UW angenommen. Im Folgenden wird analysiert, welchen Einfluss die Lage des Fehlerorts auf die Fehlerstromaufteilung unter Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethode hat.

Eine grundlegende Überlegung stellt hierbei der Umstand dar, dass die Längsimpedanz des Kabelschirms bezogen auf den Ausbreitungswiderstand einer ONS um ein Vielfaches kleiner ist, wobei die Relation natürlich abhängig von der Kabelgeometrie (z.B. Länge) und der Größe des Ausbreitungswiderstandes der ONS-Erder ist.

<sup>12</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung, in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

Unter der Randbedingung, dass die Ausbreitungswiderstände der Erder jener ONS welche zwischen Umspannwerk und der erdschlussbehafteten ONS liegen, weggelassen werden (siehe Abbildung 2-67), werden die Reduktionsfaktoren analysiert.

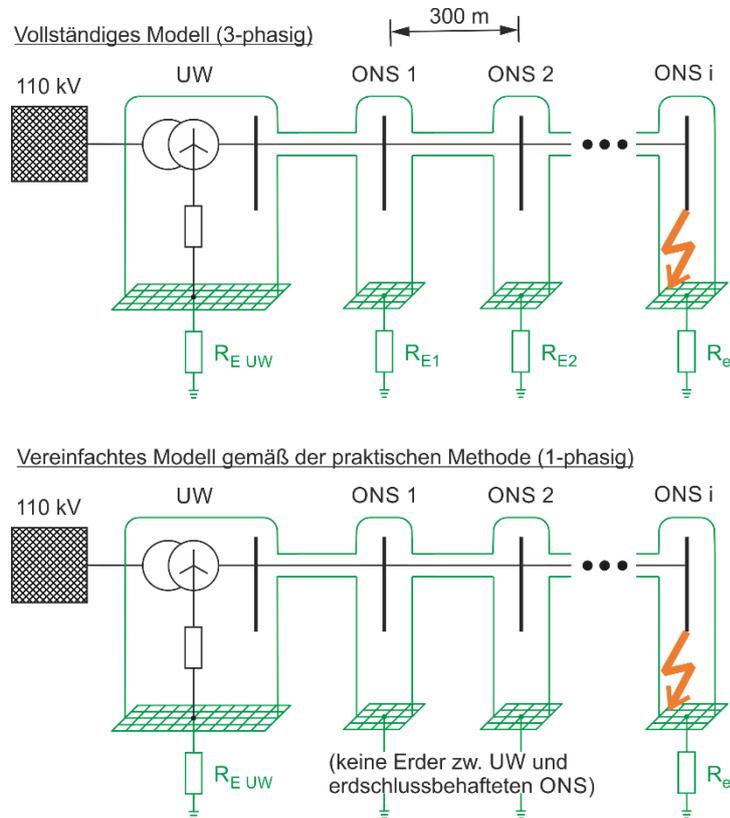


Abbildung 2-67: Übersicht der Modellanordnungen zur Analyse der Reduktionsfaktors mittels des vollständigen Modells (oben) sowie der vereinfachten praxisorientierten Berechnung (unten)

Wie im Grundlagenkapitel (siehe Kapitel 2.7.1) bereits erläutert wurde, kann der Reduktionsfaktor wie folgt angeschrieben werden:

$$|r| = \left| \frac{(\underline{Z}'_{SS} - \underline{Z}'_{SL}) \cdot l}{\underline{Z}'_{SS} \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E UW}} \right| = \left| \frac{(R'_e + R'_S) \cdot l + j(X'_{SS} + X'_S) \cdot l - (R_e + jX'_{LS} \cdot l)}{(R'_e \cdot l + R_S) + j(X'_{SS} + X'_S) \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E UW}} \right| \quad (\text{Gl. 2-19})$$

$$\left| \frac{R'_S \cdot l + j(X'_{SS} + X'_S) \cdot l - jX'_{LS} \cdot l}{R'_S \cdot l + j(X'_{SS} + X'_S) \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E UW}} \right|$$

- $R'_e = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot l$  ... Erdwiderstand in  $\Omega/m$
- $R'_S$  ... ohmscher Widerstand des Kabelschirms in  $\Omega/m$
- $X'_{SS}$  ... Selbstreaktanz der Leiter-Erde-Schleife des Kabelschirms in  $\Omega/m$
- $X'_S$  ... Innere Reaktanz des Kabelschirms in  $\Omega/m$
- $X'_{LS}$  ... Koppelreaktanz zwischen Außenleiter und Kabelschirm  $\Omega/m$

Es können folgende weiter Vereinfachung auf (Gl. 2-26) angewendet werden



- Bei üblichen Kabeltypen ist der ohmsche Widerstand des Schirmes  $R_S$  um einen Faktor 10 größer als der Erdwiderstand  $r_e$  und wird im Folgenden daher nicht mehr berücksichtigt.
- Bei üblichen Kabeltypen ist die innere Reaktanz des Schirmes  $X_S$  um mindestens einen Faktor zwanzig kleiner als die Selbstreaktanz  $X_{SS}$  und wird daher im Folgenden ebenfalls nicht mehr berücksichtigt.
- Bedingt durch die Kabelgeometrie unterscheidet sich die Selbstreaktanz  $X_{SS}$  des Kabelschirms im einstelligen Prozentbereich von der Koppelimpedanz zwischen Schirm und Außenleiter und kann daher im Zähler von (Gl. 2-26) vernachlässigt werden.

Somit verbleibt für den Reduktionsfaktor folgender vereinfachter Zusammenhang

$$|\underline{r}_{\text{vereinf.}}| = \left| \frac{R'_S \cdot l}{(R_S + jX_{SS}) \cdot l + \underline{Z}_E + R_{E\text{ UW}}} \right| \quad (\text{Gl. 2-20})$$

Der Reduktionsfaktor bei Hintereinanderschaltung mehrerer Kabelstücke kann durch Summierung wie folgt bestimmt werden

$$|\underline{r}_{\text{vereinf. ges}}| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n R_{Si} \cdot l_i}{(\sum_{i=1}^n R_{Si} + jX_{SSi}) \cdot l_i + \underline{Z}_E + R_{E\text{ UW}}} \right| \quad (\text{Gl. 2-21})$$

$n$  ... Anzahl der Teilkabelstücke  
 $i$  ... Index des jeweiligen Teilkabelstücks

Die Abbildung 2-68 zeigt die Beträge der Reduktionsfaktoren welche mittels des vollständigen Modelles und der vereinfachten Methode gemäß Gl.2-17 bzw. 2-18 bestimmt wurden. Wie aus der Abbildung hervorgeht, liefert die vereinfachte Berechnung bereits bei 10 ONS eine Überbewertung hinsichtlich des Reduktionsfaktors von fast 100%. Hinsichtlich Personensicherheit im Erdschussfall würde somit nach den Ergebnissen der vollständigen Modellierung, bei 10 ONS eine um den Faktor 2 größere Erdungsspannung bestimmt werden. Dieser Effekt nimmt mit Vergrößerung des Abstandes zwischen den ONS weiter zu. Der Einsatzbereich der vereinfachten Modellierung beschränkt sich somit auf Erdschlüsse in ONS welche im Nahbereich des Umspannwerkes liegen.

Die Abweichung zwischen den gemäß Gl.2-16 und Gl 2-18 berechneten Reduktionsfaktoren ist zu vernachlässigen.

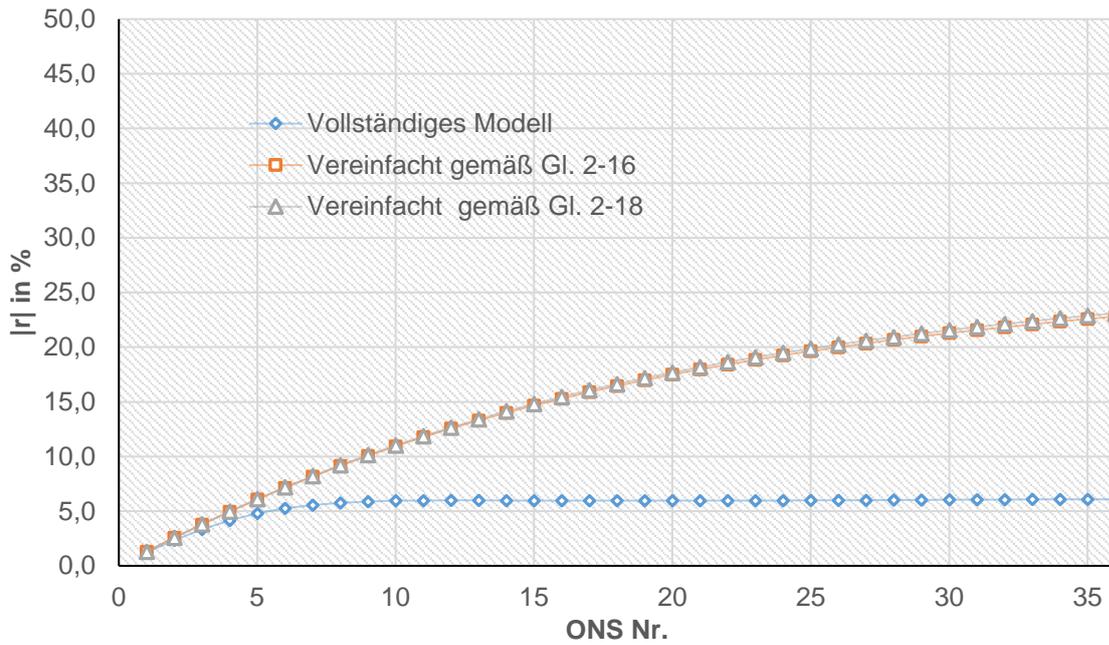


Abbildung 2-68: Reduktionsfaktoren bei vereinfachter Berechnungsmethode gegenüber der Berechnung mittels des vollständigen Modells

## 2.8 Anwendung der Telegraphengleichung zur Bestimmung von Stationspotentialen bei stichförmigen Netzstrukturen

### 2.8.1 Allgemeines

Im Folgenden wird analysiert, ob sich durch Anwendung der Leitungsgleichungstheorie die Kettenleiterstruktur bestehend aus Kabelschirm und Ausbreitungswiderstände der ONS-Erder sowie die die Strom- und Potentialverhältnisse im Erdschlussfall einfach bestimmt werden können. Hierzu ist es im ersten Schritt erforderlich, eine abgewandelte Form der Leitungsgleichung herzuleiten, um die induktive Kopplung zwischen dem fehlerstromführenden Außenleiter und dem Kabelschirm berücksichtigen zu können.

### 2.8.2 Herleitung der abgewandelten Telegraphengleichung

Die im Folgenden durchgeführte Herleitung basiert auf der bekannten Leitungsgleichung (z.B. [11]) bzw. Telegrafengleichung, deren Grundmodell um eine zusätzliche Spannungsquelle erweitert wurde (siehe Abbildung 2-69). Diese repräsentiert jene Spannung, die durch einen weiteren stromführenden Leiter, über die Koppelimpedanz, eine Spannung in die zu untersuchende Leitung induziert.

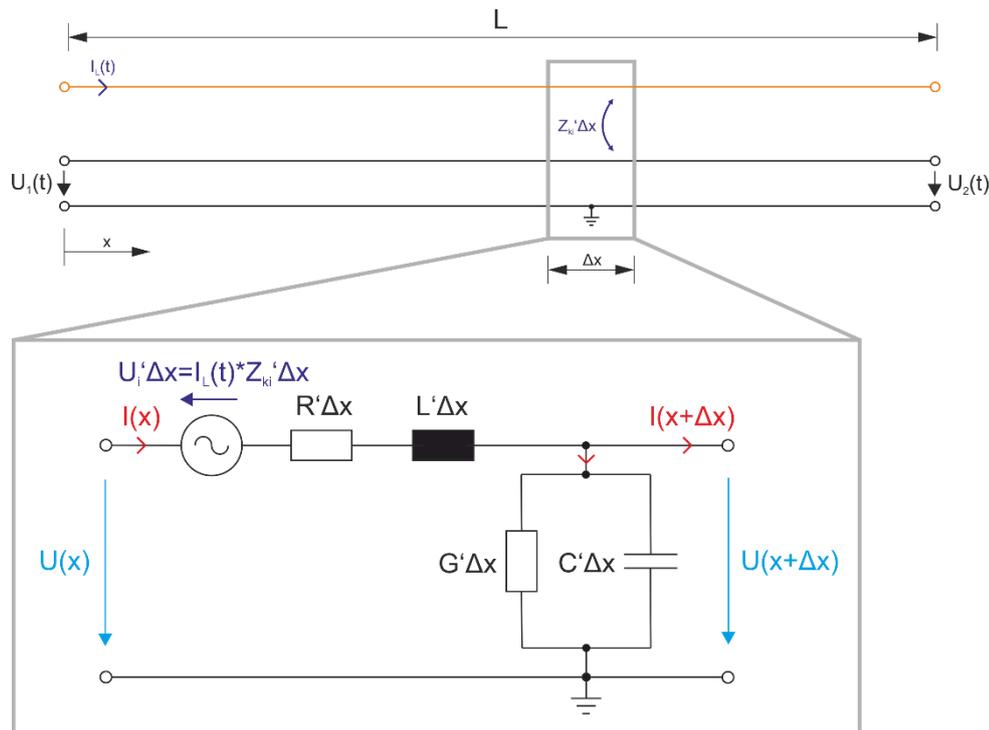


Abbildung 2-69: Ersatzschaltbild Leitungsgleichung

Da im vorliegenden Anwendungsfall nur sinusförmige Spannungen und Ströme von Interesse sind, können durch Anwendung der Maschenregel sowie der Knotenregel folgende Gleichungen für ein differentielles Leitungsstück (siehe Abbildung 2-69) angegeben werden.



$$U(x) - U(x + \Delta x) - I(x) \cdot (R' + j\omega L') \cdot \Delta x + U_i' \cdot \Delta x = 0 \quad (\text{Gl. 2-22})$$

$$I(x) - U(x + \Delta x) \cdot (G' + j\omega C') \cdot \Delta x - I(x + \Delta x) = 0 \quad (\text{Gl. 2-23})$$

$U(x)$	...	Spannung am Ort „ $x$ “ in V
$U(x + \Delta x)$	...	Spannung am Ort „ $x + \Delta x$ “ in V
$I(x)$	...	Strom am Ort „ $x$ “ in A
$I(x + \Delta x)$	...	Strom am Ort „ $x + \Delta x$ “ in A
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	...	Kreisfrequenz in 1/s
$R'$	...	Längswiderstand in $\Omega/\text{m}$
$L'$	...	Längsinduktivität in H/m
$G'$	...	Querleitwert in S/m
$C'$	...	Querkapazität F/m
$U_i'$	...	Induzierte Spannung in V/m
$\Delta x$	...	Differentielle Leiterstücklänge in m

Für den Grenzfall, dass  $\Delta x \rightarrow 0$  kann der Differenzenquotient der Spannungsgleichung in den Differenzialquotienten übergeführt werden:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{U(x) - U(x + \Delta x)}{\Delta x} - I(x) \cdot (R' + j\omega L') + U_i' = 0 \quad (\text{Gl. 2-24})$$

$$-\frac{\partial U(x)}{\partial x} - I(x) \cdot (R' + j\omega L') + U_i' = 0$$

Durch Ableitung von (Gl. 2-24) erhält man die zweite Ableitung der differentiellen Spannungsgleichung:

$$-\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} - \frac{\partial I(x)}{\partial x} \cdot (R' + j\omega L') \cdot \Delta x = 0 \quad (\text{Gl. 2-25})$$

Durch Umformung von (Gl. 2-25) ergibt sich die erste Ableitung des Stromes zu:

$$-\frac{\partial I(x)}{\partial x} = \frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} \cdot \frac{1}{(R' + j\omega L')} \quad (\text{Gl. 2-26})$$

Für die Knotengleichung des Stromes gilt ebenfalls, dass für den Grenzfall  $\Delta x \rightarrow 0$  der Differenzenquotient in den Differenzialquotienten übergeführt werden kann:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x) - I(x + \Delta x)}{\Delta x} - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} U(x + \Delta x) \cdot (G' + j\omega C') = 0 \quad (\text{Gl. 2-27})$$

$$-\frac{\partial I(x)}{\partial x} = U(x) \cdot (G' + j\omega C')$$

Durch Gleichsetzen von (Gl. 2-26) und (Gl. 2-27) ergibt sich die erste Leitungsgleichung zu:

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} - U(x) \cdot (R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C') = 0 \quad (\text{Gl. 2-28})$$

Hierbei stellt der Teilausdruck

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} \quad (\text{Gl. 2-29})$$

die Fortpflanzungskonstante dar, der Realteil ist hierbei ein Maß für die Dämpfung und der Imaginärteil ein Maß für die Phasenkorrektur.

In gekürzter Schreibweise kann die erste Leitungsgleichung wie folgt angegeben werden:

$$\frac{\partial U^2(x)}{\partial x^2} - \gamma^2 = 0 \quad (\text{Gl. 2-30})$$

Der Lösungsansatz für die Differentialgleichung lautet:

$$U(x) = U_p \cdot e^{-\gamma x} + U_r \cdot e^{\gamma x} \quad (\text{Gl. 2-31})$$

bzw.

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = -\gamma \cdot U_p \cdot e^{-\gamma x} + \gamma \cdot U_r \cdot e^{\gamma x} \quad (\text{Gl. 2-32})$$

Aus physikalischer Sicht handelt es sich bei  $U_p$  um die Spannung der vorlaufenden Welle und bei  $U_r$  um die Spannung der rücklaufenden Welle.

Die zweite Leitungsgleichung ergibt sich durch Umformen zu:

$$I(x) = -\frac{\partial U(x)}{\partial x} \cdot \frac{1}{(R' + j\omega L')} + \frac{U_i'}{(R' + j\omega L')} \quad (\text{Gl. 2-33})$$

Durch Einsetzen von (Gl. 2-32) in (Gl. 2-33) ergibt sich:

$$I(x) = (U_p \cdot e^{-\gamma x} - U_r \cdot e^{\gamma x}) \cdot \sqrt{\frac{G' + j\omega C'}{R' + j\omega L'}} + \frac{U_i'}{R' + j\omega L'} \quad (\text{Gl. 2-34})$$

Hierbei wird der Wellenwiderstand durch folgenden Term repräsentiert:

$$Z_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (\text{Gl. 2-35})$$

Durch Multiplikation des Wellenwiderstandes auf die linke Seite ergibt sich in gekürzter Schreibweise:

$$I(x) \cdot Z_W = U_p \cdot e^{-\gamma x} - U_r \cdot e^{\gamma x} + K \quad (\text{Gl. 2-36})$$

Wobei zur besseren Übersicht der letzte konstante Term wie folgt zusammengefasst wurde.

$$K = \frac{U_i' \cdot Z_W}{(R' + j\omega L')} \quad (\text{Gl. 2-37})$$

Es ergeben sich die beiden Leitungsgleichungen aus (Gl. 2-31) und (Gl. 2-34) zu:

$$U(x) = U_p \cdot e^{-\gamma x} + U_r \cdot e^{\gamma x} \quad (\text{Gl. 2-38})$$

$$I(x) \cdot Z_W = U_p \cdot e^{-\gamma x} - U_r \cdot e^{\gamma x} + K \quad (\text{Gl. 2-39})$$

### 2.8.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse aus dem vollständigen Modell mit den Ergebnissen aus der abgewandelten Leitungsgleichung

Um die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Modellierung vergleichen zu können, sind im ersten Schritt die Konstanten  $U_p$  und  $U_r$  zu bestimmen. Diese werden durch die Verhältnisse am Anfang und am Ende der Leitung bestimmt. Für die weiterführenden Analysen wird daher von der in Abbildung 2-70 Situation ausgegangen. Diese besteht aus einer 10-kV-Stichleitung welche gelöscht betrieben wird. Die Erdungssysteme der einzelnen Stationen sind über die Kabelschirme verbunden, haben jeweils einen Abstand von 300 m zueinander und je

Station einen Erdausbreitungswiderstand von  $5 \Omega$ . Das Fehlerszenario ist ein Erdschluss (mit vernachlässigbaren Fehlerübergangswiderstand) in der letzten Station.

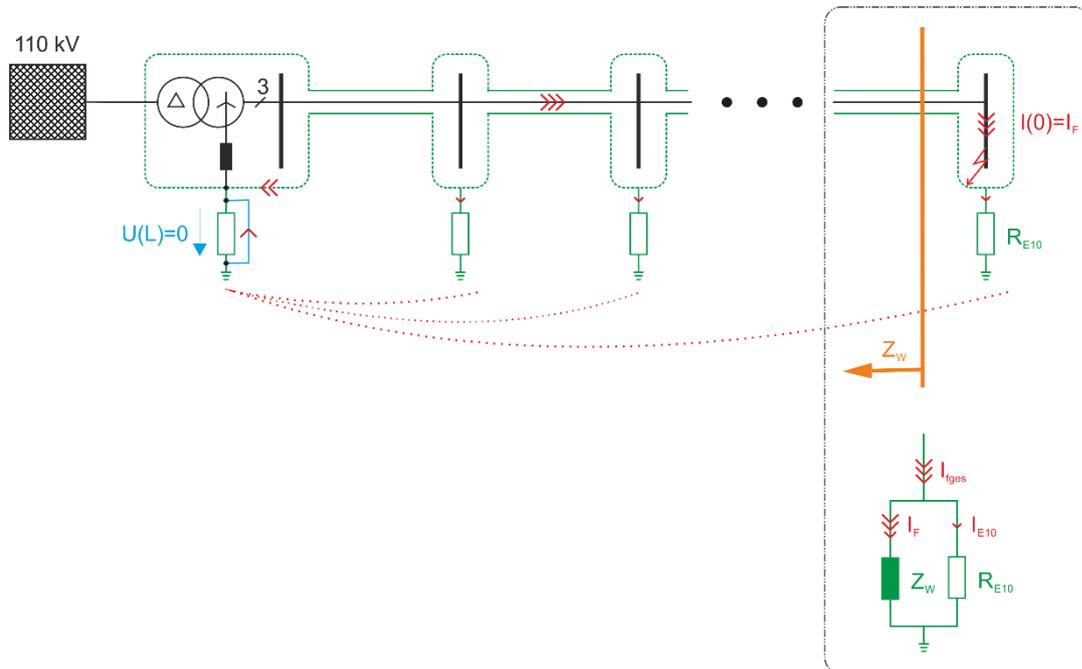


Abbildung 2-70: Fehlerszenario für die Bestimmung der Integrationskonstanten

Für die Bestimmung der Integrationskonstanten wurde der Bezugspunkt bei der letzten Station festgelegt wobei die örtlich positive Richtung zur Quelle verläuft. Da in der Realität der Erdausbreitungswiderstand eines UWs meist mindestens um einen Faktor 10 kleiner ist als jener der von MS/NS-Trafostationen (betrachtet wird hier nur die lokale Stationserdungsanlage) wird dieser auf null gesetzt, es ergeben sich somit folgende Randbedingungen:

$$U(L) = 0 = U_p \cdot e^{-\gamma \cdot L} + U_r \cdot e^{\gamma \cdot L} \quad (\text{Gl. 2-40})$$

$$I(0) = I_F = \frac{U_p}{Z_W} - \frac{U_r}{Z_W} \cdot e^{\gamma \cdot x} + \frac{K}{Z_W} \quad (\text{Gl. 2-41})$$

Die Lösung des Gleichungssystems bestehend aus (Gl. 2-40) und (Gl. 2-41) ergibt die gesuchten Konstanten zu:

$$U_r = -U_p \cdot e^{-2 \cdot \gamma \cdot L} \quad (\text{Gl. 2-42})$$

$$U_p = \frac{I_F \cdot Z_W - K}{(1 + e^{-2 \cdot \gamma \cdot L})} \quad (\text{Gl. 2-43})$$

Wie aus Abbildung 2-70 hervorgeht, ist beim Einsetzen des Fehlerstroms zu berücksichtigen, dass in den Leitungsgleichungen der erste Erdungswiderstand  $R_{E10}$  nicht berücksichtigt ist, mittels Stromteilerregel kann der für die Leitungsgleichung einzusetzende Anteil des Fehlerstromes jedoch wie folgt ermittelt werden:

$$I_F = I_{Fges} \cdot \frac{1}{Z_W} \cdot \frac{Z_W \cdot R_{E10}}{Z_W + R_{E10}} \quad (\text{Gl. 2-44})$$

### Vergleich der Berechnungsmodelle

Die Abbildung 2-71 zeigt die berechneten Stationspotentiale aus der Berechnung mit der Leitungsgleichung und dem Simulink-Modell. Bei bekannter Stromaufteilung können somit im gezeigten Beispiel, mit der angepassten Leitungsgleichung, die Stationspotentiale zwischen UW und der erdschlussbehafteten ONS mit einer Abweichung von kleiner 10 % bestimmt werden.

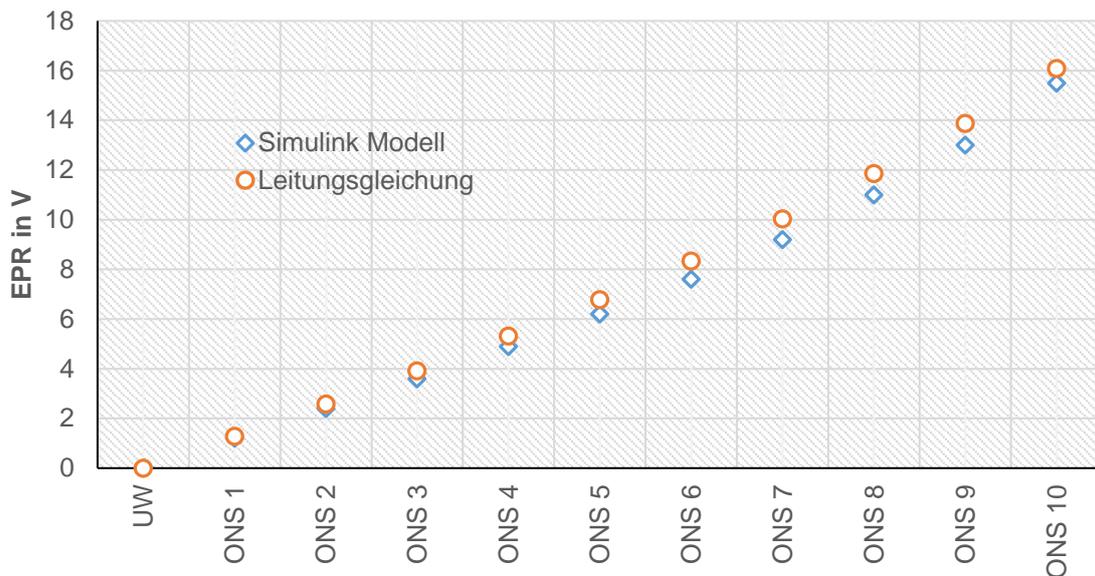


Abbildung 2-71: Gegenüberstellung der Stationspotential aus den Berechnungsergebnissen der Leitungsgleichung und des vollständigen Simulink-Modells bei einem Fehlerstrom von  $I_F=23,5$  A

### Anwendungsgrenzen

Die Anwendbarkeit der Leitungsgleichung für den vorliegenden Zweck ist abhängig von der Bestimmbarkeit der Konstanten  $U_p$  und  $U_r$ . Hierzu müssen die Randbedingungen am Ende und Anfang der Leitung bekannt sein. Für das Kabelstück zwischen UW und Erdschlussort ist dies, wie in Kapitel 2.8.3 gezeigt, bei bekanntem Fehlerstrom und der Voraussetzung, dass die Erdungsspannung im UW zu vernachlässigen ist, möglich. Dieser Umstand stellt wie aus den Beispielen in Kapitel 2.5 hervorgeht jedoch nicht den typischen Fall dar. Bei Stickleitungen ergibt sich für die Berechnung der Erdungsspannungen jener ONS, welche hinter der erdschlussbehafteten Station liegen, das Problem, dass die Erdungsspannung der letzten ONS vorab nicht bekannt ist. Somit müsste zuerst im Rahmen der klassischen Netzwerktheorie die Erdungsspannung der letzten Station berechnet werden, bevor die Konstanten  $U_p$  und  $U_r$  bestimmt werden können. Ausgenommen ist der Fall, hinter der erdschlussbehafteten ONS folgt eine ausreichend große Anzahl an ONS, bei welcher sicher gestellt werden kann, dass die letzte ONS der Kettenleiterstruktur nicht mehr zur Wirkung des Gesamterdungssystems beiträgt (kein Fehlerstrom über dessen Anlagenerder abgeleitet wird).



Allgemein können mit den Leitungsgleichungen in der gezeigten Form keine inhomogene Fälle und unterschiedliche Erdungsanlagen berücksichtigt werden.

## 2.9 Messtechnische Analyse der Fehlerstromaufteilung im Rahmen realer Erdschlussversuche

Im Rahmen von mehreren realen Erdschlussversuchen wurde durch den Autor dieser Arbeit Stromaufteilungsmessungen in MS/NS-Trafostationen durchgeführt. Die Trafostationen waren hierbei im urbanen (Rand-) Gebiet angesiedelt. Für die Versuche wurde jeweils in der zu analysierenden MS/NS-Trafostation ein niederohmiger Erdschluss mittels Erdungsgarnitur hergestellt und bespannt.

Eine Übersicht über die Anzahl der Abgänge ist in Tabelle 2-3 dargestellt.

Tabelle 2-3: Übersicht über die Abgangsanzahl der analysierten MS/NS Trafostationen

Nr.	Anzahl MS Abgänge	Anzahl NS Abgänge	Anzahl zusätzlicher Erder <sup>13</sup>
Messung 1	3	5	2
Messung 2	4	8	1
Messung 3	4	4	0

Die prozentuelle Aufteilung der Stromeffektivwerte welche im Rahmen der Versuche messtechnisch erfasst wurden, sind in Abbildung 2-72 dargestellt. Zu beachten hierbei ist, dass durch die Vernachlässigung der Winkel die Stromsumme größer 100 % sein kann.

Ein Vergleich mit der in Kapitel 2.6.2 mittels Simulationsmodell berechneten Stromaufteilung liefert vergleichbare Ergebnisse.

Die Abbildung 2-73 zeigt die Stromaufteilung der ersten Messanordnung in Form eines Zeigerdiagrammes, welches ebenfalls mit den in Kapitel 2.6.2 berechneten Diagrammen vergleichbar sind.

**Anmerkung:** Eine Validierung des in Kapitel 2.3.2 beschriebem Modells war mit den hier angeführten Messergebnissen nicht möglich, da aufgrund der baulichen Situation nicht alle Erdungsleiter, begleitet er und Potentialausgleichsleiter zugänglich waren.

Die Messungen verdeutlichen, dass nur ein Bruchteil des Fehlerstromes (3 % - 6 % im Rahmen der vorliegenden Messungen) über die lokale Erdungsanlage abgeleitet werden.

<sup>13</sup> z.B. Begleiterder

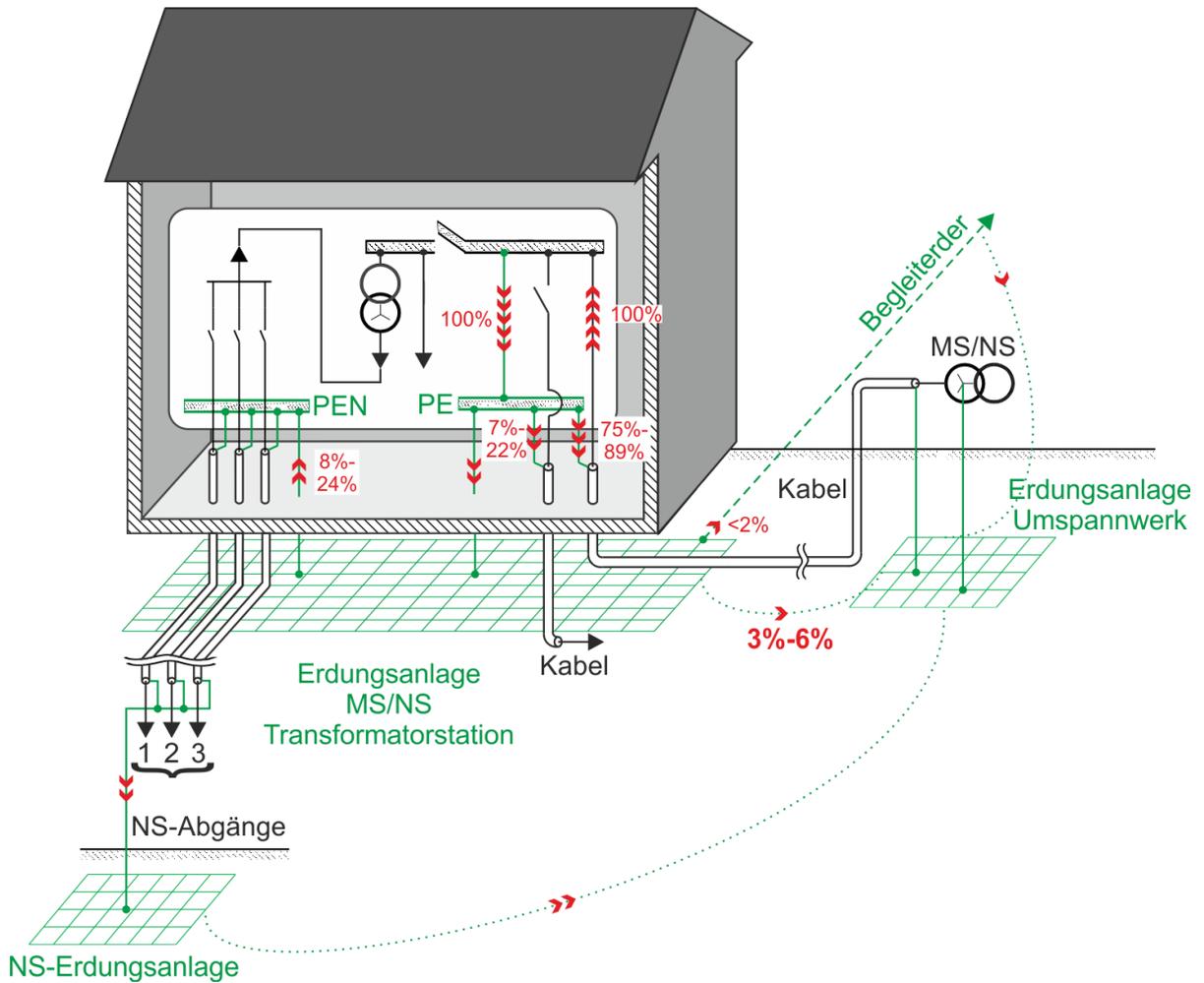


Abbildung 2-72: Übersicht über die Messung der Stromaufteilung in einer MS/NS-Trafostation im urbanen Kabelnetz, Dargestellt sind die Effektivwerte der Beträge

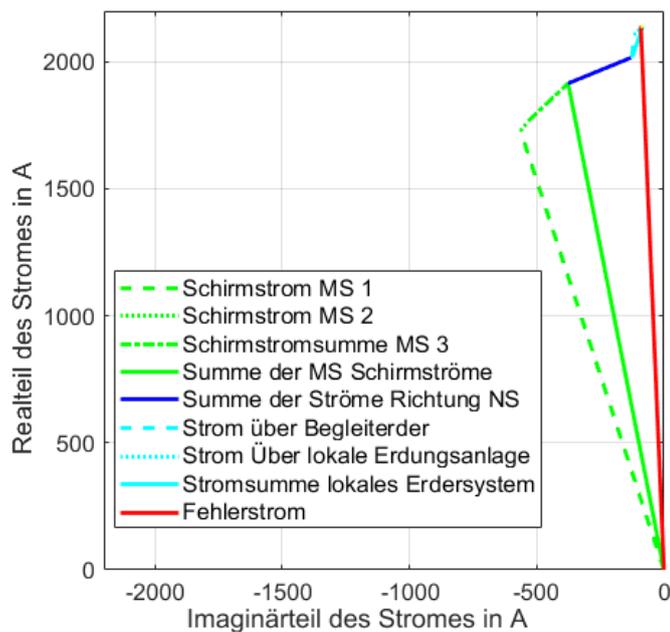


Abbildung 2-73: Zeigerdiagramm der Stromaufteilung der Messung 1





## 3 Einflussfaktoren auf die messtechnische Überprüfung von Erdungssystemen

### 3.1 Beschreibung der Analysemethode und der Ziele

Die messtechnische Überprüfung von Erdungssystemen in urbanen Gebieten (globalen Erdungssystemen) ergibt in der Praxis einige Besonderheiten, welche im Rahmen dieses Kapitels aufgearbeitet werden. Die Abbildung 3-1 zeigt in kompakter Form die Ziele sowie die wichtigsten Schritte der für die Lösung der Aufgabenstellung angewandten Methodik.

#### Erarbeitung der Grundlagen

Die Erarbeitung der Grundlagen gliedert sich in zwei Teile:

Im ersten Teil werden im Rahmen einer Literaturrecherche die wesentlichen Punkte hinsichtlich Messmethoden, Messabweichung und Einflussfaktoren zusammengefasst. Im zweiten Schritt werden unter Berücksichtigung eigener praktischer Messerfahrungen Fragestellungen gewonnen.

#### Analysen

Die Fragestellungen werden mittels geeigneter Verfahren beantwortet. Neben einfacher analytischer Verfahren, wird für die Untersuchung der ohmschen Beeinflussung die Methode der Potentialkoeffizienten angewendet.

Die Analyse hinsichtlich physischer Ausdehnung begrenzter Strukturen erfolgt mittels Finite-Elemente-Methode.

#### Erkenntnisse

Aus diesen Berechnungen werden praxisrelevante Erkenntnisse gewonnen.

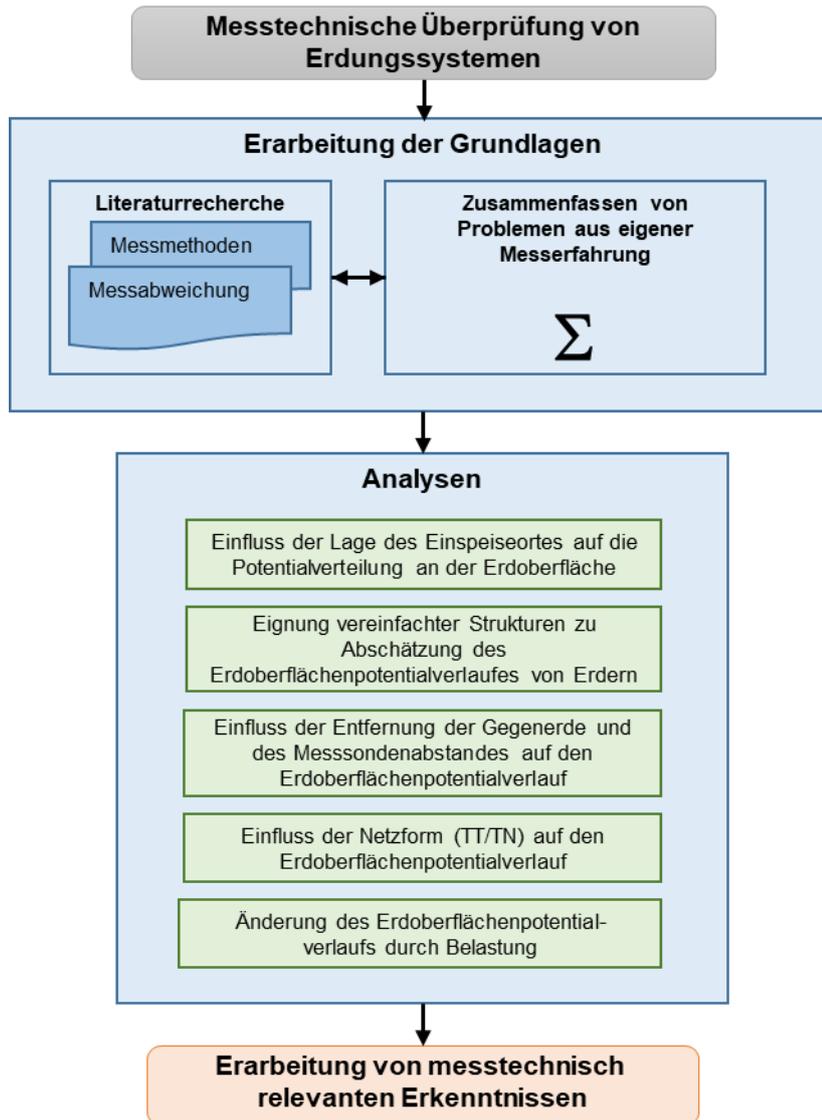


Abbildung 3-1: Darstellung der Analysemethode zur Untersuchung der Strom- und Erderspannungsverhältnisse im Erdschlussfall

### 3.2 Grundlagen - Messprinzip

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von historisch entwickelten Messkonzepten zur Erfassung von Erdoberflächenpotentialen, Schritt- bzw. Berührungsspannungen (siehe [3]) und Ausbreitungswiderständen. Hierbei besteht das Grundprinzip, wie in Abbildung 3-2 dargestellt, immer darin, einen Strom zwischen der messtechnisch zu erfassenden Erdungsanlage und einer möglichst weit entfernten Gegenerde einzuspeisen und das aus dem Strömungsfeld im Erdreich resultierende Erdoberflächenpotential sowie Schritt- und Berührungsspannungen zu erfassen.

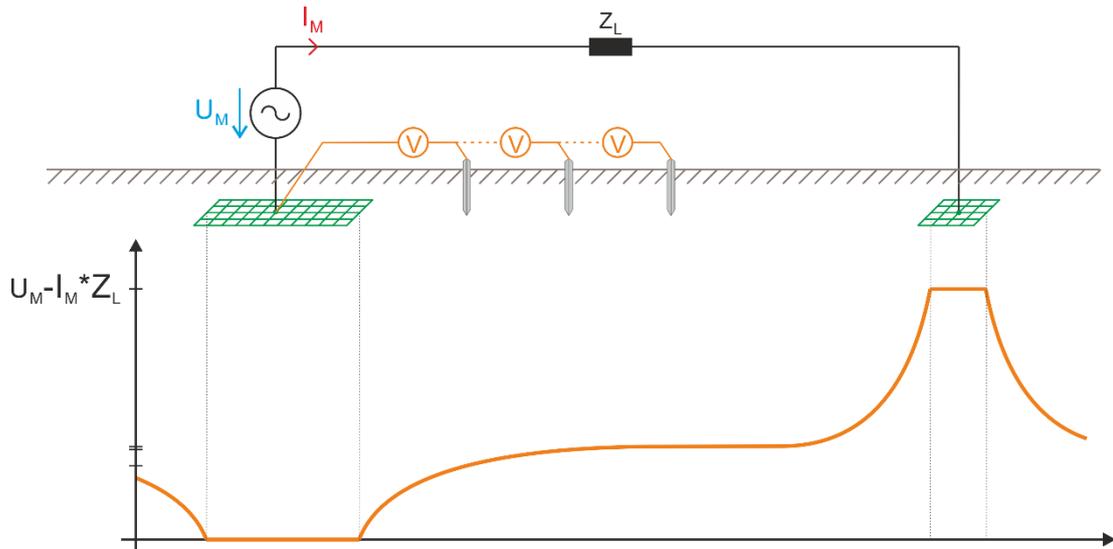


Abbildung 3-2: Grundprinzip der Erdungsmessung

Im der Praxis stellt die messtechnische Überprüfung von Erdungsanlagen hinsichtlich Personensicherheit aufgrund der Vielzahl von vorhandenen Einflussfaktoren oft eine große organisatorische und technische Herausforderung dar.

### 3.2.1 Allgemeines - Messabweichung

Allgemein beschreibt die Messabweichung die Differenz zwischen Messwert und dem wahren Wert, wobei zwischen zufälligen und systematischen Messabweichungen unterschieden werden muss. Zufällige oder statistische Messabweichungen treten unregelmäßig auf. Das heißt, sie schwanken in Größe und Vorzeichen. Hervorgerufen werden zufällige Messabweichungen beispielsweise durch eine nicht beeinflussbare Änderung des Versuchsaufbaus sowie durch die Unvollkommenheit beim subjektiven Erfassen von Messwerten. Systematische Messabweichungen hingegen beeinflussen bei gleichen Versuchsbedingungen die Messung in gleicher Weise. Hervorgerufen werden sie zum Beispiel durch Unvollkommenheit der Messgeräte sowie durch systematische Änderungen der Versuchsbedingungen. Sie setzen sich aus einem bekannten und einem unbekanntem Anteil zusammen. Entsprechend dieser Kategorisierung können bei der Bestimmung von Erdausbreitungswiderständen folgende Fehler auftreten:

#### zufällige Messabweichungen

- kapazitive Einkopplungen
- induktive Einkopplungen
- metallische Einbauten im Erdreich
- variable fremdfrequente Strömungsfelder im Erdreich

#### systematische Messabweichungen

- Messgeräteabweichung inkl. Wandlerfehler (z.B. Stromzangen)



### 3.2.2 Analyse der Vor- und Nachteile der einzelnen Messmethoden zur Überprüfung von Erdungssystemen

Messmethodenbedingte Rahmenbedingungen:

In der Literatur (siehe [21], [3]) finden sich umfangreiche Beschreibungen der unterschiedlichsten Messverfahren. Ziel dieser Verfahren ist, die im Kapitel 3.2.1 erwähnten Einflussfaktoren weitestgehend zu minimieren. Aus technischer Sicht können Störeinflüsse durch die Wahl eines „günstigen“ geometrischen Messaufbaus und/oder das verwendete Messverfahren minimiert werden. Bezüglich des Messaufbaus können zum Beispiel durch die Vermeidung einer Parallelführung der Spannungsmessleitung zu einkoppelnden Systemen (z.B. Hochspannungsfreileitungen, siehe [21] Kapitel 2.5.2) induktive Spannungseinkopplungen reduziert werden. Oft findet man in der Praxis jedoch Gegebenheiten vor, die einen günstigen geometrischen Messaufbau nicht zulassen. Zudem können meist nicht alle Störeinflüsse (z.B. netzfrequenzfremde Strömungsfelder im Erdreich durch z.B. Bahnrückströme) zufriedenstellend minimiert werden. Aus diesem Grund haben sich, basierend auf der technischen Weiterentwicklung von Messgeräten, immer neue Messverfahren etabliert.

Die Vor- und Nachteile dieser Verfahren gemäß M. Lindinger [21] sind in Tabelle 3-1 angeführt.

Tabelle 3-1: Übersicht über die verschiedenen Messmethoden (+..besser, -...schlechter) [21]

Messmethode	Stromhöhe	Frequenzfehler	Berücksichtigung netzfrequenter Signale	Berücksichtigung harmonischer Signale	Berücksichtigung anderer Frequenzen
Realer Netzversuch mit Nennspannung	++	++	++	++	++
Kompensationsmethode	+	++	++	-	--
Ein/Aus bzw. Umpolmethode	+	++	++	-	--
Schwabungsmethode	+	++	++	+	--
FFT	-	0	++	++	++
Schwabungsmethode mit FFT	+	++	++	++	++

### 3.2.3 Einflussfaktoren bei der messtechnischen Untersuchung von Erdungssystemen unter Berücksichtigung praktischer Erfahrungen

Bei der messtechnischen Überprüfung von Erdungssystemen sind folgende Einflussfaktoren einzeln oder auch in Kombination zu berücksichtigen (siehe auch [21]).



- Induktive Kopplung  
Induktive Einkopplung von Spannungen durch z.B. Hochspannungsleitungen in die Messschleife können zu Fehlern bei der Beurteilung von Erdungsanlage führen. Die Frequenz der Spannung kann bei induktiver ein Kopplung in einem breiten Spektrum je nach Quelle (Bahnstrom, Netzfrequenz und deren Harmonische) variieren und das Messergebnis abhängig vom Messverfahren (siehe Kapitel 3.2.2) bis zu einem Faktor zwei<sup>14</sup> verfälschen. Da Erdungsanlagen in erster Linie ein ohmsches Verhalten aufweisen, lassen sich induktiv eingekoppelte Spannungen theoretisch über den Phasenwinkel zwischen Messstrom und Messspannung erkennen und eliminieren. In der Praxis stellt dies jedoch einen zusätzlichen Aufwand dar, welcher (wenn möglich) auch durch günstige Wahl des Verlaufes der Messtrassen reduziert werden kann.
- Strömungsfelder im Erdreich  
Die im Rahmen der Potentialmessungen erfassten Spannungen an der Erdoberfläche ergeben sich aus dem Spannungsabfall im Erdreich, der durch elektrische Strömungsfelder hervorgerufen wird. Bedingt durch gewisse Lasten im Netz, Bahnnetze und weitere Quellen können die gemessenen Spannungen (Erdoberflächenpotential, Schritt- und Berührungsspannungen) ein breites Frequenzspektrum beinhalten. Aus messtechnischer Sicht ergibt sich je nach Messverfahren (siehe Kapitel 3.2.2) somit die Schwierigkeit, die gemessene Spannung der verursachenden Quelle zuzuordnen zu können. Die effektivste Variante zur Reduzierung dieses Einflusses ist die Anwendung einer frequenzselektiven Messung (siehe Kapitel 3.2.2).
- Potentialverschleppung durch Einbauten im Erdreich  
In der Praxis ist es oft nicht möglich, im Rahmen der Messvorbereitung das Vorhandensein von allen elektrisch leitenden Einbauten (z.B. Metallrohre, Kabel und andere Infrastrukturen) im Bereich der zu analysierenden Erdungsanlagen zu erheben. Daher ist es von besonderer Wichtigkeit, ein Messverfahren zu wählen, welches zuverlässige Messwerte liefert, um Messausreißer im Rahmen der Potentialmessungen korrekt interpretieren zu können.
- Einspeiseort der Messquelle  
Aus betriebstechnischen Gründen ist es oft schwer möglich eine Verbindung (Kabel, Freileitung) zu einer geeigneten Gegenerde herzustellen. Die realen

---

<sup>14</sup> Erfahrungswert aus eigenen Messungen, Angabe stellt somit nicht die absolute Grenze dar.



Potentialverhältnisse die in der Praxis bei einem Fehler im Verteilernetz auftreten können im Rahmen von Messungen - abhängig von der Lage der Messtromquelle - immer nur bedingt im Rahmen einer Messung nachgebildet werden (siehe Kapitel 3.3).

- Ohmsche Verkopplung

Jeder Erder für sich erzeugt, wenn er einen Strom über das Erdreich ableitet, einen Spannungsabfall im Erdreich. Die daraus resultierenden Potentialverteilungen im Erdreich und an der Erdoberfläche überlagern sich. Der Abstand zweier Erder mit gegebener Geometrie beeinflusst hierbei den Verlauf des Erdoberflächenpotentials und somit auch die Schritt- und Berührungsspannungen. In der Praxis ist es bedingt durch die Bebauungsstruktur sowie Anforderungen des Netzbetriebs nicht immer möglich einen Abstand zwischen der messtechnisch zu analysierenden Erdungsanlage und dem Gegenerder einzuhalten, der die Vernachlässigung der ohmschen Beeinflussung der Erdungsanlagen zulässt (Analyse siehe Kapitel 3.5).

- Berührungsspannung

Gemäß ÖVE/ÖNORM E 8383 [32] bzw. ÖVE/ÖNORM EN 50522 [35] dürfen bei der Überprüfung von Erdungsanlagen hinsichtlich Personensicherheit Zusatzwiderstände (z.B. Standortwiderstand,...) berücksichtigt werden. Aufgrund der vielen möglichen Berührungsszenarien verbleibt immer ein Restrisiko für den Überprüfer hinsichtlich der Erkennung aller relevanten Berührungsszenarien, weshalb in der Praxis meist eine Beurteilung ohne Zusatzwiderstände erfolgt. Ein Berührungsszenario stellt jedoch immer eine belastete Situation dar (Analyse siehe Kapitel 3.6).

### 3.3 Einfluss des Einspeiseortes

Ausgehend von einer stichförmigen Kabelnetzstruktur (siehe Abbildung 3-3) soll im Folgenden der Einfluss des (Mess-)Quellenortes bei einem Erdschluss in ONS 10 auf die Potentialverteilung entlang der ONS des Stiches analysiert werden. Hierzu werden im Rahmen einer Fallstudie zwei Varianten verglichen:

- 1.) UW-gespeister Erdschluss (realer Erdschluss)
- 2.) Ersatzquellen-gespeisten Erdschluss (Durchführung von Erdungsmessungen)

Hintergrund der Analyse ist, dass es in der Realität bei der Durchführung von Erdungsmessungen meist nicht immer möglich ist, den Strom in den lokalen Anlagenerder zu bestimmen und somit nur das Erdungssystem als Ganzes (inkl. aller mit dem Anlagenerder verbunden Erder, Begleiterder, beidseitig geerdeter Kabelschirme, ...) beurteilt werden kann.

In diesem Fall hat der Einspeiseort der Quelle maßgebenden Einfluss auf die Verteilung der Erdungsspannungen, wobei meist nicht möglich ist, zum Zwecke von Erdungsmessungen die zu analysierende ONS bis zum UW frei zu schalten.

Die Speisung des Erdschlusses erfolgt bei Variante 1 mittels eines 110/10-kV-Transformators dessen Sternpunkt niederohmig geerdet ist, sodass sich im 1-poligen-Erd(kurz)schlussfall in der ONS 10 ein Fehlerstrom von ca. 1 kA einstellt. Bei Variante 2 erfolgt die Speisung des Erdschlusses mit einer idealen Spannungsquelle deren Einspeiseort wie aus Abbildung 3-3 hervorgeht variiert wird.

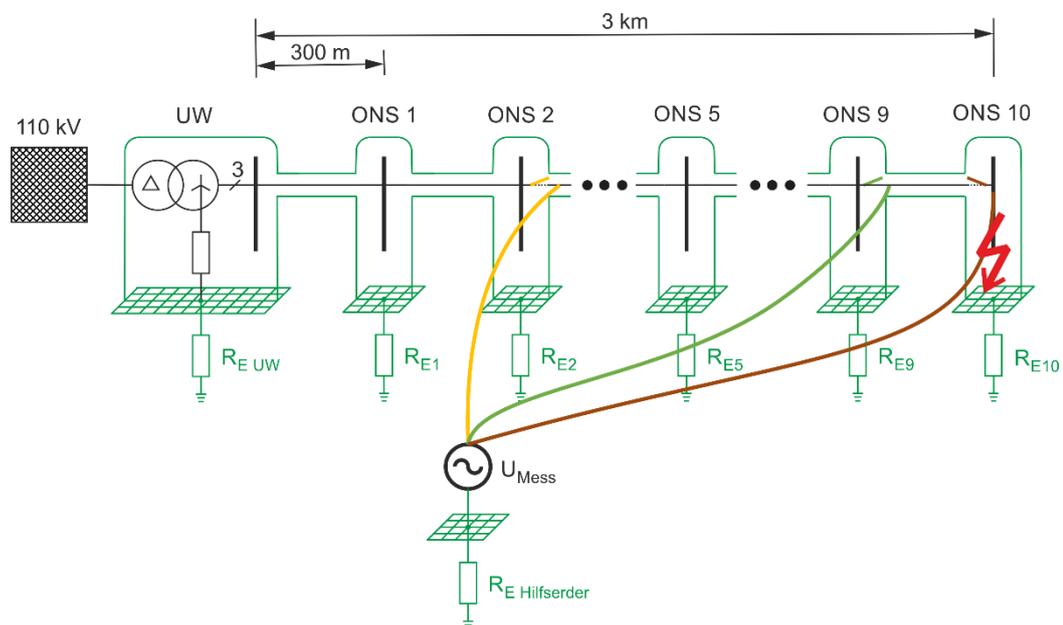


Abbildung 3-3: Modellstruktur für die Analyse des Einflusses des Einspeiseortes im Rahmen von Erdungsmessungen auf die Erdungsspannungen EPR, Erdschluss in ONS 10,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$ ,  $R_E = 5 \Omega$  (f. alle ONS ident)

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

Vergleicht man die Verteilung der Erdungsspannungen bei einem realen Erdschluss mit der Verteilung wie sie sich einstellen würde, wenn die Ersatzquelle zwischen dem Erder der zu analysierenden ONS und einer unbeeinflussten Gegenerde geschaltet werden würde, so ergibt sich bei einem Bezugsstrom von 1 kA bei der Ersatzquellenvariante eine 2,5-mal größere Erdungsspannung. Wie aus den Ergebnissen weiters hervorgeht, steigen die Erdungsspannungen der ONS 10 bei beiden Quellenvarianten immer weiter an, je näher die Ersatzquelle beim UW liegt.

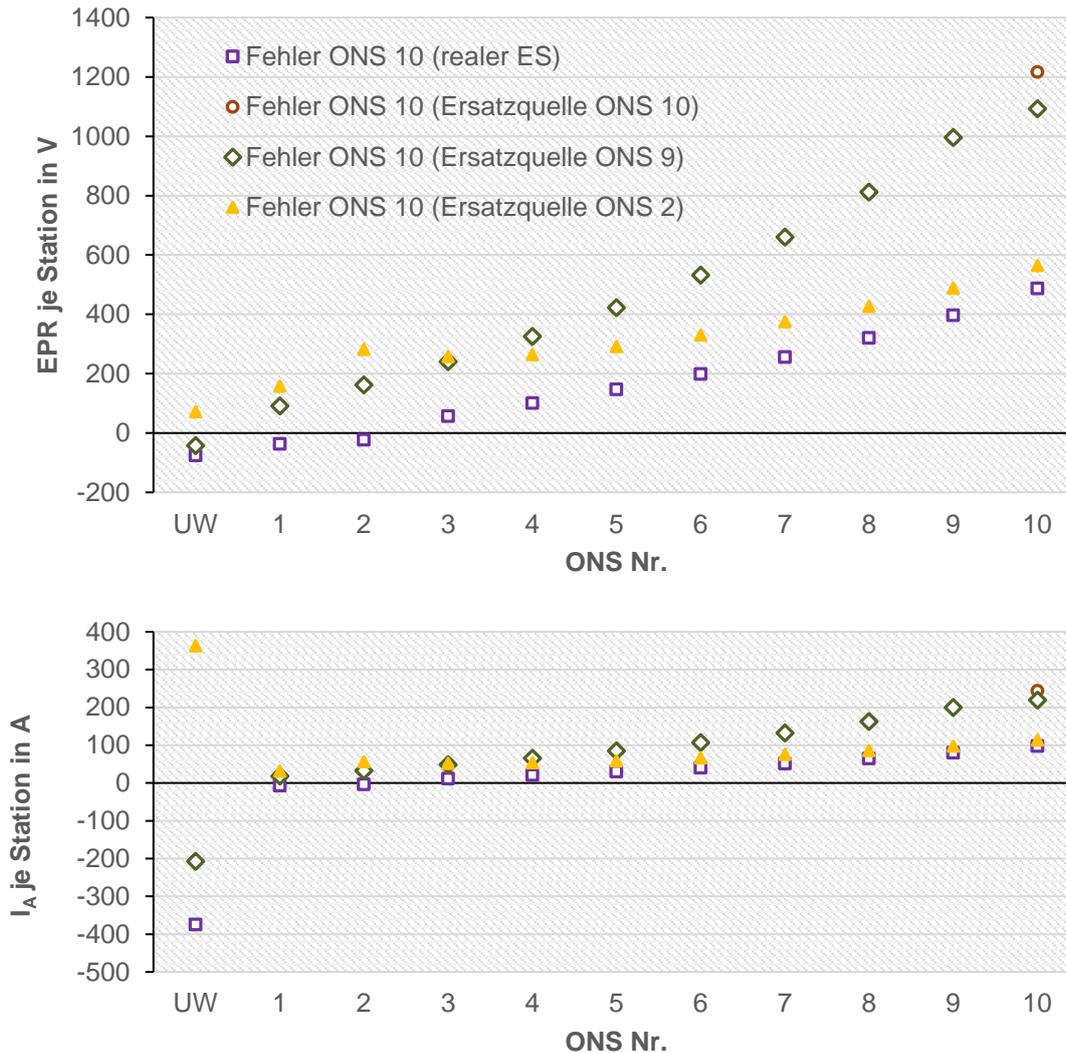


Abbildung 3-4: Erdungsspannungen EPR (oben) und Anlagenerdungsströme I<sub>A</sub> (unten) je Station in Abhängigkeit vom Quellenort bei stichförmiger Netzstruktur und Erdschluss in ONS 10, I<sub>F</sub> = 1 kA

### 3.4 Personengefährdung als Begrenzung des maximalen Messstromes (Quellenleistung)

Einen primären Einflussfaktor bezüglich der Messunsicherheit stellt das Verhältnis zwischen der Amplitude der gemessenen Spannung zwischen dem Messsignal und dem Störsignal dar. In der Praxis sind in der Regel die Amplituden der Störsignal-Ströme nicht reduzierbar. Nur der Messstrom ist durch Variation der Messquellen-Spannung-Amplitude in gewissen Grenzen variabel. Wie aus der Abbildung 3-2 hervorgeht, verteilt sich die Quellenspannung entsprechend dem Impedanz-Verhältnis, bestehend aus den Ausbreitungswiderständen der beiden Erder und der Impedanz  $Z_L$  der verbindenden Leitung. Ein Worst-Case-Szenario ergibt sich in diesem Zusammenhang, wenn der Ausbreitungswiderstand eines Erders/Erdungssystems (in der Praxis oft der Gegenerder) deutlich größer als der Längswiderstand der Verbindungsleitung und dem Ausbreitungswiderstand des zweiten

Erders/Erdungssystems ist, da in diesem Fall der Großteil der Quellenspannung am Ausbreitungswiderstand des höherohmigen Erders (Gegenerder) abfällt.

Der Zusammenhang zwischen Mess-Strom, -Leistung und -Spannung in Abhängigkeit eines Widerstandes<sup>15</sup> ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht hierbei, dass die Sicherstellung der Personensicherheit durch die Begrenzung der Messsignalspannung der eigentliche Faktor ist welcher die Mess-Stromhöhe begrenzt, zumal die Messschleifenimpedanz in der Praxis meist nur gering beeinflussbar ist. Weiters verdeutlicht die Abbildung 3-5, dass Quellenleistungen deutlich über 20 kW unter dem Aspekt der Personensicherheit praktisch keinen nennenswerten Vorteil für die Messung hinsichtlich der Stromhöhe mit sich bringen.

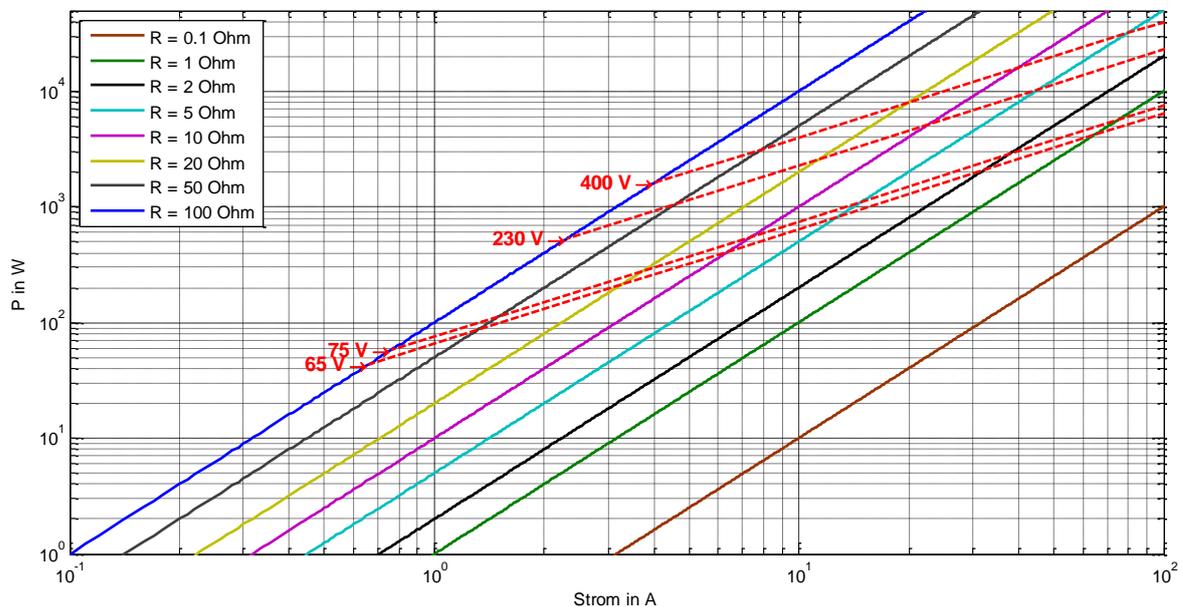


Abbildung 3-5: Zusammenhänge zwischen Mess-Strom, -Spannung, -Wirkleistung und Schleifenwiderstand der Messstromschleife

Die Messstromhöhe als Entscheidung für die angewandte Messmethode ist, wie sie in Tabelle 3-1 angeführt ist, aus den genannten Gründen daher nur bedingt geeignet.

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

- 1.) Nur der reale Erdschlussversuch (mit Nennspannung) liefert die realen Potentialverhältnisse hinsichtlich der Personensicherheit im Fehlerfall. Dieser ist jedoch in der Praxis, aufgrund des hohen organisatorischen und messtechnischen

<sup>15</sup> Bei der vorliegenden Betrachtung handelt es sich um eine rein resistive Betrachtung. Dies ist zulässig, solange davon ausgegangen werden kann, dass die Ausbreitungswiderstände der Erder sowie der ohmsche Widerstand der Verbindungsleitung deutlich größer als die Reaktanz der Verbindungsleitung ist.



Aufwandes, nur in Ausnahmefällen möglich. Für die Beurteilung von Erdungsanlagen ist das in der Praxis primär nicht relevant.

- 2.) Für alle Verfahren gilt, dass der eigentliche Faktor welcher die Messstromhöhe begrenzt, durch den Spannungsabfall an den Impedanzen des Messkreises (unter Beachtung der Personensicherheit) gegeben ist.
- 3.) Basierend auf Pkt.2 sind Quellenleistungen über 10 kW bis 20 kW in der Praxis meist nicht notwendig.

### 3.5 Einfluss der gegenseitigen ohmschen Beeinflussung

#### 3.5.1 Grundlagen

Für die Berechnung der Potentialverhältnisse realer Erdungssysteme ist die Anwendung numerischer Verfahren notwendig. Die Analysen in den folgenden Kapiteln basieren auf der Methode der Potentialkoeffizienten [41] welche kompakt dargestellt wird.

Durch die Ableitung eines Stromes über ein Erdersystem (Summe mehrere Einzelerder) ergibt sich ein Strömungsfeld im Erdreich, welches die Potentialverteilung im Erdreich verursacht. Dieses Strömungsfeld kann nach dem Superpositionsprinzip als Überlagerung einzelner Strömungsfelder von Teilerdern bestimmt werden.

Aus mathematischer Sicht ist hierbei die Beschreibung des von einem Bänderder verursachte Strömungsfeld aufgrund der un stetigen Oberfläche (Kanten des Rechteckförmigen Querschnittes) schwierig, weshalb eine äquivalente elliptische Näherung herangezogen wird, um das vom Teilerder verursachte Potential wie folgt zu bestimmen:

$$V_i(r, z) = \frac{I_i \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{z + e + \sqrt{r^2 + (z + e)^2}}{z + e + \sqrt{r^2 - (z + e)^2}} \right) \quad (\text{Gl. 3-1})$$

$V_i(r, z)$	...	Potential des elliptischen Teilerders „i“ in V
$r, z$	...	Koordinatenachsen des elliptischen Koordinatensystems in m
$I_i$	...	Strom des Teilerders „i“ in A
$\rho$	...	Spezifischer Widerstand des Erdreichs in $\Omega\text{m}$
$l$	...	Teilerderlänge in m
$e$	...	Exzentrizität in m

Durch Anwendung des Spiegelungs-Prinzips wird die Normalkomponente des Strömungsfeldes an der Erdoberfläche eliminiert, sodass kein Strom aus dem Erdreich in den oberen Halbraum (Luft) übergehen kann.



Das Potential eines beliebigen Punktes im Erdreich ergibt sich, wie erwähnt, durch die Summierung der Teilpotentiale der Erder in diesem Punkt.

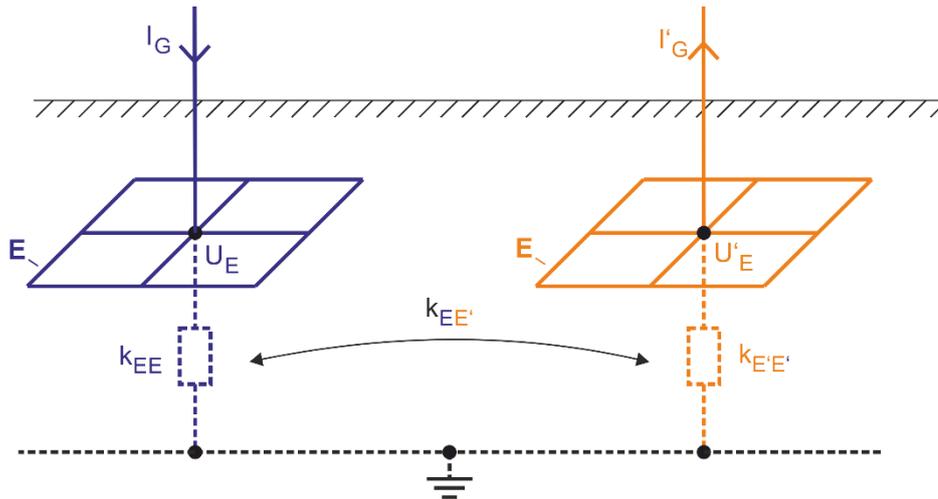
$$V_P = \sum_{i=1}^n V_{Pi} = \sum_{i=1}^n k_{Pi} \cdot I_i \quad (\text{Gl. 3-2})$$

- $V_P$  ... Potential im Punkt „P“ in V  
 $V_{Pi}$  ... Potential im Punkt „P“ verursacht durch den Teilerder „i“ in V  
 $k_{Pi}$  ... Beeinflussungskoeffizient für die Wirkung des Strömungsfeldes des Teilerders „i“ im Punkt „P“ in  $\Omega$   
 $I_i$  ... Strom des Teilerders „i“ in A

Angewendet auf alle Teilerder ergibt sich folgender Zusammenhang in Matrixschreibweise

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

Ausgehend von zwei in Erdreich vergrabenen Erdungssystemen (siehe Abbildung 3-6) können, abhängig von der Anbindung der Erdersysteme, verschiedene Varianten berechnet werden.



- |  |                             |   |
|--|-----------------------------|---|
| <p>E ...beeinflussendes Erdersystem<br/> <math>I_G</math> ...Erdungsstrom des Erdersystems „E“<br/> <math>U_E</math> ...Erdungsspannung des Erdersystems „E“<br/> <math>k_{EE}</math> ...Ausbreitungswiderstand des Erdersystems „E“</p> | <p><math>k_{EE'}</math></p> | <p>E' ...beeinflusstes Erdersystem<br/> <math>I'_G</math> ...Erdungsstrom des Erdersystems „E“<br/> <math>U'_E</math> ...Erdungsspannung des Erdersystems „E“<br/> <math>k_{E'E'}</math> ...Ausbreitungswiderstand des Erdersystems „E“<br/> <math>k_{EE'}</math> ...Kopplungswiderstand der Erdungssysteme</p> |
|--|-----------------------------|---|

Abbildung 3-6: Prinzip-Skizze über die Beeinflussung zweier Erdersysteme

- 1.) Für den Fall, dass die beiden Erdersysteme „E“ und „E“ galvanisch miteinander verbunden sind (bei vernachlässigbarem Längsspannungsabfall an den Teilerdern) ergibt sich

$$U_E = U'_E \quad (\text{Gl. 3-4})$$

Die Stromaufteilung auf die Teilerder wird so bestimmt, sodass alle Teilerder dasselbe Potential aufweisen und sich der Erdungsstrom wie folgt ergibt

$$I_G = \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{Gl. 3-5})$$

**Anmerkung:**  $I_i$  beinhaltet die Teilerderströme beider Erdersysteme („E“ und „E“)

Das Gleichungssystem ergibt sich zu

$$\begin{vmatrix} 0 \\ I_G \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{EE} & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_E \\ U_E \end{vmatrix} \quad (\text{Gl. 3-6})$$

Der beschriebene Fall entspricht zum Beispiel der Anordnung von Niederspannungserdungsanlagen welche über das TN-System miteinander verbunden sind.

- 2.) Für den Fall, dass der beeinflusste Erder auf freiem Potential liegt, stellt sich das Potential des beeinflussten Erders  $U'_E$  auf einen mittleren Wert ein. Für den Strom des



beeinflussten Erders gilt, dass einige Teilerder des beeinflussenden Erdersystems Ströme aufnehmen welche über andere Teilerder wieder abgegeben werden.

$$I'_G = - \sum_{i=1}^n I'_i = 0 \quad (\text{Gl. 3-7})$$

Das Gleichungssystem ergibt sich zu

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_G \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{EE} & k_{EE'} & -1 & 0 \\ k_{E'E} & k_{E'E'} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_E \\ I'_E \\ U_E \\ U'_E \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3-8})$$

Der beschriebene Fall entspricht zum Beispiel einer Anordnung von Niederspannungserdungsanlagen welche teilweise als TN-System und teilweise als TT-System ausgeführt sind.

- 3.) Für den Fall, dass das beeinflusste Erdersystem unabhängig vom beeinflussenden Erdersystem Strom ins Erdreich abführt, gilt:

$$I_G = \sum_{i=1}^n I_i \quad I'_G = \sum_{j=1}^m I_j \quad (\text{Gl. 3-9})$$

Das Gleichungssystem ergibt sich zu

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_G \\ I'_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{EE} & k_{EE'} & -1 & 0 \\ k_{E'E} & k_{E'E'} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_E \\ I'_E \\ U_E \\ U'_E \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 3-10})$$

Der beschriebene Fall entspricht zum Beispiel einer Anordnung von zwei Erdersystemen bei welchem über das eine Erdersystem Strom ins Erdreich abgeleitet wird, welcher über das zweite Erdersystem wieder vollständig aufgenommen wird (wie bei z.B. Erdungsmessungen).

Die folgenden Berechnungen wurden mittels des am Institut für Elektrische Anlagen und Netze entwickelten Programmes zur Berechnung der ohmschen Beeinflussung durchgeführt. Zum Einsatz kam hierbei die durch den Verfasser dieser Arbeit überarbeitete Version „OBEIN 2 2017“.



### 3.5.2 Die 62%-Regel zur Bestimmung der Erdungsspannung

Bei der praktischen Erfassung von Ausbreitungswiderständen kommen speziell bei Erdungsanlagen mit kleiner Ausdehnung (z.B. von einzelnen Gebäuden) meist Messbrücken zum Einsatz (Messschema siehe Abbildung 3-2).

Um den korrekten Ausbreitungswiderstand eines Erders messtechnisch zu bestimmen, muss der Spannungswert an der richtigen Stelle des Potentialtrichters erfasst werden. Bedingt durch die ohmsche Beeinflussung zweier Erder liegt der gesuchte Spannungswert (wie mittels analytischer Berechnung -basierend auf Halbkugelerdern unter idealisierten Verhältnissen gezeigt werden [6] kann) bei 61,8 % der Entfernung zwischen den Erdern.

Ob bzw. unter welchen Rahmenbedingungen eine Überführung eines Rings- bzw. Maschenerders in einen äquivalent Halbkugelerder möglich ist, wird im folgenden Kapitel analysiert.

### 3.5.3 Vergleich Halbkugelerder mit einem Maschenerder

Für vereinfachte Betrachtungen ergibt sich die Frage ob und unter welchen Randbedingungen ein Maschenerder mittels eines analytisch einfach zu beschreibenden Halbkugelerders ersetzt werden kann. Hierzu werden die in Abbildung 3-7 dargestellten Erdermodelle unter Variation der Seitenkantenlänge des Maschenerders sowie der Erdertiefe mit einem äquivalent Halbkugelerder<sup>16</sup> hinsichtlich Erdoberflächenpotential und Schrittspannungen verglichen.

---

<sup>16</sup> Äquivalenter Halbkugelerder bedeutet, dass der Ausbreitungswiderstand des Halbkugelerders gleich dem Ausbreitungswiderstand des Ring- bzw. Maschenerders ist.

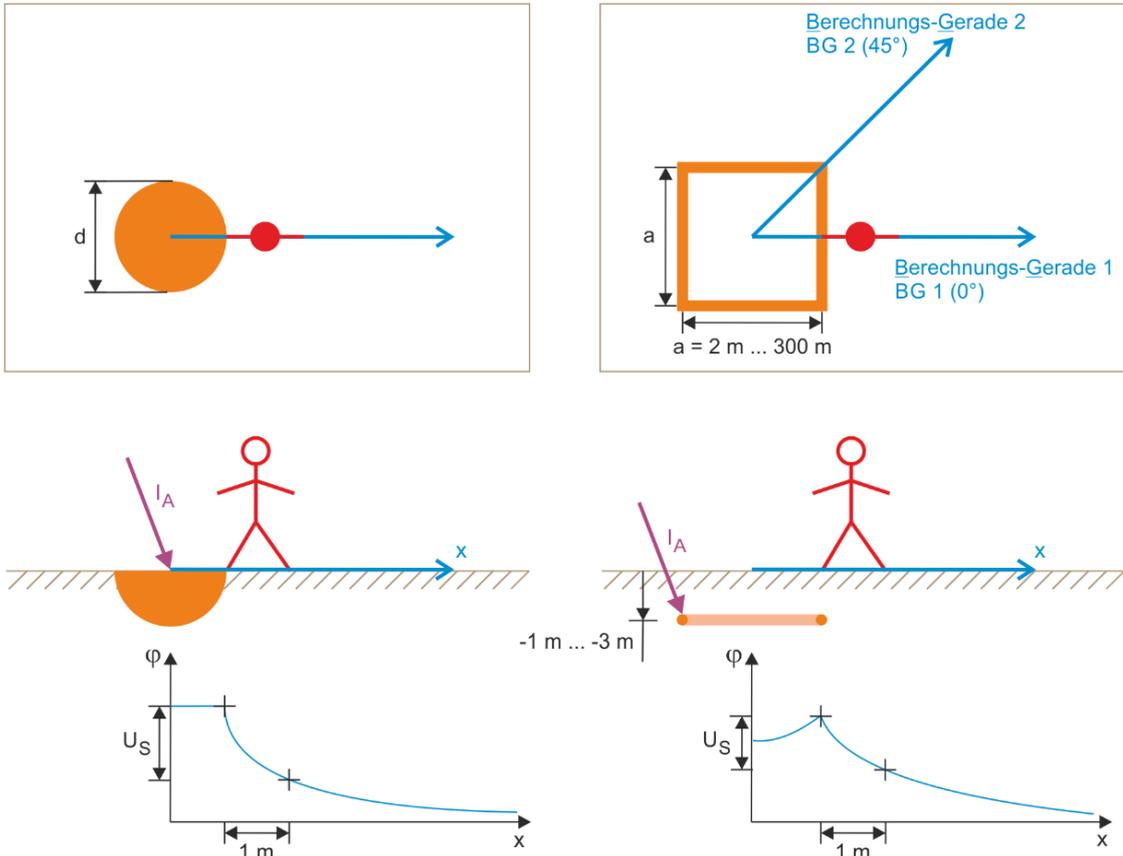


Abbildung 3-7: Übersicht für den Vergleich eines Kugelerders mit einem Ring- bzw. Maschenerder

Mathematisch kann der Verlauf des Erdoberflächenpotentials eines Halbkugelerders für  $x > d/2$  wie folgt beschrieben werden:

$$\varphi(x) = \frac{I_A \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{d/2} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{Gl. 3-11})$$

- $\varphi(x)$  ... Erdoberflächenpotential am Ort „x“ in V
- $I_A$  ... Strom welcher über den Erder abgeleitet wird in A
- $\rho$  ... Spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega\text{m}$
- $d$  ... Durchmesser des Halbkugelerders
- $x$  ... Lage des Ortes in m

Die Schrittspannung wird wie folgt definiert

$$U_S(x) = \varphi(x + 0,5\text{m}) - \varphi(x - 0,5\text{m}) \quad (\text{Gl. 3-12})$$

- $U_S(x)$  ... Schrittspannung am Ort „x“ in V



Die Berechnung des Ausbreitungswiderstandes, des Erdoberflächenpotentialverlaufes und der Schrittspannung des Ring- bzw. Maschenerders erfolgt nach der Methode der Potentialkoeffizienten mit dem Programm OBEIN 2 Version 2017 (Grundlagen siehe Kap.3.5.1).

Der Verlauf des Erdoberflächenpotentials, der Betrag der Schrittspannung für einen Maschenerder und einen äquivalenten Kugelerder, sowie die relative Abweichung sind in Abbildung 3-8 dargestellt. Für die Darstellung des Erdoberflächenpotentials sowie der Schrittspannung wurden relative Angaben in p.u.<sup>17</sup> gewählt, die Kurven können somit für jeden spezifischen Erdwiderstand herangezogen werden.

Die relative Abweichung des Erdoberflächenpotentialverlaufes<sup>18</sup> wird wie folgt definiert:

$$f_{\varphi}(x) = \frac{\varphi_{\text{Halbkugel}}(x) - \varphi_{\text{Maschen}}(x)}{\varphi_{\text{Maschen}}(x)} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 3-13})$$

$f(x)$	...	Relative Abweichung am Ort „x“ in %
$\varphi_{\text{Halbkugel}}(x)$	...	Erdoberflächenpotential des Halbkugelerders am Ort „x“ in V
$\varphi_{\text{Maschen}}(x)$	...	Erdoberflächenpotential des Maschenerders am Ort „x“ in V

---

<sup>17</sup> Beim Erdoberflächenpotentialverlauf entspricht 1 p.u. dem Potentialmaximum welches sich aus der Potentialberechnung des Maschenerders an der Erdoberfläche ergibt.  
Beim Schrittspannungsverlauf entspricht 1 p.u. dem Potentialmaximum welches sich aus der Schrittspannung des Maschenerders an der Erdoberfläche ergibt.

<sup>18</sup> Gilt sinngemäß auch für die Bestimmung der relativen Abweichung der Schrittspannung

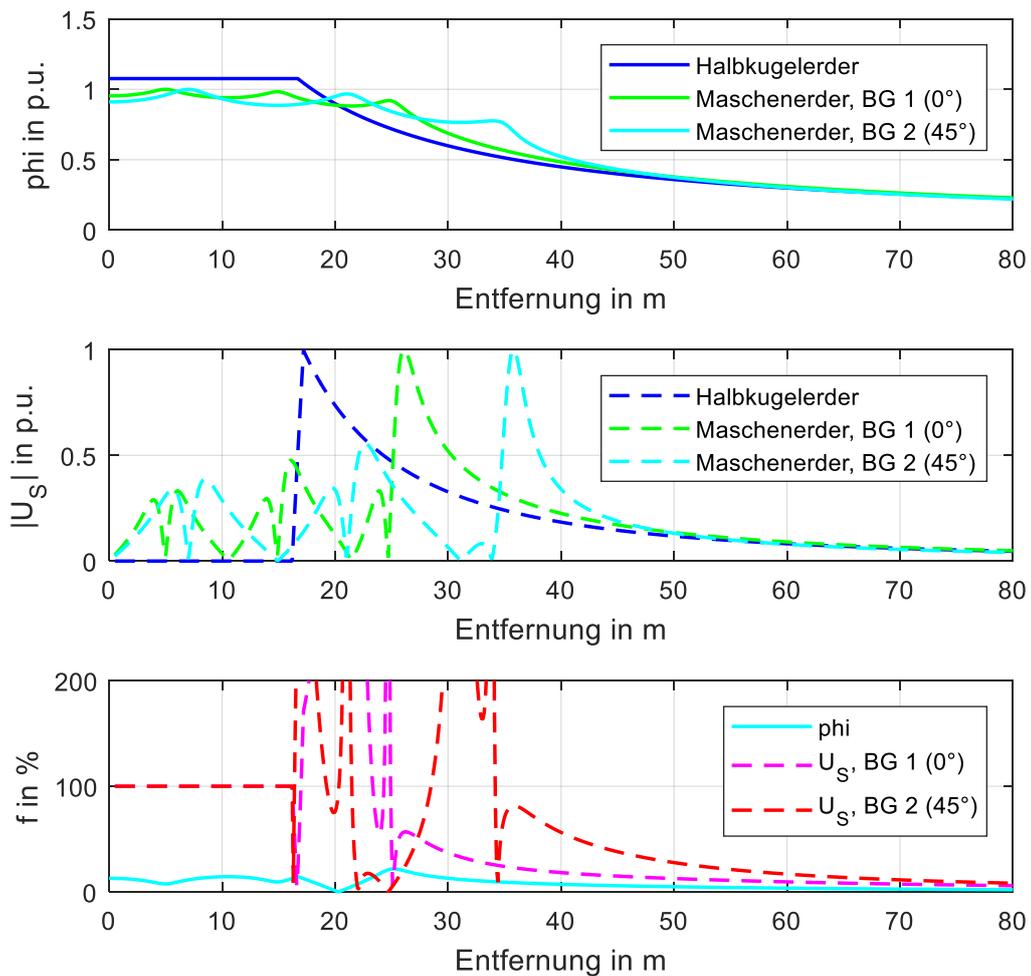


Abbildung 3-8: Erdoberflächenpotential (oben), Betrag der Schrittspannung (Mitte) für einen Maschenerder und einen Äquivalenten Kugelerder sowie deren relative Abweichung (unten), Seitenkantenlänge des Maschenerders  $a=50$  m

Die in Abbildung 3-8 dargestellten Verläufe des Erdoberflächenpotentials sowie der Schrittspannung erfolgen entlang der in Abbildung 3-7 blau dargestellten Berechnungsgeraden. Bei der Darstellung des Erdoberflächenpotentials in Abbildung 3-7 (oben) ist daher zu beachten, dass der Halbkugelerder an die Oberfläche reicht während der Maschenerder in 1 m Tiefe verlegt ist.

Aus diesem Grund ergibt sich bei identem Ausbreitungswiderstand von Halbkugelerder und Maschenerder einen abweichenden Maximalwert der Spannung. Da der Durchmesser des äquivalenten Halbkugelerders kleiner als die Seitenkantenlänge des Maschenerders ist, verlagert sich das Maximum der Schrittspannung in Abbildung 3-8 (Mitte) näher zur Mittelachse des Erders. Für die praktische Nutzung der vereinfachten Modellierung bedeutet dies, dass wie aus der Darstellung der relativen Abweichung in Abbildung 3-8 (unten)

hervorgeht, die Berechnung des Schrittspannungsverlaufes keine praktische Bedeutung hat. Der Nutzen (Abschätzung der Potentialtrichterausdehnung) der vereinfachten Modellierung einer Erdungsanlage als Halbkugelerder beschränkt sich somit auf den Verlauf des Erdoberflächenpotentials.

In Abbildung 3-9 kann entnommen werden, ab welcher Entfernung (entlang der Berechnungs-Gerade BG 1) die relative Abweichung des Erdoberflächenpotentials kleiner 5% ist.

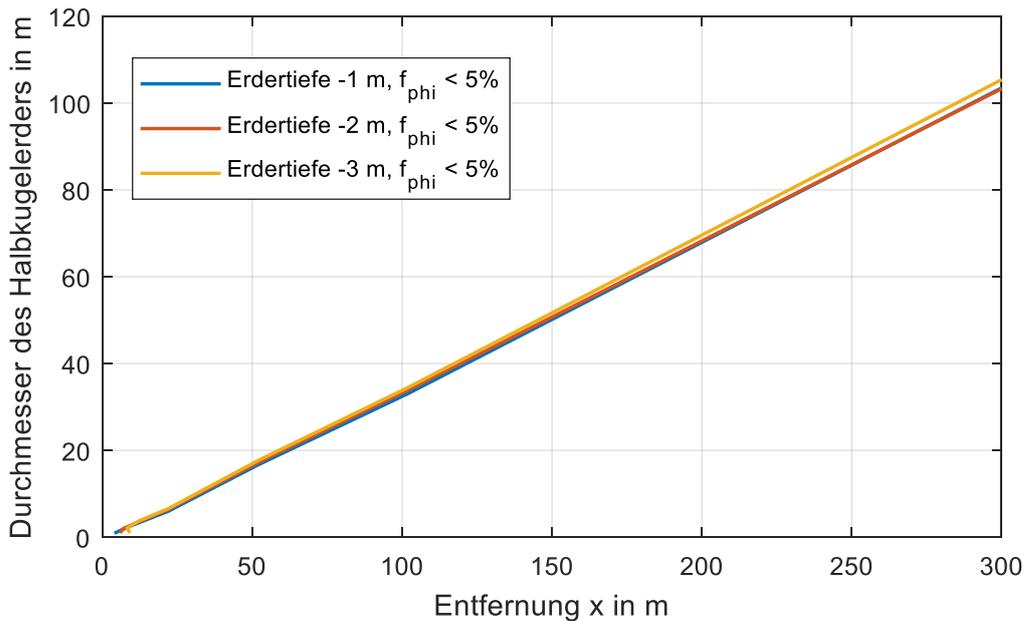


Abbildung 3-9: Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Halbkugelerders und der Entfernung, bei welcher die relative Abweichung des Erdoberflächenpotentials zwischen dem Ring- bzw. Maschenerder und dem Halbkugelerder kleiner 5 % ist

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen der Seitenkantenlänge eines Maschenerders bei verschiedenen Verlegetiefen mit dem Durchmesser eines äquivalent Halbkugelerders so ergibt sich der in Abbildung 3-10 dargestellte Zusammenhang.

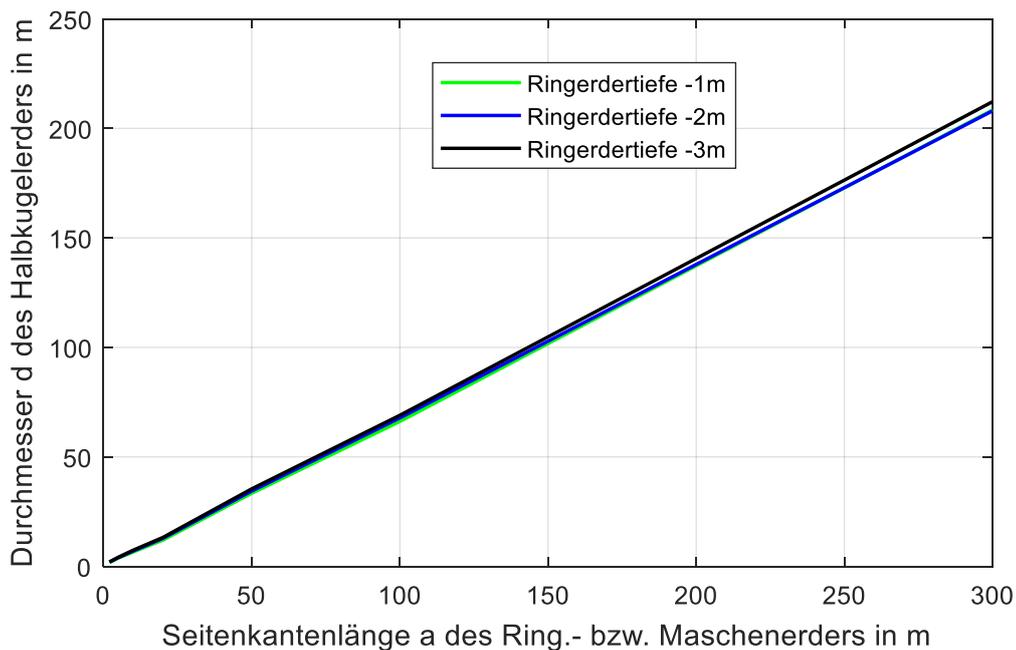


Abbildung 3-10: Zusammenhang zwischen der Seitenkantenlänge eines Ring.- bzw. Maschenerders bei verschiedenen Verlegetiefen mit dem Durchmesser eines äquivalenten Halbkugelerders im homogenen Erdreich

Aus der Abbildung 3-10 können zwei Erkenntnisse gewonnen werden:

- 1.) Unterschiedliche Verlegetiefen haben keinen nennenswerten Einfluss auf den Durchmesser der äquivalenten Halbkugelerders, da sich das Strömungsfeld eines Ring- bzw. Maschenerders bereits in geringer Entfernung zum Erder eine näherungsweise radialsymmetrische Ausprägung annimmt.
- 2.) Der Verlauf ist näherungsweise linear, somit kann für die praktische Anwendung unter der Voraussetzung eines homogenen Erdreiches, und einer quadratischen Ring- bzw. Maschenerderstruktur unabhängig vom spezifischen Erdwiderstand ein Verhältnis von  $d/a = 2/3$  mit guter Näherung herangezogen werden.

Für nicht quadratische Ring- bzw. Maschenerderstrukturen ergibt sich der in Abbildung 3-11 dargestellte geometrische Zusammenhang bei identen Ausbreitungswiderständen.

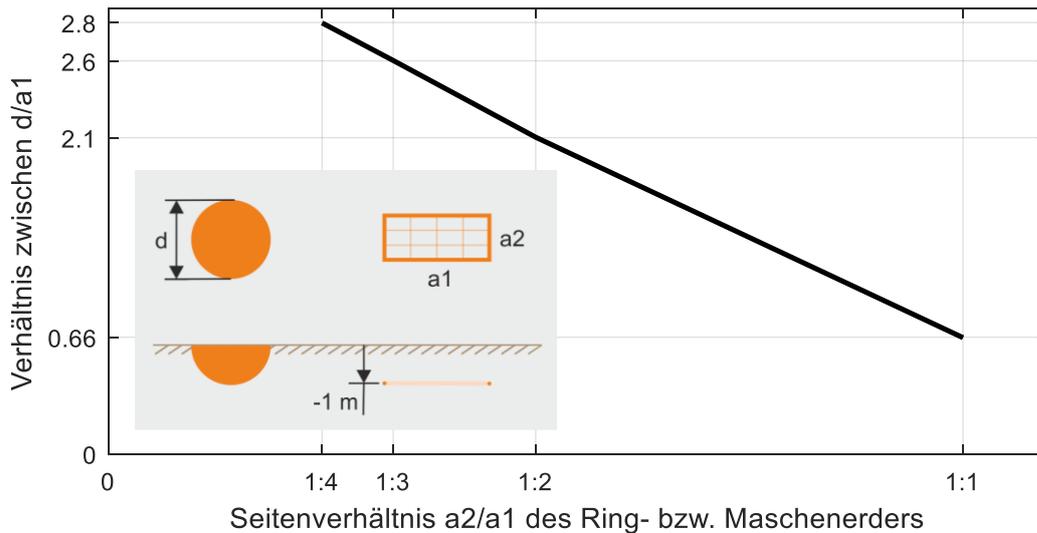


Abbildung 3-11: Geometrischer Zusammenhang für Ring- bzw. Maschenerder mit unterschiedlichen Seitenkantenlängen und Halbkugelerder bei identen Ausbreitungswiderständen

### 3.5.4 Einfluss des Abstandes zwischen Erdern auf die Erfassung der realen Erdungsspannung

Wie in Kapitel 3.5.1 erläutert wird, besteht über das Strömungsfeld im Erdreich eine gegenseitige ohmsche Beeinflussung von Erdern (Berechnungsergebnisse für einfache Erder siehe Anhang Kapitel 8.1). Hierbei gilt, dass mit zunehmender Erdungssystemausdehnung auch die Ausdehnung des Potentialtrichters zunimmt. Speziell bei großen Erdungsanlagen und Erdungssystemen (Globalen Erdungssystem) ergibt sich bedingt durch die Netzbetriebsführung (Netzauslastung, n-1-Sicherheit,...) das Problem eine Leitung zu einer Gegenerde freizuschalten. Die Literatur (Zusammenfassung siehe [21]) kann die Empfehlung entnommen werden, dass der Abstand zwischen den Erdern im Bereich von 6,5 bis 10 dem Durchmesser des Erdungssystems betragen soll.

Anhand der in Abbildung 3-12 dargestellten Anordnung wird im Folgenden die Auswirkung des Erderabstandes auf die messtechnische Bestimmung der Erdungsspannung (Ausbreitungswiderstand) sowie der Schrittspannung analysiert. Der Erdoberflächenpotentialverlauf wird hierbei entlang der Berechnungsgeraden „BG 1“ und „BG 2“ analysiert.

Die Anordnung besteht aus einem 100 m x 100 m großen Maschenerder (Maschenweite 10 m) welcher die messtechnisch zu analysierende Erdungsanlage darstellt, sowie einem Gegenerder dessen Ausdehnung sowie Abstand zur analysierenden Erdungsanlage variiert wird.

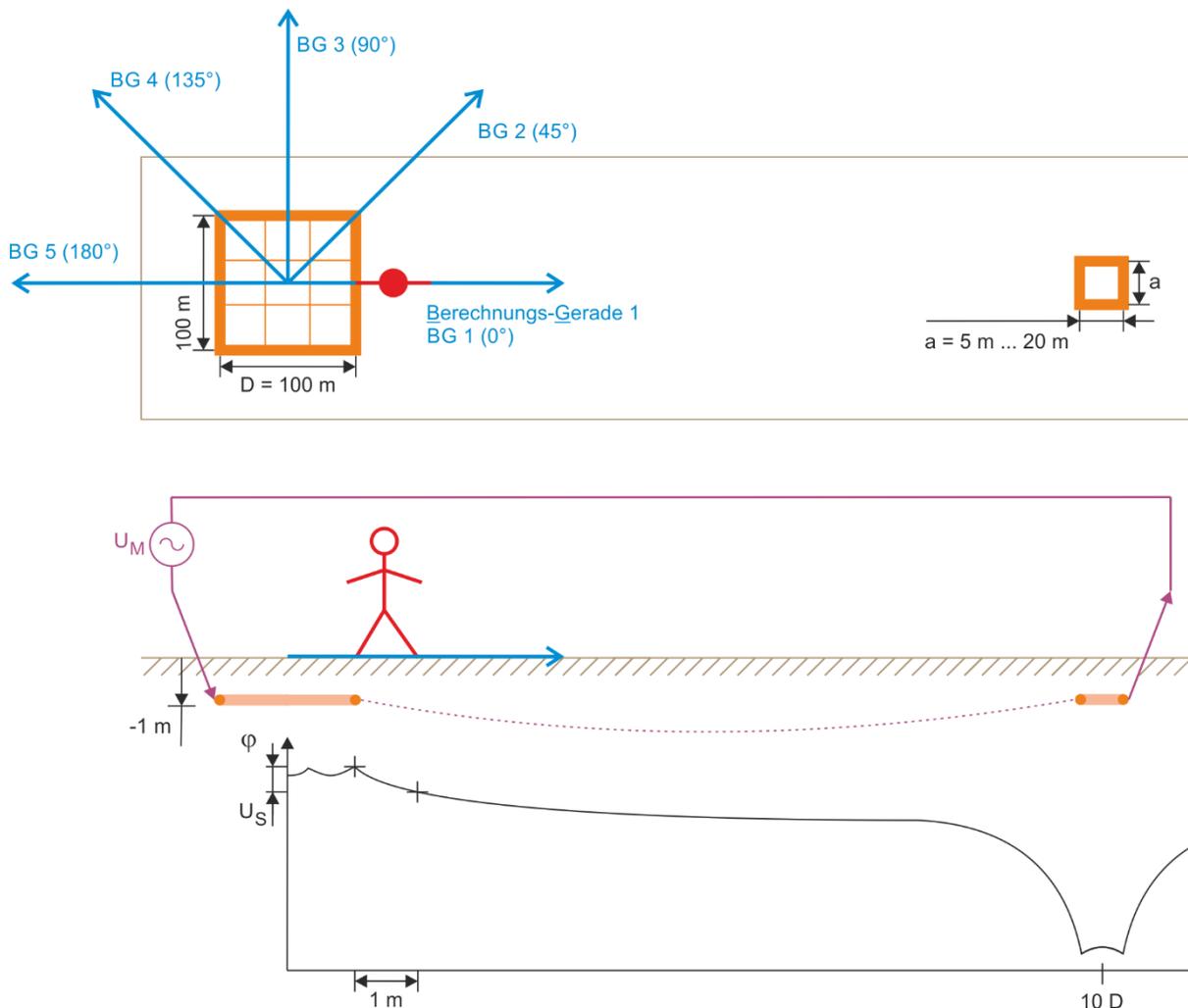


Abbildung 3-12: Prinzip Darstellung, Modellierung

In Abbildung 3-13 ist der Erdoberflächenpotentialverlauf im unbeeinflussten Fall (kein Gegenerder) sowie im beeinflussten Fall dargestellt. Für die Skalierung der Amplitude wurde eine relative Darstellung (100% entspricht  $U_E = R_A \cdot I_A$ ) gewählt, wodurch die Verläufe unabhängig vom spezifischen Bodenwiderstand und dem Anlagenerdungsstrom gültig sind<sup>19</sup>. Da der Potentialverlauf an der Erdoberfläche berechnet wurde, ist zusätzlich das Potential der Teilerder des Erdsystems dargestellt (siehe rote Kreuze).

Der Verlauf verdeutlicht, dass mit zunehmender Annäherung der Erder und somit zunehmender gegenseitiger ohmscher Beeinflussung die Erdungsspannung abnimmt, während der Gradient des Potentialverlaufes zunimmt.

Zusätzlich ist in der Abbildung jener Ort eingetragen (schwarze Kreise), an welchem abhängig von der Entfernung des Gegenerders gemessen werden müsste um den korrekten Ausbreitungswiderstand zu erfassen.

<sup>19</sup> Unter der Voraussetzung eines homogen Erdreiches

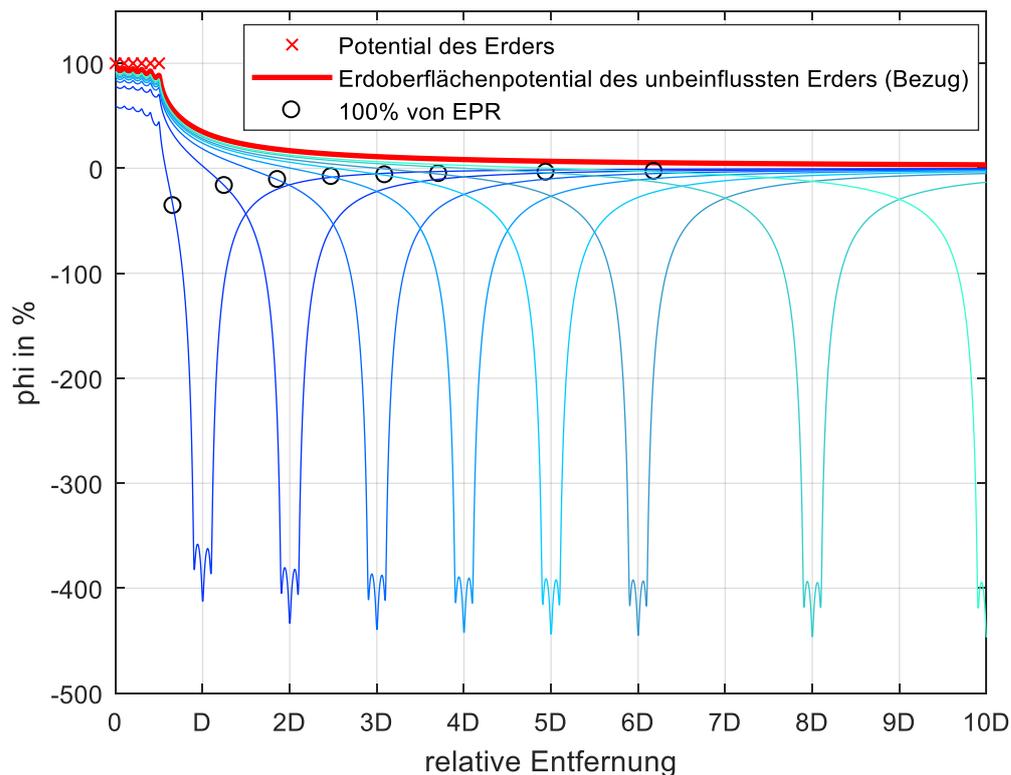


Abbildung 3-13: relativer Erdoberflächenpotentialverlauf bei Variation der Entfernung des Hilfserders (20 m x 20 m) entlang der Berechnungsgerade „BG 1“

Die Analyse jener Entfernung, bei welcher die korrekte Erdungsspannung bezogen auf den Abstand zwischen den Erdern erfasst werden kann, ist abhängig von der Gegenerderausdehnung und Entfernung, in Abbildung 3-14 dargestellt. Wie daraus entnommen werden kann, wird die in Kapitel 3.5.2 erläuterte 62%-Regel im vorliegenden Fall bei homogenem Erdreich bereits ab einem relativen Abstand der dem dreifachen Durchmesser des zu analysierenden Erdersystems erreicht und dies unabhängig von der Ausdehnung des Gegenerders. Dieser Umstand ist bei der Bestimmung des Ausbreitungswiderstandes besonders von großen Erdungssystemen relevant, da es in der Realität oft nicht immer möglich ist eine Gegenerde mit einem empfohlenen Abstand (siehe [21]) der dem 6,5 bis 10-fachen der Ausdehnung des zu analysierenden Erdungssystems einzuhalten. In der Realität ist zu berücksichtigen, dass der Potentialverlauf maßgeblich vom Verlauf des spezifischen Erdwiderstandes abhängig ist. Zu beachten ist hierbei, dass eine Messstrasse Richtung Gegenerde in der Praxis bedingt, dass die Messleitung für die Spannungsmessung parallel zum Messtromkreis angeordnet ist und es durch die induktive Verkopplung zu einer Beeinflussung der Spannungsmessung kommt.

**Anmerkung:** Auch bei idealisierten Verhältnissen (homogenes Erdreich, keine Störeinflüsse) ist eine messtechnische Bestimmung der unbeeinflussten Erdungsspannung bedingt durch die ohmsche Verkopplung nur in Richtung der Gegenerde möglich.

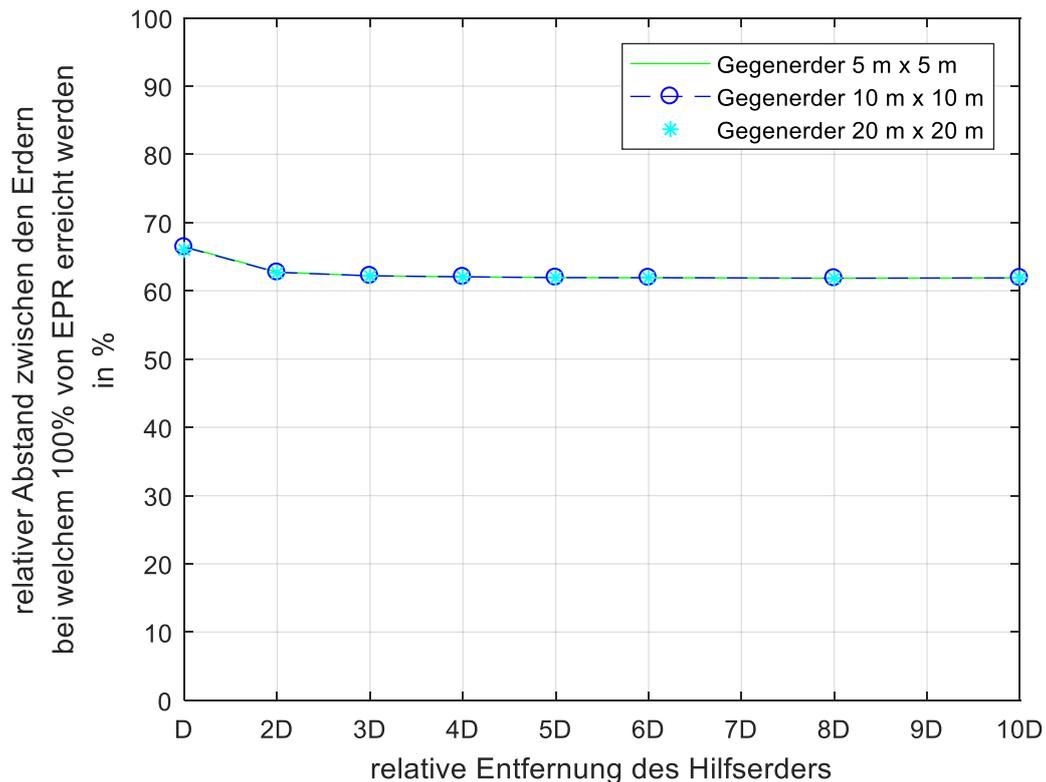


Abbildung 3-14: Relativer Abstand zwischen den Erdern, bei welchem 100 % der Erdungsspannung gemessen werden können, abhängig vom Hilfserderabstand und der Hilfserderausdehnung

Speziell bei der messtechnischen Beurteilung von ausgedehnten Erdungssystemen steht der Einfluss der Gegenerderentfernung auf die Schrittspannung im Vordergrund. In Abbildung 3-15 ist daher das Maximum der relativen Abweichung der Schrittspannung im Innenbereich (oben) und im Außenbereich (unten) des Maschenerders entlang verschiedener Berechnungsgeraden dargestellt.

Hieraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Mit geringerem Abstand der Erdungsanlagen steigt der relative Fehler der Abweichung der maximalen Schrittspannung, wobei bei einer relativen Erderentfernung von 4 mal D der relative Fehler sowohl im Innenbereich als auch im Außenbereich unter 5 % liegt.
- Bezogen auf den Mittelpunkt des Maschenerders werden in Richtung Gegenerder zu große Schrittspannungen bzw. in entgegengesetzter Richtung zu kleine Schrittspannungen erfassen.

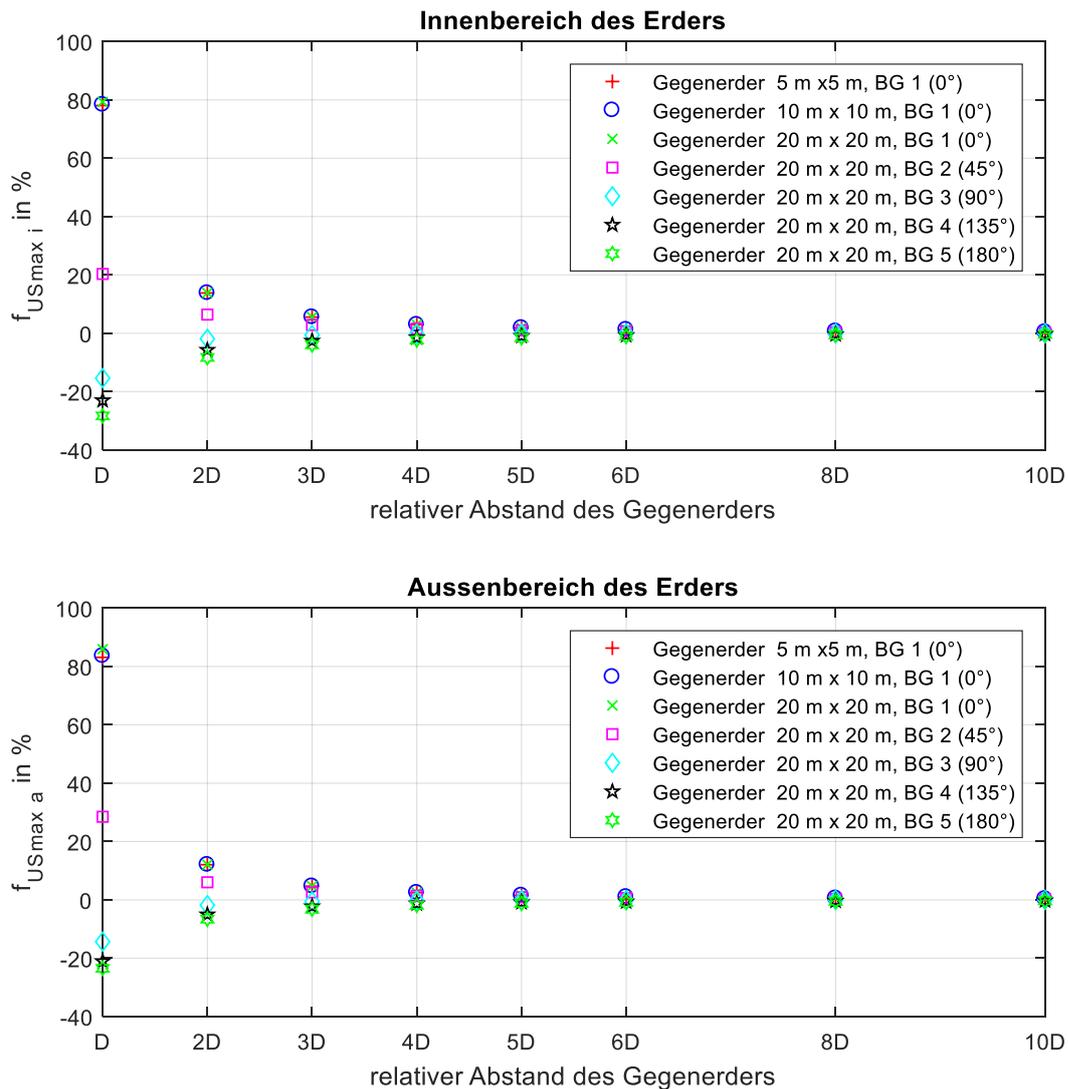


Abbildung 3-15: Relative Abweichung der maximalen Schrittspannung im Innenbereich (oben) und im Außenbereich (unten) des Maschenerders abhängig von der Entfernung und Ausdehnung des Gegenerders

Der Einfluss der maximalen Differenzspannungsabweichung entlang unterschiedlicher Messtrassen abhängig vom Erderabstand ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Das Maximum der Differenzspannung stellt hierbei den maximalen Spannungswert zwischen dem Potential des Erders und einem Punkt innerhalb der Grundfläche des Erders an der Erdoberfläche dar. Tendenziell ergeben sich dieselben Erkenntnisse wie zuvor bei der Schrittspannung erläutert.

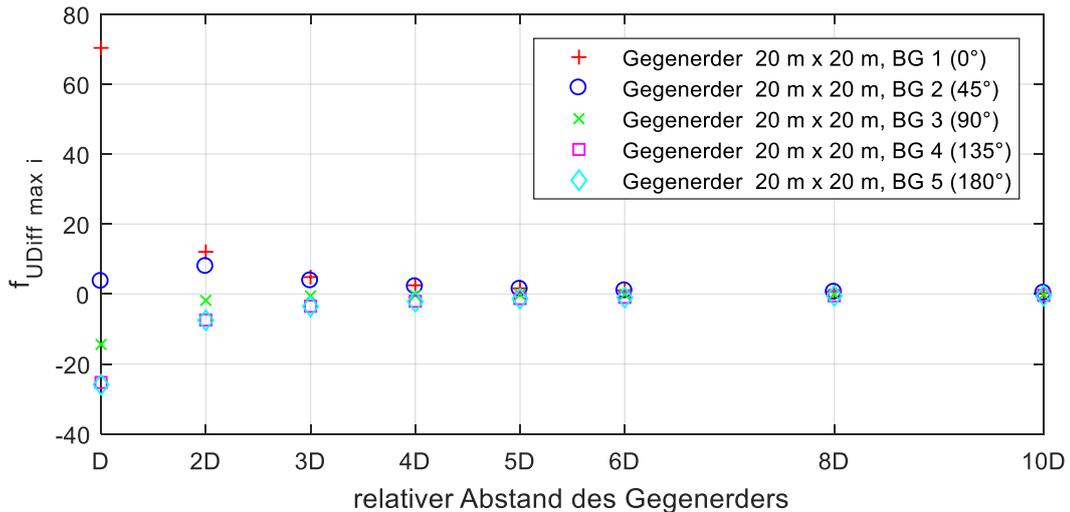


Abbildung 3-16: Relative Abweichung der maximalen Differenzspannung im Innenbereich des Maschenerders abhängig von der Entfernung und Ausdehnung des Gegenerders

### 3.5.5 Einfluss der Nullungsverbindung von NS-Kundenanlagen

Im Folgenden wird analysiert welcher Einfluss sich auf das Erdoberflächenpotential und Schrittspannung abhängig von der Anzahl genullter Niederspannungskunden ergibt. Zu diesem Zweck wird eine rasterförmiges System an Ringeredern (siehe Abbildung 3-17) mit einer Gesamtausdehnung von 190 m x 190 m hinsichtlich der folgenden Varianten analysiert:

- Variante 1: 169 Gebäudeerder im TN-System
- Variante 2: 85 Gebäudeerder im TN-System und 84 Gebäudeerder im TT-System
- Variante 3: 49 Gebäudeerder als TN-System und 120 Gebäudeerder als TT-System
- Variante 4: 25 Gebäudeerder als TN-System und 144 Gebäudeerder als TT-System
- Variante 5: 85 Gebäudeerder im TN-System
- Variante 6: 49 Gebäudeerder als TN-System
- Variante 7: 25 Gebäudeerder als TN-System

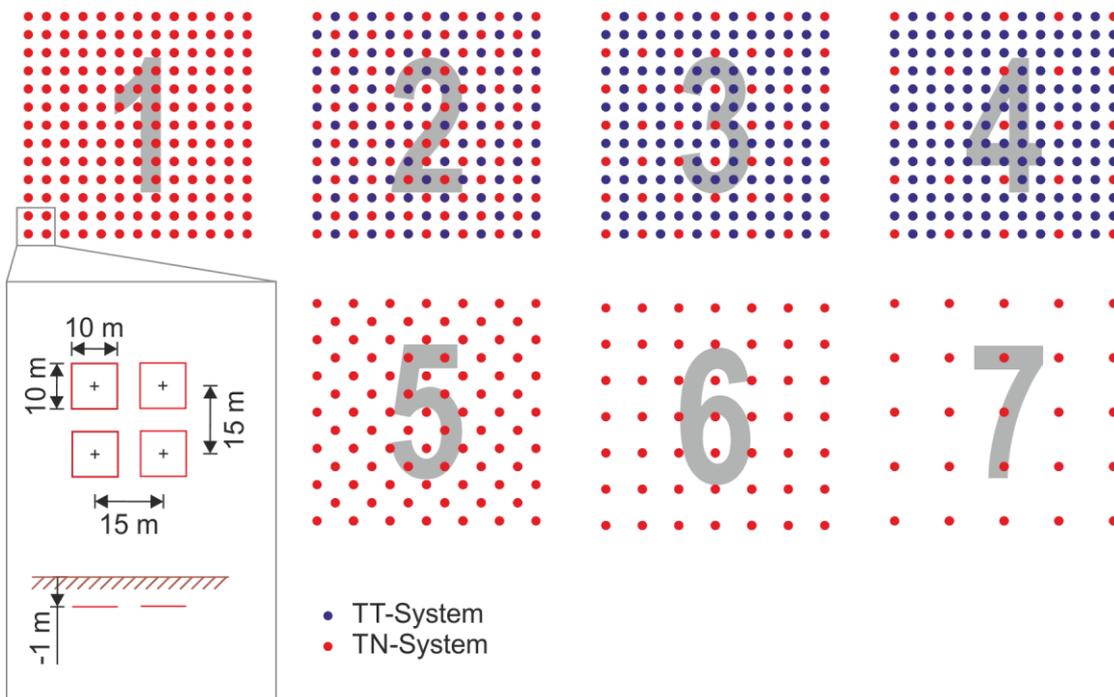


Abbildung 3-17: Übersicht über die analysierten Erdungssystemvarianten hinsichtlich Erdoberflächenpotential und Schrittspannung.

In der Dissertation „Nachweis globaler Erdungssysteme durch Messung und Berechnung von Verteilten Erdungsanlagen“ von Martin Lindinger ([21], S103 ff.) finden sich ähnliche Überlegungen, welche anhand von Halbkugelerdern durchgeführt wurden. Wie in Kapitel 3.5.3 nachgewiesen, ist die Verwendung von Halbkugelerdern als Ersatz für Ring bzw. Maschenerder hinsichtlich Schrittspannung im Nahbereich außerhalb des jeweiligen Erders nicht geeignet weshalb die folgenden detaillierteren Analysen zur Beurteilung von Erdungssystemen durchgeführt werden müssen.

Die Auswirkung auf den Ausbreitungswiderstand, abhängig von der in Abbildung 3-17 dargestellten Varianten, ist in Tabelle 3-2 angeführt. Die Angabe der Ausbreitungswiderstände erfolgen in Relation zur Variante 1, somit gelten die Relationen unabhängig vom spezifischen Bodenwiderstand im homogenen Erdreich.

Der Vergleich der Varianten 2,3 und 4 mit den Varianten 5, 6 u. 7 verdeutlicht hierbei, dass die im TT-System ausgeführten Erder keinen nennenswerten Beitrag zum Gesamtausbreitungswiderstand liefern. Der Vergleich der Varianten 1 und 7 zeigt, dass die Reduktion der Anzahl an Erdungsanlagen auf zirka ein Achtel, den Gesamtausbreitungswiderstand (bedingt durch die ohmsche Verkopplung) um weniger als 50 % ansteigen lässt.

Tabelle 3-2: relative Änderung des Ausbreitungswiderstandes abhängig von der Simulationsvariante

Var 1 (Bezug)	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6	Var 7
100 %	107 %	117 %	146 %	108 %	118 %	148 %

Die Abbildung 3-18 zeigt eine Übersicht über die Geometrie sowie die Lage der Berechnungsgeraden, entlang jener die Erdoberflächenpotentiale sowie die Schrittspannungen bestimmt wurden.

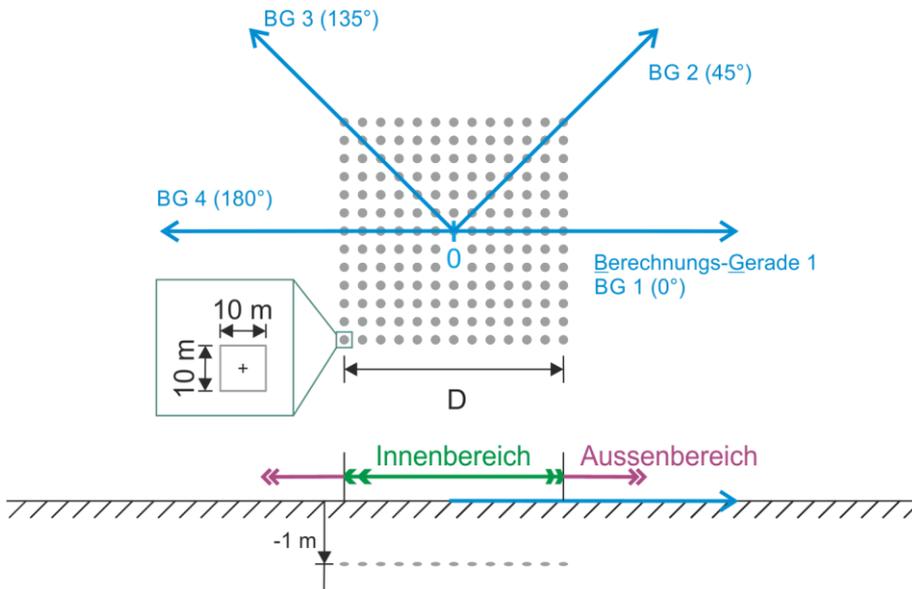


Abbildung 3-18: Geometrieübersicht für die Simulationen

Die Abbildung 3-19 zeigt die Erdoberflächenpotentialverläufe sowie die Verläufe des Betrages der Schrittspannung im Bereich des Erdungssystems für die in Abbildung 3-17 dargestellten Varianten. Für die Skalierung der Amplitude wurde eine relative Darstellung (100 % entspricht  $U_E = R_A \cdot I_A$ ) gewählt, wodurch die Verläufe unabhängig vom spezifischen Erdwiderstand und dem Anlagenerdungsstrom gültig sind<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> Gültig unter der Voraussetzung eines homogenen Erdreiches

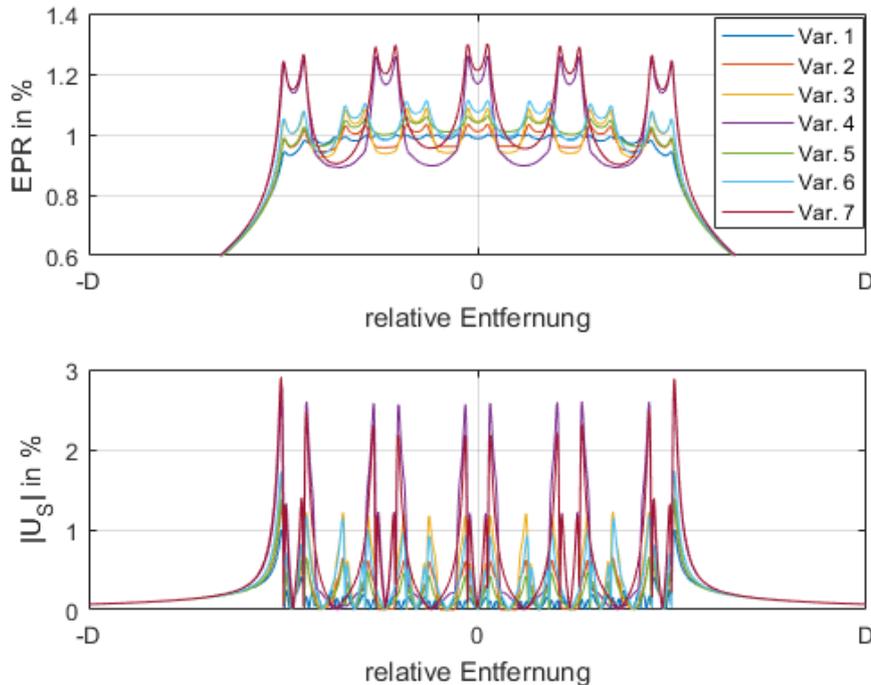


Abbildung 3-19: Ausschnitt des Erdoberflächenpotentials sowie des Betrages der Schrittspannung abhängig von der Berechnungsvariante, Bezug:  $\max(EPR_{Var1})$

Die Analyse der maximalen im Innenbereich des Erdungssystems auftretenden relativen Schrittspannungsänderung (Bezug: Variante 1), abhängig von der Berechnungsvariante, ist in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Der Vergleich der Variante 2,3 und 4 mit den Varianten 5,6 und 7 verdeutlicht, dass die als TT-System ausgeführten Erdungsanlagen welche zwischen den als TN-System ausgeführten Erdungsanlagen angeordnet sind, nur zu einer geringen Verbesserung der Schrittspannungssituation führen.

Besonders im Bereich von älteren Siedlungen bzw. Siedlungen, in denen aus technischen Gründen (z.B. in der Nähe von Bahnanlagen) kein durchgängiges TN-System realisiert ist, geht mit einer hohen Häuseranzahl nicht automatisch eine günstige Schrittspannungssituation einher. Umgekehrt geht aus der Tabelle hervor (Variante 1 vs. Variante 7), dass die Reduzierung der Erdungsanlagenanzahl auf ein Achtel zu einer Erhöhung der maximalen Schrittspannungssituation um einen Faktor zwei führt.

Bei weiteren Vergrößerung des Abstandes zwischen den Erdungsanlagen welche über jener in Variante 7 hinausgeht, ist, wie aus Kapitel 8.1.3 ersichtlich, die gegenseitige ohmsche Beeinflussung nicht mehr wirksam und die NS-Erdungsanlagen können diesbezüglich als getrennt betrachtet werden.

Tabelle 3-3: Auflistung der maximalen relativen Schrittspannungsänderung abhängig von der Berechnungsvariante

	Var 1 (Bezug)	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6	Var 7
rel. Schrittspannungsmaximum	100 %	119 %	145 %	220 %	126 %	139 %	219 %

Die Änderung der maximalen Differenzspannungen (maximale Potentialdifferenz zwischen dem Erder und einem Punkt innerhalb des Erdungssystems an der Erdoberfläche) innerhalb des Erdungssystems gelten hinsichtlich der Auswirkung der Wirkung der im TT-System betriebenen Erdungsanlagen eine ähnliche Tendenz wie für die Schrittspannung. Bezüglich der Entwicklung der Amplitude, ist die Auswirkung mit einer Vervielfachung um den Faktor bis zu ca. 4,6 (Variante 1 vs. Variante 7) deutlich größer.

Tabelle 3-4: Auflistung der maximalen relativen Differenzspannungsänderung abhängig von der Berechnungsvariante

	Var 1 (Bezug)	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6	Var 7
rel. Differenzspannung	100 %	126 %	198 %	414 %	138 %	236 %	462 %

In Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 sind die Auswirkung der Entfernung der Gegenerde auf die Messunsicherheit hinsichtlich der maximalen Schrittspannungsabweichung für den Innen- und Außenbereich des Erdungssystems dargestellt. Für die angenommenen Berechnungsvarianten ergibt sich daraus, dass bei einer akzeptierten Messunsicherheit von 5 % ein Gegenerderabstand, welcher 4-mal dem Durchmesser des Erdungssystems entspricht, ausreichend ist.

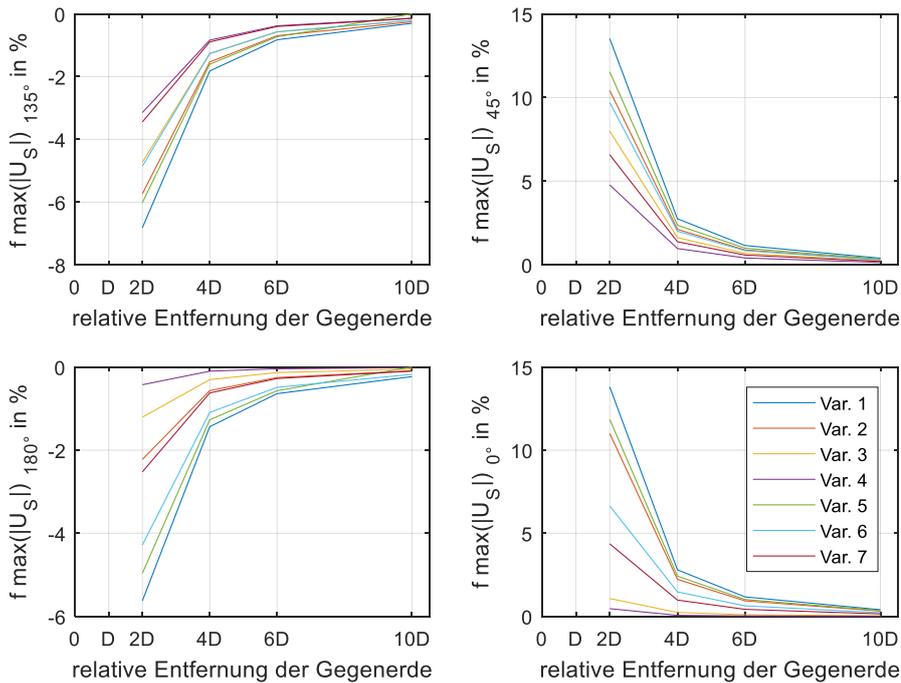


Abbildung 3-20: Relative Abweichung der maximalen Schrittspannung im Innenbereich des Erdungssystems abhängig von der Entfernung des Gegenerders

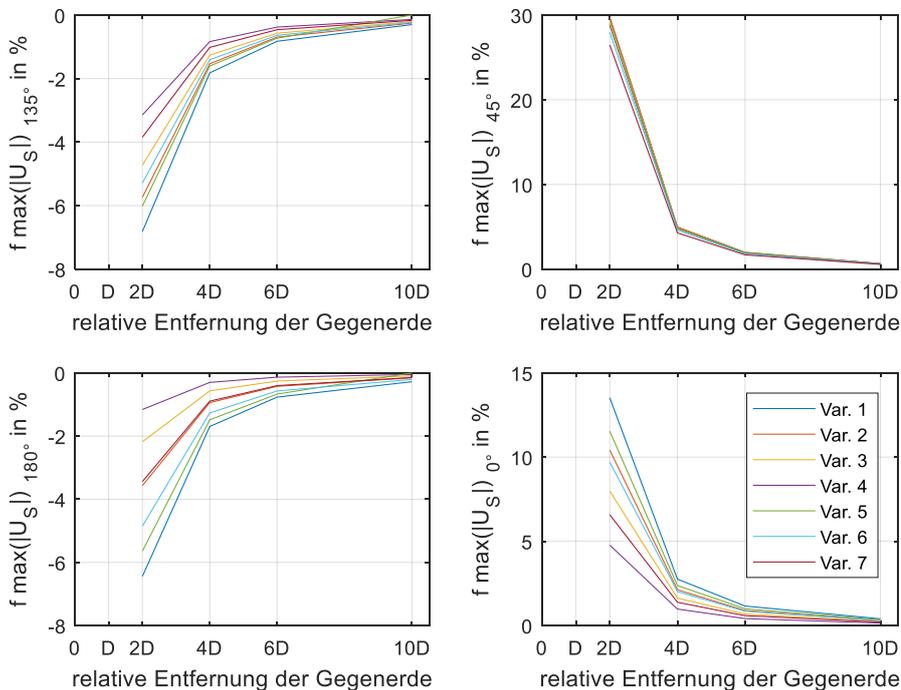


Abbildung 3-21 Relative Abweichung der maximalen Schrittspannung im Außenbereich des Erdungssystems abhängig von der Entfernung des Gegenerders

### 3.6 Einfluss der Belastung auf die Schrittspannungsmessung

In der Praxis werden für die Beurteilung der Personensicherheit von Erdungssystemen hinsichtlich Schritt- und Berührungsspannungen oft hochohmig gemessene Spannungen herangezogen. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Beurteilende einen möglichst hohen Sicherheitsfaktor und damit eine persönliche rechtliche Sicherheit sicherstellen will, zumal einige beeinflussende Faktoren, wie z.B. der maßgebende Körperwiderstand, einer großen Schwankungsbreite unterliegt.

Wie aus der IEC/TS 60479-1 [14] hervorgeht, schwankt der Körperwiderstand je nach Berührungssituation (z.B. Stromweg durch den Körper, Spannungshöhe, Größe der Berührungsfläche, Hautübergangswiderstand) zwischen ca. 1 k $\Omega$  bis und mehreren 10 k $\Omega$ .

In der Praxis hat sich für messtechnische Evaluierungen eine Körperimpedanz von 1 k $\Omega$  (zur belasteten Messung) etabliert.

Anhand des in Abbildung 3-22 dargestellten Finite Elemente Modells<sup>21</sup> wird der Einfluss einer 1-k $\Omega$ -Belastung zwischen den Berührungsspannungsflächen analysiert.

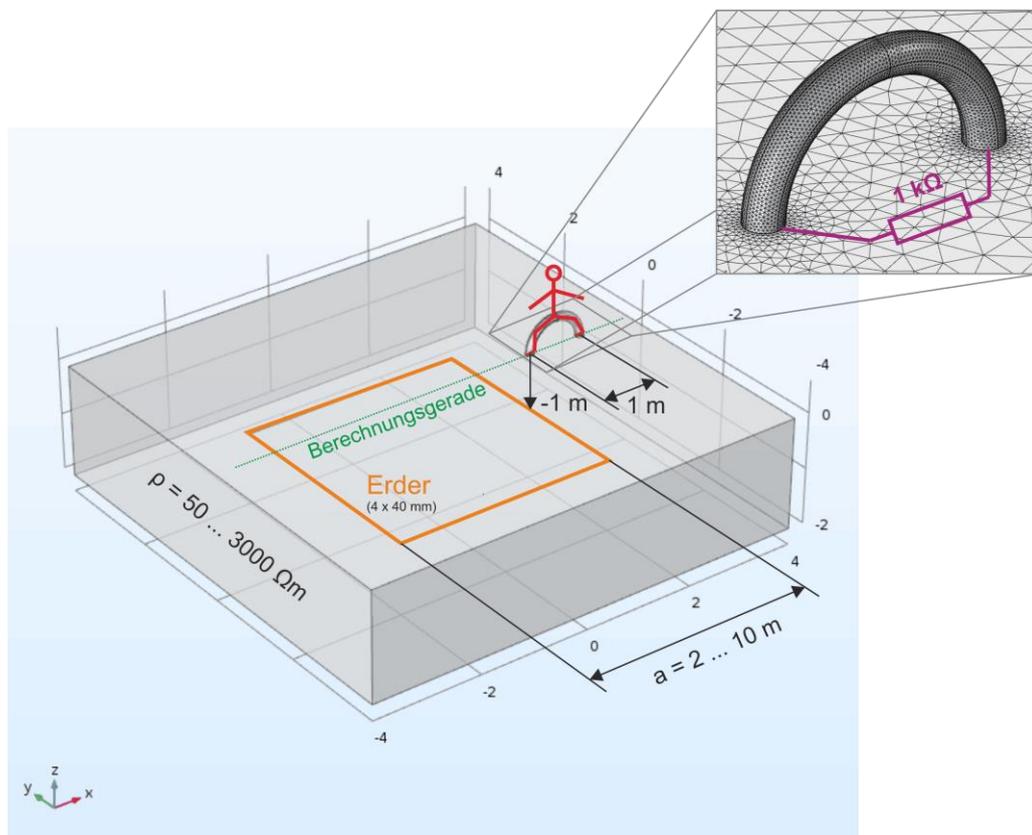


Abbildung 3-22: FEM Modell<sup>22</sup> zur Analyse der belastenden Berührungsspannungsbestimmung

<sup>21</sup> Die Modellierung wurde mittels COMSOL 5.2 realisiert.

<sup>22</sup> Der hellgraue Bereich entspricht dem Erdreich und ist in der Abbildung nicht maßstabsgetreu. Um Randeffekte bei der Simulation möglichst auszuschließen, wurde das Erdreich mit 80 m x 80 m x 30 m modelliert.

Das Modell besteht aus einem quadratischen Ringerder (4 x 40 mm Stahl) welcher in einer Tiefe von 1 m angeordnet ist. Die Seitenlänge „a“ des Ringerders wird im Rahmen der Simulation zwischen 2 m und 10 m variiert.

Der hellgraue Bereich entspricht dem Erdreich, dessen spezifischer Widerstand im Bereich von 50  $\Omega\text{m}$  bis 3  $\text{k}\Omega\text{m}$  variiert wird. Zu beachten ist, dass das Erdreich in der Abbildung nicht maßstabsgetreu dargestellt ist.

Die Modellierung der Person erfolgt in Form eines Halbtoruses dessen Querschnitt 200  $\text{cm}^2$  beträgt. Die elektrische Leitfähigkeit wurde so eingestellt, dass der Widerstand zwischen den beiden an der Erdoberfläche aufliegenden Kontaktflächen zirka 1  $\text{k}\Omega$  entspricht.

Die Abbildung 3-23 zeigt die berechneten Erdoberflächenpotentiale mit und ohne Belastung (Übergangswiderstände werden nicht berücksichtigt) durch eine Person bei unterschiedlichen spezifischen Erdwiderständen.

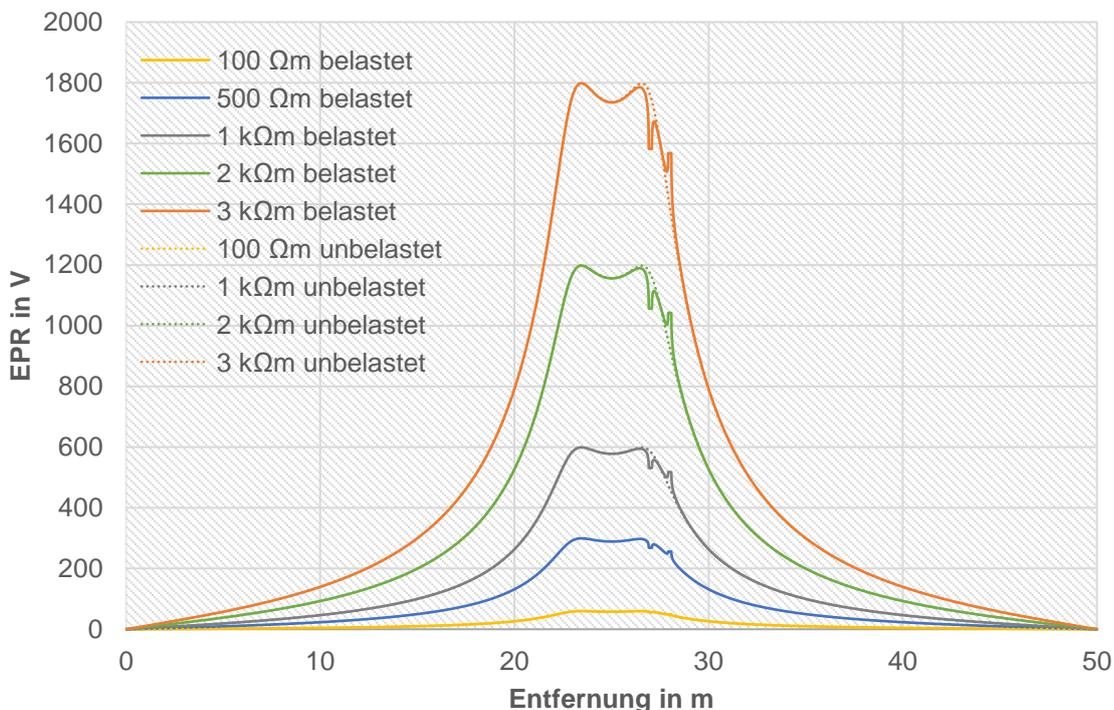


Abbildung 3-23: Erdungsspannung  $EPR^{23}$  in V mit und ohne Belastung durch Person bei verschiedenen spezifischen Erdwiderständen, Berechnungsgerade siehe Abbildung 3-22,  $a = 4 \text{ m}$ ,  $I_F = 10 \text{ A}$

Bedingt durch die ohmsche Verkopplung der vier Teile des Ringerders beträgt der Abstand zwischen den beiden Spannungmaxima weniger als 4 m (Seitenlänge des Erders), hierdurch greift eine Person welche mit einem Fuß direkt über dem Erder an der Erdoberfläche steht

<sup>23</sup> Es ist zu beachten, dass die Spannung an der Erdoberfläche berechnet wurde, der Erder selbst liegt auf einem höheren Potential, eine Rückrechnung auf den Ausbreitungswiderstand des Erders ist daher aus der Abbildung nicht möglich.

(siehe Abbildung 3-22) bei einem 1-m-Schritt entlang des er das nicht das Maximum der Spannung ab (diese ergibt sich aus dem „unbeeinflussten“ Spannungstrichter). Die Abbildung 3-23 verdeutlicht weiter die Wirkung der Belastung auf das Erdoberflächenpotential. Bedingt durch die Körperdurchströmung gleichen sich die Spannungen an den beiden Fußpunkten des Toruses an wodurch die Schrittspannung zurückgeht.

Betrachtet man die relative Differenz

$$\text{delta}_{U_s} = \frac{U_{S \text{ belastet}} - U_{S \text{ unbelastet}}}{U_{S \text{ unbelastet}}} \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 3-1})$$

zwischen einer belasteten und einer unbelasteten Schrittspannungsmessung so ergibt sich der in Abbildung 3-24 dargestellte Zusammenhang. Wie aus der Abbildung hervorgeht, hat die Ausdehnung (Seitenlänge a) des Ringerders geometriebedingt keinen sichtbaren Einfluss auf das Ergebnis, da die gegenseitige Beeinflussung der Teilerder des Ringes zwar (wie aus Abbildung 3-23 hervorgeht) vorhanden, jedoch nicht groß genug ist, um in Kombination mit den relativ kleinen Kontaktflächen (je 200 cm<sup>2</sup>) der Fußpunkte des Torusses eine geometriebedingte Abweichung zu verursachen. D.h. bezogen auf eine einfache quadratische Ringerdergeometrie (1 m Tiefe) sind die Ergebnisse sowohl für kleine als auch große Erderausdehnungen gültig.

Für die Praxis bedeutet die Abnahme der relativen Schrittspannung durch Belastung bei zunehmenden spezifischen Bodenwiderstand relativ gesehen somit eine günstigere Situation bezüglich Personengefährdung. Der Grund liegt darin, dass die Zunahme der belasteten Schrittspannung mit steigendem spezifischen Erdwiderstand deutlich geringer ist, als die Zunahme der unbelasteten Schrittspannung.

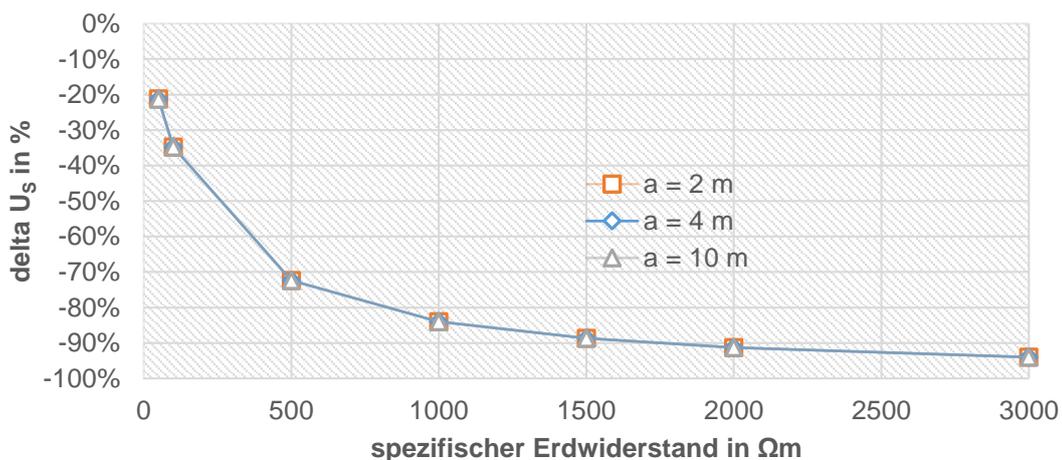


Abbildung 3-24: Reduzierung der Schrittspannung bei Belastung mit 1 kΩ in Abhängigkeit von der Erderausdehnung sowie dem spezifischen Erdwiderstand





## 4 Beurteilungsverfahren von Erdungssystemen

### 4.1 Allgemeines

Gemäß ÖVE/ÖNORM E 8383 [32] (siehe auch (Kapitel 1.2.5) kann der Nachweis über die korrekte Ausführung einer vorhandenen Erdungsanlage rechnerisch oder messtechnisch erfolgen, wobei die normativen Hilfestellungen (siehe Kapitel 1.2, sowie speziell Kapitel 1.2.6) in der Praxis nur für einfachste Erderkonstellationen hilfreich sind.

Basierend auf den in Kapitel 2 und besonders in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnissen, wird im Folgenden eine Möglichkeit aufgezeigt, wie und unter welchen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen der Nachweis einer korrekten Ausführung eines Erdungssystems rechnerisch bzw. messtechnisch erfolgen kann.

### 4.2 Flussdiagramm zur rechnerischen bzw. messtechnischen Evaluierung eines Erdungssystems

Das in Abbildung 4-1 dargestellte Flussdiagramm gliedert sich in vier Kernpunkte. Im ersten Schritt werden Randbedingungen festgelegt, anhand derer entschieden wird, ob die korrekte Ausführung des Erdungssystems anhand von Berechnungen oder anhand von Messungen durchgeführt werden soll. Hierbei ist zu beachten, dass das Flussdiagramm (nach dem Ausschlussprinzip) auf der Überlegung basiert, unter welchen Bedingungen eine messtechnische Evaluierung nicht zielführend ist. Der Kern der Entscheidung liegt daher in der Analyse der örtlichen Gegebenheiten sowie den technischen Möglichkeiten und verschmilzt in einigen Punkten mit den Elementen der Messaufgaben (z.B. siehe Erläuterungen zu E2 und M7 in Kapitel 4.3 und 4.4).

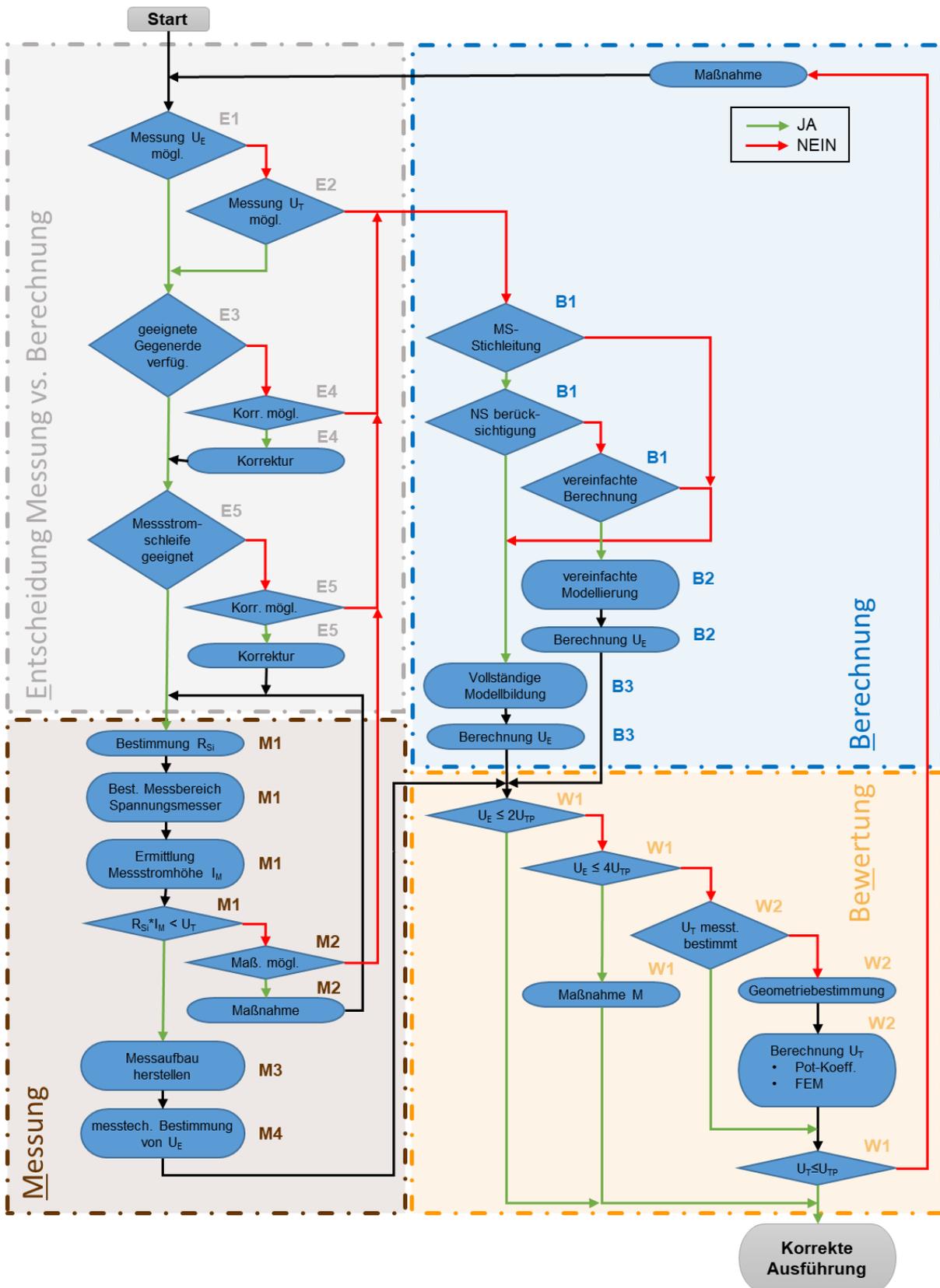


Abbildung 4-1: Schema zur Beurteilung von Erdungssystemen unter Berücksichtigung technischer und organisatorischer Randbedingungen



### 4.3 Entscheidungsprozess Berechnung vs. Messung

E1: Die Möglichkeit, den Verlauf des Erdoberflächenpotentials und die Erdungsspannung messtechnisch zu erfassen, ist maßgeblich von den örtlichen Gegebenheiten abhängig.

Hierbei sind zumindest folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Begehbarkeit vom Messtrassen (Einschränkung durch Bebauung wie Straßen)
- Vorhandensein eines ausreichenden Abstandes der Messtrassen (Messpunkten) zu beeinflussenden oder beeinflussten Objekten

Im Allgemeinen sind diese notwendigen Gegebenheiten nur in suburbanen und ländlichen Raum vorhanden.

E2: Auch die Möglichkeit Spannungsdifferenzen in Form von Schritt- und Berührungsspannungen messtechnisch zu erfassen, ist maßgeblich von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Erfolgt die Beurteilung eines Erdungssystems hinsichtlich Personensicherheit, basierend auf der Erfassung von Berührungsspannungen, so ist besonders auf mögliche Spannungsverschleppungen zu achten.

Ein messtechnischer Nachweis der korrekten Ausführung eines Erdungssystems kann im urbanen Gebieten, nur durch die Erfassung von Berührungsspannungen nachgewiesen werden. Für Hinweise, wo die maximalen Schrittspannungen in urbanen Gebieten auftreten können, siehe Kapitel 3.5.4 und Kapitel 3.5.5.

E3: Eine geeignete Gegenerde ist durch folgende Faktoren gekennzeichnet:

- ausreichender Abstand zum Erdungssystem, welches messtechnisch analysiert werden soll (siehe Kapitel 3.5.2)
- geringer Ausbreitungswiderstand der Gegenerde (siehe auch Kapitel 3.4 sowie M4)

E4: Siehe Kapitel 3.5.4

E5: Die Messstromschleife, wie sie für den Zweck einer messtechnischen Überprüfung eines Erdungssystems realisiert wird, kann zu einer Stromaufteilung führen, welche nicht den Verhältnissen im realen Erdschlussfall entspricht. Für Hinweise hinsichtlich der optimalen Anordnung siehe Kapitel 3.3.

### 4.4 Messprozess

M1: Auch im Rahmen der Messdurchführung muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Personengefährdung kommt. Daher gilt es zu überprüfen, ob an den einzelnen Impedanzen des Messstromkreises unzulässig hohe Spannungen während der



Messung abgegriffen werden können. Hierzu müssen sämtliche Widerstände des Messstromkreises (Ausbreitungswiderstände und Leitungswiderstände)  $R_{Si}$  sowie der (untere) Messbereich des Spannungsmessers bestimmt werden. Aus den ermittelten Daten ergibt sie die Höhe des benötigten Messstromes und somit die Höhe der Quellenspannung sowie der Quellenleistung. Hierbei ist sicherzustellen, dass an den einzelnen Widerständen keine unzulässig hohen Spannungsabfälle auftreten.

M2: Ergibt die Evaluierung unzulässig hoher Spannungen an einzelnen Impedanzen des Messstromkreises, so ist zu prüfen, ob eine Personengefährdung durch zusätzliche Maßnahmen verhindert werden kann. In der Praxis relevant ist hierbei oft die Gegenerde wenn deren Ausbreitungswiderstand (Geometrie bedingt) die dominante Impedanz im Messstromkreis darstellt. Mögliche Maßnahmen bei hohen Ausbreitungswiderständen von der Gegenerde sind:

- provisorische Abschränkung des Bereiches um die Gegenerde
- Abstellung einer Person welche sicherstellt, dass niemand den Gefahrenbereich im Bereich der Gegenerde betritt.

M3: Herstellung des Messaufbaus unter Berücksichtigung der Anforderungen in E1 sowie allgemeiner sicherheitstechnischer Anforderungen (z.B. Vermeidung von Stolperfallen durch Messleitungen, Überqueren von Straßen und Kreuzungen, Überqueren von Bahnanlagen)

M4: weitere Hinweise siehe Kapitel 3.5.2

#### 4.5 Berechnung

B1: Im Rahmen der messtechnischen Analyse eines Erdungssystems gilt es im ersten Schritt zu prüfen, ob eine vereinfachte Berechnung, bedingt durch die MS-Systemstruktur unter Beachtung der NS-Struktur, möglich ist. Hinweise siehe Kapitel 2.5, 2.6, 2.7 und 0.

**Anmerkung:** Der vorgeschlagene Verfahrensablauf ist eng an die Inhalte dieser Arbeit gebunden (siehe speziell Kapitel 2.7 und Kapitel 0).

B2: Hinweise siehe Kapitel 2.7 und Kapitel 0

B3: Hinweise siehe Kapitel 2.5



## 4.6 Bewertung

W1: Der Ablauf für die eigentliche Bewertung entspricht im Wesentlichen jener gemäß ÖVE/NORM E8383 [32] (siehe Abbildung 1-8) bzw. ÖVE/ÖNORM EN 50522, mit folgenden Anpassungen:

- Das Überprüfungskriterium Körperstrom  $I_B$  wurde weggelassen, da es in der Praxis nur in Spezialfällen relevant ist. In diesen Fällen müssen die zu beurteilenden Körperwiderstände und zusätzliche Übergangswiderstände im Berührungsstromkreis richtig erfasst werden um eine Über- oder Unterbewertung zu verhindern.
- Im Falle eines rechnerischen Nachweises der Personensicherheit ergibt sich bei einer auf der Berührungsspannung basierenden Beurteilung die Notwendigkeit einer rechnerischen Bestimmung der lokalen Potentialverhältnisse (Schritt und Berührungsspannung).

**Anmerkung:** Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde hierzu die Methode der finiten Elemente (siehe Kapitel 3.6) sowie der Potentialkoeffizienten (siehe Kapitel 3.5) herangezogen.





## 5 Zusammenfassung

### 5.1 Allgemeines

Die Verlängerung der Lebensdauer urbaner Mittelspannungs-Kabelnetze ist für Netzbetreiber aus wirtschaftlicher Sicht eine zentrale Fragestellung. Wie die Erfahrung aus Pilotversuchen zeigt, können alternative Schutzkonzepte (KNOPE, KNOSPE) dazu beitragen, dieser Anforderung zu entsprechen, indem durch eine rasche Fehlerklärung die Spannungsbeanspruchung in gelöscht betriebenen Mittelspannungsnetzen im Erdschlussfall reduziert wird<sup>24</sup>. Dies mindert einerseits die künstlich beschleunigte Isolationsalterung und kann andererseits zur Vermeidung von Doppelerdschlüssen als Folge von Erdschlüssen beitragen. Einen Nachteil dieser stromstarken Schutzkonzepte stellen die erhöhten Anforderungen an die Erdungssysteme hinsichtlich Personensicherheit dar. Wobei hierdurch nun auch in urbanen Gebieten mit potentiell Globalen Erdungssystemen das Verständnis für die Grenzen und maßgebenden Mechanismen für die Strom- und Spannungsverhältnisse einen zentralen Faktor für die Beurteilung von Erdungssystemen darstellt.

Im ersten Teil der Arbeit wurden die maßgebenden Mechanismen, für die Stromaufteilung in urbanen Kabelnetzen anhand eines auf Phasengrößen basierenden Berechnungsmodells analysiert. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Kapitel 5.2 dargestellt.

Im zweiten Teil, der Arbeit wird - aufbauend auf vorhandenen Arbeiten - auf die zu berücksichtigenden technischen Einflussfaktoren bei einem messtechnischen bzw. rechnerischen Nachweis der Personensicherheit in (großen) Erdungssystemen eingegangen. Basis hierfür bilden Grundanalysen unter Anwendung der Finiten-Elemente-Methode sowie der Potentialkoeffizienten-Methode welche in Kapitel 5.3 zusammengefasst sind.

Abschließend wird in Kapitel 4 ein möglicher Ablauf für die Beurteilung von Erdungssystemen dargestellt.

### 5.2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem entwickeltem Modell zur Berechnung der Strom- und Potentialverhältnisse in verbundenen Erdungssystemen

#### Modellentwicklung

Maßgebend für die Potentialverhältnisse in Erdungssystemen ist die Aufteilung des Fehlerstromes. In urbanen Versorgungsgebieten erfolgt die Anspeisung der MS/NS-Trafostationen meist mittels Kabel welche gegenüber MS-Freileitungsnetzen den Vorteil haben, dass bei vorhandenen und beidseitig aufgelegten Kabelschirmen ein 4-Leiter-MS-Netz entsteht, welches im Erdschlussfall dem Fehlerstrom einen niederimpedanten Rückleiter zur Quelle zur Verfügung stellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein modulares Berechnungsmodell für MS-Kabelnetze mit und ohne Begleiterder mit unterlagertem NS-Netz

---

<sup>24</sup> Schnellabschaltung vorausgesetzt



realisiert, welches die Realität für quasistationäre Verhältnisse möglichst gut nachbildet (siehe Kapitel 2.3).

Nach erfolgreicher Durchführung einer Modellparameter-Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 2.4) erfolgt die Analyse der Strom- und Potentialverhältnisse im niederohmigen Erdschlussfall anhand verschiedener Netzstrukturmodelle.

### Simulations-Erkenntnisse in stichförmigen MS-Netzstrukturen

Der im Rahmen der Simulationen ermittelte Betrag des Reduktionsfaktors bei einer einfachen stichförmigen 10-kV- und 20-kV-Kabelnetzstruktur (siehe Kapitel 2.5.3) wird mit kleiner 40 % bestimmt, wobei tendenziell der Betrag des Reduktionsfaktors deutlich unter 12 % liegt (siehe Kapitel 2.5.4). Neben der Kabellänge ist der zweitwichtigste Einflussfaktor auf den Reduktionsfaktor der Schirmquerschnitt. Bei einer Kabellänge von 20 km führt z.B. eine Erhöhung des Schirmquerschnittes von  $3 \times 16 \text{ mm}^2$  auf  $3 \times 35 \text{ mm}^2$  zu einer Halbierung des Reduktionsfaktors (siehe Abbildung 2-30). Der Einfluss der Isolationsdicke auf den Reduktionsfaktor ist im Bereich der analysierten Spannungsebenen zu vernachlässigen. Die Aufteilung der Schirmrückströme auf die drei Kabelschirme (bei Einleiterkabelsystemen) führt, abhängig von der Verlegeanordnung, dem Abstand und der Kabellänge zu einer maximalen Abweichung von 10 % (siehe Kapitel 2.5.2), d.h. aus Sicht der thermischen Dimensionierung der Kabel ergeben sich keine durch Geometrieunsymmetrie bedingten Zusatzanforderungen. Hinsichtlich der Verteilung der Erdungsspannungen im Erd(kurz)schluss-Fall kann bei symmetrischen Netzstrukturen (siehe Kapitel 2.5.4) bis ca. 3 km Länge eine lineare Zunahme der Erdungsspannung bis zum Erdschlussort beobachtet werden, welche hinter dem Fehlerort exponentiell abklingt (siehe Abbildung 2-32). Mit zunehmender Netzlänge und ONS Anzahl ergibt sich zwischen Quelle und Fehlerort abhängig vom Impedanzverhältnis der Kettenleiterglieder, eine zunehmend exponentielle Entwicklung der Erdungsspannung (siehe Abbildung 2-35).

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführte Analyse der Begleiterderstruktur (siehe Kapitel 2.5.6) auf die Potentialverhältnisse im Erdschlussfall ergibt, dass durchgängige Begleiterder<sup>25</sup> bei vorhandenem Kabelschirm die Potentialsituation im Erdschlussfall primär durch die Querableitung und nicht durch die Längsleitung verbessern.

Obwohl in urbanen Kabelnetzen der Großteil des Fehlerstromes über den Kabelschirm zurück fließt, sind, wie in Kapitel 2.5.7 und Kapitel 2.5.8 gezeigt, die niedrigen Ausbreitungswiderstände der ONS wichtig, um die lokale Potentialanhebung im Erdschlussfall möglichst gering zu halten. Einzelne hohe Ausbreitungswiderstände führen dabei nicht

---

<sup>25</sup> Erder der zwei ONS miteinander elektrisch leitfähig verbindet.



zwangsläufig durch das im Verbund wirkende Erdungssystem zu lokal erhöhten Erdungsspannungen im Erdschlussfall.

#### Simulations-Erkenntnisse in ringförmigen und gering vermaschten MS-Netzstrukturen

Die systematische Analyse des Einflusses der MS-Abgänge einer erdschlussbehafteten MS/NS-ONS (siehe Kapitel 2.5.5) auf die Stromaufteilung verdeutlicht, dass der Großteil des Fehlerstromes immer über den Schirm des fehlerstromspeisenden Kabels zurück fließt, auch wenn mehrere parallele Rückleiter zur Quelle existieren (siehe Abbildung 2-40).

Diese Erkenntnis wird auch durch die Analyse verschiedener Netzstrukturen (siehe Kapitel 2.5.9 bis Kapitel 2.5.11) bestätigt.

Für die Potentialverteilung zwischen Quelle und Erdschlussort ergeben sich - bedingt durch die induktive Kopplung, für stichförmige Strukturen und offene Ringstrukturen tendenziell ähnliche Verhältnisse (siehe z.B. Abbildung 2-52, Fehler ONS 2\_36 vs. Abbildung 2-35, Fehler ONS 36). In Kapitel 2.7 wird versucht, ein vereinfachtes („praxisnahes“) Berechnungsverfahren zu entwickeln.

#### Simulations-Erkenntnisse aus (möglichst) realen Modellstrukturen

Zur Abrundung der Thematik hinsichtlich Strom- und Potentialverhältnisse im Erdschlussfall werden anhand einer stichförmigen sowie einer ringförmigen Netzstruktur verschiedene Modellvarianten (Kabelschirmbehandlung, Begleiterderstruktur und unterschiedlichen NS-Verhältnissen hinsichtlich TT- und TN-System) inklusive Niederspannung modelliert.

In Vergleich zu den zuvor modellierten Basisstrukturen ergibt sich durch die geringen Ausbreitungswiderstände nur in den ersten ONS neben der erdschlussbehafteten Station eine Potentialanhebung. Weiters verdeutlichen die Ergebnisse den Nutzen der NS-Erdungsanlagen für Höhe und Verteilung der Erdungsspannungen im System.

#### Vereinfachtes Berechnungsverfahren

Der Versuch, im Rahmen der Arbeit eine vereinfachte Berechnungsmethode anhand der klassischen Netzwerk-Theorie (Maschen- und Kontengleichungen, siehe Kapitel 2.7) sowie einer abgewandelten Form der Telegraphengleichung (siehe Kapitel 0) zu entwickeln, liefert hinsichtlich des praktischen Nutzens ein interessantes Ergebnis.

Wie aus Kapitel 2.7.4 hervorgeht, liefert der vereinfachte Berechnungsansatz nur für jene Situationen, in welchen die Erdschlussbehaftete ONS nahe dem Umspannwerk (der Quelle) liegt, Ergebnisse mit hinreichender Genauigkeit (Abweichung kleiner 20 % bezogen auf das Primärmodell).

Wie aus dem Vergleich (Leitungsgleichungsmodell vs. Kettenleitermodell) der berechneten Erdungsspannungen je Station für eine einfache Kettenleiter-Stichstruktur (siehe Kapitel 2.8.3,



Abbildung 2-70) hervorgeht, können mittels Leitungsgleichungsmodell die Erdungsspannungen mit einer durchaus akzeptablen Genauigkeit (max. Differenz kleiner 10 %) berechnet werden. Die Schwachstelle der Methode liegt im Umstand, dass diese nur für symmetrische Strukturen (identer ONS Abstand, einheitlicher Kabeltyp und vergleichbare Ausbreitungswiderstände der ONS) in Frage kommt und die notwendige Bestimmung der Randparameter (siehe Kapitel 2.8.3) oft ein Problem darstellt.

### **5.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse hinsichtlich technischer Einflussfaktoren bei messtechnischem Nachweis der Personensicherheit von Erdungssystemen**

Die Theorie der messtechnischen Analyse von Erdungsanlagen stellt ein in der Literatur umfangreich behandeltes Thema dar (siehe Kapitel 3.2). Im Rahmen der Arbeit wird unter Berücksichtigung praktischer Aspekte der Bogen zwischen Theorie und Praxis für folgend angeführte Faktoren geschlossen.

#### Aspekte bei der Wahl der Messstromhöhe

Bei der Wahl der Messstromhöhe sind neben technischer Aspekte (Messstromhöhe bedingte Messunsicherheit) auch Aspekte der Personensicherheit (im Rahmen der Messung) zu berücksichtigen. Wie aus Abbildung 3-5 hervorgeht, sind Quellenleistungen größer 10 kVA bis 20 kVA unter Berücksichtigung einer Begrenzung der Quellenspannung meist nicht erforderlich.

#### Einspeiseort der Messtromquelle

In der Praxis besteht nicht immer die Möglichkeit die Stromaufteilung im Rahmen der messtechnischen Analyse einer Erdungsanlage zu bestimmen, wodurch nur eine Beurteilung des gesamten wirksamen Erdungssystems (Erdungsanlage inkl. erderwirksamer Komponenten) möglich ist. In diesen Fällen ist die Lage der Messtromquelle von zentraler Bedeutung, da diese wie aus dem Beispiel in Kapitel 3.2.2 hervorgeht, zu einer Überbewertung um einen Faktor 2,5 führen kann.

#### Abstand der Gegenerde

In der Praxis ist es aufgrund geographischer (bzw. örtlicher) und organisatorischer Gegebenheiten nicht immer möglich, den 6,5 - 10-fachen Abstand (bezogen auf den Durchmesser der zu analysierenden Erdungsanlage) zwischen der zu analysierenden Erdungsanlage und der Gegenerde einzuhalten. Wie aus den Ergebnissen in Kapitel 3.5.4 hervorgeht, ist für Ringerder bis 20 m x 20 m bei homogenen Bodenverhältnissen bei 4-fachen Erderabstand die durch ohmsche Beeinflussung bedingte Abweichung der Schrittspannung bereits unter 5 % und somit für die meisten praktischen Anwendungen ausreichend.



Soll für die Beurteilung einer Erdungsanlage nur der Ausbreitungswiderstand herangezogen werden, so ist für einfache Erdungsanlagen<sup>26</sup> auch ein noch geringerer Abstand (2- bis 3-facher Durchmesser, siehe Abbildung 3-14) ausreichend, um die 62%-Regel (siehe Kapitel 3.5.2 sowie Kapitel 3.5.3 für den Zusammenhang zwischen Halbkugel- und Ringerder) anwenden zu können.

Bei verbundenen Erdungsanlagen im urbanen Gebiet ist unter der Voraussetzung, dass eine rechnerische Bestimmung der in Summe wirksamen Ausbreitungswiderstände und eine darauf basierende Beurteilung der Personensicherheit nicht möglich ist, nur eine messtechnische Überprüfung der Schritt- und Berührungsspannungen möglich. Basierend auf den in Kapitel 3.5.5 beschriebenen Szenarien ergibt sich hier bei 4-fachem Abstand der Gegenerde (bezogen auf den Durchmesser des Erdungssystems) ebenfalls mit 5 % relativer Schrittspannungsabweichung eine für die Praxis ausreichende Genauigkeit.

### Berührungsspannung

In realen Berührungsspannungsszenarien, in denen eine Person ein durch Erdschluss spannungsführendes Objekt berührt, handelt es sich immer um eine durch den Körperwiderstand belastete Anordnung (zusätzliche Übergangswiderstände bleiben hier unbeachtet). Wird die Spannung in Form einer Schrittspannung abgegriffen, so ergibt sich, abhängig vom Verhältnis zwischen dem spezifischen Erdwiderstand und dem Körperwiderstand, eine Reduzierung der Schrittspannung zwischen 20 % bis über 90 % (siehe Abbildung 3-24)<sup>27</sup>.

## **5.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem erarbeiteten Beurteilungsverfahren**

Hinsichtlich der Beurteilung von Erdungssystemen ergibt sich aufgrund technischer und organisatorischer Gegebenheiten, dass ein messtechnischer Nachweis der Personensicherheit im Fehlerfall nicht immer das Mittel der Wahl darstellt. Tendenziell ergibt sich aus dem in Kapitel 4 vorgeschlagenem Ablauf, dass im ruralen Gebieten ein messtechnischer und in urbanen Gebieten ein rechnerischer Nachweis der korrekten Ausführung eines Erdungssystems zu bevorzugen ist.

---

<sup>26</sup> „Einfache Erdungsanlage“ bedeutet hier eine Erdungsanlage, die weitgehend keiner Beeinflussung von weiteren Einbauten im Erdreich unterliegt und im unbeeinflussten Fall ein möglichst radialsymmetrisches Strömungsfeld aufweist.

<sup>27</sup> Maßgebend für die Personengefährdung ist die Körperdurchströmung, wobei mit zunehmendem spezifischen Erdwiderstand die Höhe der Körperdurchströmung relativ gesehen ansteigt.





## 6 Ausblick – Risikobasierter Ansatz zur Beurteilung von Erdungsanlagen

Beachtet man, dass die Berührungsspannungsgrenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 (siehe auch Abbildung 1-7) unter folgenden Randbedingungen gelten:

- 1) Stromweg über eine Hand und beide Füße;
- 2) 50 % Wahrscheinlichkeit für den Wert der Körperimpedanz;
- 3) 5 % Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Herzkammerflimmern;
- 4) keine zusätzlichen Widerstände,

so ist aus den Punkten zwei und drei erkennbar, dass die Randbedingungen für die Grenzwerte statistische Wahrscheinlichkeiten voraussetzen.

Ein erweiterter Ansatz gemäß der Richtlinie EG-0 [7] beschreibt einen auf bedingter Wahrscheinlichkeit basierenden Ansatz, dessen Kern durch die Wahrscheinlichkeit eines Fehlerereignisses unter gleichzeitiger Anwesenheit einer Person, welche ein unter Spannung stehendes Objekt (verursacht durch den Fehler) berührt.

Diese Wahrscheinlichkeit berechnet sich gemäß EG-0 [7] zu:

$$P_{coinc} = \frac{f_n \cdot f_i \cdot \left(\frac{t_d}{s} + \frac{t_i}{s}\right) \cdot \frac{T}{a} \cdot CRF}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \quad (\text{Gl. 6-1})$$

$P_{coinc}$ ...	Wahrscheinlichkeit eines Fehlers während der Anwesenheit einer Person welche ein unter Spannung stehendes Objekt (verursacht durch den Fehler) berührt
$f_n$ ...	Anzahl der Fehler
$f_i$ ...	Anzahl der Anwesenheit einer Person
$t_d$ ...	Fehlerdauer
$t_i$ ...	Anwesenheitsdauer
$T$ ...	Betrachtungszeitraum
$CRF$ ...	Wahrscheinlichkeitsreduktionsfaktor



Mit dem Ergebnis dieser Berechnung ergibt sich die Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls zu:

$$P_{fat} = P_{fib} \cdot P_{coinic} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

$P_{fat}$	...	Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls
$P_{fib}$	...	Wahrscheinlichkeit von Kammerflimmern
$P_{coinic}$	...	Wahrscheinlichkeit eines Fehlers während der Anwesenheit einer Person welche ein unter Spannung stehendes Objekt (verursacht durch den Fehler) berührt

Eine Fibrillationswahrscheinlichkeit größer  $10^{-4}$  gilt gemäß EG-0 [7] als inakzeptabel. Liegt die Wahrscheinlichkeit im Bereich von  $10^{-4}$  bis  $10^{-6}$ , so sind Maßnahmen unter dem Aspekt „so niedrig wie vernünftigerweise praktikabel<sup>28</sup>“ zu treffen. Ein Wahrscheinlichkeit kleiner  $10^{-6}$  gilt als akzeptabel (siehe auch [9] und [4]).

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Methodik eine Reihe weiterer Parameter (z.B.: Berücksichtigung von Übergangswiderständen) berücksichtigt (siehe [7]).

Diese Methode hat aus wissenschaftlicher Sicht durchaus Potential und stellt für bestimmte Konstellationen von Erdungsanlagen eine interessante Alternative bzw. Ergänzung zu bestehenden Bewertungsmethoden dar.

---

<sup>28</sup> Übersetzt aus EG-0 [7], ALARP (as low as resonable practicable)



## 7 Literatur

- [1] BGBl. II Nr. 322/1998, Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über die Anforderungen an öffentliche Verteilungsnetze mit der Nennspannung 400/230 V und an diese angeschlossene Verbraucheranlagen zur grundsätzlichen Anwendung der Schutzmaßnahme Nullung (Nullungsverordnung), Fassung 09.05.2017
- [2] Brandauer W., Verlustberechnung in Elektrizitätsnetzen mit gering superpositionierten Last- und Erzeugungseinheiten, Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2014
- [3] Bräunlich R., Messtechnische Überprüfung von großen Erdungsanlagen, Fachartikel, Ausgabedatum: unbekannt
- [4] BS EN 50522, Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c., National Annex NA (Informative), 2010
- [5] Clarke E., Circuit Analysis of A-C Power Systems, Volume 1: Symmetrical and Related Components, Ausgabe September 1950
- [6] Curdts E. B., Some of the Fundamental Aspects of Grounding Resistance Measurement using the Fall-of-Potential Methode, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 17, 2002
- [7] EG-0, Power System Earthing Guide. Part 1: Management Principles, energy network association, Mai 2010
- [8] Emmer W., Programm zur Berechnung induktiver Beeinflussungen, Masterarbeit am Institut f. Elektrische Anlagen der TU Graz, März 2014
- [9] Fickert L. ; Mallits T.; Schmutzger E.: Effiziente Berechnung von Erdschlussströmen in gelöschten Netzen und Betrachtungen zu globalen Erdungssystemen – in: IEWT Wien 2015
- [10] Fickert L., Grundlagen Elektrischer Energiesysteme, Vorlesungsskriptum am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz, 2010
- [11] Heuerman H., Skriptum Hochfrequenztechnik, Komponenten für Gigh-Speed- und Hochfrequenzschaltungen, 2009
- [12] Hufnagl E., Erdschlussbehandlung unter regulatorischen Aspekten, STE 2017 Sternpunktsbehandlung in Netzen bis 110 kV, Aschaffenburg, Feb. 2017



- [13] Hunold S, Algorithmischen Bestimmung der Alterungskarakteristik von Mittelspannungskabelmuffen basierend auf diagnostischen Messwerten und Betriebsmitteldaten, Dissertation an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Juni 2016
- [14] IEC/TS 60479-1, Wirkung des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte, Vornorm Mai 2007
- [15] IEEE Std. 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, Ausgabe 2015
- [16] IEEE Std. 81.2, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, Ausgabe: 1991
- [17] Iskra R., Erweiterung des Digitalprogrammes KABEIN zur Berechnung von induktiven Beeinflussung durch Hochspannungskabel, Diplomarbeit, Institut f. Elektrische Anlagen der TU Graz, 1190
- [18] Kaufmann W., Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme, VWEV-Verlag, Berlin 1995, ISBN 3-8022-0469-7
- [19] Kays J., Agentenbasierte Simulationsumgebung zur Verbesserung der Planung von Verteilnetzen, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Dortmund
- [20] Kerber G., Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU München, 2011
- [21] Lindinger M., Nachweis globaler Erdungssysteme durch Messung und Berechnung von verteilten Erdungsanlagen, Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 2012
- [22] Muckenhuber R., Skriptum „Elektrische Anlagen 1, Teil 1“, 1987, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz
- [23] Muckenhuber R., Skriptum „Elektrische Anlagen 1, Teil 2“, 1989, Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz
- [24] NKT Cables, Produktkatalog, <http://www.nkt.de/produkte.html>, Zugriff: Jän. 2017
- [25] Oeding D., Oswald B.R, Elektrische Kraftwerke und Netze, 7. Auflage, ISBN 978-3-642-19245-6
- [26] OVE EN 50310, Anwendung von Maßnahmen für Erdung und Potentialausgleich in Gebäuden mit Einrichtungen der Informationstechnik, Ausgabe 2017-03-01



- [27] ÖVE/ÖNORM E 8001-1, Ausgabe 2010-03-01, Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 v und DC 1500 V, Teile 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)
- [28] ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61, Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V --Teil 6-61: Prüfungen – Erstprüfungen, 2001
- [29] ÖVE/ÖNORM E 8001-6-62, Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V --Teil 6-62: Prüfungen -- Wiederkehrende Prüfungen und Außerordentliche Prüfung, 2003
- [30] ÖVE/ÖNORM E 8014-1, Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V -- Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Begriffe, 2016
- [31] ÖVE/ÖNORM E 8014-3, Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V -- Teil 3: Besonderheiten von Erdungsanlagen in Gebäuden mit speziellen EMV-Anforderungen der informationstechnischen Einrichtungen, 2006
- [32] ÖVE/ÖNORM E 8383, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV, Ausgabe 2000-03-01
- [33] ÖVE/ÖNORM E8014-2, Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V -- Teil 2: Fundamenterder, 2006
- [34] ÖVE/ÖNORM E8384, Ausgabe 2007, Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
- [35] ÖVE/ÖNORM EN 50522, Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, Ausgabe 2011
- [36] ÖVE/ÖNORM EN62305-1, Blitzschutz –Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe 2012-07-01
- [37] ÖVE/ÖNORM EN62305-2, Blitzschutz –Teil 2: Risiko-Management, Ausgabe 2013-02-01
- [38] ÖVE/ÖNORM EN62305-3, Blitzschutz –Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen, Ausgabe 2012-07-01
- [39] ÖVE-B1/1976, Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV
- [40] Raunig C., Ein Beitrag zur Berechnung und Modellierung von niederfrequenten induktiven Beeinflussungsfragen, laufende Dissertation an der TU Graz



- [41] Rettensteiner W., Erstellung eines Digitalprogrammes zur Berechnung der ohmschen Beeinflussung zwischen Erdungsanlagen, Diplomarbeit am Institut für Elektrische Anlagen, 1981
- [42] Rischawy W., Technische Anwendbarkeit und wirtschaftliche Bewertungsfaktoren von Erdschlussortungsverfahren in städtischen Mittelspannungsnetzen, Masterarbeit, Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, Dez. 2015
- [43] Scheffler J., Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Chemnitz, 2002
- [44] Schichler U., Grundlagen der Hochspannungstechnik, Vorlesungsskriptum am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz, 2016
- [45] Schmutzger E., Ein Beitrag zur Berechnung der niederfrequenten induktiven Beeinflussung von Rohrleitungsnetzen, Dissertation an der TU Graz, 1990
- [46] Urban F., Ein Beitrag zur Berechnung des Stosserdungswiderstandes Zusammengesetzter Erder, Dissertation am Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz, 1991
- [47] Wieland T., Analyse, Bewertung und Steigerung möglicher Einspeisekapazität dezentraler Energieerzeugungsanlagen in der Verteilnetzebene, Forschungsbeitrag im Rahmen der Internationalen Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2013



## 8 Anhang

### 8.1 Ohmsche Koppelfaktoren von einfachen Erdern

#### 8.1.1 Allgemeines

Im Folgenden<sup>29</sup> werden die Koppelfaktoren einfacher Erder angeführt. Der Koppelfaktor wird hierbei wie folgt definiert:

$$k = \frac{R_{E\_neu}}{R_{E\_alt}} \quad (\text{Gl. 8-1})$$

Wie aus der Definition des Koppelfaktors hervorgeht, lässt dieser den Rückschluss auf den minimalen Abstand von Erdern zu, ab denen diese hinsichtlich Ihres Ausbreitungswiderstandes als unbeeinflusst angesehen werden können.

---

<sup>29</sup> Berechnungen wurden vom Verfasser der vorliegenden Arbeit erstellt

## 8.1.2 Tiefenerder

### Zwei Tiefenerder

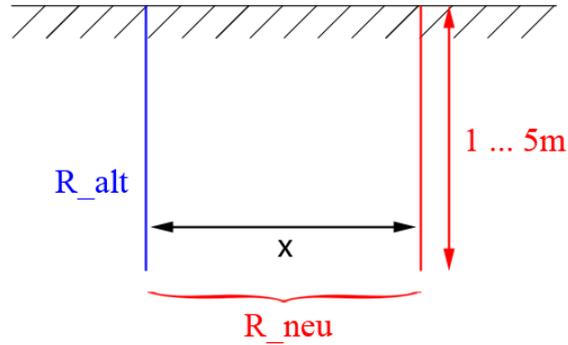


Abbildung 8-1: Übersicht, Tiefenerderanordnung (2 Erder)

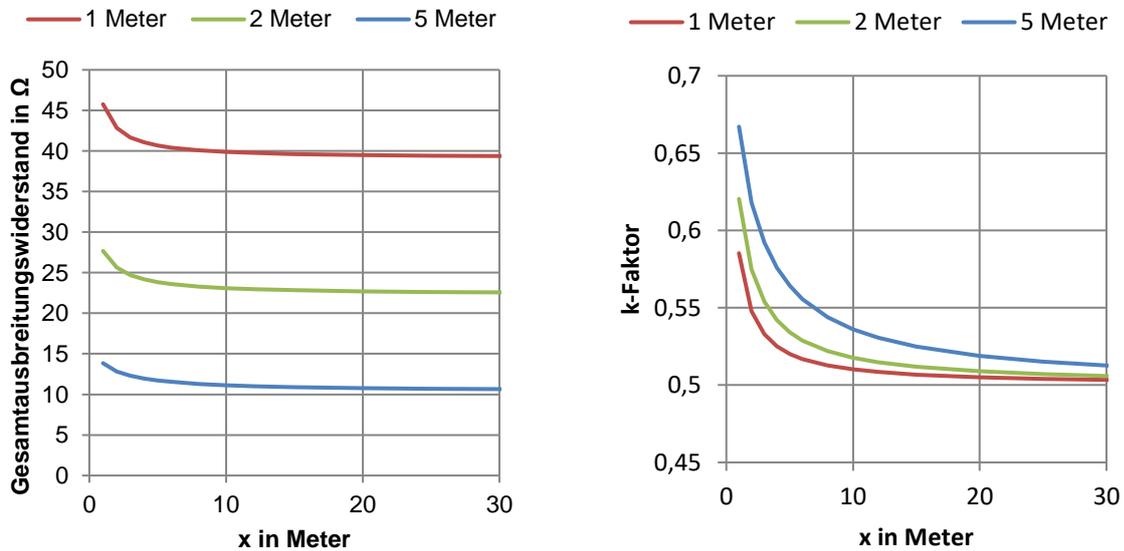


Abbildung 8-2: Ausbreitungswiderstand (bei  $100 \Omega\text{m}$ ) von zwei Tiefenerdern abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erdertiefen (links), Koppelfaktor zweier Tiefenerder abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erdertiefen (rechts)

## Drei Tiefenerder

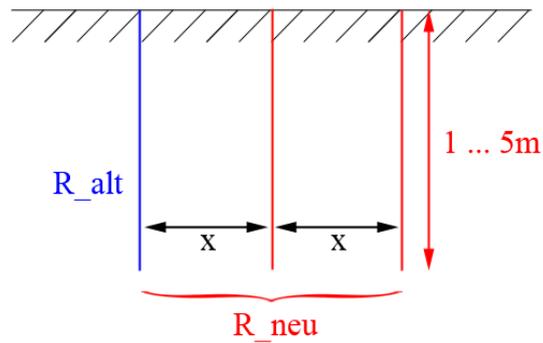


Abbildung 8-3: Übersicht, Tiefenerderanordnung (3 Erder)

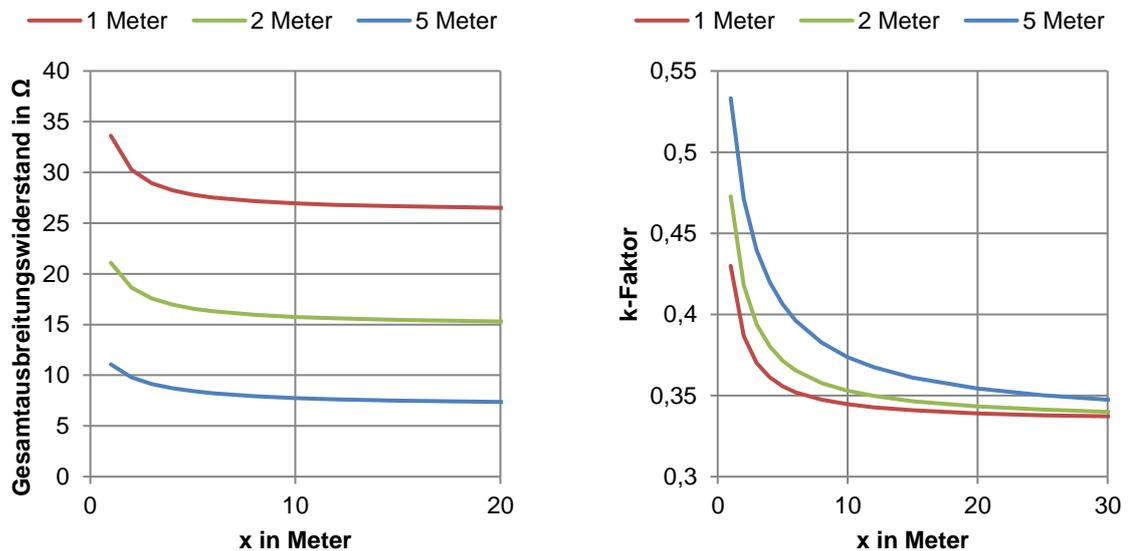


Abbildung 8-4: Ausbreitungswiderstand (bei  $100 \Omega\text{m}$ ) von drei Tiefenerdern abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erdertiefen (links), Koppelfaktor zweier Tiefenerder abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erdertiefen (rechts)

## Vier Tiefenerder

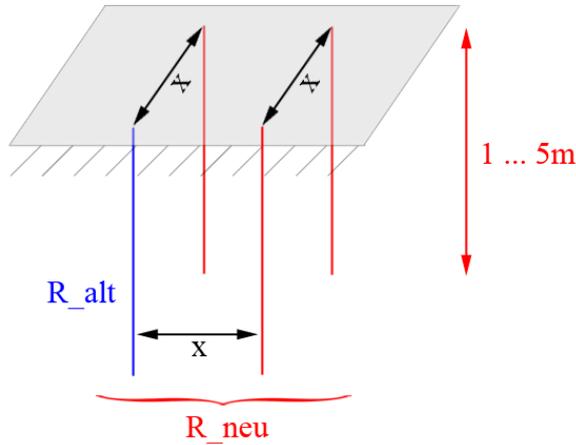


Abbildung 8-5: Übersicht, Tiefenerderanordnung (3 Erder)

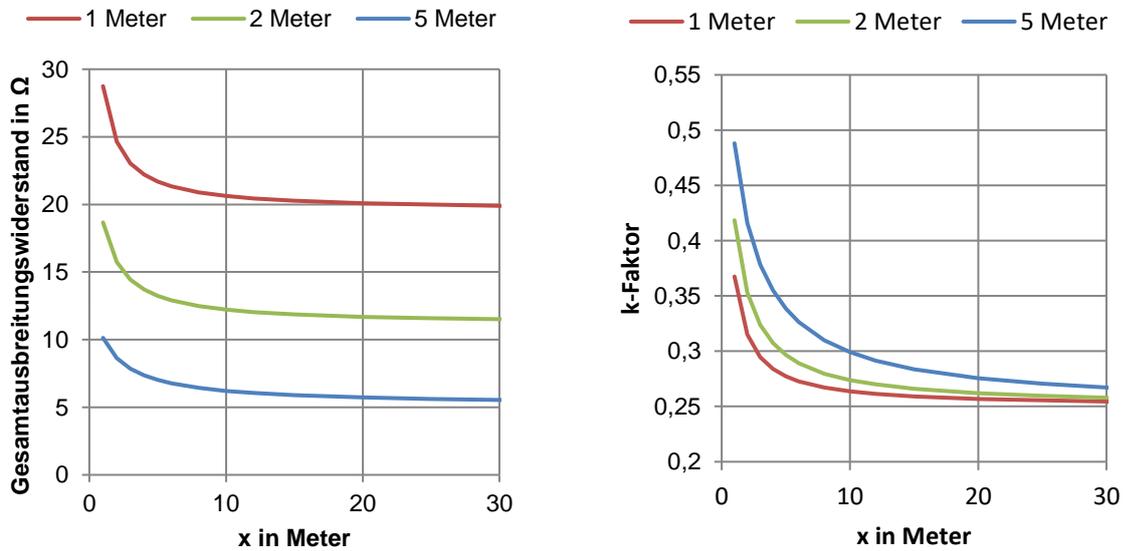


Abbildung 8-6: Ausbreitungswiderstand (bei 100  $\Omega$ m) von vier Tiefenerdern abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erdertiefen (links), Koppelfaktor zweier Tiefenerder abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erdertiefen (rechts)

### 8.1.3 Ringerder

#### Zwei Ringerder:

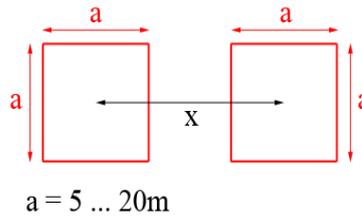


Abbildung 8-7: Übersicht, Ringerder in 1 m Tiefe (2 Erder)

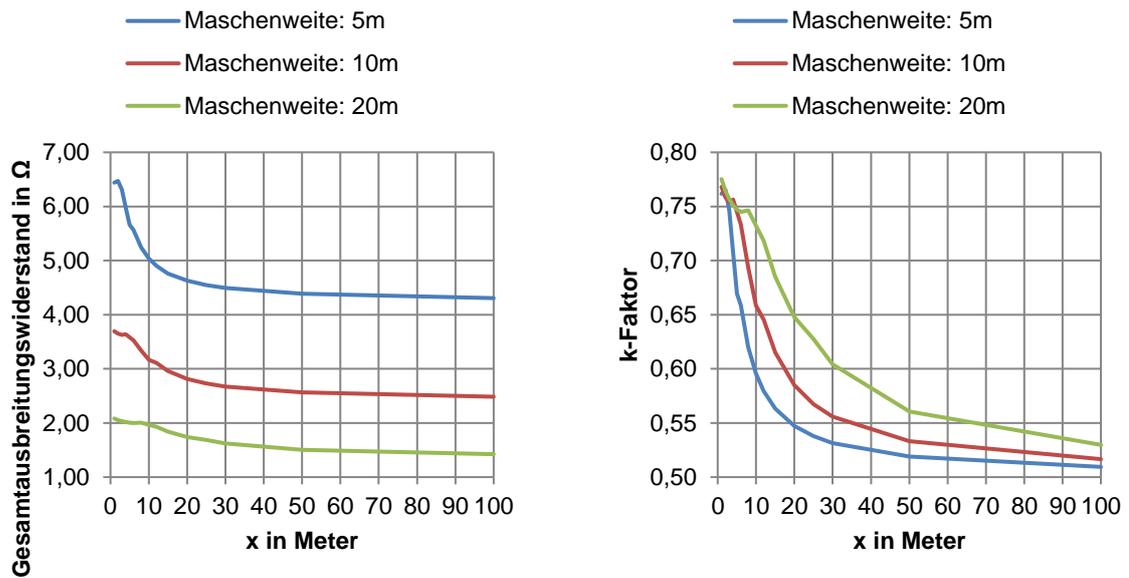


Abbildung 8-8: Ausbreitungswiderstand (bei 100 Ωm) von zwei Ringerdern abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erderausdehnungen (links), Koppelfaktor zweier Ringerder abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erderausdehnungen (rechts)

**Vier Ringerder:**

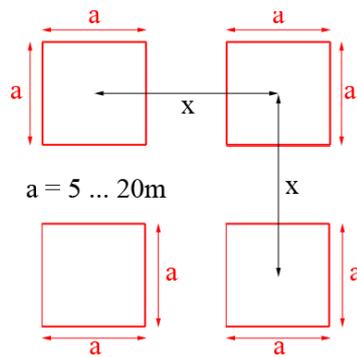


Abbildung 8-9: Übersicht, Ringerder in 1 m Tiefe (4 Erder)

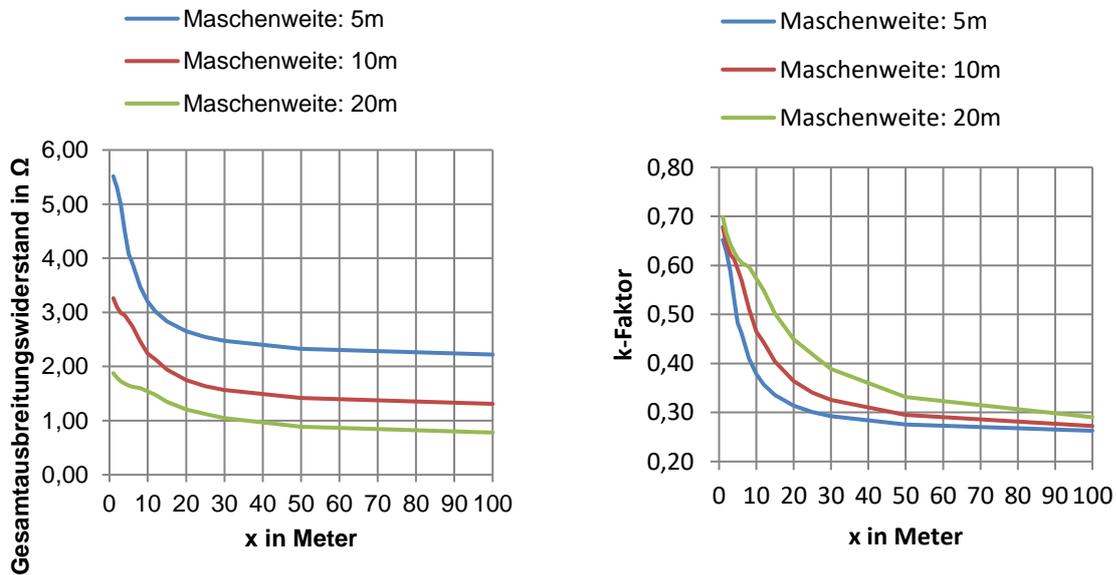


Abbildung 8-10: Ausbreitungswiderstand (bei 100  $\Omega$ m) von vier Ringerdern abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erderausdehnungen (links), Koppelfaktor vier Ringerder abhängig vom Erderabstand für verschiedene Erderausdehnungen (rechts)

## 8.2 Stromaufteilung und Potentialverhältnisse in Erdungssystemen unter Berücksichtigung von MS-Netzstrukturen bei reduzierter ONS-Anzahl

### 8.2.1 Beitrag von unterschiedlichen Begleiterderstrukturen auf die Spannungsverteilung entlang einer Stichleitung bei reduzierter ONS-Anzahl

Basierend auf der in Kapitel 2.5.6 in Abbildung 2-44 dargestellten Struktur zeigt Abbildung 8-11 die Erdungsspannungen entlang der ONS abhängig von der Begleiterderstruktur bei 10 ONS.

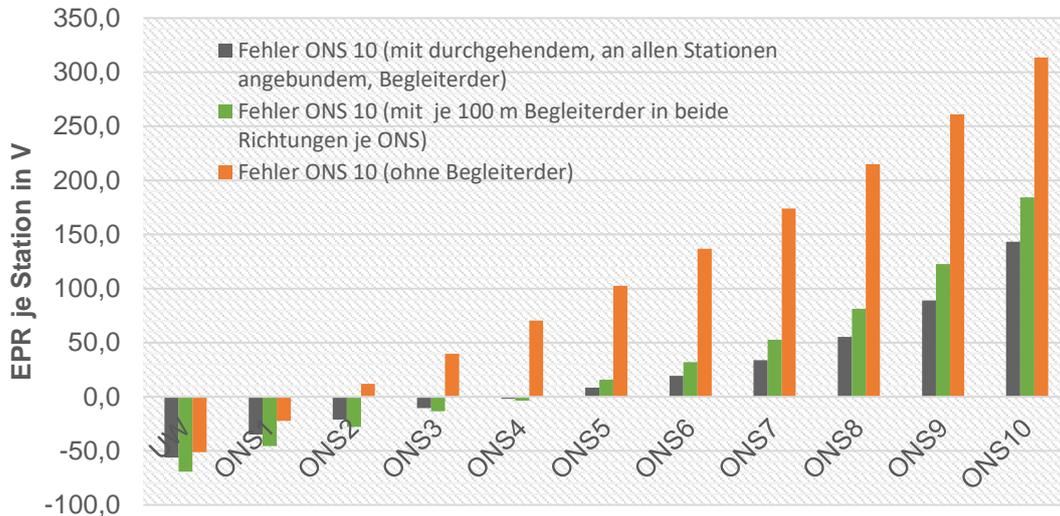


Abbildung 8-11: Erdungsspannung EPR je Station bei unterschiedlichen Begleiterderkonfigurationen bei stichförmiger Netzstruktur (siehe Abbildung 2-44, jedoch mit nur 10 ONS), Fehler ONS 10, Stationsabstand 300 m,  $I_F = 1\text{ kA}$

### 8.2.2 Einfluss der Stationserdungswiderstände (symmetrische Variation) auf die Spannungsverteilung einer Stichleitung bei reduzierter ONS-Anzahl

Basierend auf der in Kapitel 2.5.7 in Abbildung 2-42 bis Abbildung 2-44 dargestellten Struktur zeigt Abbildung 8-12 die Erdungsspannungen entlang der ONS abhängig von den Ausbreitungswiderständen bei 10 ONS.

Die Abbildung 8-13 beinhaltet sinngemäß zu Abbildung 2-48 den Verlauf von Erdungsspannung und Anlagenerdungsstrom abhängig von den Erdausbreitungswiderständen der ONS 10.

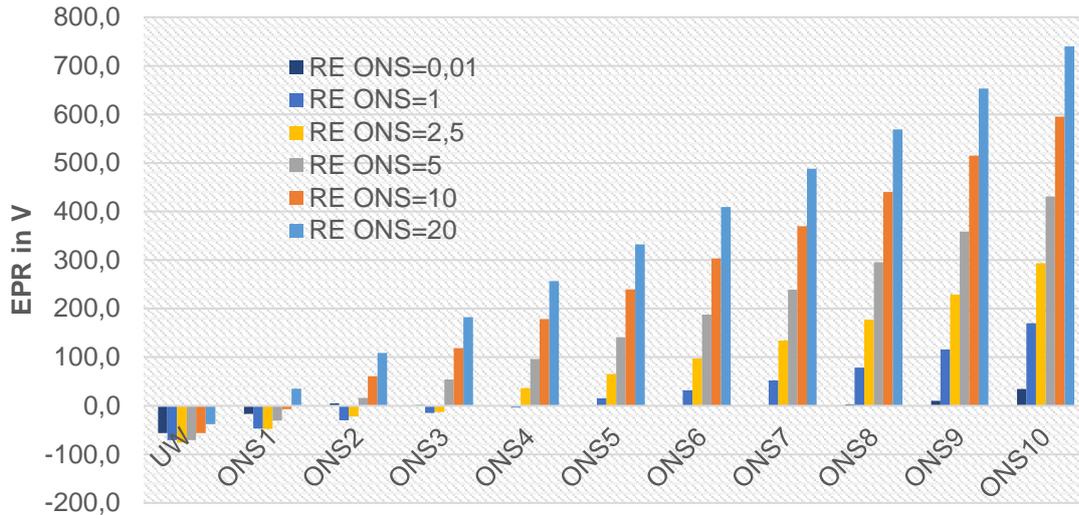


Abbildung 8-12: Erdungsspannungen EPR je Station in Abhängigkeit von den Erdausbreitungswiderständen (symmetrische Variation) der ONS bei stichförmiger Netzstruktur (siehe Abbildung 2-42 bis Abbildung 2-44, jedoch mit nur 10 ONS), Erdschluss ONS 10,  $I_F = 1 \text{ kA}$

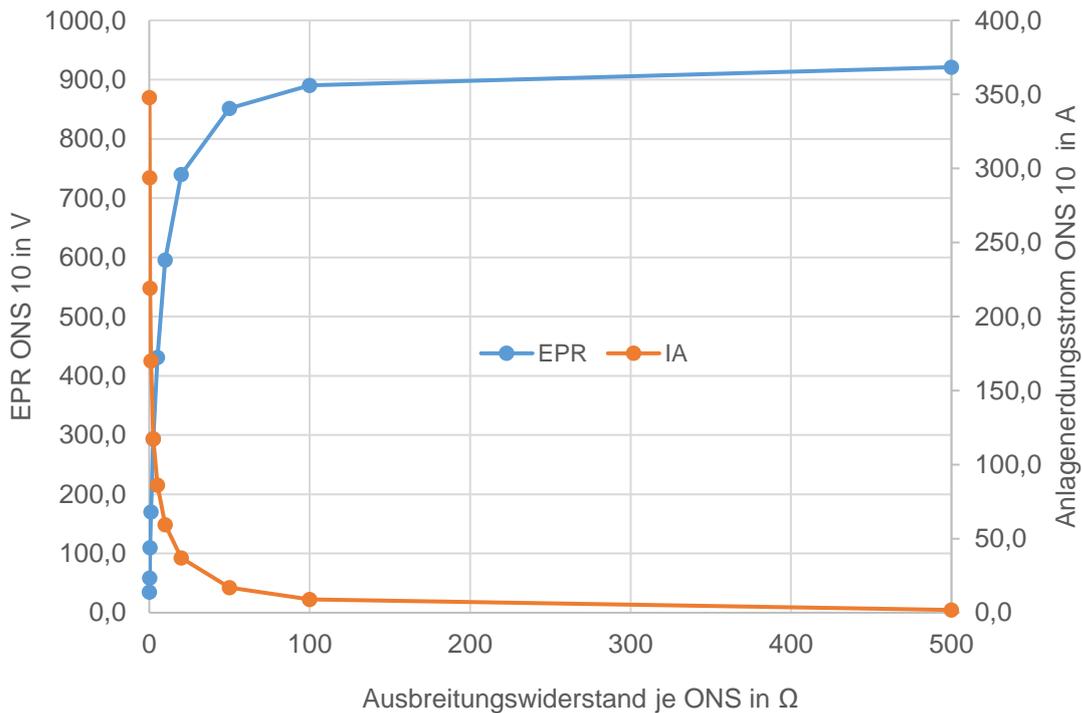


Abbildung 8-13: Erdungsspannungen EPR und Anlagenerdungsströme  $I_A$  abhängig von den Ausbreitungswiderständen (symmetrische Variation) der Ortsnetzstationen bei stichförmiger Netzstruktur (siehe Abbildung 2-42 bis Abbildung 2-44, jedoch mit nur 10 ONS),  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$ ,  $R_E = 0,01 \Omega \dots 500 \Omega$  (f. alle ONS ident)

### 8.2.3 Einfluss des Fehlerortes auf die Spannungsverteilung entlang einer offenen Ringleitung bei reduzierter ONS-Anzahl

Basierend auf der in Kapitel 2.5.9 in Abbildung 2-51 dargestellten Struktur zeigt Abbildung 8-14 die Erdungsspannungen entlang der ONS abhängig vom Fehlerort einer reduzierten ONS Anzahl (bezogen auf Abbildung 2-51).

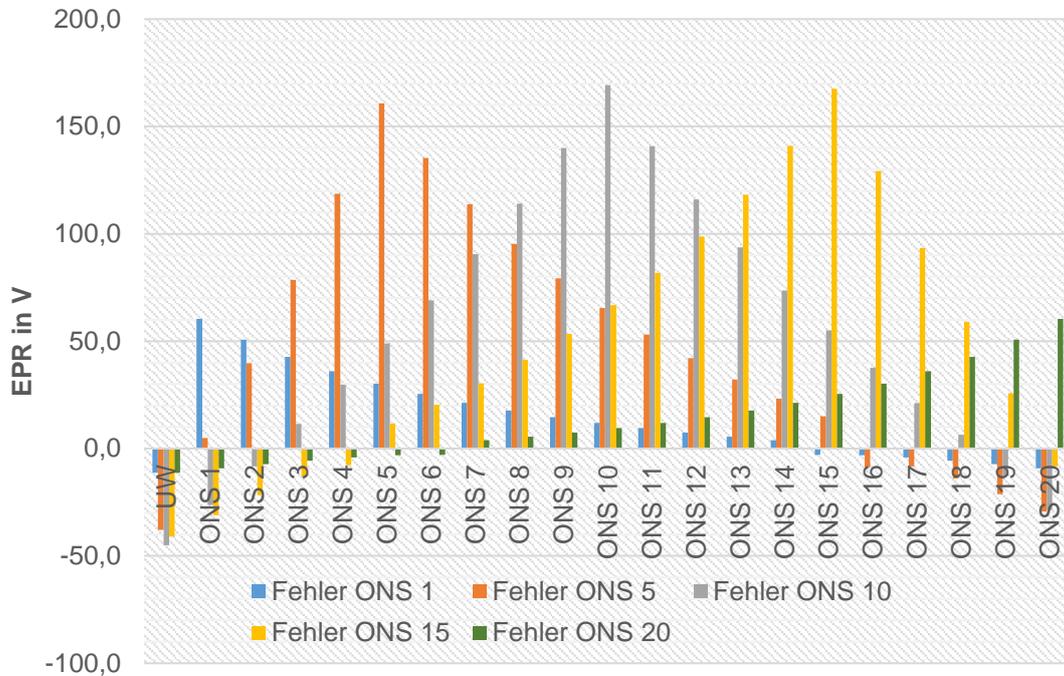


Abbildung 8-14: Erdungsspannungen<sup>30</sup> EPR (oben) je ONS in Abhängigkeit vom Fehlerort einer offen betriebener Ringnetzstruktur (siehe Abbildung 2-51, jedoch mit nur 10 ONS),  $I_F = 1 \text{ kA}$ ,  $R_{E\_UW} = 0,2 \Omega$ ,  $R_E = 5 \Omega$  (f. alle ONS ident)

<sup>30</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

### 8.2.4 Einfluss zusätzlicher Stichabzweige auf die Spannungsverteilung entlang einer offenen Ringleitung bei reduzierter ONS-Anzahl

Basierend auf der in Kapitel 2.5.10 in Abbildung 2-53 dargestellten Struktur zeigt Abbildung 8-15 die Erdungsspannungen entlang der ONS abhängig vom Fehlerort einer reduzierten ONS Anzahl (bezogen auf Abbildung 2-53).

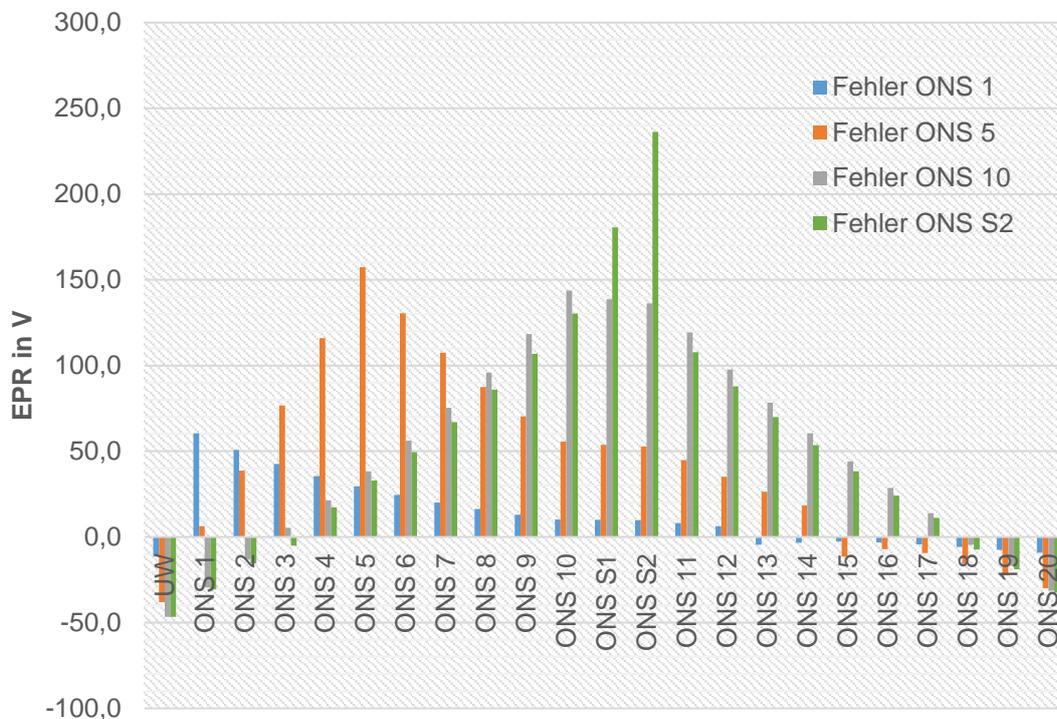


Abbildung 8-15: Erdungsspannungen<sup>31</sup> EPR (oben) je ONS in Abhängigkeit vom Fehlerort bei offen betriebener Ringnetzstruktur mit Stichabgang (siehe Abbildung 2-53, jedoch mit nur 10 ONS),  $I_f = 1\text{kA}$  (bei Fehler in ONS 10)

### 8.2.5 Einfluss zusätzlicher Parallelzweige auf die Strom- und Spannungsverteilung in den ONS entlang einer offenen Ringleitung bei reduzierter ONS Anzahl

Basierend auf der in Kapitel 2.5.11 in Abbildung 2-55 dargestellten Struktur zeigt Abbildung 8-15 die Erdungsspannungen entlang der ONS abhängig vom Fehlerort einer reduzierten ONS Anzahl (bezogen auf Abbildung 2-55).

<sup>31</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.

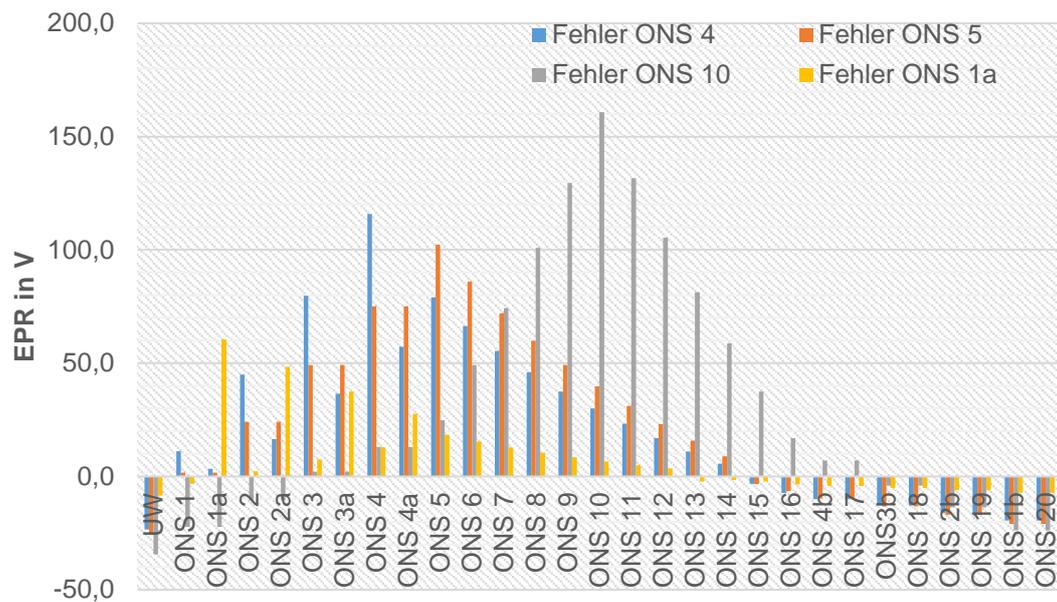


Abbildung 8-16: Erdungsspannungen<sup>32</sup> EPR (oben) je Station in Abhängigkeit vom Fehlerort bei offen betriebener Ringnetzstruktur mit Quervermaschung (siehe Abbildung 2-55, jedoch mit nur 10 ONS),  $I_F = 1\text{ kA}$  (bei Fehler in ONS 10)

<sup>32</sup> Ein EPR mit negativen Vorzeichen bedeutet, dass der Spannungszeiger des dargestellten Effektivwertes der Spannung in der dem Spannungszeiger am Fehlerort gegenüberliegenden Halbebene des Zeigerdiagrammes liegt.