



Andreas Paratscher, BSc

Bestimmung und Verifikation der Erdungsimpedanz von Mittelspannungsstationen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

Masterstudium: Elektrotechnik
vorgelegt an der

Technische Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl
Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert



ELEKTRISCHE
ANLAGEN & NETZE
TU GRAZ

Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Graz, November 2021



© fotopro

Bestimmung und Verifikation der Erdungsimpedanz von Mittelspannungsstationen

Eine Masterarbeit von
Andreas Paratscher, BSc

Betreuer:
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl
Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

5. November 2021

Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/I
8010 Graz
Österreich

Institutsleiter

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl
Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Begutachter

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl
Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert

Eine Masterarbeit von
Andreas Paratscher, BSc

5. November 2021

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am _____

Andreas Paratscher, BSc

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz, _____

Andreas Paratscher, BSc

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt besonders meiner Betreuerin Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl, die mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Ihre fachliche und organisatorische Unterstützung, sowie Ihre Diskussionsbereitschaft und die daraus resultierenden Denkanstöße waren eine große Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert bedanken, der nicht nur durch seine langjährige Erfahrung, wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen hat, sondern auch durch „Geschichten“ aus seinem Leben, die Stimmung während der Zeit der Masterarbeit wesentlich aufgelockert hat.

Ich möchte mich auch bei all meinen Studienkollegen*innen bedanken, die ich während des Studiums kennengelernt habe.

Abschließend möchte ich meinen aufrichtigsten Dank an meine Familie aussprechen. Ich möchte mich hiermit für die sagenhafte Unterstützung während der ganzen Studiendauer, aber im Speziellen in den schwierigen Phasen, als ich Unterstützung brauchte, ganz besonders bedanken.

Beenden möchte ich meine Danksagung mit den Worten:

„Familie ist nicht alles, aber ohne Familie ist alles nichts.“

Arthur Schopenhauer

Kurzfassung

Mittelspannungsnetze werden im D-A-CH-Raum überwiegend erdschlusskompensiert betrieben. Durch den vermehrten Netzausbau mit Kabeln ist mehr Kompensationsleistung notwendig. Dabei kommen vermehrt auch dezentrale Erdschlusskompensationsspulen in Schaltstationen oder Ortsnetzstationen zum Einsatz. In diesen Stationen müssen trotz der zusätzlichen Erdungsströme durch die Kompensationsspulen die zulässigen Schritt- bzw. Berührungsspannungen nach ÖVE/ÖNORM EN 50522 eingehalten werden. Zur Ermittlung der tatsächlich auftretenden Berührungsspannung ist die Bestimmung der wirksamen Erdungsimpedanz erforderlich. Für diese Erdungsimpedanz maßgeblich ist nicht nur der Ausbreitungswiderstand des Erdungssystems der Station, sondern auch die Ausbreitungswiderstände der über die PEN-Leiter der Niederspannungsversorgung bzw. über die Schirme der Mittelspannungskabel verbundenen Erdungsanlagen.

Ziel der Masterarbeit ist ein Modell mit möglichst wenig Eingabeparametern, mit welchem die Abschätzung der Erdungsimpedanz unter Berücksichtigung dieser angeschlossenen Erdungsanlagen möglich ist. Dabei wird einerseits das gesamte Erdungssystem mit einem Kettenleitermodell in Microsoft Excel® und MATLAB® nachgebildet und andererseits mit der Software XGSLab™, welche auch die ohmsche und induktive Kopplung nahegelegener Erdungssysteme berücksichtigt, simuliert. Mit Hilfe von Parametervariationen werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Betrag und den Winkel der Erdungsimpedanz bestimmt. Die Modelle werden mit einer realen Erdungsimpedanzmessung einer Mittelspannungsschaltstation verifiziert.

Anhand der Ergebnisse kann man erkennen, dass die Länge der PEN-Leiter bzw. Kabelschirme zwischen den Gebäuden sowie die Ausbreitungswiderstände der einzelnen Erdungssysteme die größten Auswirkungen haben, wobei die ohmsche Kopplung insbesondere bei in der Praxis häufig vorkommenden Längen von 50 m – 100 m zu berücksichtigen ist. Der Querschnitt der PEN-Leiter bzw. Kabelschirme hingegen hat kaum einen Einfluss auf die Impedanz.

Es zeigt sich außerdem, dass für die Bestimmung der Erdungsimpedanz die Berücksichtigung der nächsten zwei bis drei hintereinander geschalteten Schaltstationen meist ausreichend ist, da dann bereits die Impedanz des unendlichen Kettenleiters erreicht ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits durch die Kenntnis einer geringen Anzahl von Parametern der vorliegenden Simulationsmodelle eine gute Abschätzung der Erdungsimpedanz möglich ist. Damit ist es dem Anwender mithilfe des Netzplanes und einigen Betriebsparametern, aber ohne aufwändigere Messungen möglich, die gesamt wirksame Erdungsimpedanz grob abzuschätzen.

Titel: Bestimmung und Verifikation der Erdungsimpedanz von Mittelspannungsstationen

Schlüsselwörter: komplexe (globale) Erdungssysteme, ohmsche Beeinflussung, Potentialkoeffizientenmethode, Finite Elemente Methode, rechnerische und messtechnische Beurteilung von Erdungssystemen, Sicherheit, Potentialverschleppungen

Abstract

Medium-voltage networks in the D-A-CH region are predominantly operated with ground-fault compensation. Due to the increased network expansion with cables, more compensation power is required. In this context, decentralized ground-fault compensation coils are increasingly used in switching stations or ring main units. In these stations, the permissible step or touch voltage according to ÖVE/ÖNORM EN 50522 must be maintained despite the additional ground currents caused by the compensation coils. To determine the actually occurring touch voltage, it is necessary to determine the effective impedance to earth. For this impedance to earth, not only the resistance to earth of the station's earthing system is of interest, but also the resistances to earth of the grounding systems connected via PEN conductors of the low-voltage supply or via the shields of the medium-voltage cables.

The aim of the master thesis is to develop a model with as few input parameters as possible, for the rough estimation of the impedance to earth taking into account these connected grounding systems. On the one hand, the entire earthing system is simulated with a lattice network in Microsoft Excel® and MATLAB®. On the other hand it is simulated with the software XGSLab™, which also takes into account the ohmic and inductive coupling of nearby earthing systems. Parameter variations are used to determine the significant factors on the magnitude and angle of the effective impedance to earth. The models are verified with a real impedance to earth measurement of a medium voltage substation.

Based on the results, it can be seen that the length of the PEN conductors and cable shields between the buildings as well as the resistances to earth of the individual grounding systems have the greatest effect, whereby in particular the ohmic coupling must be taken into account for lengths of 50 m – 100 m, which are very common in practice. The cross-section of the PEN conductors and cable shields, on the other hand, has hardly any influence.

It is shown that for the determination of the impedance to earth the consideration of the next two to three switching stations connected in series is usually sufficient, since then the impedance of the infinite lattice network is already reached.

The results show that already by knowing a small number of parameters of the present simulation models a sufficient estimation of the impedance to earth is possible. Thus, it is possible for the user to roughly estimate the total effective impedance to earth with the help of the network map and some further operation parameters but without more complex measurements.

Titel: Determination and Verification of the Impedance to Earth of Medium-Voltage Stations

Keywords: complex (global) grounding systems, earthing system, grounding system, ohmic influence, potential coefficient method, finite element method, computational and metrological assessment of grounding systems, safety, potential carryovers

Abkürzungsverzeichnis

AWE	Automatische-Wieder-Einschaltung
Bzw.	beziehungsweise
DACH-Region	Deutschland-Österreich-Schweiz Region
EN	Europäische Normen
EPR, U_E	Earth potential rise, Erdungsspannung U_E
E	Erder
FU-Betrieb	Frequenzumrichter Betrieb, Regelung von Frequenz und Spannung
HH	Höchstspannung
HS	Hochspannung
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IT	Isolated Terra, isolierter Sternpunkt
KNOPE	Kurzzeitige niederohmige Phasenerdung
KNOSPE	Kurzzeitige niederohmige Sternpunkterdung
MS	Mittelspannung
N	Neutralleiter
NS	Niederspannung
OVE / ÖVE	Österreichische Verband für Elektrotechnik
ÖNORM	Nationale österreichische Norm
PE	protective earth, Schutzleiter
PEN-Leiter	protective earth neutral, „Schutzerde neutral“
PVC	Polyvinylchlorid
S	Potentialsteuererder
T	Terra, Erde
THD	Total Harmonic Distortion
VPE	Vernetztes Polyethylen
z.B.	zum Beispiel

Symbolverzeichnis

a	Allgemein Abstand in m
A	Querschnitt in mm ²
A_L	Querschnitt des Innenleiters von Nieder- bzw. Mittelspannungskabel in mm ²
A_S	Querschnitt des Kabelschirmes in mm ²
b	Allgemein Breite bzw. Tiefe in m
\vec{B}	Magnetische Flussdichte in T
c	Abstand Spannungselektroden in m
C_E	Leiter-Erde-Kapazität in F
d	Dämpfung
d_E	Verminderte Erdstromtiefe in m
d_{ik}	Abstand zwischen den Kabelschirmen i und k in m
\vec{D}	Elektrische Flussdichte in $\frac{A \cdot s}{m^2}$
\vec{E}	Elektrische Feldstärke in $\frac{V}{m}$
f	Frequenz in Hz
G	Leitwert in $\frac{1}{\Omega}$ oder S
\vec{H}	Magnetische Feldstärke in $\frac{A}{m}$
I_0	Nullstrom in A
i_{anz}	Anzahl von Gebäuden
I_B	Zulässiger Körperstrom in A
I_{CE}	Kapazitive Erdschlussstrom in A
I_D	Dauerstrom in A
I_E	Erdungsstrom in A
I_F	Fehlerstrom beim Erdschluss in A
I_L	Induktiver Löschspulenstrom in A
$I_{L1} \dots I_{L3}$	Phasenstrom in A

I_M	Messstrom Erdungsimpedanzmessung in A
I_P	Allgemein Prüfstrom in A
I_{Rest}	Erdschlussreststrom in A
I_S	Strom durch den Kabelschirm in A
\vec{j}	Elektrische Stromdichte in $\frac{A}{m^2}$
k	Koppelfaktor in $\frac{V}{m}$
l	Allgemein Länge bzw. Distanz in m
l_g	Grenzlänge in m
l_{GB}	Abstand zwischen den Gebäuden im Niederspannungszweig in m
l_{MS}	Abstand zwischen den Mittelspannungsschaltstationen in m
L	Induktivität Allgemein in H
L_K	Induktivität des Kabels in Microsoft Excel® in H
$L_{M1} \dots L_{M2}$	Induktivität der Kompensationsspulen in H
n	Multiplikator
n_{AB}	Anzahl der Abgänge im Niederspannungszweig
n_{KS}	Anzahl der wirksamen Kabelschirme
r_i	Allgemein Radius in m
r	Reduktionsfaktor
R	Widerstand Allgemein in Ω
R_D	Ohmscher Widerstand der Kompensationsspule in Ω
R_E	Erdungswiderstand in Ω
$R_{E,H}$	Erdungswiderstand der Hilfelektrode in Ω
$R_{E,HK}$	Erdungswiderstand eines Halbkugelerders in Ω
$R_{E,KP}$	Erdungswiderstand eines Kreisplattenerders in Ω
$R_{E,UW}$	Erdungswiderstand eines Umspannwerkes in Ω
R_H	Erdungswiderstand eines Gebäudes in Ω
R_K	Ohmscher Widerstand des Kabels in Microsoft Excel® in Ω

R_M	Ohmscher Widerstand des Kabelmastes in Ω
R_Q	Querableitwiderstand in Ω
t_f	Fehlerdauer in s
U_L	Leiter-Erde-Spannung Generator in V
U_M	Prüfspannung in V
U_N	Nennspannung in V
\underline{U}_{NE}	Verlagerungsspannung in V
\underline{U}_{qL}	Leiter-Erde-Spannung in V
U_S	Schrittspannung in V
U_T	Berührungsspannung in V
U_{Tp}	Zulässige Berührungsspannung in V
U_{vT}	Leerlauf-Berührungsspannung in V
v	Verstimmung
V	Skalare Potentialfunktion in $\frac{V}{m}$
z	Allgemein Höhe in m
\underline{Z}_E	Erdungsimpedanz in Ω
\underline{Z}_{inf}	Kettenleiterimpedanz für einen unendlich langen Kettenleiter in Ω
\underline{Z}'_{iiCE}	Impedanzbelag nach Carson für einen unendlich langen Leiter in $\frac{\Omega}{m}$
\underline{Z}'^*_{iiCE}	Impedanzbelag nach Carson für einen kurzen Leiter in $\frac{\Omega}{m}$
\underline{Z}_{Kette}	Impedanz eines Kettenleiters mit einer beliebigen Anzahl an Gebäuden in Ω
\underline{Z}_{Kette_NS}	Impedanz eines Kettenleiters für den Niederspannungsabzweig in Ω
\underline{Z}_{Kette_MS}	Impedanz eines Kettenleiters für die Mittelspannungsstruktur in Ω
Z'_{MATLAB}	Impedanzbelag eines PEN-Leiters berechnet in MATLAB® in $\frac{\Omega}{m}$
Z'_{XGSLab}	Impedanzbelag eines PEN-Leiters berechnet in XGSLab™ in $\frac{\Omega}{m}$
\underline{Z}_{PEN}	Impedanz eines PEN-Leiters in Ω
\underline{Z}_S	Längsimpedanz eines Kettenleiters in Ω

$\underline{Z}_{\text{Schirm}}$	Impedanz Kabelschirm in Ω
$\underline{Z}_{\text{sternp}}$	Sternpunktimpedanz in Ω
$\underline{Z}_{\text{vor}}$	Impedanz des vorherigen Moduls in Microsoft Excel® in Ω
$\underline{Z}'_{S1S1E} \dots \underline{Z}'_{S3S3E}$	Impedanzbelag Selbstimpedanz in $\frac{\Omega}{\text{m}}$
$\underline{Z}'_{S1S2E} \dots \underline{Z}'_{S3S2E}$	Impedanzbelag Koppelimpedanz in $\frac{\Omega}{\text{m}}$
$\underline{Z}_1 \dots \underline{Z}_3$	Impedanz Transformator Stern-Schaltung in Ω
$\underline{Z}_{13} \dots \underline{Z}_{23}$	Impedanz Transformator Dreieck-Schaltung in Ω
$\underline{Z}_{11} \dots \underline{Z}_{22}$	Selbstimpedanzen Herleitung Kettenleitermodell in Ω
$\underline{Z}_{12} \dots \underline{Z}_{21}$	Koppelimpedanzen Herleitung Kettenleitermodell in Ω
ε	Permittivität $\frac{\text{A}\cdot\text{s}}{\text{V}\cdot\text{m}}$
γ	Spezifische Leitfähigkeit in $\frac{1}{\Omega\cdot\text{m}}$
μ_0	Magnetische Feldkonstante in $\frac{\text{H}}{\text{m}}$
δ_E	Eindringtiefe des Stromes in m
φ	Allgemein Potential in V
ρ	Spezifischer Widerstand Allgemein in $\Omega \cdot \text{m}$
ρ_C	Ladung in A · s
ρ_E	Spezifischer Widerstand des Erdbodens in $\Omega \cdot \text{m}$
$\rho_{E,S}$	Scheinbarer spezifischer Bodenwiderstand in $\Omega \cdot \text{m}$
ω	Kreisfrequenz in $\frac{1}{\text{s}}$

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
1.1	Ausgangslage und Motivation	1
1.2	Fragestellungen und Ziele	6
1.3	Methodik	6
1.4	Gliederung der Arbeit.....	7
2	Theorie und Berechnungsgrundlagen	9
2.1	Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen.....	9
2.1.1	Isolierter Sternpunkt.....	9
2.1.2	Starrer / Niederohmiger Sternpunkt.....	11
2.1.3	Resonanzgeerdeter Sternpunkt.....	12
2.1.3.1	Vorübergehende niederohmige Sternpunkterdung (KNOSPE).....	15
2.1.3.2	Vorübergehende niederohmige Phasenerdung (KNOPE)	15
2.1.3.3	Wichtige Parameter für kompensierte Netze.....	16
2.1.3.4	Erdschlusskompensationsspule	17
2.2	Wichtige normative Bestimmungen zu Erdungssystemen	18
2.2.1	Begriffsdefinitionen	20
2.2.2	ÖVE/ÖNORM EN 50522	24
2.2.2.1	Funktionale Anforderungen	24
2.2.2.2	Auslegung von Erdungsanlagen.....	24
2.2.2.3	Zusammenschluss von Hochspannungs- und Niederspannungserdungsanlagen ...	27
2.2.2.4	Errichtung von Erdungsanlagen	28
2.2.2.5	Zusätzliche Anmerkungen zur Auslegung.....	29
2.3	Globales Erdungssystem.....	30
2.3.1	Zusammenschluss von Erdungssystemen	31
2.3.2	Nähe der Erdungssysteme	31
2.3.3	Äquipotentialfläche	32
2.3.4	Ablaufdiagramm zur Identifizierung eines globalen Erdungssystems.....	32
2.4	Aufbau eines Mittelspannungskabels.....	33
2.4.1	Leiter	33
2.4.2	Innere Leitschicht.....	33
2.4.3	Isolierung	34

2.4.4	Äußere Leitschicht	34
2.4.5	Schirm.....	34
2.4.6	Schutzhülle	34
2.4.7	Bewehrung.....	35
2.4.8	Kunststoffmantel	35
2.4.9	Schirmbehandlung von Mittelspannungskabeln	36
2.4.9.1	Beidseitige Erdung.....	36
2.4.9.2	Einseitige Erdung.....	37
2.4.9.3	Cross-Bonding	37
2.5	Aufbau eines Niederspannungskabels	38
2.6	Ohm'sche Beeinflussung von nahegelegenen Erdungssystemen	39
2.6.1	Berechnungsmethode der Potentialkoeffizienten	40
2.7	Berechnung der Impedanzen mit Erdrückleitung	43
2.8	Berechnung der Schirmimpedanzen	46
2.9	Grundlagen der Erdungsmessung.....	50
2.9.1	Messung des spezifischen Bodenwiderstandes.....	50
2.9.1.1	Wenner-Verfahren	51
2.9.1.2	Schlumberger-Verfahren	51
2.9.1.3	Dipol-Dipol-Verfahren	52
2.9.2	Messung der Erdungsimpedanz.....	53
2.9.2.1	2-Punkt-Methode	54
2.9.2.2	Zangenmethode/Clamp-on.....	54
2.9.2.3	3-Punkt-Methode	55
2.9.2.4	Fall-of-Potential-Methode	56
2.9.2.5	Methode mit Strominjektion	57
2.9.2.6	Netzversuch mit Nennspannung - Staged fault tests	58
2.9.2.7	Zusammenfassung	59
2.9.2.8	Messabweichungen	59
2.9.2.9	Frequenzselektive Messung.....	60
2.10	Softwarepaket XGSLab™.....	60
2.11	Formeln für einfache Erderanordnungen.....	63
3	Modellbildung und Simulation	64

3.1	Herleitung des Kettenleitermodelles.....	64
3.2	Struktur und Eigenschaften des Kettenleiters	70
3.3	Realisierung des Kettenleiters in Microsoft Excel®.....	73
3.3.1	Eingabefelder und Berechnung	73
3.3.2	Modul Kabel.....	74
3.3.3	Modul Abzweig	74
3.3.4	Modul Mast / Ringschluss.....	75
3.3.5	Modul Substation	75
3.3.6	Modul Abgang.....	76
3.3.7	Modul Auswertung	76
3.4	Simulationsergebnisse in MATLAB®	77
3.4.1	Datenerhebung Simulation	77
3.4.2	Impedanz PEN-Leiter Niederspannungskabel	78
3.4.3	Schirmimpedanz Mittelspannungskabel.....	83
3.4.4	Kettenleiter eines Niederspannungsabzweiges – Parameteranalyse	86
3.4.5	Kettenleiter einer Mittelspannungsschaltstation	89
3.4.6	Wertebereiche für die Erdungsimpedanz	92
3.5	Simulationsergebnisse in XGSLab™.....	94
3.5.1	Erdungswiderstand eines Gebäudes.....	94
3.5.2	Einzelnes Gebäude mit angeschlossenem PEN-Leiter.....	96
3.5.3	Mehrere Gebäude mit angeschlossenem PEN-Leiter.....	99
3.5.4	Abschätzung des Erdungswiderstandes von einfachen Netzstrukturen	103
3.5.5	Potentialverteilung bei einem Fehler	104
4	Messung an einer Mittelspannungsstation	107
4.1	Aufgabenstellung	107
4.2	Grundsatzuntersuchung Reduktionsfaktor / Erdungsstrom.....	108
4.3	Messungen	109
4.3.1	Messung des spezifischen Bodenwiderstandes.....	109
4.3.2	Messung der Erdungsimpedanz mit Strominjektion in die Gegenstation.....	111
4.3.2.1	Trasse West.....	113
4.3.2.2	Trasse Nord	114
4.3.3	Messung der Erdungsimpedanz mit Strominjektion in die Gegenelektrode.....	115

4.4	Vergleich von Messung und Simulation der Schaltstation	117
4.5	Vergleich von Messung und Simulation der Niederspannungsabgänge.....	119
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
6	Verzeichnisse.....	123
6.1	Literaturverzeichnis.....	123
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	125
6.3	Tabellenverzeichnis.....	130
6.4	Formelverzeichnis.....	130
7	Anhang.....	133
7.1	Microsoft Excel®-Kettenleiter	133
7.1.1	Eingabefeld.....	133
7.1.2	Modulstruktur	134
7.2	MATLAB®-Simulationen.....	137
7.2.1	Impedanzen für den PEN-Leiter	137
7.2.2	Impedanzen für den Kabelschirm.....	139
7.2.3	Parameteranalyse der Niederspannungsabzweige.....	140
7.2.4	Parameteranalyse der Mittelspannungsschaltstationen.....	141
7.2.5	Impedanz- und Winkelverläufe Niederspannungskettenleiter	143
7.2.5.1	Ländliche Struktur.....	143
7.2.5.2	Dörfliche Struktur	146
7.2.5.3	Städtische Struktur	149
7.2.6	Impedanz- und Winkelverläufe Mittelspannungsschaltstation	152
7.2.6.1	1 Abzweig	152
7.2.6.2	5 Abzweige	154
7.3	XGSLab™-Simulationen.....	157
7.3.1	Erdungswiderstand eines Gebäudes.....	157
7.3.2	Einzelnes Gebäude mit angeschlossenem PEN-Leiter.....	158
7.3.3	Mehrere Gebäude mit PEN-Leiter	160
7.3.4	Abschätzung der Erdungsimpedanz von einfachen Netzstrukturen	161

1 Einführung

In den folgenden Kapiteln werden die aktuelle Ausgangslage und die Motivation der vorliegenden Masterarbeit erläutert. Darauffolgend werden die Fragestellungen und Ziele der Arbeit beschrieben. Abschließend folgt eine zusammenfassende Gliederung dieser Arbeit.

1.1 Ausgangslage und Motivation

Elektrischer Strom ist nicht nur technisch bedeutungsvoll, sondern er stellt auch eines der wichtigsten Wirtschaftsgüter unserer Menschheit dar. Durch den fortschreitenden Klimawandel sind wir gezwungen, die Erzeugung von elektrischer Energie mit Hilfe von konventionellen fossilen Kraftwerken durch umweltfreundlichere erneuerbare Energieerzeugungsanlagen zu ersetzen. Jedes Gebäude, das wirtschaftlich genutzt werden soll, muss aber an das Stromnetz angebunden werden, dies wird sich auch trotz des gegenwärtigen Transformationsprozesses des Energiesystems nicht ändern. Um die Verluste bei der Stromübertragung so gering als möglich zu halten, führte man verschiedene Spannungs- bzw. Netzebenen (siehe Abbildung 1.1) ein, da die Übertragungsverluste mit steigender Spannungsebene sinken.

Einteilung in Netzebenen:

- Ebene 1: Höchstspannungsnetz 380/220 kV, inklusive Umspannung 380/220 kV
- Ebene 2: Umspannung Höchst- und Hochspannungsebene
- Ebene 3: Hochspannungsnetz 110 kV
- Ebene 4: Umspannung Hoch- und Mittelspannung
- Ebene 5: Mittelspannungsnetz > 1 kV, typisch jedoch 10 kV bis 36 kV
- Ebene 6: Umspannung Mittel- und Niederspannung
- Ebene 7: Niederspannungsnetz 400 V

Lässt man die Ebenen, in denen die Umspannung zwischen den verschiedenen Spannungsebenen erfolgt, außer Acht, so verbleiben 4 Netzebenen, wobei jeder Ebene bestimmte Aufgaben bzw. Anwendungsgebiete zugewiesen sind.

Höchstspannungsebene / Übertragungsnetz:

In der DACH-Region sind hier Spannungen von 220 kV und 380 kV üblich. Eine Aufgabe der Höchstspannungsebene ist die Übertragung von Energie zwischen Kraftwerken und Verbraucherzentren, wobei hier die Übertragungsentfernungen sehr groß sind. Als weiterer Aspekt kann die Verbindung von weit entfernten Netzteilen, wie zum Beispiel der Zusammenschluss von Landesnetzen genannt werden. Die Höchstspannungsübertragung kann außerdem als überlagertes Netz integriert werden. Das bedeutet, es besteht bereits ein gut ausgebautes Hochspannungsnetz, diesem ordnet man das Höchstspannungsnetz über und integriert in jenes Netz leistungsfähige Kraftwerke bzw. einen Kraftwerksverbund. Dadurch sollen letztlich die Zuverlässigkeit und die

Wirtschaftlichkeit des Übertragungsnetzes erhöht werden. Es soll auch darauf hingewiesen werden, dass sich bei sehr langen Übertragungsstrecken (Verbindungen über Meer) die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung als nützlich erwiesen hat, da Anlagen zur Spannungsstützung entfallen. [1]

Hochspannungsebene:

Alle Ebenen bis auf das Höchstspannungsnetz werden dem Verteilnetz zugeordnet, welches vom Verteilnetzbetreiber betrieben wird. Diese Ebene versorgt meist Städte. Industriebetriebe mit großer Ausdehnung bzw. mit hohem Leistungsbedarf haben ebenfalls eine direkte Anbindung an die Hochspannungsebene. [2]

Mittelspannungsebene:

Diese Ebene wird zur Versorgung von einzelnen Stadtteilen oder Ortschaften verwendet. In der Nähe von großen Ballungszentren findet man im Mittelspannungsbereich eher Kabelnetze vor, wohingegen man im ländlichen Bereich auf Freileitungs- und Kabelnetze trifft. [3]

Niederspannungsebene:

Auf der Niederspannungsebene werden die Endkunden (Privathaushalte, Gewerbe, öffentliche Einrichtungen, ...) mit Energie versorgt. Die Kabel- bzw. Freileitungslängen zu den Verbrauchern sind auf einige 100 m begrenzt. Grund dafür ist der Spannungsabfall über die Leitungen bzw. Kabel. [1]

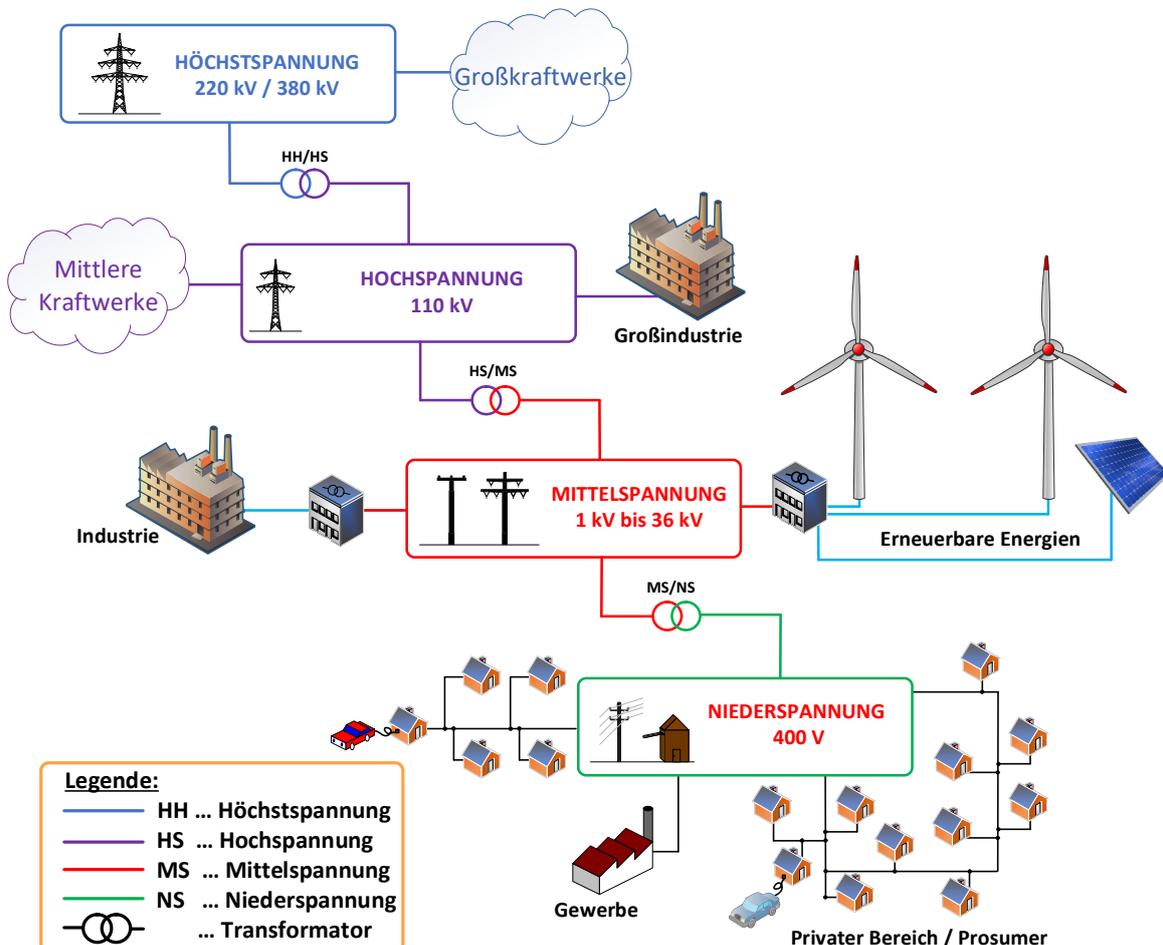


Abbildung 1.1: Netzebenen

Die Behandlung des Transformatorsternpunktes (siehe auch Abschnitt 2.1) hängt von der gewählten Netzform ab. Je nach Netzform gibt es bestimmte Sternpunktbehandlungen, die sich in der Praxis etabliert haben. Der Sinn der Sternpunktbehandlung liegt in der Begrenzung des einpoligen Kurzschlussstromes, bzw. der Verlagerungsspannung, welche auch als Spannung zwischen Sternpunkt und der Erde definiert ist. Tritt ein kleiner Kurzschlussstrom auf, so ist in der Regel mit einer höheren Verlagerungsspannung zu rechnen, und umgekehrt, dass bedeutet in der Praxis ist ein Kompromiss zwischen Kurzschlussstrom und Verlagerungsspannung zu finden [4].

Im Mittel- bzw. Hochspannungsnetz (bis 110 kV) ist die häufigste Sternpunktbehandlung jene des Erdschluss kompensierten Netzes (siehe Abbildung 1.2). Der Transformatorsternpunkt wird mit der Erdungsanlage des Netzsystems über eine Lösch- bzw. Kompensationsspule verbunden. Tritt ein Erdschluss auf, so ist die Spule so ausgelegt, dass an der Fehlerstelle, der auftretende kapazitive Erdschlussstrom (bedingt durch die Erdkapazitäten), je nach Einstellung der Spule, kompensiert wird. Eine vollständige Kompensation ist in der Praxis meist nicht möglich, es verbleibt ein Erdschlussreststrom, auch Wattreststrom genannt, welcher beispielsweise zur Erdschlusssortung genutzt werden kann. Die Versorgungssicherheit von kompensierten Netzen ist besonders hoch, da ein einzelner Erdschluss nicht sofort abgeschaltet werden muss. In der Praxis hat sich bei Mittelspannungsnetzen gezeigt, bleibt der Erdschlussreststrom in der Nähe von ca. 60 A, so erlischt der Lichtbogen, welcher beim Erdschluss entsteht, meist von selbst. [1]

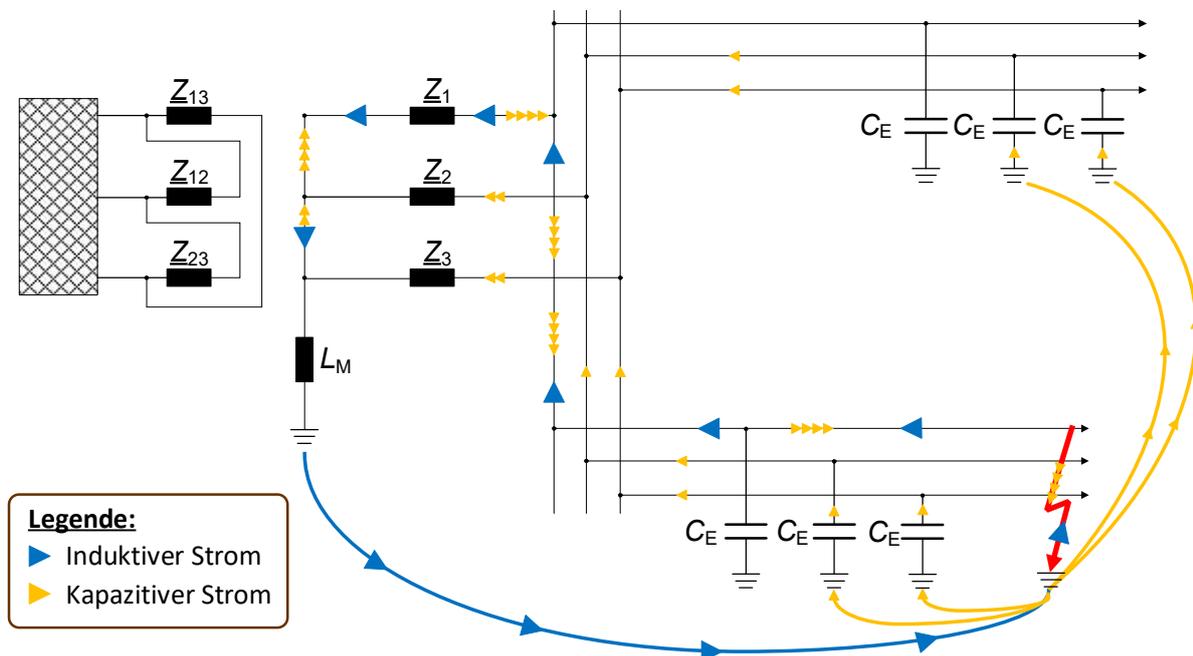


Abbildung 1.2: Funktion eines kompensierten Netzes

Der Betrieb von Mittelspannungsnetzen, welche als kompensierte Netze ausgeführt werden, erfreut sich einer großen Beliebtheit in Europa. Doch auch dem Betrieb von Erdschluss kompensierten Netzen sind Grenzen gesetzt. Grundsätzlich müssen folgende zwei Bedingungen beachtet werden:

- Lichtbogenlöschgrenze: Der verbleibende kapazitive Fehlerstrom (mit Kompensation) soll die Löschgrenzen, die nach ÖVE-B 1/1976 [5], Tab 22-2 festgelegt sind, nicht überschreiten. Für ein 20 kV Netz liegt dieser Wert bei 60 A. Überschreitet man diesen Wert, so kann es sein, dass

der Lichtbogen nicht mehr selbstständig erlischt und es deshalb zu einer frühzeitigen Abschaltung des Netzes kommen muss.

- Zulässige Berührungsspannung: Laut Norm ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6], Bild 4 muss die Berührungsspannung, welche durch den Fehlerstrom über den Transformatorsternpunkt erzeugt wird, begrenzt werden. Für eine Fehlerdauer länger als 10 Sekunden kann eine Berührungsspannung von 80 V toleriert werden.

Bedingt durch den Klimawandel befindet sich unser Energieversorgungssystem gerade in einem bedeutenden Transformationsprozess. Es werden viele erneuerbare Energieerzeuger integriert und Freileitungen durch Kabelsysteme ersetzt. Dies wirkt sich wie folgt auf unser kompensiert betriebenes Mittelspannungsnetz aus:

- Die Integration von regenerativen Erzeugern erfolgt zu einem hohen Prozentsatz durch Kabel. Der Strom, der bei einem Erdschluss fließt, ist kapazitiv und entspricht dem über die Leiter-Erde-Kapazitäten der Leitungen (Kabel und Freileitungen) fließenden Strom. Dieser Strom ist proportional zur gesamten Kapazität des Netzes im Nullsystem und ist daher von der Gesamtlänge der angeschlossenen Leitungen abhängig. Je größer die Ausdehnung eines Netzes wird, desto größer wird auch der Erdschlussstrom und man erreicht daher schneller die vorhin besprochene Lichtbogenlöschgrenze. [4]
- Viele Freileitungen werden durch Kabelsysteme, welche im Erdreich vergraben werden, ersetzt. Dies spiegelt sich auch in den Investitionskosten der Übertragungs- bzw. Verteilnetzbetreiber wider. Im Mittel entfallen ca. 57 % der jährlichen Investitionskosten auf den Umbau von Freileitungs- auf Kabelsysteme [1]. Durch den Umbau verspricht man sich umwelttechnische Vorteile, besseren Schutz vor atmosphärischen Entladungen und eine höhere Zuverlässigkeit bei der Energieübertragung [7]. Jedoch erhöht sich auch hier, wie im Punkt davor bereits beschrieben, der Erdschlussstrom mit der Netzausdehnung.

Wie anhand der obigen Beispiele ersichtlich ist, steigt der kapazitive Erdschlussstrom im Netz an. Um nun nicht an die Löschgrenze des Netzes zu gelangen bzw. die zulässige Schritt- und Berührungsspannung nicht zu überschreiten, haben sich dafür in der Praxis mehrere Lösungsmöglichkeiten etabliert. Eine Variante wäre die Netztrennung, das Netz wird dabei in kleinere Teilnetze aufgespalten. In der Praxis sieht man jedoch davon ab, da es ein sehr komplexer und teurer Prozess ist, außerdem wird die Betriebsführung des Netzes dadurch aufwändiger [1].

Eine weitere Möglichkeit wäre die Installation von dezentralen Kompensationsspulen (siehe Abbildung 1.3). Hierbei werden in kapazitiven Schwerpunkten im Netz (frei nach der Regel: „Kompensiere die Blindleistung dort, wo sie entsteht“), Erdschlusskompensationsspulen, die durch einen Sternpunktbildner mit dem Netz verbunden sind, installiert, welche dann im Fehlerfall einen induktiven Blindstrom liefern, der den kapazitiven Fehlerstrom kompensieren soll. Der Vorteil ist hierbei, dass das Netz nicht aufgetrennt werden muss und mit vergleichbar geringeren Kosten gerechnet werden kann. Jedoch gibt es auch hier Besonderheiten, die es zu beachten gilt. Das Erdungssystem, in welches die Erdschlusskompensationsspule den induktiven Strom leitet, muss dafür ausgelegt sein, und die Personensicherheit sowie die Funktion der Netzschutzeinrichtungen des Energiesystems muss

weiterhin sichergestellt sein. Beachtet werden müssen neben der Erdungsspannung U_E (Earth potential rise EPR) auch die Berührungsspannung U_T , sowie die Potentialverschleppung zu anderen Erdungssystemen [8]. Wie Abbildung 1.4 zeigt, sind die Erdungssysteme des Niederspannungsnetzes üblicherweise über den PEN-Leiter mit dem Erdungssystem der Mittelspannungsstation verbunden. Es sei auch noch zu erwähnen, dass Fehlerströme über den Kabelschirm zu anderen Erdungssystemen übertragen werden können. Um eine Aussage über alle diese Kriterien zu geben, wird die effektive Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation benötigt. Um die Bestimmung bzw. Verifikation dieser geht es in der vorliegenden Masterarbeit.

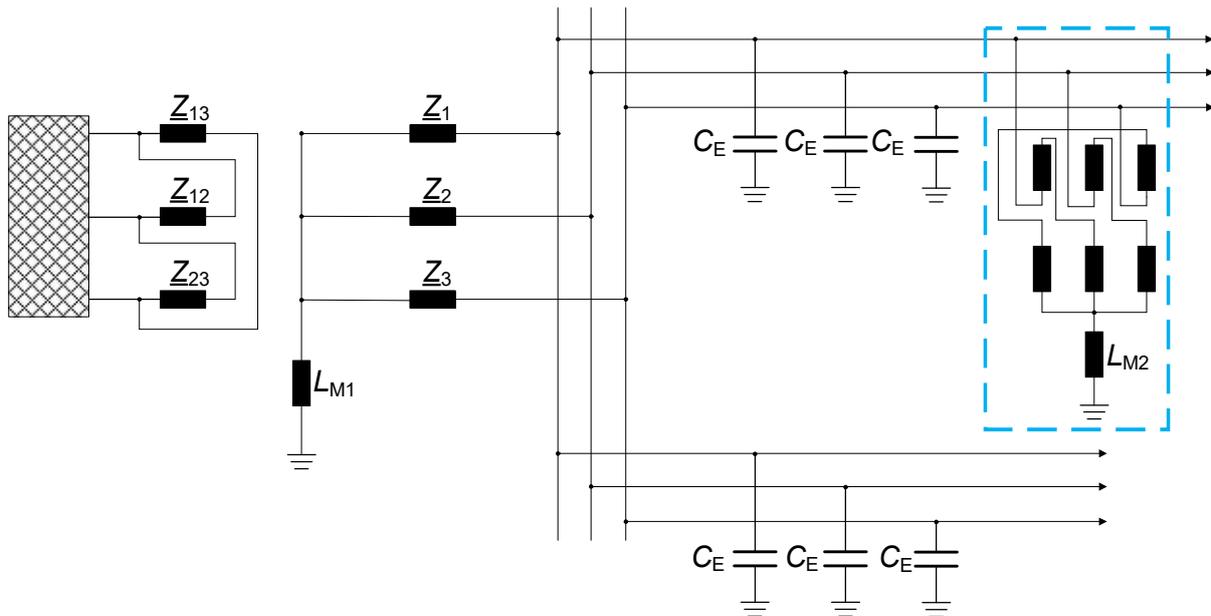


Abbildung 1.3: Kompensiertes Netz mit zusätzlicher dezentraler Kompensationsspule (in blau)

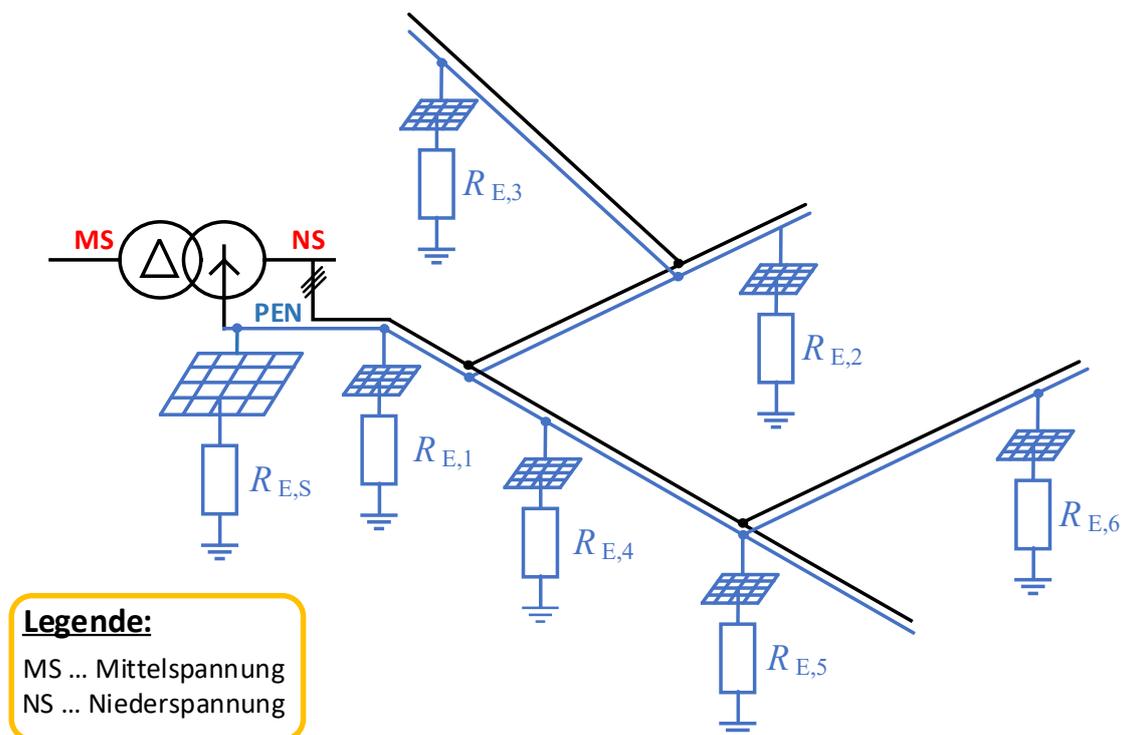


Abbildung 1.4: Verbindung der Erdungssysteme eines Mittel- und Niederspannungsnetzes

1.2 Fragestellungen und Ziele

In der vorliegenden Masterarbeit sollen folgende Fragestellungen und Ziele beantwortet bzw. verfolgt werden:

- Bestimmung und Verifikation der wirksamen Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation bei einem Erdschluss im Mittelspannungsnetz:
 - Berücksichtigung des Niederspannungserdungssystems
 - Berücksichtigung von mehreren Ortsnetzstationen
 - Verbindung zwischen den Ortsnetzstationen mit Mittelspannungskabel inklusive Schirm
 - Bestimmung der verschleppten Spannung am Erdungssystem
 - Messung der Erdungsimpedanz von Mittelspannungsschaltstationen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation im Erdschlussfall zu bestimmen. Bei der Bestimmung der Erdungsimpedanz müssen berücksichtigt werden: das Erdungssystem des angeschlossenen Niederspannungsnetzes, die Impedanz des Kabelschirmes zwischen den Mittelspannungsstationen sowie die Impedanz der PEN-Leiter im Niederspannungsbereich. Aufgabe ist es zudem, sowohl für die Mittelspannungsschaltstation als auch für die angeschlossenen Niederspannungsabzweige, Bereiche für die Impedanz (in Betrag und Winkel) anzugeben, um in der Praxis eine grobe Aussage darüber treffen zu können, ob die Impedanzmessung plausible Messwerte liefert bzw. sollte mithilfe dieser Werte eine erste grobe Abschätzung der Erdungsimpedanz möglich sein. Es ist anzumerken, dass bei der Bestimmung der möglichen Bereiche für die Impedanz darauf zu achten ist, dass so wenig Parameter wie möglich verwendet werden bzw. nur jene Parameter, Einfluss nehmen, welche auch in der Praxis messtechnisch festgestellt werden können. Zusätzlich müssen die Erdungsspannung an der Mittelspannungsschaltstation sowie das verschleppte Potential an den Erdungssystemen der Gebäude im Niederspannungsnetz bestimmt werden. Im Rahmen der Masterarbeit soll eine Messung der Erdungsimpedanz an einer Mittelspannungsschaltstation durchgeführt werden, um anschließend die Simulationsergebnisse mithilfe der Messwerte zu verifizieren.

1.3 Methodik

Zur Lösung bzw. Bearbeitung der Aufgabenstellung sind folgende Schritte auszuführen:

- Literaturrecherche:
 - Auslegung von Erdungssystemen
 - Modellierung von Erdungssystemen
 - Grundlagen der Erdungsmessung (Erdungsimpedanz, Messmethoden, ...)
- Modellierung von Erdungssystemen in:
 - Microsoft Excel®
 - MATLAB®
 - XGSLab™

- Durchführung der Erdungsmessung an einer Mittelspannungsschaltstation:
 - Messaufbau
 - Evaluierung der Messergebnisse
 - Vergleich der Messergebnisse mit der Simulation

Nach erfolgter Literaturrecherche ist die Bestimmung der Erdungsimpedanz mithilfe verschiedener Simulationsmodelle durchzuführen. Es sollen durch die Verwendung der oben angeführten Programmpakete verschiedene Simulationsmodelle erstellt werden. Die Ergebnisse der Modelle sollen verglichen und evaluiert werden. Die Simulationen sind, wenn möglich, durch eine reale Messung einer Mittelspannungsschaltstation zu verifizieren. Der Messaufbau ist in der vorliegenden Arbeit zu beschreiben, und die Funktion der verwendeten Messgeräte soll genauer erläutert werden. Die aufgenommenen Messwerte müssen ausgewertet und mit einer Simulation evaluiert werden. Etwaige Abweichungen sollen in den entsprechenden Kapiteln begründet und diskutiert werden.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in folgende Kapitel:

- **Kapitel 2: Theorie und Berechnungsgrundlagen**

In dem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen, welche zur Lösung der Problemstellungen benötigt wurden, genauer erläutert. Außerdem wird auf wichtige Berechnungsgrundlagen eingegangen. Wichtige Kapitelinhalte sind: Sternpunktbehandlung, relevante Begriffe und Normen für Erdungssysteme, Grundlagen zur Erdungsmessung (Messaufbau, Messmethoden, ...), Berechnung der Leiter-Erde-Schleifenimpedanz und Schirmimpedanz, Aufbau von Mittel- und Niederspannungskabeln, Formeln für einfache Erderanordnungen, sowie die Grundlagen des Softwarepaketes XGSLab™.

- **Kapitel 3: Modellbildung und Simulation**

In diesem Kapitel werden die Simulationsmodelle vorgestellt. Ein Modell basiert auf einer Kettenleiterstruktur, welche sich aus diskreten Bauelementen zusammensetzt. Es wird außerdem auf die Herleitung und Besonderheiten dieses Modells eingegangen. Auch die Bestimmung der einzelnen Impedanzen wird erläutert. Eine Realisierung des Kettenleitermodells erfolgte in Microsoft Excel® und MATLAB®. Es wurden verschiedenste Parameteranalysen und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Zusätzlich wurden die Erdungssysteme von einfachen Netzstrukturen mithilfe der Software XGSLab™ modelliert und simuliert. In diesem Kapitel werden auch Simulationsmodelle miteinander verglichen. Für die Simulationen liegen Schätzungen von Verteilnetzbetreibern für folgende Parameter vor:

- Anzahl der Gebäude an einem Niederspannungsabzweig
- Anzahl der Abzweige pro Mittelspannungsschaltstation
- Anzahl der Mittelspannungsschaltstationen für den Zuständigkeitsbereich
- Durchschnittliche Entfernung der Gebäude zueinander
- Durchschnittliche Entfernung der Mittelspannungsschaltstationen

- Durchschnittlicher Querschnitt der PEN-Leiter
- Durchschnittlicher Schirmquerschnitt der Mittelspannungskabel
- Erfahrungswerte für den Erdungswiderstand von Gebäuden

Auf die Wahl der Simulationsparameter wird in diesem Kapitel genauer eingegangen.

- **Kapitel 4: Messung an einer Mittelspannungsstation**

In diesem Kapitel wird die Messung, welche an einer realen Mittelspannungsschaltstation durchgeführt wurde, näher erläutert. Der Messaufbau sowie die verwendeten Messgeräte werden beschrieben. Die Messdaten werden ausgewertet und notwendige Diagramme erstellt. Die Ergebnisse der Simulationen und Messungen werden dargestellt und miteinander verglichen.

- **Kapitel 5: Zusammenfassung und Ausblick**

Das Kapitel beschäftigt sich mit der Interpretation und Evaluierung der Simulationsergebnisse. Die Ergebnisse aus Kapitel 3 und 4 sollen hier diskutiert werden und Antworten auf die Fragestellungen und Ziele der vorliegenden Masterarbeit liefern. Es sollen außerdem Verbesserungsvorschläge für weitere Erdungsimpedanzmessungen von Mittelspannungsstationen erläutert und diskutiert werden. Zusätzlich werden Anregungen für weitere Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet besprochen.

2 Theorie und Berechnungsgrundlagen

In den folgenden Abschnitten werden die notwendige Theorie und Berechnungsgrundlagen erläutert, welche für die vorliegende Arbeit verwendet werden. Zu Beginn wird auf die verschiedenen Sternpunktbehandlungen von Netzsystemen eingegangen. Anschließend werden für Erdungssysteme wichtige Begriffe und Normen erklärt. Des Weiteren wird auf die Berechnung von Schirmimpedanzen und Impedanzen mit Erdrückleitung eingegangen. Zusätzlich wird der Aufbau von Mittel- und Niederspannungskabeln veranschaulicht. Außerdem wird auf die ohmsche Beeinflussung von nahegelegenen Erdungssystemen näher eingegangen. Danach werden noch grundlegende Aspekte der Erdungsmessung erläutert, welche für die Erstellung dieser Arbeit nötig sind. Zum Abschluss des Kapitels wird das Softwarepaket XGSLab™ näher beschrieben, und Formeln für vereinfachte Erderanordnungen angegeben.

2.1 Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen

Wie bereits in Abschnitt 1.1 kurz beschrieben, legt die Art der Sternpunktbehandlung des Transformators fest, wie die Nullimpedanz des Netzes beeinflusst wird. Sie hat daher Einfluss auf die Höhe des Kurzschlussstromes und die Verlagerungsspannung. Außerdem hängt die Verfügbarkeit des Netzes bei einem Fehler von der jeweiligen Behandlung des Transformatorsternpunktes ab. Anzumerken ist auch, dass im Fehlerfall die zulässige Schritt- und Berührungsspannung nicht überschritten werden darf, dazu kann ein möglichst niederohmiges Erdungssystem beitragen [4]. In den folgenden Abschnitten wird unter der Annahme eines Erdschlusses (häufigster Fehler im Netz) auf die verschiedenen Netztypen genauer eingegangen.

2.1.1 Isolierter Sternpunkt

Beim isolierten Netz wird der Transformatorsternpunkt nicht geerdet (siehe Abbildung 2.1). Betreibt man das Netz mit symmetrischen Verbrauchern, so tritt im Idealfall keine Verlagerungsspannung \underline{U}_{NE} auf. Diese Art der Sternpunktbehandlung findet man oft bei Mittelspannungsnetzen mit geringer Ausdehnung. Im einpoligen Fehlerfall fließt ein kapazitiver Fehlerstrom, dieser ist den im Netz befindlichen Leiter-Erde-Kapazitäten C_E und der Nennspannung U_N proportional (siehe Formel (2.1)). Damit nimmt dieser mit der Ausdehnung des Netzes zu. Das ist auch der Hauptgrund, warum der isolierte Sternpunkt nur für Netze mit geringer Größe verwendet wird. Der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} wird ansonsten zu groß und überschreitet die Löschgrenze (siehe Abbildung 2.2). Befindet sich der Erdfehlerstrom unter der Löschgrenze, so erlischt der beim Erdschluss entstehende Lichtbogen beim nächsten Stromnulldurchgang. Überschreitet er die Grenze, so kann es passieren, dass der Lichtbogen nach dem Stromnulldurchgang wieder zündet. [4]

$$I_{CE} = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_N \quad (2.1)$$

Im Fehlerfall ist die Verlagerungsspannung \underline{U}_{NE} gleich der Leiter-Erde-Spannung des Netzes, damit werden die gesunden Phasen gegen das Erdpotential um den Faktor $\sqrt{3}$ angehoben. Somit wird die

Isolation der Betriebsmittel stärker beansprucht. Aufgrund des niedrigen Erdschlussstromes kann das Netz beim einfachen Erdschluss über mehrere Stunden weiterbetrieben werden und bietet so eine höhere Versorgungszuverlässigkeit. Jedoch steigt durch die Spannungsüberhöhung in den gesunden Phasen die Gefahr eines Doppelerdschlusses, was somit zu einer sofortigen Abschaltung des fehlerhaften Netzes führen würde. Der Vorteil beim isolierten Netz ist, dass man einen Fehler schnell durch die Messung der Verlagerungsspannung erkennt, die Ortung der Fehlerstelle ist hingegen schwieriger, da die Amplitude des Erdschlussstroms in der Regel im Verhältnis zum Betriebsstrom klein ist. [9]

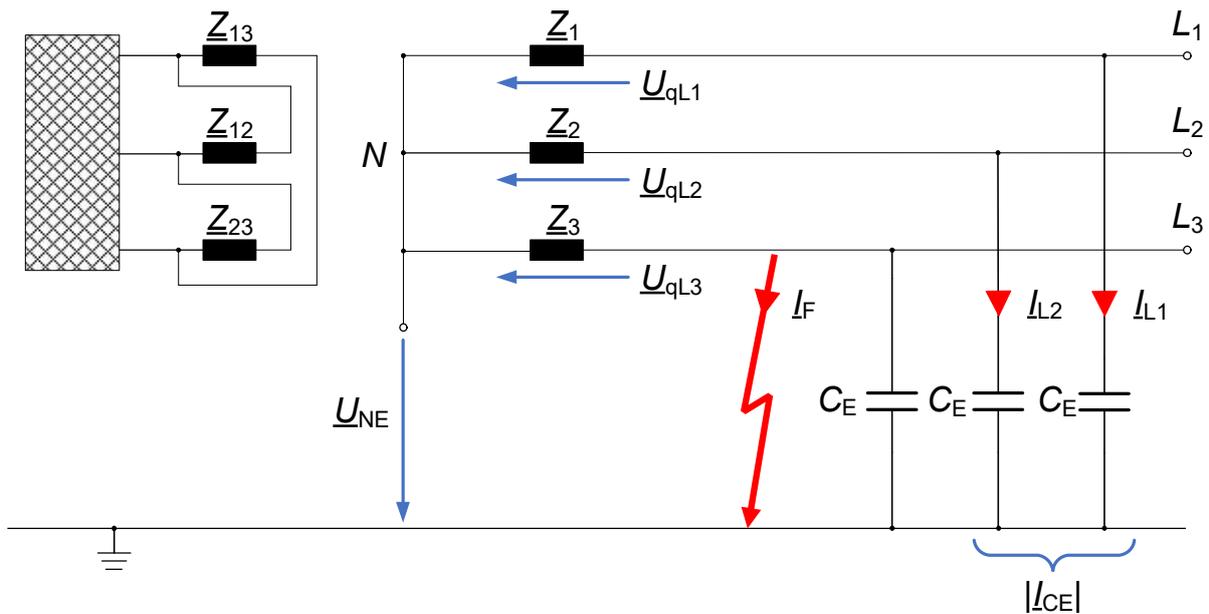


Abbildung 2.1: Isoliertes Netz

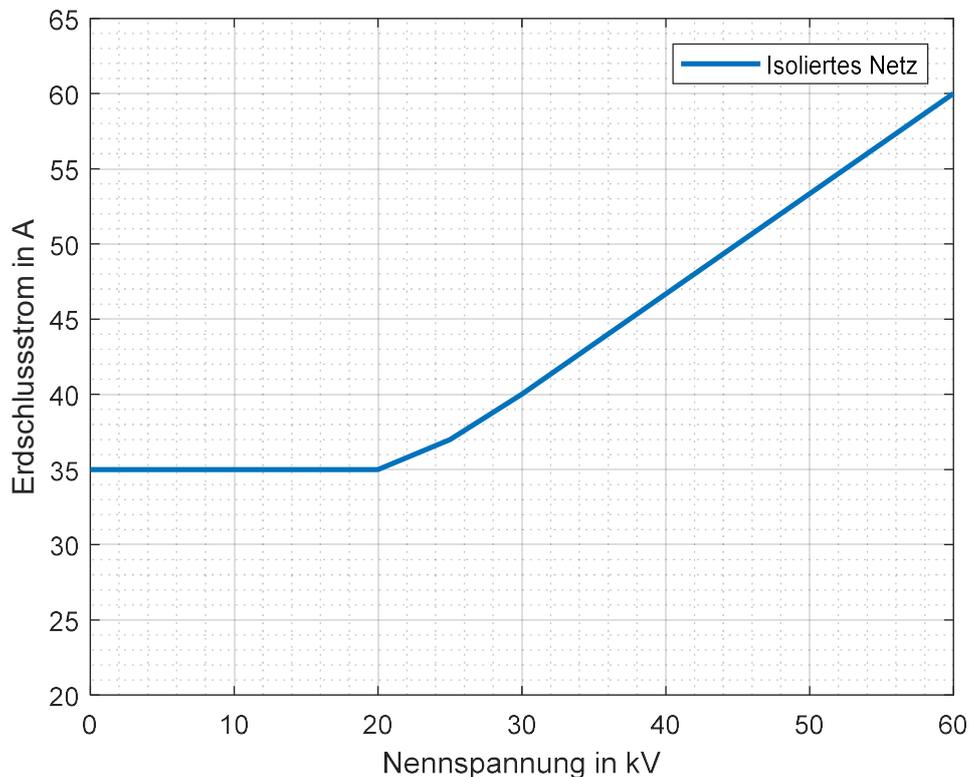


Abbildung 2.2: Richtwerte für Erdschlussströme im isolierten Netz, bei welchen der Lichtbogen erfahrungsgemäß noch selbstständig erlischt (Daten aus [5])

Anwendung: [4]

- Versorgung für Kraftwerkseigenbedarf
- IT-Netz in der Niederspannung (Krankenhaus, ...)
- Mittelspannungsnetz mit geringer Ausdehnung

Vorteile: [9]

- Einfacher Aufbau
- Geringe Erdfehlerströme
- Kann bei einem einpoligen Erdfehler weiterbetrieben werden

Nachteile: [9]

- Gefahr von Doppelerdschlüssen
- Lokalisierung von Fehlern schwierig
- Gefahr von intermittierenden Erdschlüssen
- Betriebsmittelisolation muss gegen Erde für die verkettete Betriebsspannung ausgelegt werden

2.1.2 Starrer / Niederohmiger Sternpunkt

Ist der Sternpunkt direkt mit der Erde verbunden, so liegt ein starr geerdeter Sternpunkt vor. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, eine Drossel (bessere Dämpfung von transienten Spannungen) oder einen Widerstand zur Strombegrenzung zwischen Sternpunkt und Erde zu schalten, dann spricht man von einer strombegrenzenden Sternpunkterdung (siehe Abbildung 2.3). Durch den starr geerdeten Sternpunkt treten nahezu keine Überspannungen beim Erdschluss auf. Im Vergleich zu kompensierten oder isolierten Netzen erreicht der Fehlerstrom jedoch wertmäßig den Bereich des dreipoligen Kurzschlussstromes. Bedingt durch die hohen Kurzschlussströme müssen etwaige Fehler im Netz so schnell wie möglich abgeschaltet werden, um Schäden an Betriebsmitteln zu vermeiden. Des Weiteren darf keine zu hohe Schritt- und Berührungsspannung auftreten, da diese zu Personengefährdungen führen kann (siehe auch Norm ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6], Bild 4). [9]

In Höchstspannungsnetzen setzt man nur starre bzw. niederohmige Sternpunkterdungen ein. Der Grund liegt im Sternpunkt selbst. Eine starre Verbindung ist kostengünstig und technisch einfach zu realisieren. Ein gelöschter Betrieb würde aufgrund der verbleibenden hohen Ströme nach der Kompensation und den hohen Spannungsanhebungen in den gesunden Leitern keinen wirtschaftlichen sowie technischen Sinn ergeben. Der Isolationsaufwand wäre bei solchen hohen Spannungen enorm und wird daher vermieden. Die meisten Mittelspannungsnetze in Europa sind kompensiert betrieben, jedoch wäre es auch möglich, diese auf eine starre bzw. niederohmige Sternpunkterdung umzustellen. Aufgrund der Wirtschaftlichkeit werden Niederspannungsnetze meist niederohmig bzw. starr geerdet. [9], [10]

Die sofortige Abschaltung von Fehlern hat eine negative Auswirkung auf die Versorgungssicherheit des Netzes. Da es in Höchstspannungsnetzen (vorwiegend Freileitungsnetze) häufig zu einpoligen Erdschlüssen kommt, führte man die Automatische-Wieder-Einschaltung (AWE) ein. Dabei wird die

Leitung für eine kurze Zeit (0,1 s bis 1 s) spannungslos geschaltet und erreicht somit, dass der Lichtbogen, welcher durch den Erdschluss entsteht, erlischt. Zündet der Lichtbogen erneut, so wird die komplette Leitung dreipolig abgeschaltet. Durch die AWE erreicht man eine wesentlich höhere Versorgungszuverlässigkeit des Netzes. [4]

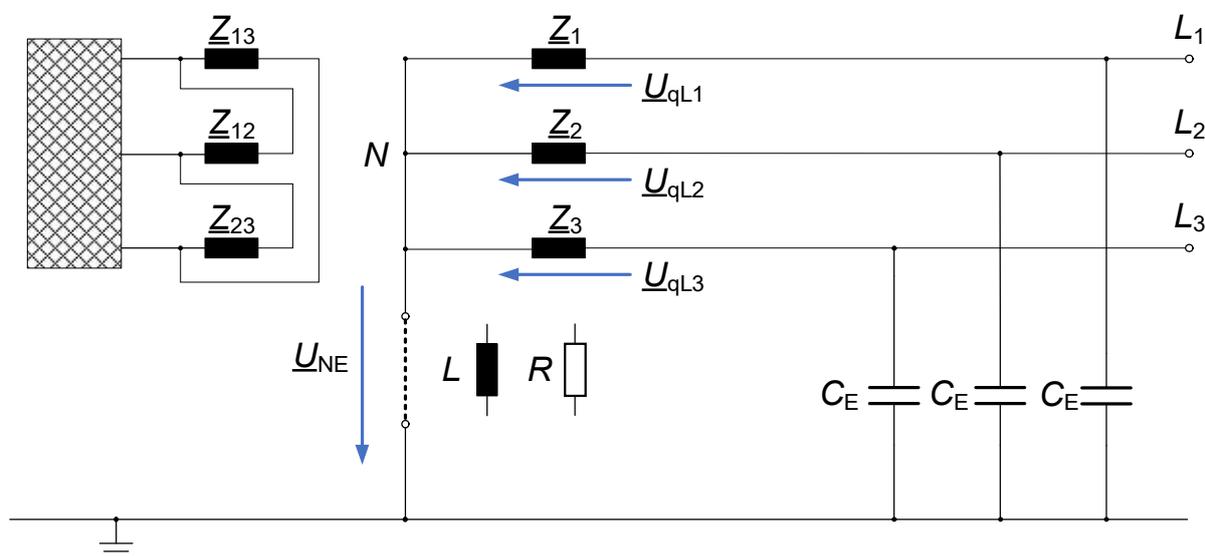


Abbildung 2.3: Starre / Niederohmige Sternpunktterdung

Anwendung: [4]

- Niederspannungsnetz
- Höchstspannungsnetz
- Hoch- und Mittelspannungsnetz

Vorteile: [9]

- Einfacher technischer Aufbau
- Keine Begrenzung der Netzausdehnung
- Automatische-Wieder-Einschaltung
- Einfache Erdschlusserfassung

Nachteile: [9]

- Abschaltung von Leitungen bedingt durch AWE
- Sehr große Erdkurzschlussströme
- Erheblicher Aufwand für Erdungssysteme

2.1.3 Resonanzgeerdeter Sternpunkt

Bei dieser Art von Sternpunktbehandlung wird der Transformatorsternpunkt über eine Erdschlusslöschspule L_M mit der Erde verbunden (siehe Abbildung 2.4). Wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben, ist es auch möglich mehrere dezentrale Kompensationsspulen in das Netz einzubinden. Die Aufgabe der Kompensationsspule ist es, den im Erdschlussfall auftretenden kapazitiven

Erdschlussstrom I_{CE} zu kompensieren. Die Kompensationsspule stellt dafür einen induktiven Strom zur Verfügung. In den meisten Fällen kann der Spulenstrom über einen Stufenschalter oder einen Tauchanker angepasst werden. Nach der Kompensation verbleibt ein Erdschlussreststrom I_{Rest} , dieser besteht aus einem Wirkanteil, welcher auch Wattreststrom genannt wird, und kann zur Erdschlusssortung verwendet werden [9]. Ebenfalls im Erdschlussreststrom enthalten, ist ein Oberschwingungsanteil.

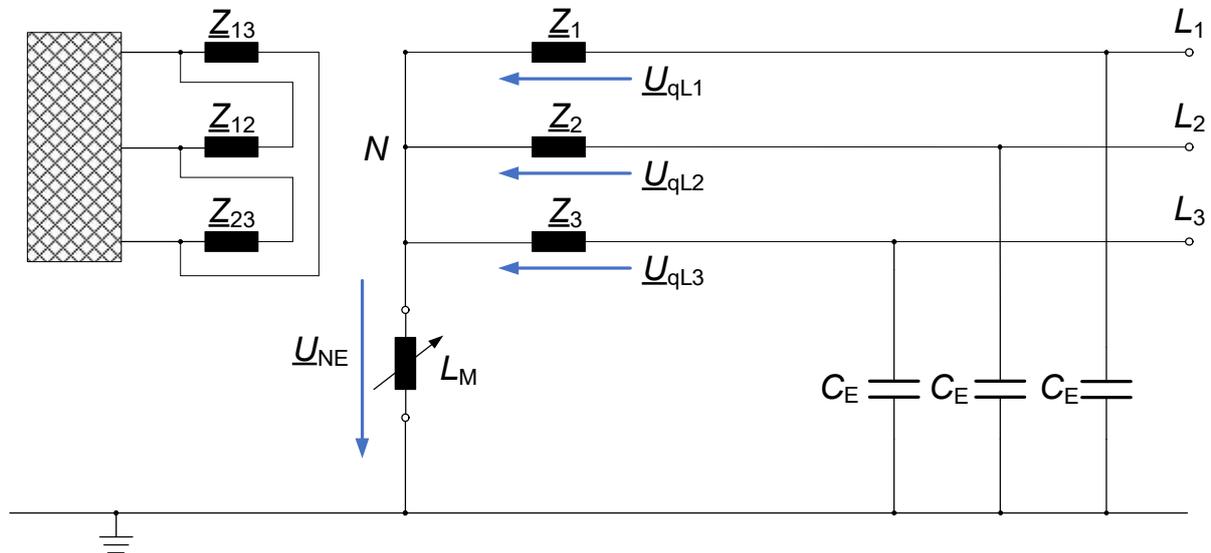


Abbildung 2.4: Kompensiertes Netz

Durch die Kompensationsspule kann die Netzausdehnung im Vergleich zum isolierten Sternpunkt wesentlich vergrößert werden. Die maximale Netzausdehnung ist laut [1] größtenteils abhängig vom verbleibenden Wattreststrom sowie vom Anteil des Oberschwingungsstromes, welcher nicht durch die Erdschlusskompensationsspule kompensiert werden kann. Des Weiteren müssen noch die Grenzen der Schritt- sowie Berührungsspannung eingehalten werden. Auch beim kompensierten Netz gibt es eine Löschgrenze (siehe Abbildung 2.5). Liegt man unter dieser, so erlischt in der Regel der entstehende Lichtbogen beim Erdschluss von selbst. Überschreitet man diese jedoch, so erlischt der Lichtbogen nicht mehr und die Gefahr eines Doppelerdschlusses steigt. Das Netz kann nur dann weiter betrieben werden, wenn geeignete Maßnahmen vorliegen (niederohmiges Erdungssystem, entsprechende Schutztechnik,...), welche die Fehlerspannung auf einen zulässigen Wert begrenzen, bzw. der Fehlerstrom muss in einer vorgegebenen Zeit abgeschaltet werden. [9]

Analog zum isolierten Sternpunkt steigt auch hier die Spannung der fehlerfreien Phasen um den Faktor $\sqrt{3}$ an. Es ist somit auf die Isolationsfähigkeit der einzelnen Leiter zu achten, da die Gefahr eines Doppelerdschlusses durch die hohe Spannungsbelastung zunimmt. [4]

Hoch- und Mittelspannungsanlagen werden in Europa meist als kompensierte Netze ausgeführt. Der Grund dafür liegt in der hohen Versorgungssicherheit. Das Netz soll so kompensiert werden, dass sich der Erdschlussreststrom unterhalb der Löschgrenze befindet, damit erreicht man, dass der beim Erdschluss entstehende Lichtbogen von selbst erlischt. Das Netz kann dann über mehrere Stunden hinweg weiter betrieben werden, wodurch Versorgungsunterbrechungen vermieden werden [4]. Es bestünde auch die Möglichkeit, bei Netzen mit einem hohen Kabelanteil eine starre Sternpunktterdung

zu wählen. Bei Kabeln gehen meist einfache Erdschlüsse in Mehrfacherdschlüsse über, welche man durch eine schnelle Abschaltung der Fehlerströme verhindern kann. Es muss die Schritt- bzw. Berührungsspannung dabei eingehalten werden. [9]

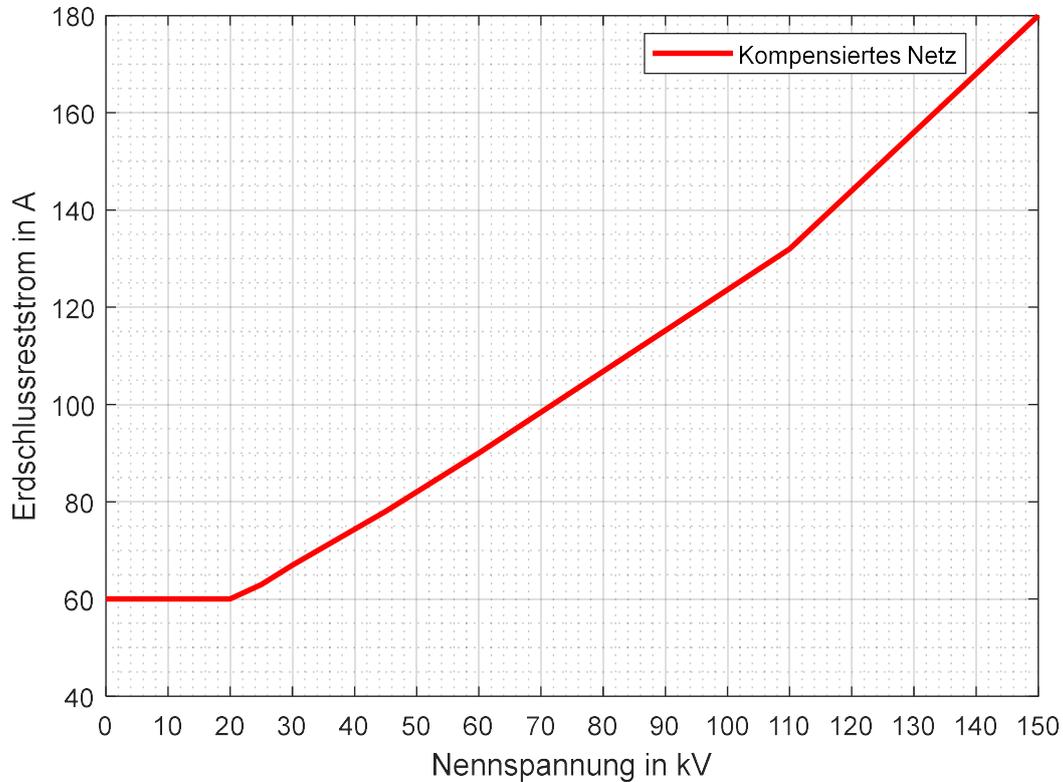


Abbildung 2.5: Richtwerte für den Erdschlussreststrom im kompensierten Netz, bei welchen der Lichtbogen erfahrungsgemäß noch selbstständig erlischt (Daten aus [5])

Anwendung: [4]

- Hochspannungsnetz
- Mittelspannungsnetz

Vorteile: [9]

- Hohe Versorgungssicherheit
- Kleine Erdschlussrestströme
- Geringe Anforderungen an das Erdungssystem
- Wiederkehrende Spannung steigt langsamer als beim isolierten Netz an → höhere Löschgrenze

Nachteile: [9]

- Gefahr von Doppelerdschlüssen
- Erdschlussortung schwierig
- Betriebsmittelisolation muss gegen Erde für die verkettete Betriebsspannung ausgelegt werden
- Begrenzte Netzausdehnung durch Erdschlussreststrom
- Einbau von Kompensationsspule nötig → erhöhte Kosten

2.1.3.1 Vorübergehende niederohmige Sternpunktterdung (KNOSPE)

In kompensierten Netzen gestaltet sich die Erdschlussortung aufgrund des kleinen Erdschlussreststromes schwierig. Daher verwendet man eine kurzzeitig niederohmige Sternpunktterdung (KNOSPE). Der Sternpunkt wird zusätzlich zur Kompensationsspule kurzzeitig mit einem Widerstand geerdet (siehe Abbildung 2.6). Durch die kurzzeitige niederohmige Sternpunktterdung erhöht man den Erdschlussreststrom, welcher so einfacher geortet werden kann. [11]

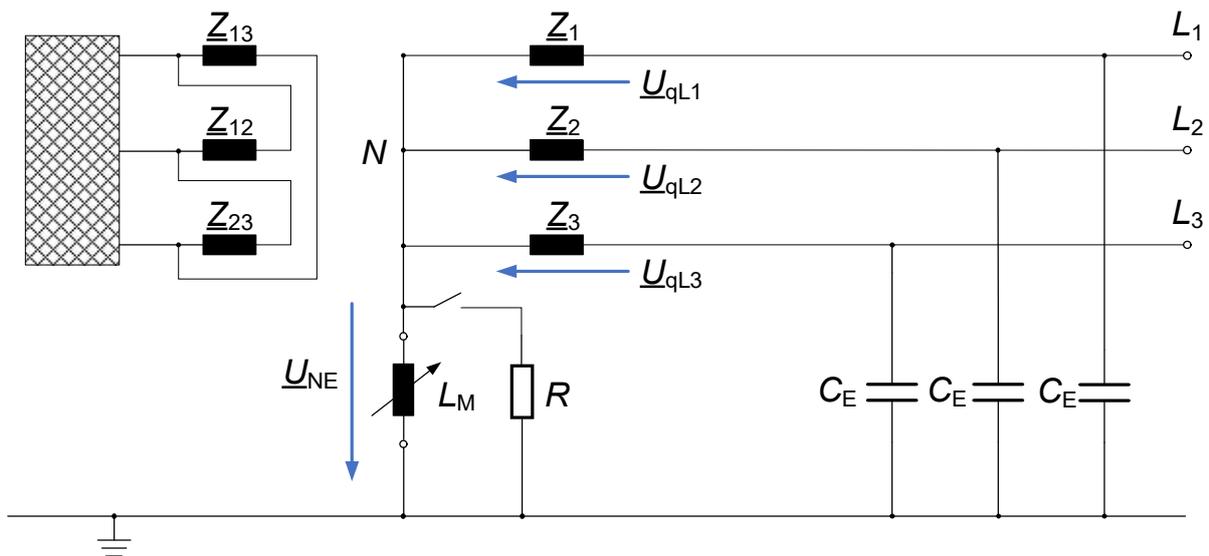


Abbildung 2.6: Kompensiertes Netz mit vorübergehender niederohmiger Sternpunktterdung

2.1.3.2 Vorübergehende niederohmige Phasenerdung (KNOPE)

Auch dieses Verfahren findet in der Praxis zur Erdschlussortung eine breite Anwendung. Hier wird durch die kurzzeitige Erdung einer gesunden Phase ein hoher Ortungsstrom erzeugt.

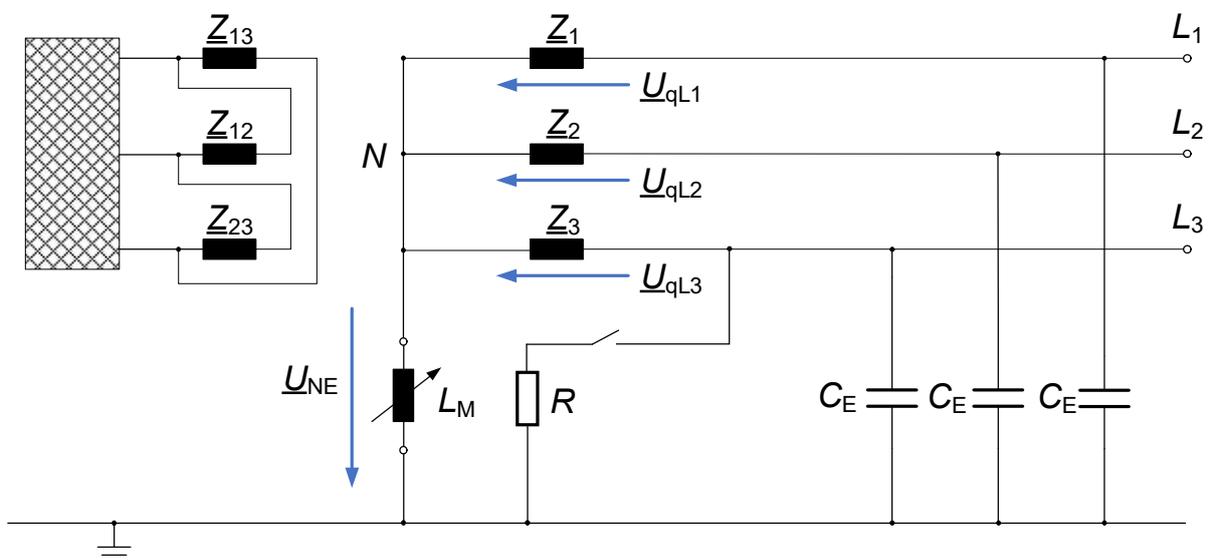


Abbildung 2.7: Kompensiertes Netz mit vorübergehender niederohmiger Phasenerdung

Man erzeugt gewollt einen Doppelerdschluss. Die treibende Spannung (verkettete Spannung) ist bei dieser Variante höher als bei der vorübergehenden niederohmigen Sternpunktterdung, daher erhöht sich auch der Ortungsstrom, wobei man eine geringere Abhängigkeit des Fehlerstromes von den Leitungsimpedanzen bzw. vom Nullsystem erreicht. [12]

2.1.3.3 Wichtige Parameter für kompensierte Netze

Verstimmung:

Das Verhältnis zwischen dem kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE} und dem induktiven Löschspulenstrom I_L nennt man die Verstimmung v . Mit ihrer Hilfe kann man eine Aussage darüber treffen, ob das Netz über- oder unterkompensiert ist. Aus Formel (2.2) kann man erkennen, ist der induktive Löschspulenstrom I_L größer als der Erdschlussstrom I_{CE} , herrscht eine negative Verstimmung. Das Netz ist somit überkompensiert. Ist hingegen der Erdschlussstrom größer als der induktive Löschspulenstrom, so ist die Verstimmung positiv und das Netz ist unterkompensiert (siehe Abbildung 2.8). [4]

$$v = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}} = \frac{\omega \cdot \sum C_E - \frac{1}{\omega \cdot L_M}}{\omega \cdot \sum C_E} = 1 - \frac{1}{\omega^2 \cdot L_M \cdot \sum C_E} \quad (2.2)$$

Dämpfung:

Sie spiegelt den ohmschen Anteil des Erdschlussreststromes wider. Sie berechnet sich mithilfe der Querableitwiderstände R_Q und dem ohmschen Widerstand der Kompensationsspule R_D wie folgt [10]:

$$d = \frac{1}{\omega \cdot \sum C_E} \cdot \left(\frac{1}{R_D} + \sum \frac{1}{R_Q} \right) \quad (2.3)$$

Erdschlussstrom:

Strom, welcher gegen Erde abfließt, wenn keine Kompensationsdrossel installiert ist. [4]

$$I_{CE} = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C_E \cdot U_N \quad (2.4)$$

Erdschlussreststrom:

Strom, welcher nach der Kompensation gegen Erde abfließt. Er setzt sich aus einem Wattreststromanteil und einem Verstimmungsstrom zusammen. In kompensierten Freileitungsnetzen beträgt der Erdschlussreststrom ca. $\frac{1}{10}$ des kapazitiven Erdschlussstromes. In Kabelnetzen erreicht man Werte zwischen 3 % und 5 % des Erdschlussstromes. [9]

$$I_{Rest} = 3 \cdot \omega \cdot C_E \cdot (d + i \cdot v) \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} = I_{CE} \cdot \sqrt{v^2 + d^2} \quad (2.5)$$

Oberschwingungsgehalt:

Die Formel für den Erdschlussreststrom kann unter Berücksichtigung der Oberschwingungen noch erweitert werden.

$$I_{Rest} = I_{CE} \cdot \sqrt{v^2 + d^2 + THD^2} \quad (2.6)$$

Der Oberschwingungsgehalt wird hier mit THD bezeichnet und ist wie folgt definiert:

$$THD = \frac{\text{Effektivwert der Oberschwingungen}}{\text{Effektivwert der Grundschwingung}} \quad (2.7)$$

Anzumerken ist hierbei, dass sich die Kompensationsspule nur auf die Grundwelle auswirkt. Die 5. (250 Hz) und 7. (350 Hz) Oberschwingung ist im Erdschlussreststrom meist sehr dominant vorhanden. Diese tragen daher auch stark zum Erdschlussreststrom bei und dürfen daher nicht vernachlässigt werden. [4]

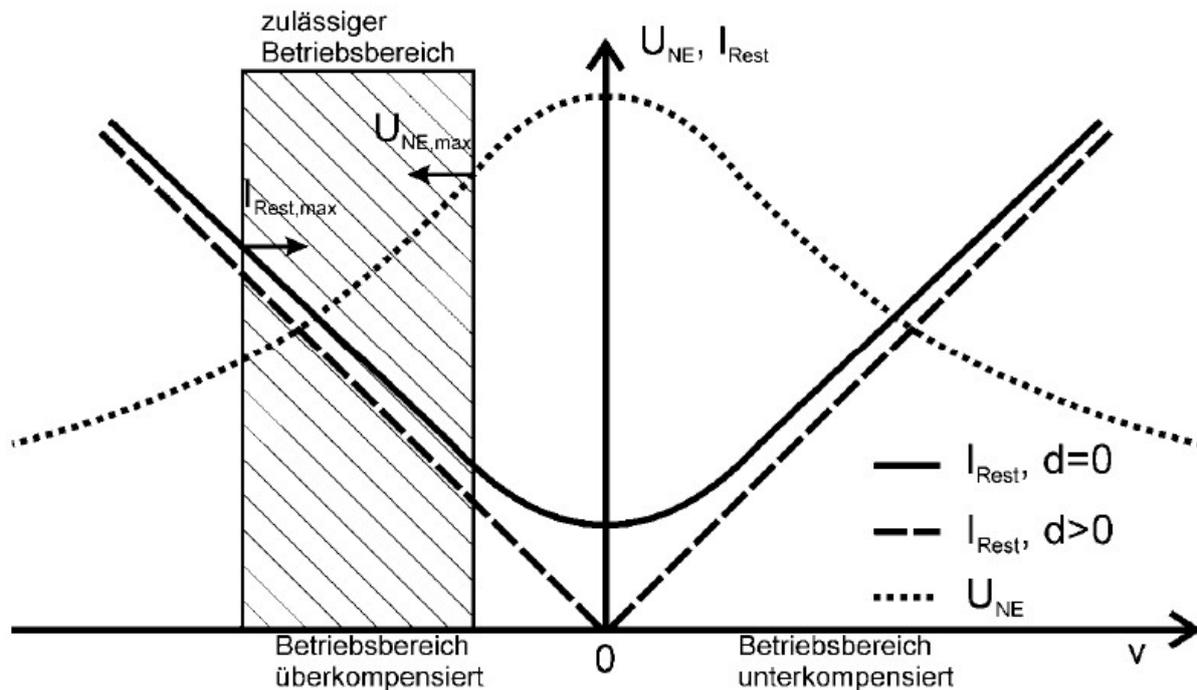


Abbildung 2.8: Betriebsbereich von Kompensationsspulen [9]

2.1.3.4 Erdschlusskompensationsspule

Bedingt durch den Netzausbau besteht die Notwendigkeit, die Induktivität der Spule zu verändern. Eine Spule mit einem festen Induktivitätswert ist daher in den wenigsten Fällen sinnvoll. Meistens werden Kompensationsspulen als Tauchkernspulen ausgeführt (siehe Abbildung 2.9). Die Induktivität wird bei dieser Anordnung durch die Veränderung des Luftspaltes eingestellt. Eine weitere Art der Kompensationsspule stellt die Stufenspule dar, hier wird die Induktivität durch das Zu- und Abschalten von Windungsteilen eingestellt. Der große Vorteil der Tauchkernspule ist, dass die Induktivität unter Spannung, stufenlos über einen Motor, der mit einer Gewindestange verbunden ist, eingestellt werden kann, die Stufenspule hingegen muss bei jeder Veränderung der Schaltstufe spannungslos geschaltet werden. [10]

Die Spulen besitzen meist eine Hauptwicklung, mit welcher die Induktivität eingestellt werden kann, und eine Hilfswicklung. Die Hilfswicklung wird für die niederohmige Sternpunktterdung verwendet. Hier wird der Zusatzwiderstand kurzzeitig mit der Hilfswicklung verbunden. [10]

Die typischen Leistungsbereiche von Kompensationsspulen aus [4] sind in Tabelle 1 angegeben:

Tabelle 1: Einsatzbereich von Kompensationsspulen

Spannung	$U_N \dots \frac{145}{\sqrt{3}} \text{ kV}$
Strom	100 kvar ... 30 Mvar
Leistung	200 A ... 800 A

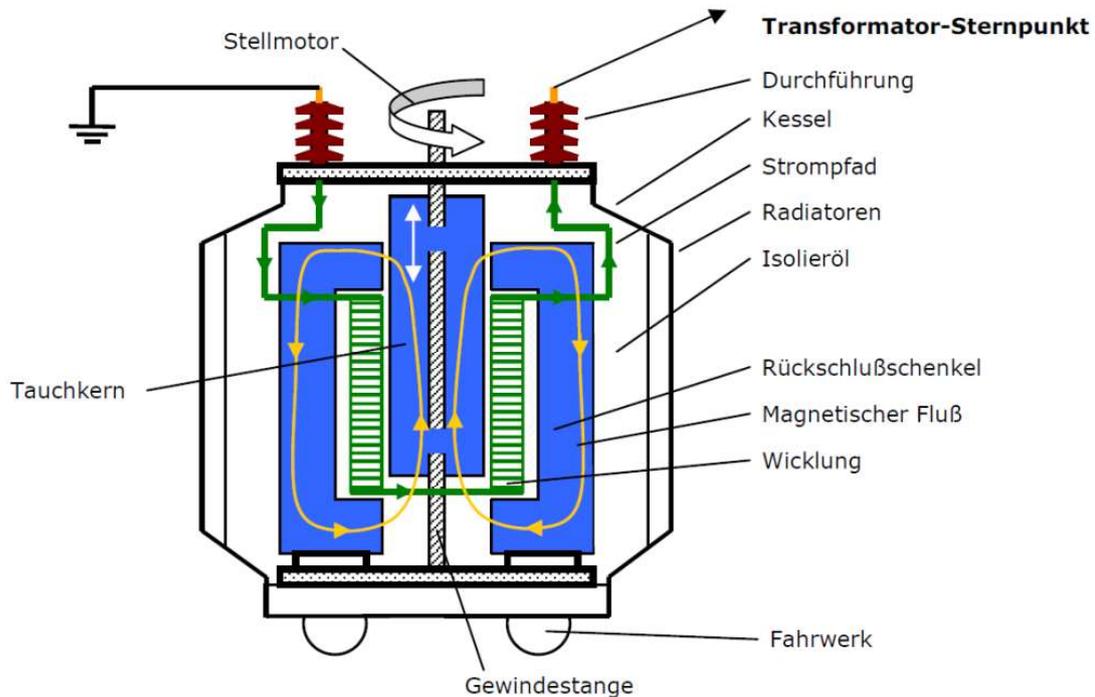


Abbildung 2.9: Aufbau einer Kompensationsspule [10]

Je nach Netzebene wählt man verschiedene Aufstellungsorte für die Kompensationsspulen. Man unterteilt einen Netzbereich in Netzgruppen, darunter versteht man galvanisch getrennte Netzabschnitte. Im Hochspannungsbereich verteilt man mehrere Spulen über eine Netzgruppe. Beim Mittelspannungsnetz setzt man für eine Netzgruppe eine große Kompensationsspule ein, wobei bedingt durch den Netzausbau auch vermehrt dezentrale Kompensationsspulen zum Einsatz kommen. Die Einbindung dieser erfolgt mithilfe von Zick-Zack-Drosseln, welche als Sternpunktbildner dienen (siehe Abbildung 1.3). Beim Transformator ist außerdem darauf zu achten, dass nicht auf beiden Transformatorseiten eine Kompensationsspule installiert wird bzw. ist die Kombination von geerdetem Sternpunkt und Drosselspule zu vermeiden, da durch diese Art der Verschaltung die Nullspannung übertragen werden kann und es so möglich ist, Erdfehler auf der falschen Transformatorseite vorzutäuschen. [4]

2.2 Wichtige normative Bestimmungen zu Erdungssystemen

In den folgenden Abschnitten soll ein Überblick über die aktuellen normativen Bestimmungen zu Erdungssystemen gegeben werden. Weiters wird die Auslegung von Erdungsanlagen näher betrachtet. Grundsätzlich unterscheidet die Norm zwischen elektrischen Anlagen mit verschiedenen Wechselspannungshöhen (kleiner-gleich 1 kV und größer als 1 kV). Außerdem werden zu Beginn wichtige Begrifflichkeiten, welche Erdungsanlagen betreffen, erläutert. Zum Schluss wird noch auf das

globale Erdungssystem eingegangen, da es ein bedeutendes und viel publiziertes Forschungsthema darstellt. Das System soll gefährliche Berührungs- und Schrittspannungen durch einen Verbund von Erdungssystemen verhindern.

Normung Erdungsanlagen

Hochspannung ($> 1 \text{ kV}$)

- ÖVE/ÖNORM E 8383:2000 03 01 [13]
 - ➔ Starkstromanlagen $> 1 \text{ kV}$
- ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 12 01 [6]
 - ➔ Erdung von Starkstromanlagen $> 1 \text{ kV}$
- ÖVE B 1/1976:1976 12 01 [5]
 - ➔ Beeinflussung von Fernmeldeanlagen

Niederspannung ($\leq 1 \text{ kV}$)

- ÖVE E 8101:2019 01 01 [14]
 - ➔ Errichtungsbestimmungen für Niederspannungsanlagen
- ÖVE E 8014:2019 01 01 [15]
 - ➔ Fundamenterder, Potentialausgleich, Informationstechnik

Erdungsmessung

- IEEE Std 80-2013 [16]
 - ➔ Erdung Umspannwerk
- IEEE Std 81-2012 [17]
- ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 12 01, Anhang L [6]
 - ➔ Messung Erdungsimpedanz, Erdungsspannung, spezifischer Erdwiderstand

Sonstiges

- ÖVE EN 50310:2020 07 01 [18]
 - ➔ Erdung, Potentialausgleich für Gebäude, Strukturen mit telekommunikationstechnischen Einrichtungen
- ÖVE/ÖNORM EN 62305-1:2012 07 01 [19]
 - ➔ Blitzschutz - Allgemeines
- ÖVE/ÖNORM EN 62305-2:2013 06 01 [20]
 - ➔ Blitzschutz - Risikomanagement
- ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 BBL 1:2013 11 01 [21]
 - ➔ Schutz von baulichen Anlagen und Personen, mit Beiblatt zu explosionsgefährdeten Bereichen

Abbildung 2.10: Übersicht (keine Vollständigkeit) der Normen für Erdungsanlagen

2.2.1 Begriffsdefinitionen

Nachfolgend werden die wichtigsten Begriffe bezüglich eines Erdungssystems genauer erläutert, da diese nicht nur in der vorliegenden Arbeit, sondern auch in vielen Normen häufig vorkommen. Die Begriffe werden aus der Norm ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011 12 01 [6] übernommen, da in dieser die grundlegende Auslegung von Erdungssystemen für elektrische Anlagen mit einer Nennwechselspannung > 1 kV erläutert wird.

Hochspannung:

Wird jene Wechselspannung bezeichnet die einen Spannungswert von > 1000 V besitzt. Anzumerken sei hier außerdem, dass die Norm die Mittel- sowie Höchstspannung anders als bei den Netzebenen, der Hochspannung zuteilt.

Niederspannung:

Jene Wechselspannung die einen Spannungswert kleiner oder gleich 1000 V besitzt.

Stationen:

Unter dem Begriff fasst man die Enden von Übertragungs- oder Verteilnetzleitungen, Transformatoren, Schaltanlagen und Gebäude der elektrischen Energieversorgung zusammen. Inbegriffen sind auch Einrichtungen, welche dem Netzschutz bzw. der Betriebsführung dienen.

Beispiele: Übertragungsnetzstation (z.B. 380 kV Station), Verteilnetzstation (z.B. 20 kV Station), ...

Kraftwerk:

Anlagen die zur Erzeugung von elektrischer Energie dienen. Inkludiert sind Komponenten zur Energieumwandlung und etwaige Hilfseinrichtungen.

Beispiele: Windkraftwerke mit Blocktransformator, Kohlekraftwerke, ...

Schutz gegen direktes Berühren (Basisschutz):

Soll verhindern, dass Menschen mit ihren Körperteilen oder Gegenständen mit aktiven Teilen, oder Betriebsmittel, welche eine gefährliche Spannung führen können, in Berührung kommen.

Beispiele: Isolierung, Abdeckung, Hindernisse, ...

Schutz bei indirektem Berühren (Fehlerschutz):

Soll Personen vor Gefahren schützen, welche im Fehlerfall von Betriebsmitteln (Metallgehäuse, ...) oder anderen leitfähigen Teilen (z.B. Wasserleitung, Gasleitung, ...) ausgehen können.

Beispiele: Schutztrennung, Schutzklasse II Geräte, ...

Erder (Kennzeichnung: E):

Ist definiert als leitfähiges Teil. Der Erder ist in einem anderen leitfähigen Medium eingebettet, wie beispielsweise Beton, und steht in elektrischem Kontakt mit der Erde.

Tiefenerder:

Metallstab der als Erder dient und in leitfähiger Verbindung mit der Erde steht.

Konstruktionsteile mit Erderwirkung:

Leitfähiges Teil das mit der Erde verbunden ist. Das Teil kann über Beton mit der Erde verbunden sein oder eine leitende Verbindung zu Wasser haben. Der eigentliche Verwendungszweck ist nicht die Erdung, jedoch hat das Konstruktionsteil alle Eigenschaften, welche auch ein Erder erfüllt.

Beispiel: Stahlträger, Rohrleitungen, Betonbewehrung, ...

Erdungsanlage:

Bezeichnet die Summe aller Erder in einer Anlage oder den einzelnen Erder eines Betriebsmittels. Hier sind auch die Verbindungen zwischen den Erdern mit inbegriffen.

Örtliche Erde:

Jener Teil der Erde, der sich im elektrischen Kontakt mit einem Erder befindet. Das elektrische Potential der Erde muss nicht null sein.

Bezugserde (auch ferne Erde):

Ein Teil der Erde, der leitfähig ist. Er liegt außerhalb des Einflussbereiches jenes Erdungssystems, das man untersuchen will. Das elektrische Potential der Bezugserde wird definitionsgemäß null gesetzt.

Erdungsleiter:

Stellt die Verbindung zwischen einem Betriebsmittel, einer Anlage, ..., zum Erder her.

Potentialausgleichsleiter:

Leiter mit welchem die Verbindung zum Potentialausgleich hergestellt wird.

Spezifischer Erdwiderstand:

Spezifischer Widerstand des Bodens in $\Omega \cdot m$. Konkret spricht man hier vom Widerstand eines Kubikmeters Erde, wobei der Abstand zwischen den Grenzflächen 1 m beträgt.

Formelzeichen: ρ_E

Erdungsspannung (EPR):

Bezeichnet die Spannung zwischen der zu untersuchenden Erdungsanlage und der Bezugserde.

Formelzeichen: U_E

Berührungsspannung:

Bezeichnet die Spannung zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese gleichzeitig berührt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Berührungsspannung durch den Einfluss der Körperimpedanz signifikant ändern kann.

Formelzeichen: U_T

Leerlauf – Berührungsspannung:

Bezeichnet die Spannung zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese nicht berührt werden.

Formelzeichen: U_{VT}

Schrittspannung:

So bezeichnet man die Spannung zwischen zwei Punkten im zu untersuchenden Erdungssystem, wobei der Abstand zwischen den Punkten 1 m (Schrittspannung des Menschen) beträgt.

Formelzeichen: U_S

Erdungsimpedanz:

Bezeichnet die Impedanz zwischen einer Anlage, einem Betriebsmittel, etc., und der Bezugserde. Anzumerken sei hier, dass die Erdungsimpedanz auch von den Erdseilen der Freileitungen, von Kabelschirmen, die mit anderen Erdungsanlagen verbunden sind und PEN-Leitern beeinflusst werden kann.

Formelzeichen: Z_E

Ausbreitungswiderstand:

Stellt den Realteil der Erdungsimpedanz dar.

Formelzeichen: R_E

Potentialverschleppung:

Es ist möglich, eine Erdungsspannung in andere Erdungssysteme zu verschleppen, wo normalerweise nur eine geringe oder keine Potentialanhebung vorherrscht. Der Grund dafür können beispielsweise Schirme von Kabeln, Gleise oder Rohrleitungen sein.

PEN – Leiter:

Erfüllt gleichzeitig die Funktion eines Schutzleiters und eines Neutralleiters.

Kabel mit Erderwirkung:

Hierbei handelt es sich um Kabel, welche einen leitfähigen Mantel, Schirm oder eine Bewehrung haben. Diese haben dieselbe Wirkung wie ein mitverlegter Bänderder.

Erdungsstrom:

Ist jener Strom, welcher über die Erdungsimpedanz in die Erde fließt.

Formelzeichen: I_E

Reduktionsfaktor:

Der Reduktionsfaktor setzt den Erdungsstrom in das Verhältnis zum Fehlerstrom (3-facher Nullstrom).

$$r = \frac{I_E}{3 \cdot I_0} \quad (2.8)$$

Formelzeichen: r

Erdfehlerstrom:

Der Erdfehlerstrom bezeichnet den Strom, der vom Betriebsstromkreis zum Erdungssystem bzw. zu den geerdeten Teilen an der Fehlerstelle fließt.

Formelzeichen: I_F

Oberflächenerder:

Diese Art von Erder ist meist in geringer Tiefe (ca. 1 m) verlegt. Er ist meist als Band- oder Runderder ausgeführt und ring- oder maschenförmig verlegt.

Fundamenterder:

Wird in den Beton eingebettet, dieser steht in leitendem Kontakt mit der Erde. Er wird meist als geschlossener Ring ausgeführt.

Potentialsteuererder (Kennzeichnung: S):

Der Potentialsteuererder wird zur Potentialsteuerung verwendet (siehe Abbildung 2.11). Dies soll zu hohe Schritt- oder Berührungsspannungen verhindern bzw. abschwächen.

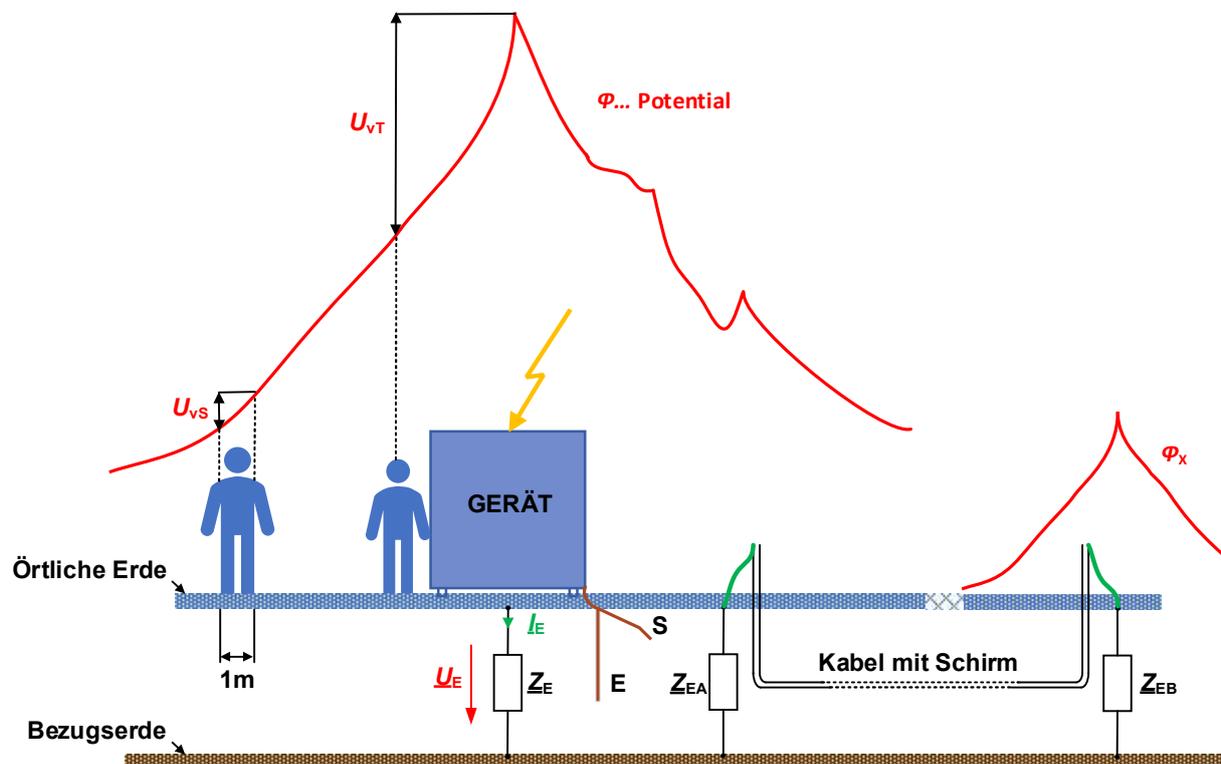


Abbildung 2.11: Begriffe für Erdungssysteme (in Anlehnung an [6])

2.2.2 ÖVE/ÖNORM EN 50522

Die Norm ÖVE/ÖNORM EN 50522 beschäftigt sich mit der Auslegung von Erdungssystemen. Die folgenden Abschnitte fassen die wichtigsten Aspekte der Norm zusammen, wenn nicht anders angegeben wurden die Informationen aus [6] entnommen.

2.2.2.1 Funktionale Anforderungen

Eine Erdungsanlage muss in der Lage sein, Fehlerströme aufzunehmen und diese sicher gegen Erde abzuleiten. Diese muss sowohl mechanisch als auch thermisch dafür ausgelegt sein. Bei der Konstruktion des Erdungssystems ist darauf zu achten, dass die Lebensdauer der Erdungsanlage an jene der elektrischen Anlage angepasst wird. Das Erdungssystem muss Menschen, Tiere und Betriebsmittel vor zu hohen Fehlerströmen, Potentialanhebungen und Potentialdifferenzen schützen. Es soll daher die Schritt-, Berührungsspannungen und Potentialverschleppungen auf ein Minimum begrenzen. Des Weiteren muss es die elektromagnetische Verträglichkeit zwischen elektrischen Geräten und der Hochspannungsanlage gewährleisten.

2.2.2.2 Auslegung von Erdungsanlagen

Für die Auslegung von Erdungsanlagen müssen folgende Kenngrößen beachtet werden:

- Fehlerdauer
- Höhe des Fehlerstromes
- Beschaffenheit der Erde

Bei der Materialauswahl von Erdern, welche mit der Erde in Kontakt stehen, muss darauf geachtet werden, dass das Material korrosionsbeständig ist. Die Stahlbewehrungen von Fundamenten sowie Stahlträger können als Konstruktionsteile mit Erderwirkung (siehe Abschnitt 2.2.1) aufgefasst werden und sind daher Teil der Erdungsanlage. Bei der Wahl des Werkstoffes für den Erder ist auf die mechanische Belastbarkeit und die Korrosionsbeständigkeit zu achten.

Folgende Mindestquerschnitte für Erder sowie Potentialausgleichsleiter sind vorgegeben:

Tabelle 2: Mindestquerschnitte für Erder [6]

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

Nullströme, welche im Netz bei fehlerfreiem Zustand auftreten, müssen bei der Auslegung des Erdungssystems berücksichtigt werden. Da Erdungssysteme häufig vermascht sind, teilen sich die im Fehlerfall fließenden Ströme auf, daher muss nicht jeder Erder für den ganzen Fehlerstrom ausgelegt werden.

Zur Einhaltung der Berührungsspannung wurde die sogenannte „S-Kurve“ festgelegt (siehe Abbildung 2.12). Beachtet werden muss jedoch, dass die Kurve nur für den Kontakt zwischen den Händen und Füßen gilt. Will man Zusatzwiderstände (Schuhe, hochohmige Oberflächen, ...) miteinbeziehen, so

muss ein Rechenverfahren, welches sich im Anhang A der Norm ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] befindet, angewendet werden. Für eine Fehlerdauer von mehr als 10 Sekunden kann eine Berührungsspannung von 80 V toleriert werden. Überschreitet man die Kennlinie, so müssen die Schutzeinrichtungen in der vorgegebenen Zeit auslösen.



Abbildung 2.12: Zulässige Berührungsspannung [6]

Laut Norm [6] ist das Kriterium für die Berührungsspannung erfüllt, wenn einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Vorliegen eines globalen Erdungssystems bzw. Teil eines globalen Erdungssystems
- Die Erdungsspannung (gemessen oder berechnet) ist kleiner als der doppelte Wert der zulässigen Berührungsspannung
- Anwendung von Maßnahmen (Isolierung, Umzäunungen, etc., ...) welche abhängig von der Höhe der Erdungsspannung und Fehlerdauer anzuwenden sind

Anzumerken ist jedoch, dass etwaige Potentialverschleppungen immer geprüft (beispielweise durch Messungen) werden müssen.

Zur Berechnung der Erdungs- bzw. Berührungsspannungen sollen folgende Daten verwendet werden:

- Erdungsimpedanz von Erdungsanlagen
- Spezifischer Erdwiderstand
- Erdungsanlagen, welche mit der zu untersuchenden Anlage verbunden sind

Bei der Auslegung von Erdungsanlagen geht man laut folgendem Ablaufdiagramm vor.

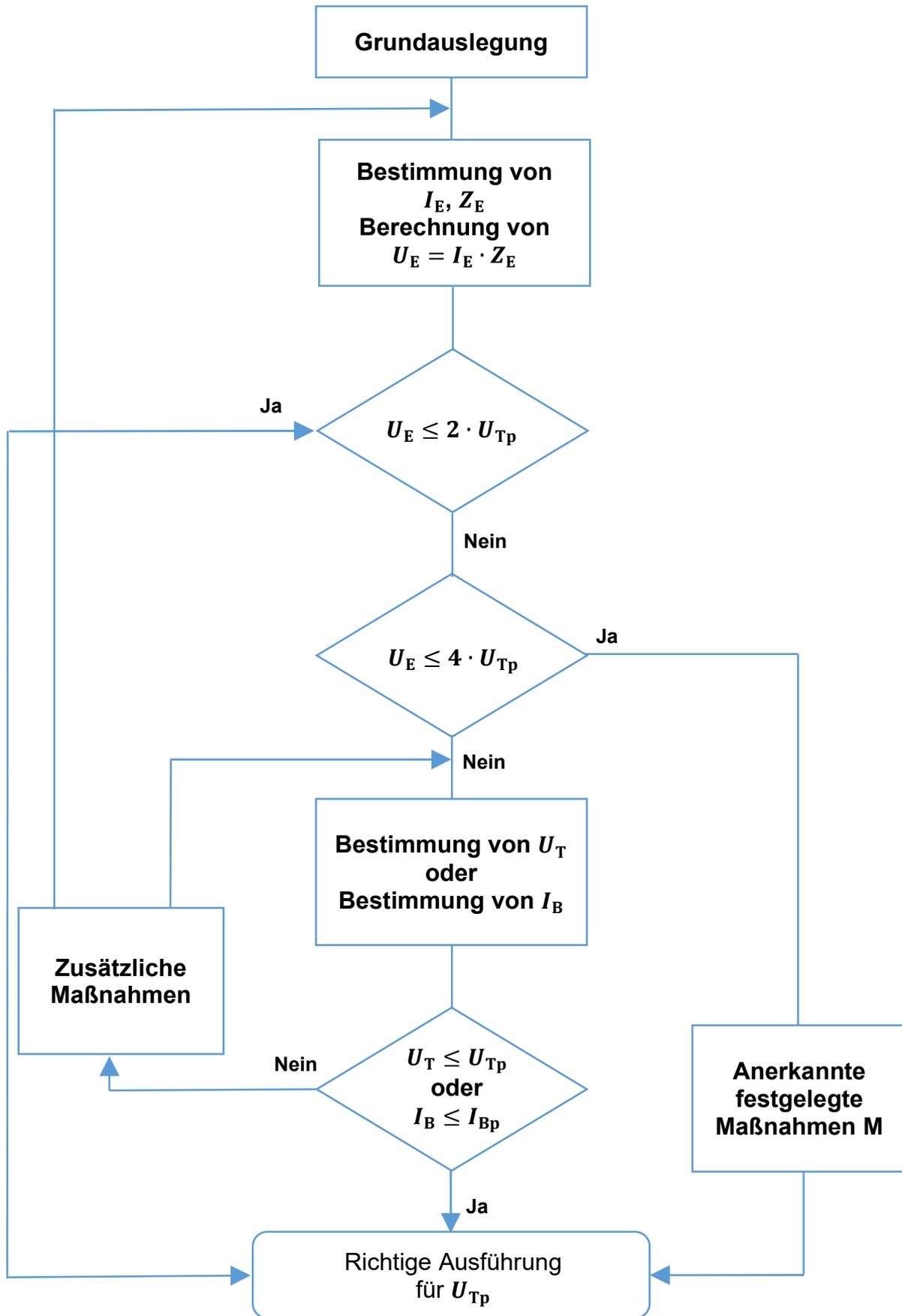


Abbildung 2.13: Auslegung von Erdungsanlagen [6]

Laut Abbildung 2.13 ergibt sich folgender Ablauf für die Auslegung der Erdungsanlage:

- Datenerfassung der zu errichtenden Anlage (Anlagengröße, ...)
 - Erstentwurf der Erdungsanlage
 - Liegt ein globales Erdungssystem vor?
- } Grundausslegung
- Wenn dies zu verneinen ist, dann müssen Bodenkenwerte ermittelt werden (spezifischer Erdwiderstand, bzw. Erstellung eines Bodenmodells)
 - Ermitteln des Erdfehlerstromanteils, welcher in der Nähe der Erdungsanlage in das Erdreich eintritt
 - Gesamtimpedanz zur Erde ermitteln, abhängig von der Anlagengeometrie, Bodenkenwerte, angeschlossenen Erdungsanlagen
 - Erdungsspannung ermitteln
 - Zulässige Berührungsspannung U_{Tp} ermitteln
 - Ist die Erdungsspannung kleiner als die zulässige Berührungsspannung und sind die Anforderungen der Tabelle 3 erfüllt, so ist die Auslegung abgeschlossen
 - Weiters ist die Auslegung abgeschlossen, wenn die Erdungsspannung kleiner als die doppelte zulässige Berührungsspannung ist
 - Ist dies nicht erfüllt, so muss festgestellt werden, ob die Berührungsspannungen innerhalb und am Rand der Erdungsanlage unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen
 - Potentialverschleppungen dürfen innerhalb und außerhalb der Anlage keine Gefährdung darstellen, ansonsten sind entsprechende Maßnahmen zu treffen
 - Die Betriebsmittel auf der Niederspannungsseite dürfen keine zu hohe Spannungsbeanspruchung erfahren, ansonsten müssen Maßnahmen ergriffen werden, wie beispielsweise die Auftrennung des Hochspannungs- und Niederspannungserdungssystems
 - Es ist außerdem zu überprüfen, ob durch Sternpunktgleichsströme hohe Potentialdifferenzen innerhalb der Erdungsanlage entstehen können, wenn ja, sind entsprechende Maßnahmen zu setzen

2.2.2.3 Zusammenschluss von Hochspannungs- und Niederspannungserdungsanlagen

In der Praxis liegen Niederspannungs- und Hochspannungserdungsanlagen meist nahe beieinander. Sind diese nicht Teil eines globalen Erdungssystems, so ist es möglich, dass die Erdungsspannung von der Hochspannungs- auf die Niederspannungserdungsanlage übertragen wird. Um dies zu vermeiden, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten. Entweder man verbindet alle Hochspannungs- mit den Niederspannungserdungsanlagen, oder man ergreift entsprechende Maßnahmen und trennt die Hochspannungs- von der Niederspannungserdungsanlage. Es müssen jedenfalls in der Hochspannungs- sowie der Niederspannungsanlage die Grenzen für Berührungs- sowie Schrittspannung und Potentialverschleppung eingehalten werden. Befindet sich die Niederspannungsanlage innerhalb der Hochspannungsanlage, so müssen die beiden Erdungssysteme miteinander verbunden werden. Befindet sich die Hochspannungs- sowie Niederspannungserdungsanlage in einem globalen Erdungssystem, so ist eine Verbindung zwischen den Systemen problemlos möglich. Ist dies nicht der Fall, so müssen die Anforderungen entsprechend

Tabelle 3 beachtet werden. Sind beide Anlagen getrennt bzw. müssen diese aufgetrennt werden, so muss ein entsprechender Abstand sichergestellt werden. Für Anlagen bis zu einer Spannung von 50 kV hat sich in der Praxis die Entfernung von 20 m bewährt.

Tabelle 3: Anforderungen für den Zusammenschluss von Erdungsanlagen [6]

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

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

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

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

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

^e U_{Tp} ist abgeleitet von Bild 4

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

Innerhalb eines Verbundes von Erdungssystemen kann es zu Potentialverschleppungen (Kabelschirme, PEN-Leiter, ...) kommen. Um dies zu vermeiden, müssen Abhilfemaßnahmen getroffen werden:

- Leitfähige Teile isolieren
- Potentialsteuererder
- Spannungsbegrenzung durch Schutzeinrichtungen
- Abschränkungen bzw. bauliche Hindernisse

2.2.2.4 Errichtung von Erdungsanlagen

Ein Verbund von einzelnen Erdern bezeichnet man als Erdungssystem. Ein Oberflächenerder wird meist in einer Tiefe zwischen 0,5 m und 1 m verlegt, es sollte darauf geachtet werden, dass das System unter der Frostgrenze installiert wird. In der Praxis werden häufig Tiefenerder verwendet. Die Anschlussfahne jener Erder liegt meist unter der Erdoberfläche. Diese Erder sind besonders dann vorteilhaft, wenn der spezifische Erdwiderstand mit der Tiefe sinkt, was einen niedrigen Erdungswiderstand zur Folge hat. Etwaige Konstruktionen aus Metall können als Erder verwendet werden, um Teile zu erden, welche mit

der Konstruktion verbunden sind. Der Werkstoff muss dafür einen ausreichenden Querschnitt haben und elektrisch sowie mechanisch dafür ausgelegt sein. Leitfähige Teile, die nicht zum Betriebsstromkreis gehören und berührbar sind, müssen geerdet werden, ist dies nicht möglich, so muss man die Teile durch entsprechende Maßnahmen isolieren. Erdungssysteme müssen in periodischen Abständen durch visuelle Kontrollen und durch Messungen überprüft werden.

2.2.2.5 Zusätzliche Anmerkungen zur Auslegung

Im Ablaufdiagramm wird der höchst zulässige Körperstrom I_B benötigt, für ihn gelten abhängig von der Fehlerdauer folgende Stromwerte.

Tabelle 4: Höchst zulässiger Körperstrom und zugehörige Fehlerdauer [6]

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

Bei der Auslegung des Erdungssystems muss je nach Dauerstrom und verwendetem Material ein entsprechender Querschnitt gewählt werden. Für den häufigsten Fall des kreisförmigen Querschnittes der Erder gilt Abbildung 2.14.

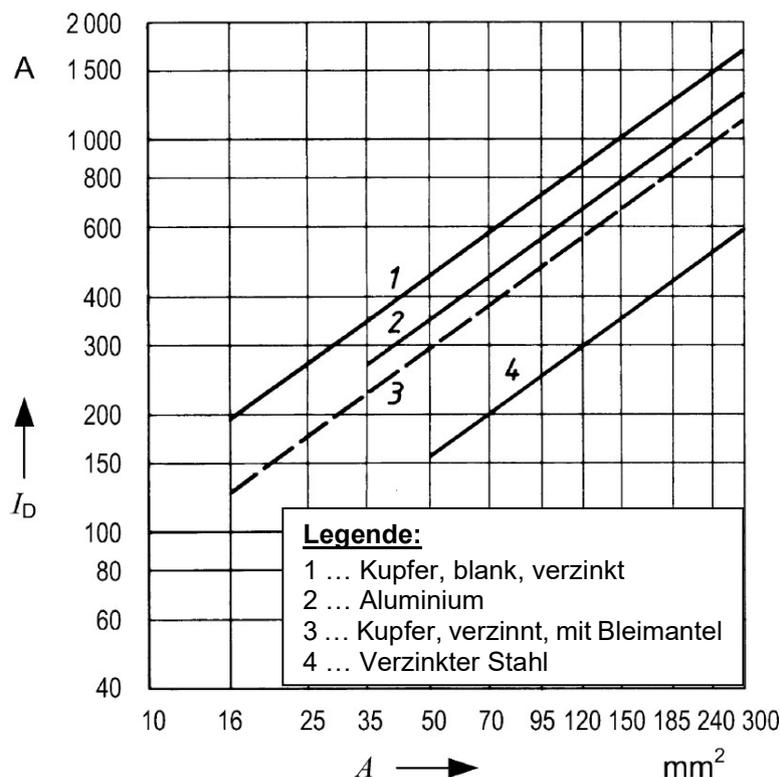


Abbildung 2.14: Auslegung für den Erdungsleiter bei kreisförmigem Querschnitt [6]

2.3 Globales Erdungssystem

Die Thematik des globalen Erdungssystems stellt eines der wichtigsten Forschungsthemen im Bereich der Erdungssysteme dar. Es existieren in der Literatur und in den Normen eine Vielzahl von Definitionen, welche ein globales Erdungssystem beschreiben sollen.

Grundsätzlich versteht man unter einem globalen Erdungssystem einen Verbund von verschiedenen Erdungsanlagen. Durch eine hohe Anzahl von Erdungsanlagen und einem geringen Abstand zwischen den Erden entsteht ein Bereich, in welchem bedingt durch die Erdungsanlagen keine hohen Schritt- bzw. Berührungsspannungen auftreten. Der im Fehlerfall fließende Strom teilt sich somit auf die verschiedenen Erden auf, dadurch verhindert man, dass zu hohe Erdungsspannungen an den einzelnen Erdungssystemen entstehen. Die Erden wirken als Verbund betrachtet als Maschenerde. Weiters ist in jenem Bereich eine elektrische Trennung zwischen Anlagenerde und Betriebserde nicht mehr möglich. Ein globales Erdungssystem kann also allgemein als Äquipotentialfläche aufgefasst werden, man könnte sich auch eine „Kupferplatte“ vorstellen. Die Norm [6] beschreibt nicht wie (Messablauf, Berechnungsgrundlagen) man überprüft, ob ein globales Erdungssystem vorliegt. Bisher existieren nur Messungen oder Berechnungsmodelle für typische Anordnungen von Erden. Als Beispiele nennt die Norm [6] Stadtzentren (urbane Netzstrukturen), städtische oder industrielle Bereiche, die ein verteiltes Nieder- und Hochspannungserdungssystem haben (siehe Abbildung 2.15). Als globales Erdungssystem gelten außerdem eine hohe Anzahl von Gebäuden mit Fundamenterden. Die Erdungssysteme können auch untereinander verbunden sein. Dies ist beispielsweise durch Kabelschirme oder den Niederspannungsschutzleiter (rurale Netzstruktur) möglich. Anzumerken sei auch, dass eine niedrige Gesamterdungsimpedanz noch kein eindeutiges Kriterium für das Vorliegen eines globalen Erdungssystems darstellt. Daher sind auch in der Norm [6] keine Mindestwerte angegeben. Auch bei einer hohen Gesamterdungsimpedanz (unter Umständen bedingt durch einen hohen spezifischen Erdbodenwiderstand) ist es durch zusätzliche Erden oder eine entsprechende Potentialsteuerung möglich, die Grenzwerte für Schritt- sowie Berührungsspannung einzuhalten. Weiters kann durch die Reduktionsfaktoren der Kabelschirme bzw. der Erdleiter der fließende Fehlerstrom so verteilt werden, dass daraus eine niedrige Erdungsspannung resultiert und somit Schritt- und Berührungsspannung begrenzt werden können. Es ist zusätzlich auch möglich, in Gebieten mit schlechten Erdungsverhältnissen durch eine schnelle Fehlerabschaltung die Grenzen von Schritt- und Berührungsspannung einzuhalten (siehe Abbildung 2.12). Außerdem ist darauf hinzuweisen, dass sehr wohl durch Einbauten im Erdreich (z.B. Pipelines, ...) oder Netzverbindungsleitungen, fremdes Potential in das globale Erdungssystem eingeschleppt werden kann. Umgekehrt ist es auch möglich, dass ein Potential vom globalen Erdungssystem in einen anderen Bereich des Netzes verschleppt wird, und dort Schritt- bzw. Berührungsspannungen verursacht. Auch innerhalb des globalen Erdungssystems kann es durch induktive Beeinflussungen zu Schritt- bzw. Berührungsspannungen kommen, daher ist es zu empfehlen, besonders bei langen Leitungen, Überspannungsableiter zu installieren [6]. Somit ist zur Bewertung von globalen Erdungssystemen eine Erdungsmessung nötig, um die ohmsche Beeinflussung festzustellen. Zusätzlich dazu muss eine Messung bzw. Berechnung der induktiven Beeinflussung vorgenommen werden, um verschleppte Potentiale zu identifizieren. [6], [13], [22], [23]

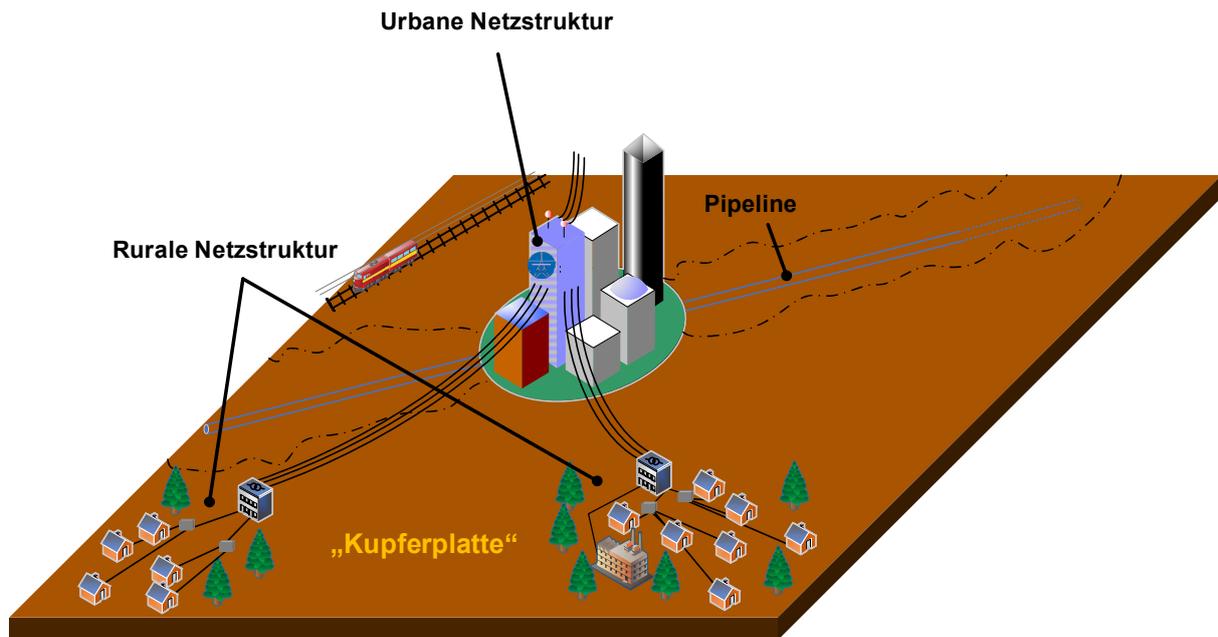


Abbildung 2.15: Modellversuch eines globalen Erdungssystems

Ein globales Erdungssystem lässt sich nach [24] grundsätzlich durch folgende Eigenschaften charakterisieren.

- Zusammenschluss von Erdungssystemen
- Nähe der Erdungssysteme
- Äquipotentialfläche

2.3.1 Zusammenschluss von Erdungssystemen

Die Verbindung von lokalen Erdungssystemen kann beispielsweise durch Kabelschirme von Mittel- bzw. Hochspannungskabeln realisiert werden. Weiters sind Verbindungen über mitverlegte Begleiterder, im Boden verlegte leitfähige Pipelines oder Rohre möglich. Besonders im Hochspannungsbereich kann die Verbindung über die Erdseile hergestellt werden. Nicht zu vernachlässigen sind auch die PEN-Leiter des Niederspannungsnetzes, welche mit dem Erdungssystem der Mittelspannungsstation verbunden sind (siehe Abbildung 1.4). Der PEN-Leiter fungiert hier als Schutz- (PE) und Neutralleiter (N). Die Verbindung der Erdungssysteme muss für die gesamte Lebensdauer des globalen Erdungssystems bestehen bleiben, daher soll beispielsweise der Verteilnetzbetreiber in bestimmten Zeitabständen die Durchgängigkeit von Kabelschirmen sowie PEN-Leitern prüfen. Da im Boden vergrabene Rohre sowie Pipelines nicht in seinen Zuständigkeitsbereich fallen, lässt man diese bei der Betrachtung außer Acht und ist somit bei der Abschätzung der Erdungsimpedanz auf der sicheren Seite. [24], [25]

2.3.2 Nähe der Erdungssysteme

In der Norm ÖVE/ÖNORM EN 50522 spricht man von einem „geringen gegenseitigen Abstand“, somit zieht diese nur eine Länge in Betracht. Es muss jedoch auch die elektrotechnische Bedeutung einer Länge berücksichtigt werden, da die Verbindungselemente auch eine Impedanz aufweisen. Ist

beispielsweise der Abstand zwischen den Erdungssystemen sehr gering, so kann die Impedanz, welche durch das Verbindungselement der Erdungssysteme entsteht, meist vernachlässigt werden. Bei Verbindungen zwischen Mittelspannungsschaltstationen und den Niederspannungsverbrauchern kann die Distanz in der Praxis weitreichend variieren. Längen zwischen 30 m und 1000 m sind je nach Bebauungsdichte keine Seltenheit. In Industrienetzen und urbanen Netzstrukturen kommen meist Längen zwischen 30 m und 100 m vor. In ruralen Gebieten kann der Abstand schnell auf einige Hundert Meter ansteigen. [24], [25]

2.3.3 Äquipotentialfläche

Im Idealfall soll ein globales Erdungssystem wie eine Äquipotentialfläche wirken, somit können keine gefährlichen Potentialdifferenzen abgegriffen werden. Wichtig ist hierbei auch, dass die Äquipotentialfläche für jeden auftretenden Fehlerfall wirken muss. Außerdem sollte sie in jedem Punkt im globalen Erdungssystem vorhanden sein. Um dies zu gewährleisten, muss man alle Erdungssysteme und leitfähigen Teile im Gebiet miteinander verbinden. Weiters ist auch hier die Durchgängigkeit der Äquipotentialfläche in bestimmten Zeiträumen zu überprüfen. Zusätzlich müsste man die Erdungsspannung in jedem Punkt im System sowie für jeden Fehlerfall feststellen, um gefährliche Schritt- und Berührungsspannungen zu vermeiden bzw. einzugrenzen. [24]

2.3.4 Ablaufdiagramm zur Identifizierung eines globalen Erdungssystems

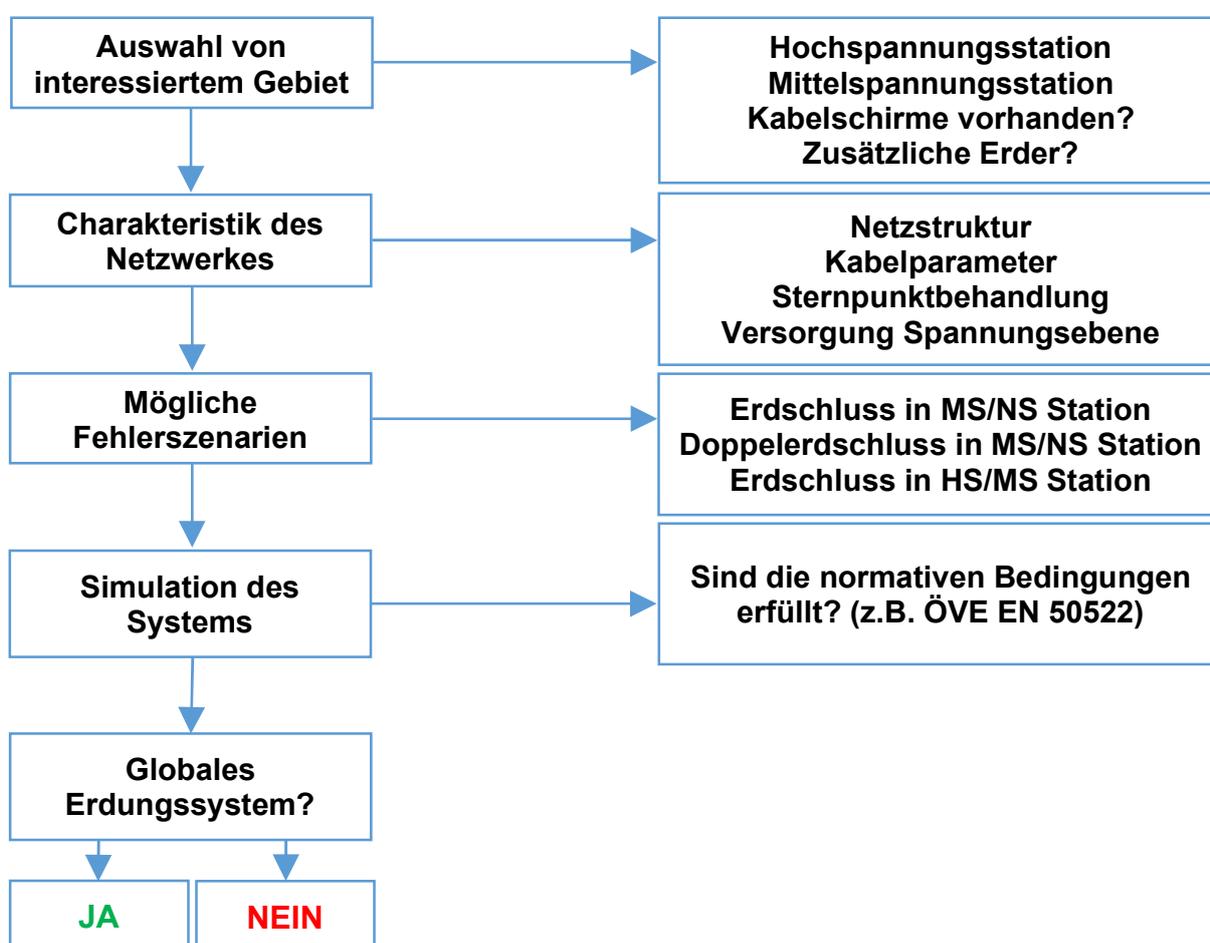


Abbildung 2.16: Ablauf zur Identifikation eines globalen Erdungssystems [25]

Da in der Norm [6] keine Vorgehensweise zur Identifikation eines globalen Erdungssystems beschrieben wird, werden laut [25] durch Forschungsprojekte die verschiedensten Ansätze aufgestellt und erprobt. Eine mögliche Variante wird in Abbildung 2.16 dargestellt. Man wählt ein Gebiet aus, welches man als globales Erdungssystem identifizieren möchte. Anschließend bestimmt man die vorherrschende Spannungsebene im betrachteten Gebiet. Danach stellt man fest, welche Art von Erder vorhanden sind (Verbindung der Schaltstationen durch Kabelschirme, vergrabene Rohrleitungen, ...). Im nächsten Schritt analysiert man die Charakteristik des Netzes und geht zur Parameterbestimmung (Kabelparameter, Sternpunktbehandlung, Leitungslängen, Erdwiderstände, ...) über. Weiters müssen die verschiedensten Fehlerszenarien und Fehlerarten festgelegt werden. Je nach Sternpunktbehandlung reicht es meist nicht aus, nur den einpoligen Erdfehler zu betrachten. Es soll mithilfe von Simulationen (einfachen diskreten Modellen, ...) überprüft werden, ob die normativen Bedingungen, welche für ein globales Erdungssystem gefordert werden (Grenzen für Schritt- bzw. Berührungsspannung, Erdungsspannungen, ...) eingehalten werden. Mithilfe der Simulation können Stellen, an denen eine besonders hohe Erdungsspannung auftritt, identifiziert werden und in der Realität genauer untersucht werden. Gleichzeitig ist es möglich, durch das Hinzufügen von zusätzlichen Erdern die Auswirkung auf das gesamte Erdungssystem zu untersuchen. Weiters sollte man noch reale Messungen durchführen, um die Simulationsergebnisse zu verifizieren und so eine Aussage treffen, ob das ausgewählte Gebiet als globales Erdungssystem identifiziert werden kann. [25]

2.4 Aufbau eines Mittelspannungskabels

In diesem Abschnitt wird der physikalische Aufbau von Mittelspannungskabeln erläutert. Ein Großteil des Mittel- bzw. Niederspannungsnetzes (zwischen 80 % und 90 %) sind bereits verkabelt. Als Material für den Kabelmantel verwendet man heutzutage Kunststoffe. Vermehrt werden Polyethylen (VPE) oder Ethylen-Propylen-Polymer (EPR) eingesetzt. Mittelspannungskabel werden meist als Ein- oder Dreileiterkabel (siehe Abbildung 2.17 und 2.18) ausgeführt. [26]

2.4.1 Leiter

Der Leiter ist für die Stromleitung verantwortlich. Als Leiterwerkstoff wird meist Kupfer oder Aluminium verwendet. Bei gleichem Gewicht hat Aluminium einen größeren Querschnitt und somit einen höheren Leitwert und ist zudem günstiger als Kupfer, daher wird es meist für die Mittelspannungsebene verwendet. Leiter im Mittelspannungsbereich sind meist mehrdrähtig ausgeführt. [27]

2.4.2 Innere Leitschicht

Durch diese Schicht erreicht man eine Glättung des Feldverlaufes an der Leiteroberfläche. Sie gleicht Materialunebenheiten aus. Durch die Schicht verhindert man Teilentladungen, welche nach einiger Zeit zu einer Schädigung der Kabelisolation führen können, da es ohne sie zu Feldspitzen im Isoliermaterial kommen kann. Bei älteren Kabeln, die noch eine Papierisolierung besitzen, besteht die innere Leitschicht aus mehreren Lagen leitfähigem Papier oder aus Gewebband. Bei Kunststoffkabeln

verwendet man ein Trägermaterial, das durch Ruß leitfähig wird. Zudem soll die Schicht ein besseres thermisches Verhalten im Kurzschlussfall bewirken. [27]

2.4.3 Isolierung

Der Zweck dieser ist die Isolierung des Leiters gegen die Erde bzw. gegen die anderen Phasen. Heutzutage verwendet man meist vernetztes Polyethylen (VPE) als Isolierwerkstoff. Grund dafür ist seine sehr gute elektrische Festigkeit und zusätzlich weist es ein gutes thermoelastisches Verhalten auf. Beim Auftragen des Isoliermaterials auf den Leiter ist besondere Vorsicht geboten, da es sonst zu Inhomogenitäten im Isoliermaterial kommen kann und so der Werkstoff durch Teilentladungen mit fortschreitendem Alter zerstört werden kann. Die VPE Isolierung hält einer Betriebstemperatur von bis zu 90 °C stand. In Kurzschlussfällen sind kurzzeitig Temperaturen bis zu 250 °C möglich, ohne den Isolierstoff dauerhaft zu schädigen. Die Vorteile der VPE Isolierung liegen im geringen Gewicht sowie den geringen dielektrischen Verlusten. Bei kleinen Nennspannungen wird die Dicke der Isolierschicht durch die mechanischen Beanspruchungen bestimmt. Bei höheren Nennspannungen dimensioniert man die Dicke der Isolierschicht nach der elektrischen Beanspruchung. [27], [28]

2.4.4 Äußere Leitschicht

Der Aufbau der äußeren Leitschicht entspricht dem der inneren Leitschicht. Durch sie soll die Kabelisolierung eine gleichmäßige Feldbelastung erfahren. Die Leitschicht ist mit dem darüberliegenden Kabelschirm leitfähig verbunden. Damit eine lückenlose Verbindung zwischen Isolierung und innerer bzw. äußerer Leitschicht gewährleistet werden kann, werden alle drei Schichten in einem Arbeitsgang auf den Leiter aufgebracht. [27]

2.4.5 Schirm

Dieser besteht aus leitfähigen Kupferdrähten mit Querleitwendeln. Er wird um jeden einzelnen Leiter gelegt bzw. bei mehradrigen Leitern um den gesamten Kabelbund (siehe Abbildung 2.17 und 2.18). Der Schirm und die äußere Leitschicht müssen leitfähig miteinander verbunden sein. Dies wird durch eine leitfähige Polsterung oder durch direkten Kontakt sichergestellt. Der Schirm soll je nach Anwendungsfall entweder an beiden oder an einem Kabelende mit Erde verbunden sein. Wird der Kabelschirm auf beiden Seiten aufgelegt, so führt dies im fehlerfreien Fall zu Erdpotential an den Leitschichten, welche für eine Begrenzung des elektrischen Feldes sorgen. Über den Kabelschirm fließen außerdem Fehler- und Ableitströme. [27]

2.4.6 Schutzhülle

Je nach Kabelaufbau benötigt man eine Schutzhülle, welche zwischen Schirm und Mantel liegt, wohingegen man bei bewehrten Kabeln eine innere und eine äußere Schutzhülle integriert. Die Hülle soll das Kabel vor Korrosionsschäden jeglicher Art schützen. Meist besteht sie aus Papier, das in Bitumen getränkt wurde. Neuerdings verwendet man auch Kunststofffolien oder Faserstoffe wie Jute.

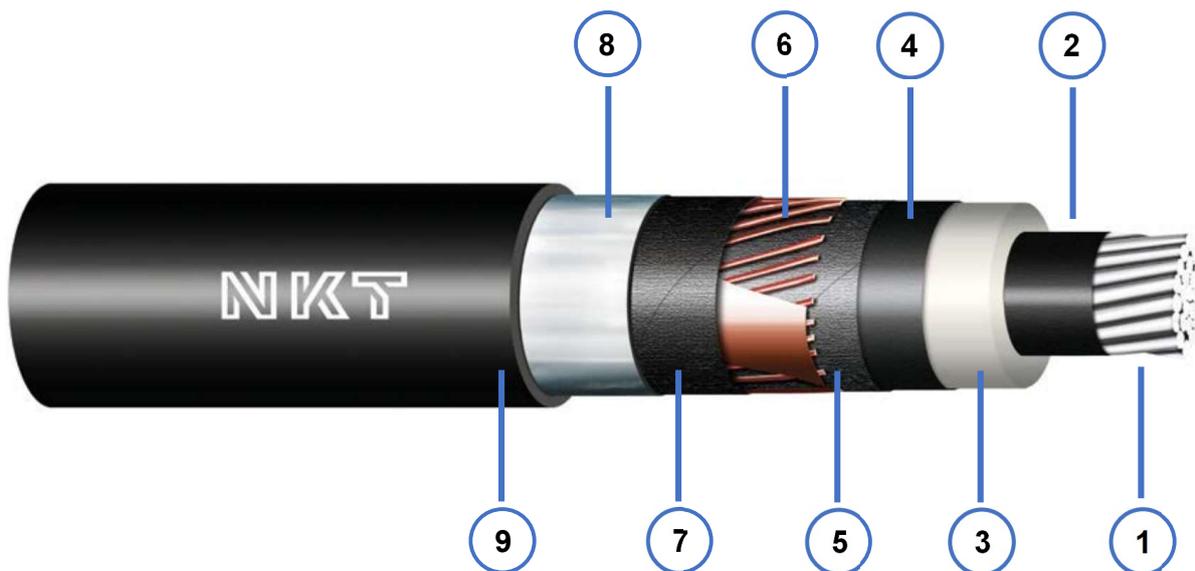
Das Grundmaterial muss ein quellfähiges Material sein, da es die Längswasserdichtheit des Kabels gewährleisten muss. [27]

2.4.7 Bewehrung

Kunststoffkabel, die einen Kupfer- oder Aluminiumschirm haben, benötigen keine Bewehrung. Für Kabel die hohen mechanischen Belastungen (z. B. Seekabel) ausgesetzt sind, empfiehlt sich jedoch, Kabel mit Stahlbewehrung zu verwenden, um das Kabel vor zu hohen Zugspannungen zu schützen. [29]

2.4.8 Kunststoffmantel

Um das Kabel vor äußeren Beschädigungen jeglicher Art zu schützen, überzieht man das gesamte Kabel mit einem Mantel. Heutzutage besteht der Mantel aus Kunststoff, da dieser allerdings nicht diffusionsdicht ist, benötigt man je nach Anwendungsfall auch eine zusätzliche Schutzhülle und einen Schichtenmantel. Der Schichtenmantel ist für die Querwasserdichtheit verantwortlich. Der Zustand des Mantels hat entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer des Kabels. [27], [29]



Legende:

- 1 Leiter, rund, mehrdrähtig
- 2 Innere Leitschicht
- 3 Isolierung
- 4 Äußere Leitschicht
- 5 Leitfähiges Band, Quellvlies → Schutz der äußeren Leitschicht
- 6 Kupferdrahtschirm
- 7 Leitfähiges Band, Quellvlies → Längswasserdichtheit sicherstellen
- 8 Aluminiumfolie → für Querwasserdichtheit
- 9 Kabelmantel

Abbildung 2.17: Einleiter Mittelspannungskabel NA2XS(FL)2Y [30]



Abbildung 2.18: Mehrleiter Mittelspannungskabel PEX-S-AL 3X 95 SE/25 12 kV RT [31]

2.4.9 Schirmbehandlung von Mittelspannungskabeln

Der Kabelschirm kann auf unterschiedliche Arten mit der Erde verbunden werden. Die häufigsten Arten sollen in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden.

2.4.9.1 Beidseitige Erdung

Um die Erdungsverhältnisse im Netz zu verbessern, verbindet man die Enden der Mittelspannungskabel mit den jeweiligen Erdungssystemen der Mittelspannungsschaltstationen. Durch den Stromfluss im Leiter entsteht ein Magnetfeld, welches eine Spannung im Kabelschirm induziert. Die Spannung treibt einen Strom durch die entstehende Stromschleife (siehe Abbildung 2.19). Je nach Höhe des fließenden Schirmstromes kommt es so zu Zusatzverlusten im Kabel. Die Verlegeart und Anordnung der Kabel beeinflussen die Höhe der Verluste. Durch eine Mehrfacherdung kann die auftretende induzierte Spannung minimiert werden und somit auch die entstehenden Verluste. Durch den Kabelschirm fließen außerdem auch Fehlerströme sowie kapazitive Ströme. [32]

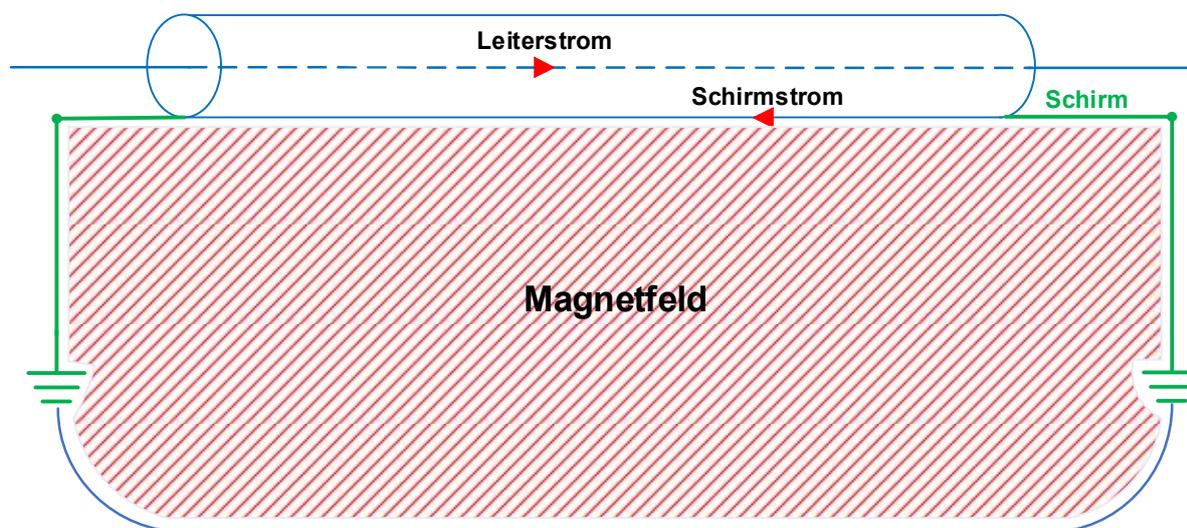


Abbildung 2.19: Beidseitige Erdung des Kabelschirmes

2.4.9.2 Einseitige Erdung

Bei der einseitigen Erdung wird der Kabelschirm nur an einem Kabelende mit der Erde verbunden. Dadurch entsteht im Vergleich zum beidseitig aufgelegten Kabelschirm kein geschlossener Stromkreis (siehe Abbildung 2.20) und somit kann kein Strom im Schirm fließen. Der Vorteil dabei ist, dass keine Schirmverluste auftreten. Jedoch wird eine Spannung im Schirm induziert. Diese nimmt mit der Länge des Kabels zu und erreicht am Kabelende ihr Maximum. Der große Nachteil besteht also darin, dass am Kabelende eine gefährlich hohe Spannung abgegriffen werden kann. Die steigende Spannung belastet zunehmend die Isolation, bis es zum Durchschlag kommt. Daher ist es ratsam, das offene Ende des Kabelschirmes mit einem Überspannungsableiter zu verbinden. [32]

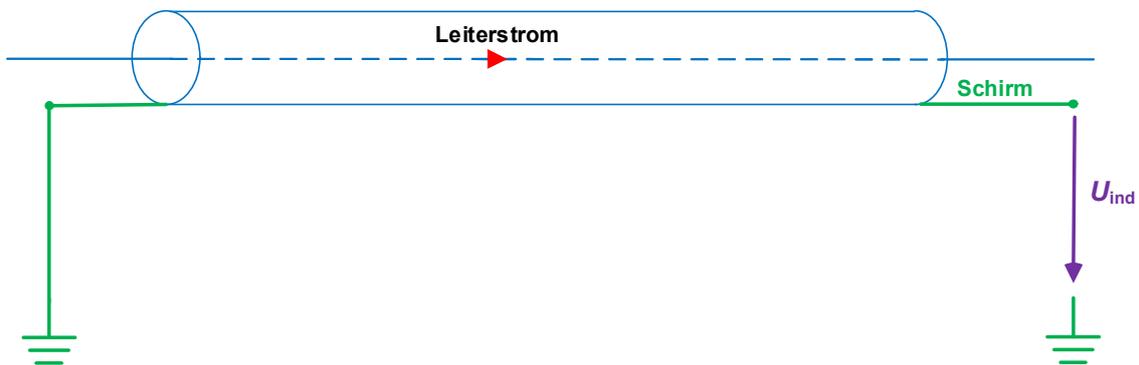


Abbildung 2.20: Einseitige Erdung des Kabelschirmes

Tritt im Netz ein Erdschluss auf, so fließt ein Fehlerstrom. Dieser muss zur Quelle zurückkehren. Ist der Schirm einseitig geerdet, dann muss der Strom über das Erdreich zur Quelle zurückfließen. Der Strom fließt je nach Fehlerszenario bei 50 Hz in einer Tiefe von ca. 930 m (Eindringtiefe des Stromes) zur Quelle zurück. Aufgrund der großen Entfernung des Rückstromes steigt die induzierte Spannung im Schirm stark an, welche wiederum die Isolierung des Schirmes stark beschädigen kann. In der Praxis verlegt man deshalb einen Schutzleiter (meist isoliert aufgrund von Korrosionsschutz) parallel zum Schirm, der als Rückleiter für den Strom dient. Zu beachten ist jedoch, dass der Schutzleiter beidseitig zu erden ist und so nahe wie möglich an den Kabeln verlegt werden soll. Der Schutzleiter muss so dimensioniert werden, dass er dem vollen zu erwartenden Fehlerstrom standhält. [32]

2.4.9.3 Cross-Bonding

Um die Zusatzverluste zu minimieren, muss man die Kabelschirme gegeneinander auskreuzen (siehe Abbildung 2.21). Durch das Auskreuzen der Schirme wird die induzierte Spannung auf ein Minimum reduziert. Im Idealfall wären die Schirme dann stromlos. In der Praxis ist eine komplette Kompensation durch unterschiedliche Leiter – Leiter – Impedanzen meist nicht möglich. Die Schirme werden in speziellen Cross – Bonding – Muffen ausgekreuzt. Außerdem werden die Schirme in den Muffen mit der örtlichen Erdungsanlage verbunden, da sich solche Muffen aufgrund von Inspektionstätigkeiten meist in Umspann- oder Zwischenstationen befinden. Um gefährliche Überspannungen zu vermeiden, installiert man auch hier Überspannungsableiter. In der Realität sind die Kabelmuffen nicht wie in Abbildung 2.21 direkt untereinander angeordnet, sondern je nach örtlicher Begebenheit platziert. [32]

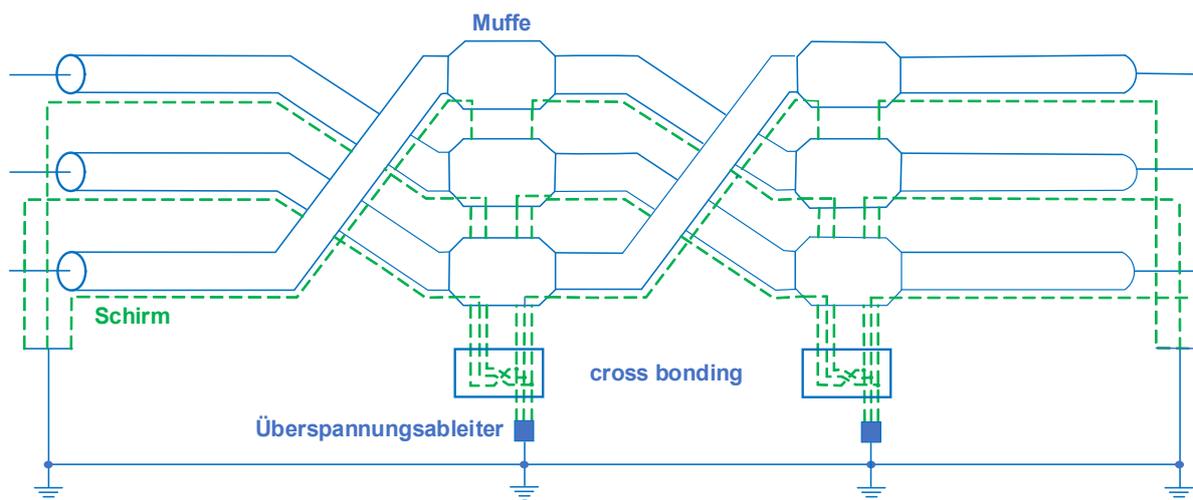


Abbildung 2.21: Cross-Bonding-Anordnung (in Anlehnung an [27])

2.5 Aufbau eines Niederspannungskabels

In den meisten Fällen führt man Niederspannungskabel als Vierleiterkabel aus (siehe Abbildung 2.22). Wie auch bei den Mittelspannungskabeln verwendet man als Leitermaterial Kupfer oder Aluminium. Der Aufbau ist im Vergleich zum Mittelspannungskabel einfacher. Als Isolationsmaterial und für den Kabelmantel verwendet man meistens PVC. Je nach Anwendungsfall sind auch Niederspannungskabel mit Kabelschirm erhältlich (siehe Abbildung 2.23). [28]

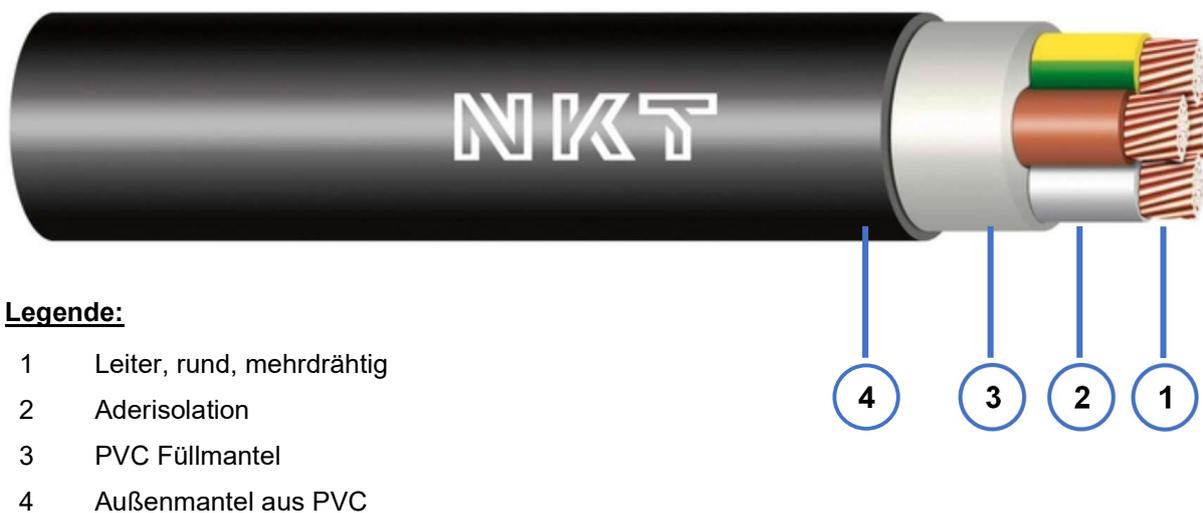
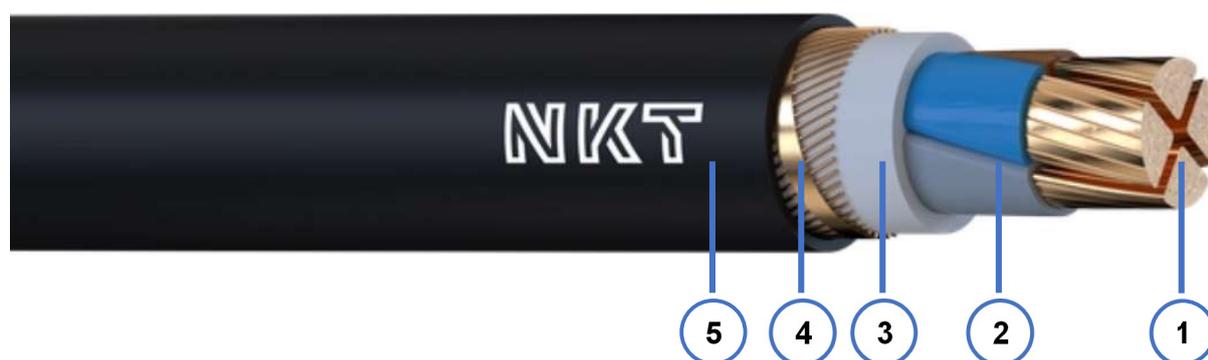


Abbildung 2.22: Mehrleiter Niederspannungskabel E-YY 0.6/1 kV [33]



Legende:

- 1 Leiter, sektorförmig, mehrdrätig
- 2 Aderisolation
- 3 PVC Füllmantel
- 4 Kupferschirm mit Querleitwendel
- 5 Außenmantel aus PVC

Abbildung 2.23: Mehrleiter Niederspannungskabel NYCWY 0.6/1 kV [34]

2.6 Ohm'sche Beeinflussung von nahegelegenen Erdungssystemen

Im Fehlerfall kommt es zu einem Stromfluss durch den Erder, der dann über das Erdreich zur Quelle zurückfließt. Durch den abfließenden Strom in das Erdreich entsteht ein Strömungsfeld. Das Strömungsfeld ruft am Erder einen Spannungsabfall (Erdungsspannung) hervor. Da man in der Regel ein ganzes Erdungssystem betrachtet, das aus mehreren einzelnen Erdern besteht, ergibt sich somit eine resultierende Potentialverteilung (siehe Abbildung 2.24). Diese Potentialverteilung überlagert sich mit jener der Erdoberfläche. Somit hat der Abstand zwischen den einzelnen Erdern, bei größeren Erdungsanlagen, eine Auswirkung auf das Erdoberflächenpotential, was wiederum einen Einfluss auf die Schritt- und Berührungsspannung hat. Durch die ohmsche Beeinflussung erhöht sich die effektive Erdungsimpedanz, was wiederum zu einer höheren Schritt- und Berührungsspannung führt. Auch bei der Bestimmung der wirksamen Erdungsimpedanz durch eine praktische Messung spielt die ohmsche Beeinflussung eine wichtige Rolle, da zur Messung eine Gegenerde benötigt wird, welche nicht im Einflussbereich des zu untersuchenden Erdungssystems liegen darf. Um die Potentialverteilung von realen Erdungssystemen zu bestimmen, sind aufgrund der geometrischen Form der verschiedenen Erder numerische Methoden nötig. Um in der Praxis eine einfache und schnelle Abschätzung der Erdungsimpedanz mit hinreichender Genauigkeit zu erhalten, hat sich die Berechnungsmethode der Potentialkoeffizienten etabliert, welche nun kurz erläutert wird. [22], [23]

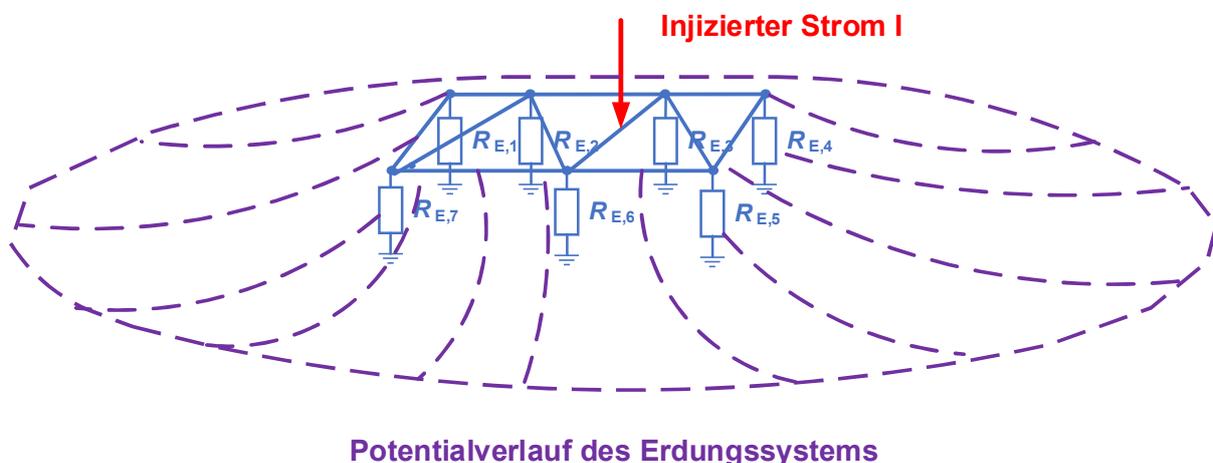


Abbildung 2.24: Potentialverlauf eines Erdungssystems (in Anlehnung an [22])

2.6.1 Berechnungsmethode der Potentialkoeffizienten

Um bei der Bestimmung der Erdungsimpedanz die ohmsche Kopplung miteinzubeziehen, wird das elektrische Strömungsfeld und das Potential, das sich im Erdreich ausbreitet, benötigt. Dafür geht man von den Maxwell-Gleichungen aus.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (2.9)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (2.10)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.11)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_C \quad (2.12)$$

Betrachtet man nur den stationären Fall, so gilt die Annahme, dass keine zeitlichen Änderungen auftreten, somit sind alle Ableitungen nach der Zeit gleich 0.

$$\frac{d}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

Damit erhält man folgende Gleichungen.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (2.14)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (2.15)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.16)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_C \quad (2.17)$$

Zusätzlich gelten die beiden Materialgleichungen:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (2.18)$$

$$\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (2.19)$$

Laut [23] gelten diese Zusammenhänge auch näherungsweise für eine Betriebsfrequenz von 50 Hz. Um nun das Gleichungssystem zu lösen, kann nach [35] eine skalare Potentialfunktion definiert werden.

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V \quad (2.20)$$

Formel (2.17) kann mit Hilfe der Beziehung (2.18) wie folgt umgeformt werden.

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho_C}{\varepsilon} \quad (2.21)$$

Setzt man Gleichung (2.20) in (2.21) ein so ergibt sich die verallgemeinerte Laplace-Poisson Gleichung:

$$\Delta V = -\frac{\rho_C}{\varepsilon} \quad (2.22)$$

Wäre der Raum ladungsfrei, so ergibt sich eine Laplace Gleichung:

$$\Delta V = 0 \quad (2.23)$$

Mithilfe der Methode der Potentialkoeffizienten kann Gleichung (2.22) bzw. (2.23) gelöst werden. Daraus kann anschließend mit Formel (2.19) und (2.20) die Stromdichteverteilung berechnet werden.

Bei der Berechnung des Strömungsfeldes bzw. Potentials von einem Bänderder ergibt sich durch die un stetige Oberfläche, welche jeweils an den Kanten und Ecken vorliegt, ein unendlich hoher Wert für diese. Daher verwendet man als Näherung Ellipsoide. Bei dieser Form treten keine Unstetigkeitsstellen in der Geometrie auf und weiters ist die Potentialfunktion für den Körper relativ einfach zu bestimmen. Die Oberfläche eines Erders aus Bandstahl oder Runddraht rechnet man dann auf einen elliptischen Erder mit derselben Oberfläche um (siehe Abbildung 2.25). [22]

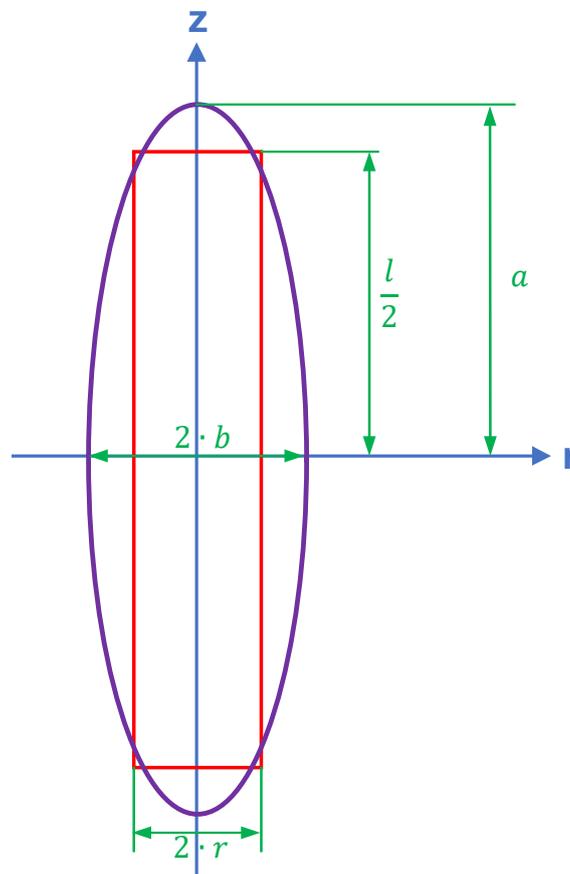


Abbildung 2.25: Modellierung eines Staberders als Ellipse (in Anlehnung an [22])

Für das Potential eines Staberders, angenähert durch eine Ellipse, ergibt sich mithilfe des Spiegelladungs-Prinzips folgende Potentialfunktion.

$$V_i(r, z) = \frac{I_i \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{z + e + \sqrt{r^2 + (z + e)^2}}{z + e + \sqrt{r^2 - (z + e)^2}} \right) \quad (2.24)$$

Wobei für e gilt:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} \approx \frac{l}{2} \quad (2.25)$$

Berechnet man das Potential an der Oberfläche des Erders so nennt man dies Eigenpotential. Mit diesem lässt sich der Erdungswiderstand eines einzelnen Erders bestimmen. Um die Auswirkung des beeinflussenden Erders auf den beeinflussten Erder zu identifizieren, berechnet man das Potential im Mittelpunkt des beeinflussten Erders, welches durch den beeinflussenden Erder verursacht wird. Mithilfe von Formel (2.24) lassen sich die Potentialkoeffizienten und damit der Erdungswiderstand bzw. die Erdungsimpedanz der Anlage bestimmen. [23]

Die Koppelfaktoren (siehe Abbildung 2.26) zwischen den einzelnen Erdern lassen sich wie folgt berechnen:

$$k_{ij} = \frac{V_i}{I_j} \quad (2.26)$$

Wobei I_j den Strom durch den Teilerder beschreibt. Ist $j = i$ so beschreibt k_{ij} den Einzelausbreitungswiderstand des Erders. Will man das Gesamtpotential bzw. den Gesamterdungswiderstand der zu untersuchenden Anlage bestimmen, so kann man dies mithilfe der Superposition der einzelnen Potentiale, wie folgt berechnen. [23]

$$U_E = \sum k_{ij} \cdot I_j \quad (2.27)$$

Dies lässt sich auch in Matrixschreibweise darstellen.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

In abgekürzter Schreibweise lässt sich dies wie folgt beschreiben:

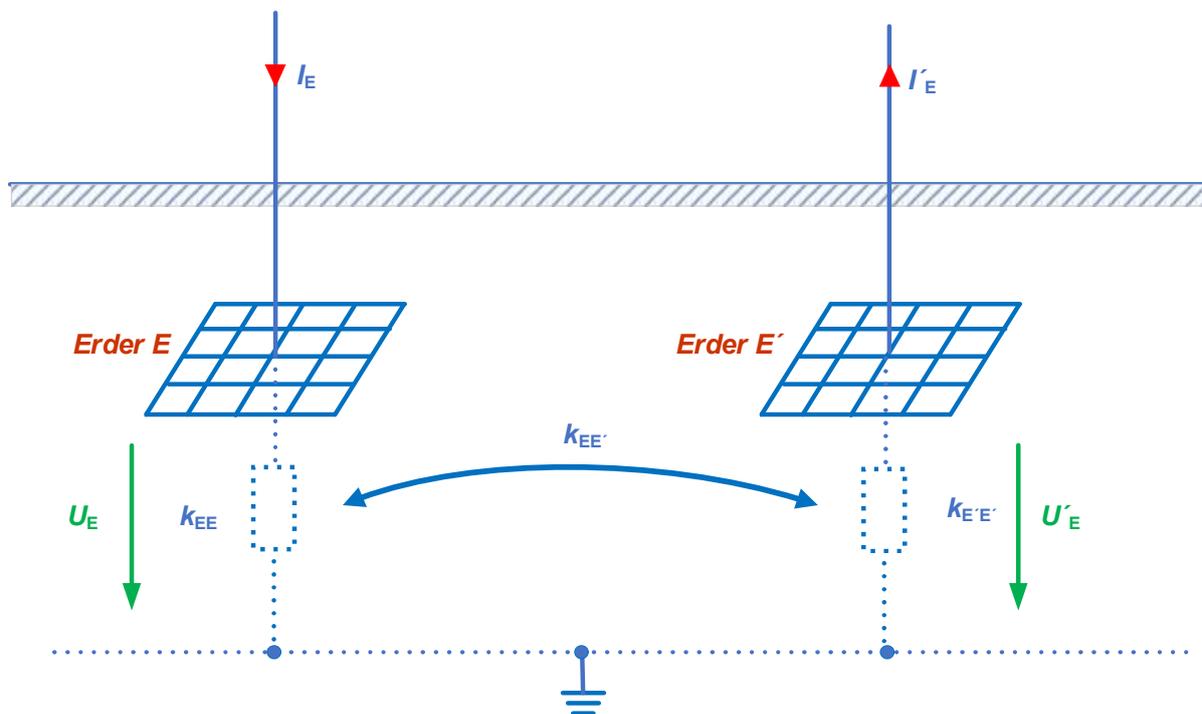
$$\mathbf{V} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{I} \quad (2.29)$$

K bezeichnet man auch als die Koppelmatrix, da sie die ganzen Koppelfaktoren zwischen den einzelnen Erdern enthält, die Einheit der einzelnen Koppelfaktoren ist Ω . Sie stellt die Beziehung zwischen dem Potential und den in den Erdern eingespeisten Strömen dar. Eine Eigenschaft der Koppelmatrix ist, dass sie immer quadratisch ist und in der Hauptdiagonale die Eigenkoppelfaktoren stehen, somit kann man in der Hauptdiagonale die Einzelausbreitungswiderstände der jeweiligen Erder ablesen. Es existiert immer eine Kombination von Koppelfaktoren k_{ij} und k_{ji} , diese sind jedoch in der Regel nicht gleich groß,

nur im symmetrischen Fall gilt $k_{ij} = k_{ji}$. Will man den Gesamtwiderstand des betrachteten Erdungssystems bestimmen, so invertiert man die Koppelmatrix \mathbf{K} und erhält damit die Leitwerte der Erder. Anschließend berechnet man den Gesamtwiderstand R_E mithilfe der Formel (2.31). [22]

$$\mathbf{G} = \mathbf{K}^{-1} \quad (2.30)$$

$$R_E = \frac{1}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (2.31)$$



Legende:

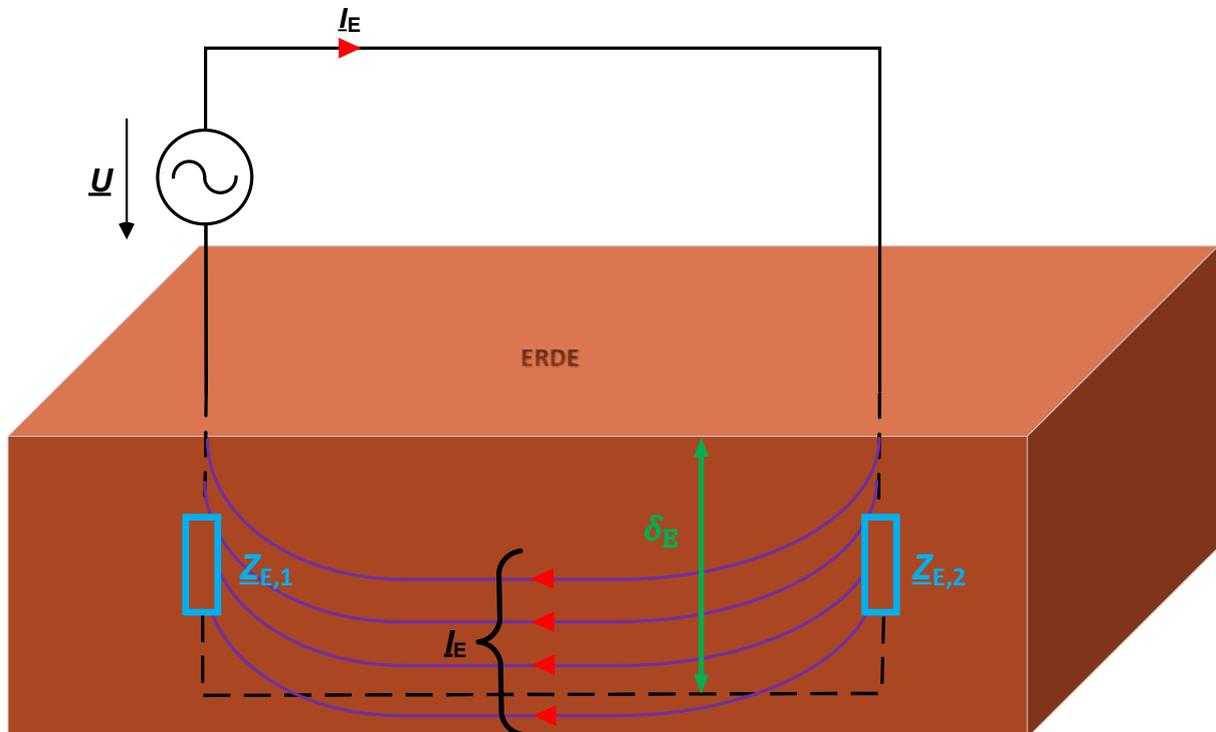
E	beeinflussender Erder	E'	beeinflusster Erder
I_E	Erdungsstrom in A	I'_E	Erdungsstrom durch die Beeinflussung in A
U_E	Erdungsspannung in V	U'_E	Erdungsspannung in V
k_{EE}	Erdungswiderstand von Erder E	$k_{E'E'}$	Erdungswiderstand von Erder E'
$k_{EE'}$	Kopplungswiderstand zwischen den Erdern		

Abbildung 2.26: Beeinflussung von Erdungssystemen (in Anlehnung an [23])

2.7 Berechnung der Impedanzen mit Erdrückleitung

Für die mathematische Behandlung der PEN-Leiter im Niederspannungsbereich ist es nötig, die Impedanz einer Leiter-Erde-Schleife zu bestimmen (siehe Abbildung 2.27). Da der Strom durch das Erdreich zur Quelle zurückkehrt, bildet sich dort ein frequenzabhängiges Strömungsfeld aus. Das Strömungsfeld hängt vom Magnetfeld in der Erde ab, das von Leitungen in und über dem Erdreich beeinflusst wird. Zusätzlich hängt es vom spezifischen Bodenwiderstand ab. Um die Impedanz einer Leiter-Erde-Schleife zu berechnen, existieren in der Literatur die verschiedensten Methoden, welche die Maxwell-Gleichungen näherungsweise, lösen. Die bekanntesten Ansätze sind von Carson und

Pollaczek. Unter der Annahme einer niedrigen Frequenz und einem hohen spezifischen Erdbodenwiderstand, was in der Praxis häufig vorkommt, liefert die Formel nach Carson hinreichend genaue Ergebnisse. Es wird außerdem vorausgesetzt, dass der Strom an die Leitungsführung gebunden ist und konzentriert im Erdboden zur Quelle zurückfließt. [36]



Legende:

- \underline{U} Angelegte Spannung an der Leiterschleife in V
- \underline{I}_E Strom durch die Leiterschleife in A
- δ_E Eindringtiefe in m
- $\underline{Z}_{E,1}$ Erdungsimpedanzen der Station in Ω
- $\underline{Z}_{E,2}$ Erdungsimpedanzen der Station in Ω

Abbildung 2.27: Leiter-Erde-Schleife (in Anlehnung an [1])

Die vereinfachte Formel nach Carson lautet wie folgt [36]:

$$\underline{Z}'_{iICE} = \underbrace{R'_i}_{1} + \underbrace{\frac{\omega \cdot \mu_0}{8}}_{2} + j \cdot \underbrace{\frac{\omega \cdot \mu_0}{8 \cdot \pi}}_{3} + j \cdot \underbrace{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{\delta_E}{r_i}\right)}_{4} \quad (2.32)$$

1. Ohm'scher-Widerstandsbelag des Leiters:

Dieser berechnet sich mit Hilfe der Formel:

$$R'_i = \frac{\rho}{A} \quad (2.33)$$

Wobei ρ den spezifischen Widerstand des verwendeten Leitermaterials in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ und A die Querschnittsfläche des Leiters in m^2 darstellt.

2. Ohm'scher Widerstandsbelag der Erdrückleitung:

Für die Frequenzen 16,7 Hz, 50 Hz sowie 60 Hz gilt nach [1] annähernd:

$$R'_E = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \approx 50 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}} \quad (2.34)$$

Wobei für ω gilt:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.35)$$

Anzumerken ist hier, dass der Widerstandsbelag R'_E nicht vom spezifischen Widerstand des Bodens abhängt.

3. Innerer Reaktanzbelag:

Dieser beschreibt die Kopplung des Leiters mit sich selbst.

4. Äußerer Reaktanzbelag:

Zur Berechnung des äußeren Reaktanzbelages wird die Eindringtiefe δ_E benötigt. Man gibt die Eindringtiefe in m an. Sie beschreibt, in welcher Tiefe der Strom in einem fiktiven Rückleiter zurück zur Quelle fließt. Der Rückleiter wird als unendlich dünn angenommen und erzeugt kein Magnetfeld, welches andere Leiter im Boden beeinflusst. [4]

$$\delta_E = 1,85 \cdot \sqrt{\frac{\rho_E}{\omega \cdot \mu_0}} \quad (2.36)$$

Hier stellt ρ_E den spezifischen Widerstand des Bodens dar, welcher in $\Omega \cdot \text{m}$ angegeben wird. Aus Formel (2.36) ist zu entnehmen, dass die Eindringtiefe mit steigendem spezifischen Bodenwiderstand zunimmt und mit steigender Frequenz sinkt. Bei sehr hohen Frequenzen fließt der Strom somit an der Erdoberfläche zur Quelle zurück. Für eine Frequenz von 50 Hz ergibt sich eine Eindringtiefe von ca. 932 m. Die Variable r_i stellt den mittleren Radius des Leiters dar und wird in m angegeben.

Die Formel von Carson wurde unter der Annahme eines unendlich langen Leiters hergeleitet. Dabei wird angenommen, dass die Leitungslängen sehr viel größer sind als die Eindringtiefe des Stromes, der zurück zur Quelle fließt. Durch diese Vereinfachung vernachlässigt man die Randeffekte an den Enden des Leiters. Für lange Kabel und Leitungen liefert die Formel sehr gute Ergebnisse. Messungen in der Praxis und Simulationen, siehe hierzu [37], haben jedoch ergeben, dass es bei kurzen Kabeln und Leitungen (Längen < 1 km) zu Abweichungen kommt. Grund dafür ist die Eindringtiefe, da bei so kurzen Leitungen und Kabeln, wie sie vorwiegend im Verteilnetzbereich vorkommen, der Strom in einer viel geringeren Tiefe zurückfließt. Um größere Abweichungen bei der Anwendung der Formel für geringere Leitungs- bzw. Kabellängen zu vermeiden, hat man durch Berechnungen eine verminderte

Erdstromtiefe d_E und einen verminderten Widerstandsbelag $R_E'^*$ für die Erdrückleitung eingeführt. Laut [37] wird eine Grenzlänge l_g definiert, diese wird für Kabel und Leitungen wie folgt berechnet.

$$l_g \approx 1,36 \cdot \delta_E \quad (2.37)$$

Anhand der Grenzlänge gilt folgende Fallunterscheidung:

Gilt für die Leitungs- bzw. Kabellänge $l \leq 1,36 \cdot \delta_E$, so kann Formel (2.32) wie folgt angepasst werden.

Die neue Erdstromtiefe berechnet sich laut [37] nach der Formel (2.38):

$$d_E = \frac{2}{e} \cdot l \cdot e^{-\frac{l}{\delta_E}} \quad (2.38)$$

Hier bezeichnet l die Leitungslänge in m und e bezeichnet die Eulersche Zahl. Der verminderte Widerstandsbelag der Erdrückleitung berechnet sich nach [37] wie folgt:

$$R_E'^* = 0,75 \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot \frac{d_E}{\delta_E} \quad (2.39)$$

Somit ergibt sich für Leitungen bzw. Kabel, welche eine Länge von $l \leq l_g$ aufweisen nach [37]:

$$\underline{Z}_{iiCEN}'^* = R_i' + R_E'^* + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{8 \cdot \pi} + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{d_E}{r_i}\right) \quad (2.40)$$

Gilt für die Leitungs- bzw. Kabellänge $l > 1,36 \cdot \delta_E$, so kann Formel (2.32) wie folgt angepasst werden.

Die neue Erdstromtiefe berechnet sich laut [37] nach der Formel (2.41):

$$d_E^* = e^{-e \cdot \frac{\delta_E}{4 \cdot l}} \cdot \delta_E \quad (2.41)$$

Hier bezeichnet l wieder die Leitungslänge in m und e bezeichnet die Eulersche Zahl. Der verminderte Widerstandsbelag der Erdrückleitung berechnet sich nach [37] wie folgt:

$$R_E''^* = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot \left(\frac{d_E^*}{\delta_E}\right)^{2 \cdot \ln(2)} \quad (2.42)$$

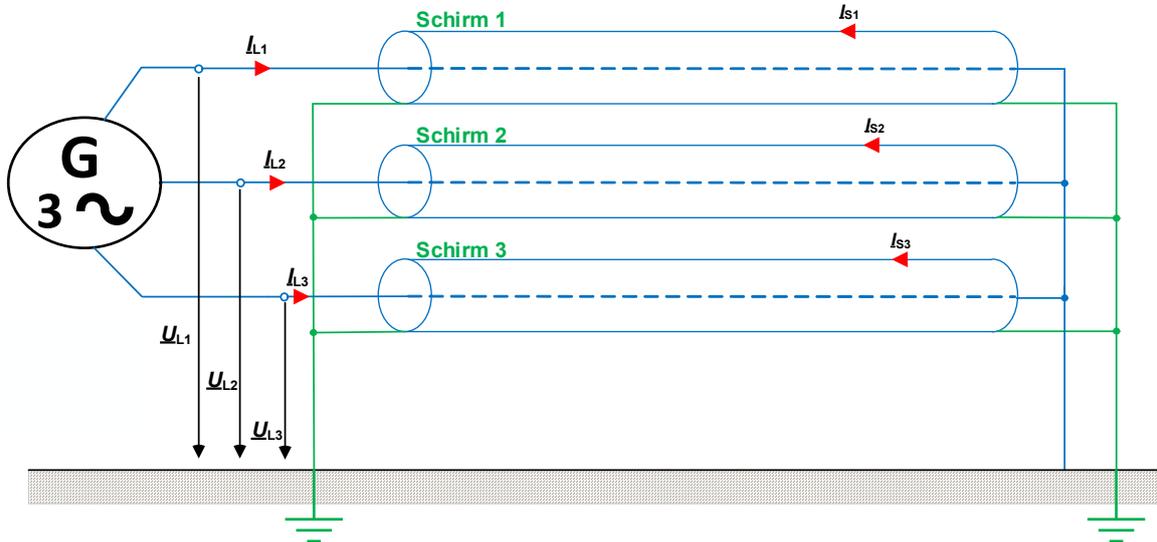
Somit ergibt sich für Leitungen bzw. Kabel, welche eine Länge von $l > l_g$ aufweisen nach [37]:

$$\underline{Z}_{iiCEN}''^* = R_i' + R_E''^* + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{8 \cdot \pi} + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{d_E^*}{r_i}\right) \quad (2.43)$$

2.8 Berechnung der Schirmimpedanzen

Die verschiedenen Schaltstationen sind untereinander mit Mittelspannungskabeln verbunden. Wie bereits in Abschnitt 2.4 erläutert wurde, verfügen diese über einen Kabelschirm. Im Fehlerfall fließt im Vergleich zum Erdboden, bedingt durch die geringe Impedanz des Kabelschirmes, ein großer Teil des

Fehlerstromes über diesen zurück zur Quelle. Um die Impedanz des Kabelschirmes (beidseitig geerdet) von Drehstromkabeln zu bestimmen, geht man vorerst von Abbildung 2.28 aus. Mithilfe der dargestellten Schaltung lässt sich die Mitimpedanz von Drehstromkabeln bestimmen.



Legende:

- $\underline{U}_{L1...3}$ Leiter-Erde-Spannung in Phase 1 bis 3 in V
- $\underline{I}_{L1...3}$ Leiterstrom in Phase 1 bis 3 in A
- $\underline{I}_{S1...3}$ Schirmstrom in Phase 1 bis 3 in A

Abbildung 2.28: Schaltungsaufbau zur Bestimmung der Mitimpedanz (in Anlehnung an [1])

Allgemein gilt:

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \tag{2.44}$$

Mit Hilfe von Formel (2.44) und Abbildung (2.28) lässt sich folgende Matrixschreibweise finden [1]:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{L1L1E} & \underline{Z}'_{L1L2E} & \underline{Z}'_{L1L3E} & \underline{Z}'_{L1S1E} & \underline{Z}'_{L1S2E} & \underline{Z}'_{L1S3E} \\ \underline{Z}'_{L2L1E} & \underline{Z}'_{L2L2E} & \underline{Z}'_{L2L3E} & \underline{Z}'_{L2S1E} & \underline{Z}'_{L2S2E} & \underline{Z}'_{L2S3E} \\ \underline{Z}'_{L3L1E} & \underline{Z}'_{L3L2E} & \underline{Z}'_{L3L3E} & \underline{Z}'_{L3S1E} & \underline{Z}'_{L3S2E} & \underline{Z}'_{L3S3E} \\ \underline{Z}'_{S1L1E} & \underline{Z}'_{S1L2E} & \underline{Z}'_{S1L3E} & \underline{Z}'_{S1S1E} & \underline{Z}'_{S1S2E} & \underline{Z}'_{S1S3E} \\ \underline{Z}'_{S2L1E} & \underline{Z}'_{S2L2E} & \underline{Z}'_{S2L3E} & \underline{Z}'_{S2S1E} & \underline{Z}'_{S2S2E} & \underline{Z}'_{S2S3E} \\ \underline{Z}'_{S3L1E} & \underline{Z}'_{S3L2E} & \underline{Z}'_{S3L3E} & \underline{Z}'_{S3S1E} & \underline{Z}'_{S3S2E} & \underline{Z}'_{S3S3E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \\ -\underline{I}_{S1} \\ -\underline{I}_{S2} \\ -\underline{I}_{S3} \end{bmatrix} \tag{2.45}$$

Die Selbstimpedanzen in Formel (2.45) werden für sehr lange Leitungs- bzw. Kabellängen mit Gleichung (2.46) berechnet, wobei für r_i , der Radius des Kabelschirmes eingesetzt werden muss. [36]

$$\underline{Z}'_{iiCE} = R'_i + \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{\delta_E}{r_i}\right) \tag{2.46}$$

Anzumerken ist hier, dass der Term für die innere Reaktanz hier entfällt, da man für den Schirm keinen Vollleiter mehr verwendet, sondern einen Kreisring.

Die Gegenimpedanzen berechnet man mit der folgenden Gleichung (2.47) aus [1].

$$\underline{Z}'_{ikCE} = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8 \cdot \pi} + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{\delta_E}{d_{ik}}\right) \quad (2.47)$$

Die Struktur von Gleichung (2.47) gleicht jener von Formel (2.46), auch hier werden bei der Gegenimpedanz nur der ohmsche Widerstandsbelag der Erdrückleitung und der äußere Reaktanzbelag berücksichtigt. Die Variable d_{ik} stellt hier den Abstand zwischen den Leitern bzw. Kabelschirmen in m dar.

Für kurze Leitungs- bzw. Kabellängen gilt wieder die Fallunterscheidung, welche schon für die Impedanz des PEN-Leiters beschrieben wurde.

Gilt für die Leitungs- bzw. Kabellänge $l \leq 1,36 \cdot \delta_E$, so kann Formel (2.46) wie folgt angepasst werden.

Die neue Erdstromtiefe berechnet sich laut [37] nach der Formel (2.48):

$$d_E = \frac{2}{e} \cdot l \cdot e^{-\frac{l}{\delta_E}} \quad (2.48)$$

Hier bezeichnet l die Leitungslänge in m und e bezeichnet die Eulersche Zahl. Der verminderte Widerstandsbelag der Erdrückleitung berechnet sich nach [37] wie folgt:

$$R_E'^* = 0,75 \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot \frac{d_E}{\delta_E} \quad (2.49)$$

Somit ergibt sich für Leitungen bzw. Kabel, welche eine Länge von $l \leq l_g$ aufweisen nach [37]:

$$\underline{Z}'_{iiCEN} = R_i' + R_E'^* + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{d_E}{r_i}\right) \quad (2.50)$$

Gilt für die Leitungs- bzw. Kabellänge $l > 1,36 \cdot \delta_E$, so kann Formel (2.46) wie folgt angepasst werden.

Die neue Erdstromtiefe berechnet sich laut [37] nun nach der Formel (2.51):

$$d_E^* = e^{-e^{\frac{\delta_E}{4 \cdot l}} \cdot \delta_E} \quad (2.51)$$

Hier bezeichnet l wieder die Leitungslänge in m und e bezeichnet die Eulersche Zahl. Der verminderte Widerstandsbelag der Erdrückleitung berechnet sich nach [37] wie folgt:

$$R_E''^* = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot \left(\frac{d_E^*}{\delta_E}\right)^{2 \cdot \ln(2)} \quad (2.52)$$

Somit ergibt sich für Leitungen bzw. Kabel, welche eine Länge von $l > l_g$ aufweisen nach [37]:

$$\underline{Z}'_{iiCEN} = R_i' + R_E''^* + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{d_E^*}{r_i}\right) \quad (2.53)$$

Für die Gegenimpedanz gilt dieselbe Fallunterscheidung wie für die Selbstimpedanz. [37]

Somit ergibt sich für $l \leq l_g$ laut [37]:

$$d_E = \frac{2}{e} \cdot l \cdot e^{-\frac{l}{e \cdot \delta_E}} \quad (2.54)$$

$$R_E'^* = 0,75 \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot \frac{d_E}{\delta_E} \quad (2.55)$$

$$\underline{Z}'_{ikCE} = R_i' + R_E'^* + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{d_E}{d_{ik}}\right) \quad (2.56)$$

Für $l > l_g$ ergibt sich laut [37]:

$$d_E^* = e^{-e \frac{\delta_E}{4 \cdot l}} \cdot \delta_E \quad (2.57)$$

$$R_E''^* = \frac{\omega \cdot \mu_0}{8} \cdot \left(\frac{d_E^*}{\delta_E}\right)^{2 \cdot \ln(2)} \quad (2.58)$$

$$\underline{Z}'_{ikCE} = R_i' + R_E''^* + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{d_E^*}{d_{ik}}\right) \quad (2.59)$$

Da man die Schirmimpedanz berechnen möchte, betrachtet man nur den rot markierten Bereich in Formel (2.45). Man setzt dafür die Spannungen \underline{U}_{L1} , \underline{U}_{L2} , \underline{U}_{L3} gleich null, somit werden auch die Leiterströme I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} zu null. Man legt nun an alle Kabelschirme dieselbe Spannung \underline{U} . Der Betrag, sowie der Winkel der Spannung sind dabei unerheblich. Somit ergibt sich das Gleichungssystem (2.60).

$$\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{U} \\ \underline{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{S1S1E} & \underline{Z}'_{S1S2E} & \underline{Z}'_{S1S3E} \\ \underline{Z}'_{S2S1E} & \underline{Z}'_{S2S2E} & \underline{Z}'_{S2S3E} \\ \underline{Z}'_{S3S1E} & \underline{Z}'_{S3S2E} & \underline{Z}'_{S3S3E} \end{bmatrix} \cdot l \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Wählt man eine symmetrische Anordnung der Kabel, beispielsweise eine Dreiecksanordnung, so gilt für die Selbstimpedanzen der Matrix \underline{Z} laut [1]:

$$\underline{Z}'_{S1S1E} = \underline{Z}'_{S2S2E} = \underline{Z}'_{S3S3E} \quad (2.61)$$

Für die Gegenimpedanzen gilt dann laut [1]:

$$\underline{Z}'_{S1S2E} = \underline{Z}'_{S1S3E} = \underline{Z}'_{S2S3E} = \underline{Z}'_{S2S1E} = \underline{Z}'_{S3S1E} = \underline{Z}'_{S3S2E} \quad (2.62)$$

Setzt man Formel (2.61) und (2.62) in Gleichung (2.60) ein und löst das Gleichungssystem, dann erhält man für die Impedanz der Kabelschirme folgende Formel:

$$\underline{Z}_{\text{Schirm}} = \frac{\underline{Z}'_{S1S1E} \cdot l + 2 \cdot \underline{Z}'_{S2S1E} \cdot l}{3} \quad (2.63)$$

2.9 Grundlagen der Erdungsmessung

In den folgenden Abschnitt wird auf die wichtigsten Verfahren der Erdungsmessung, welche in der Praxis angewendet werden, näher eingegangen. Zu Beginn werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Bestimmung des spezifischen Bodenwiderstandes erläutert. Anschließend werden diverse Methoden zur Identifikation der Erdungsimpedanz behandelt. Des Weiteren wird auf die bedeutendsten Einflussfaktoren bei der Erdungsmessung sowie auf auftretende Messungenauigkeiten eingegangen.

2.9.1 Messung des spezifischen Bodenwiderstandes

Für die Planung bzw. Überprüfung von Erdungsanlagen spielt besonders der spezifische Erdwiderstand ρ des Bodens eine wichtige Rolle, dieser wird in $\Omega \cdot m$ angegeben. Man kann sich darunter den Widerstand eines Würfels mit 1 m Kantenlänge und 1 m² Fläche vorstellen (siehe Abbildung 2.29) [38]. Je niederohmiger der Boden am Standort ist, desto geringer ist auch der effektive Erdungswiderstand der Erdungsanlage.

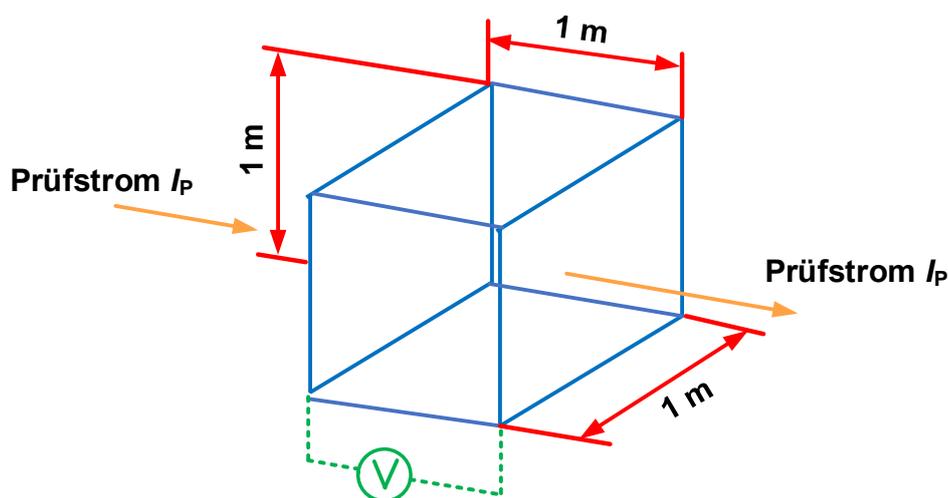


Abbildung 2.29: Definition spezifischer Erdwiderstand (in Anlehnung an [38])

Der Betrag des spezifischen Erdwiderstandes hängt nicht nur von der Beschaffenheit des Erdbodens ab, sondern auch von vielen anderen Faktoren wie beispielsweise Temperatur, Luftfeuchte, Jahreszeit und Wetter. Daraus ergibt sich eine jahreszeitliche Schwankung des spezifischen Erdbodenwiderstandes von ca. $\pm 30\%$. Der Bereich des spezifischen Bodenwiderstandes reicht von einigen wenigen $\Omega \cdot m$ (sehr feuchte, moorige Böden) bis hin zu $10000 \Omega \cdot m$ (Granit, Kalkstein, ...). Der durchschnittliche Erdboden in Ostösterreich liegt in einem Bereich zwischen $100 \Omega \cdot m$ und $200 \Omega \cdot m$, wenn man felsige Gebiete ausschließt. Im Westen von Österreich ist mit höheren Bodenwiderständen zu rechnen, da dort vermehrt felsiges Gebiet vorzufinden ist. Ein Erdboden besteht aus verschiedenen Erd- bzw. Gesteinsschichten. In tieferen Erdschichten ist die Änderung von Temperatur und Feuchte geringer, daher ist dort die Änderung des Widerstandes kleiner. Durch die Bestimmung des spezifischen Bodenwiderstandes soll bereits vor Baubeginn die Lage sowie Art des Erdungssystems festgelegt werden. Zur Bestimmung haben sich verschiedene Verfahren etabliert, welche nun kurz in den folgenden Abschnitten erläutert werden. [38], [39], [40]

2.9.1.1 Wenner-Verfahren

Eine der am häufigsten verwendeten Methoden zur Bestimmung des spezifischen Bodenwiderstandes ist das Verfahren nach Wenner. Dabei werden vier Elektroden verwendet, welche man in einem äquidistanten Abstand zueinander in den Boden eintreibt. Der Abstand zwischen den Elektroden ist in Abbildung 2.30 mit a gekennzeichnet. Alle Elektroden sollen sich in einer Einschlagtiefe b befinden.

In die beiden äußeren Elektroden wird ein Strom eingespeist, und gleichzeitig über die beiden inneren Elektroden die Spannungsdifferenz gemessen. Dann kann durch Anwendung des ohmschen Gesetzes der Widerstand R berechnet werden. Anschließend kann man mit Formel (2.64) auf den spezifischen Bodenwiderstand $\rho_{E,W}$ in $\Omega \cdot m$ rückrechnen. [38]

$$\rho_{E,W} = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.64)$$

In der Praxis ist die Einschlagtiefe b im Vergleich zum Abstand a meistens viel geringer, daher setzt man oft die Tiefe $b = 0$ und erhält so die handliche Formel (2.65) mit deren Hilfe der spezifische Widerstand ermittelt werden kann.

$$\rho_{E,Näherung} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (2.65)$$

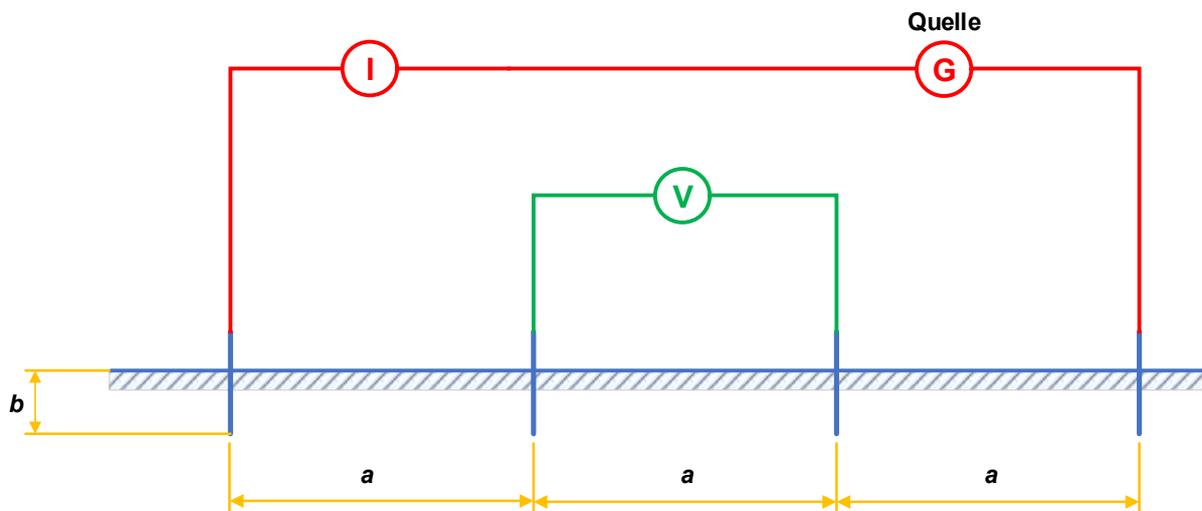


Abbildung 2.30: Messaufbau Wenner-Verfahren (in Anlehnung an [17])

Das Wenner-Verfahren erweist sich als eine sehr störungempfindliche Messmethode. Das Verfahren reagiert empfindlich auf vertikale Änderungen in der Bodenstruktur, es eignet sich daher besonders gut, um horizontale Erdschichten zu detektieren. Es empfiehlt sich, mehrere Messungen mit verschiedenen Abständen a durchzuführen und anschließend einen Mittelwert für den spezifischen Bodenwiderstand zu berechnen. [17], [39]

2.9.1.2 Schlumberger-Verfahren

Der Aufbau des Schlumberger-Verfahrens (siehe Abbildung 2.31) ist dem des Wenner-Verfahrens sehr ähnlich. Jedoch werden bei diesem Verfahren die Abstände der äußeren Elektroden verändert und der Abstand der inneren Elektroden wird nicht verändert. Über die äußeren Elektroden wird wieder ein

Strom eingespeist und über die inneren Elektroden der Spannungsabfall gemessen, anschließend lässt sich wieder der Widerstand R ermitteln. Danach kann mit Formel (2.66) der spezifische Widerstand ρ_{E_Sch} berechnet werden.

$$\rho_{E_Sch} = \pi \cdot \frac{a^2 - \frac{c^2}{4}}{4} \cdot R \quad (2.66)$$

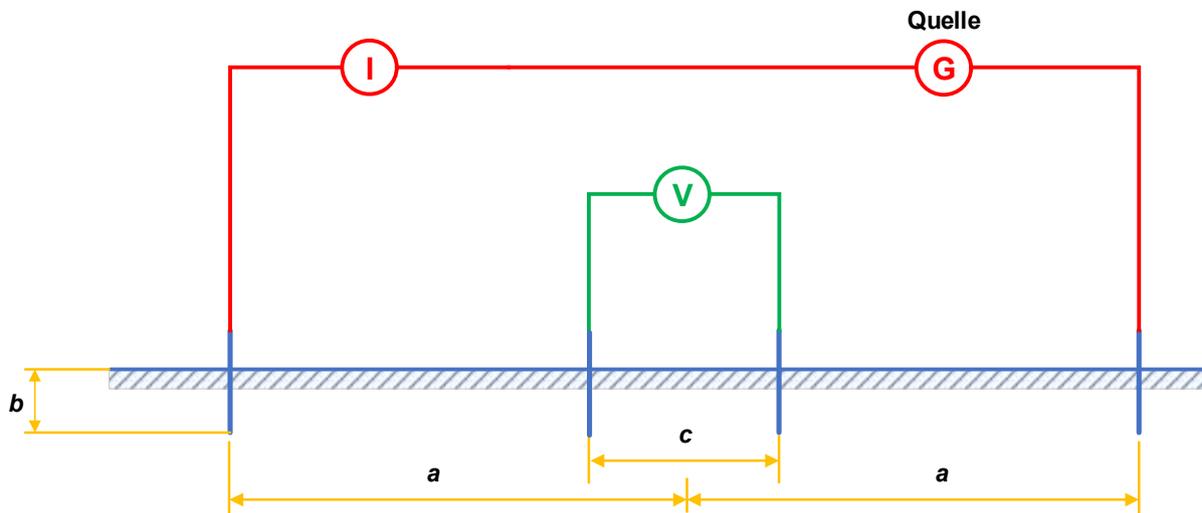


Abbildung 2.31: Messaufbau Schlumberger-Verfahren (in Anlehnung an [17])

Im Vergleich zum Wenner-Verfahren hat der Anwender eine Zeitersparnis, da man nur die äußeren Elektroden umplatzieren muss, und nicht alle vier Elektroden. Das Verfahren ist unempfindlicher gegenüber vertikalen Änderungen in der Bodenstruktur, daher können vertikale Strukturen im Boden einfacher erkannt werden. [17], [39]

2.9.1.3 Dipol-Dipol-Verfahren

Für dieses Verfahren werden im einfachsten Fall vier Elektroden verwendet (siehe Abbildung 2.32). Man verwendet zwei Elektroden, über die ein Strom eingespeist wird. In einem bestimmten Abstand c platziert man die Spannungselektroden und misst dort die Spannungsdifferenz um anschließend wieder den ohmschen Widerstand R zu berechnen. Die Distanz c ist ein Vielfaches vom Abstand zwischen den Elektroden. In der Praxis verwendet man je nach Verfahren eine unterschiedliche Anzahl von Elektroden (meist zwischen 12 und 24) die dann von einem Messgerät der Reihe nach durchgeschaltet werden. Der spezifische Widerstand ρ_{E_Dipol} lässt sich mit Formel (2.67) feststellen [41]. Diese Konfiguration wird für Detailuntersuchungen des Erdbodens verwendet. Der Nachteil des Verfahrens ist, dass es nicht für große Erdtiefen anwendbar ist. Das Verfahren ist nützlich, um vertikale Erdschichten zu lokalisieren und liefert auch genauere Ergebnisse als die Wenner-Methode für horizontale Schichten.

$$\rho_{E_Dipol} = \pi \cdot R \cdot \frac{c \cdot (c^2 - a^2)}{a^2} \quad (2.67)$$

Bei gegenwärtigen Messsystemen (wie etwa [42]) werden zuerst die Daten vor Ort erfasst und anschließend wird mithilfe einer Computer-Software das inverse Problem gelöst und auf die spezifische Widerstandsverteilung im Erdboden rückgerechnet. [41], [43]

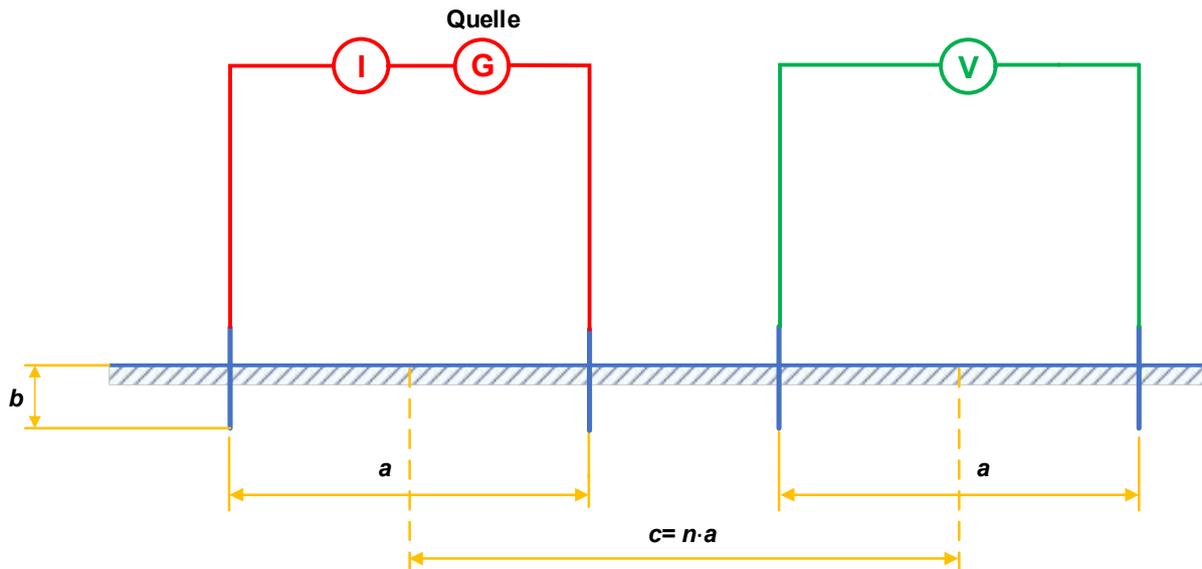


Abbildung 2.32: Messaufbau Dipol-Dipol-Verfahren (in Anlehnung an [41])

2.9.2 Messung der Erdsimpedanz

Die Erdsimpedanz stellt sowohl für die technische Funktionalität des Netzes als auch für die Personensicherheit eine wichtige Größe dar. Bei der Aufteilung des Fehlerstromes auf das lokale Erdungssystem und etwaige Kabelschirme ist sie ein bedeutender Faktor [23]. Zur Bestimmung der Erdsimpedanz haben sich im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Messmethoden etabliert, welche sich je nach Anwendungsfall und Messgenauigkeit besser oder schlechter eignen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wichtigsten Methoden kurz erläutert.

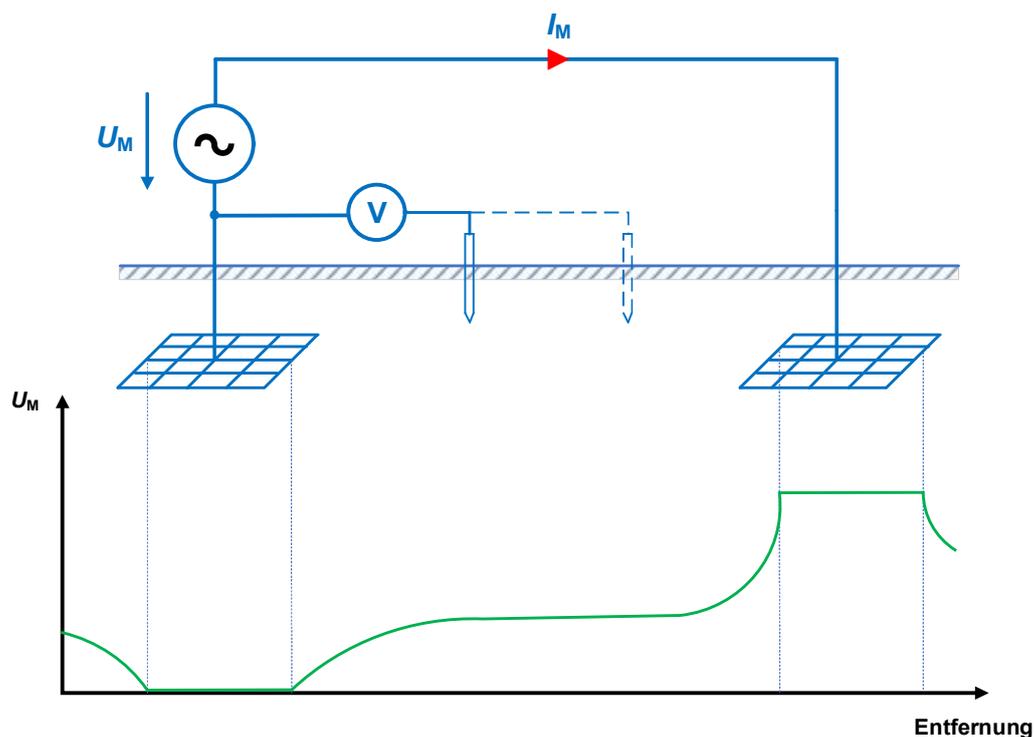


Abbildung 2.33: Strom-Spannungsmessung (in Anlehnung an [23])

Grundsätzlich lässt sich jede Erdungsimpedanzmessung auf eine der drei Punkte zurückführen [22]:

- Messung der Impedanz mit einem herkömmlichen Impedanz-/Widerstands-Handmessgerät (für kleine Erdungssysteme oder Messung einzelner Erder)
- Messung der Erdungsimpedanz durch Einspeisen eines Stromes in die zu untersuchende Erdungsanlage und gleichzeitige Messung des entstehenden Spannungstrichters (siehe Abbildung 2.33). Diese Methode wird auch Strom-Spannungs-Messung genannt und wird häufig bei Erdungsanlagen mit großer Ausdehnung verwendet.
- Es wird im Netz ein realer Erdschluss mit Nennspannung erzeugt, dabei werden alle Strom- und Spannungsverhältnisse aufgenommen und anschließend analysiert.

2.9.2.1 2-Punkt-Methode

Diese Methode stellt das einfachste Verfahren zur Bestimmung des Erdungswiderstandes dar. Der Messaufbau wird in Abbildung 2.34 dargestellt. Hier wird der Erdungswiderstand R_E in Serie zu einer Hilfselektrode mit dem Widerstand $R_{E,H}$ gemessen. Als Bedingung für die Messung muss gelten $R_{E,H} \ll R_E$. In der Praxis werden als Hilfserder oft große Erdungssysteme verwendet, welche einen äußerst geringen Erdungswiderstand aufweisen.

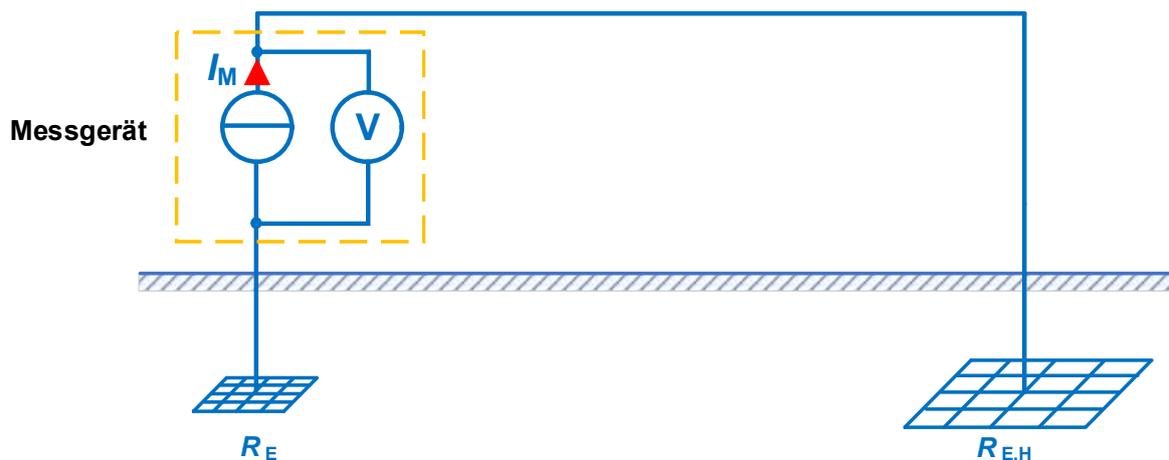


Abbildung 2.34: 2-Punkt-Methode (in Anlehnung an [44])

Diese Methode wird häufig für die Bestimmung des Erdungswiderstandes für einen einzelnen Erder verwendet. Aufgrund des niedrigen Messstromes ist die Messgenauigkeit bei dieser Art der Erdungsmessung sehr gering. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen den Erdungssystemen groß genug ist, um eine Überlappung der Potentialtrichter zu vermeiden. Das Verfahren eignet sich sehr gut, um eine grobe Abschätzung über den Erdungswiderstand zu tätigen und um Verbindungsüberprüfungen vorzunehmen. [17]

2.9.2.2 Zangenmethode/Clamp-on

Diese Methode hat einen ähnlichen Aufbau (siehe Abbildung 2.35) wie die 2-Punkt-Methode. Eine Stromzange induziert eine Spannung in einem Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 3,4 kHz in das zu untersuchende Erdungssystem. Die induzierte Spannung hat einen Messstrom I_M zur Folge, welcher

durch die Stromzange gemessen wird. Durch die Kenntnis der induzierten Spannung und des Messstromes lässt sich der Erdungswiderstand ermitteln.

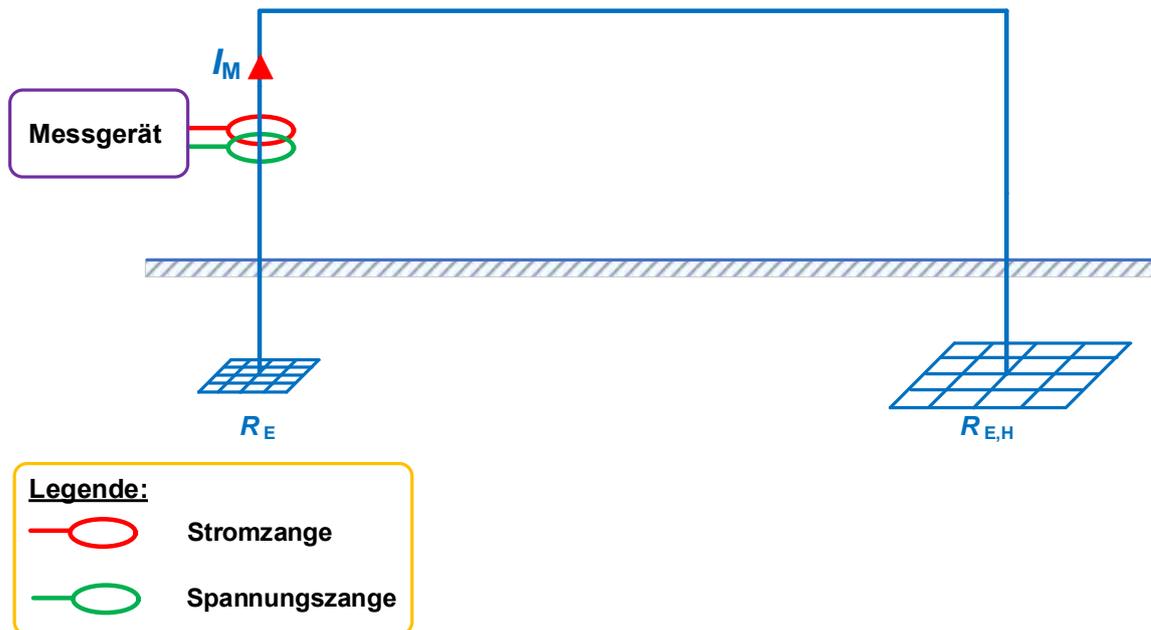


Abbildung 2.35: Clamp-on oder Stakeless-Methode (in Anlehnung an [44])

Bei der Anwendung dieser Methode wird angenommen, dass die an das zu analysierende Erdungssystem angeschlossenen Kabelschirme eine sehr niedrige Impedanz im Vergleich zum Erdungssystem aufweisen. Aufgrund der hohen Frequenz der induzierten Spannung würden diese sonst hochohmig werden und so das Messergebnis verfälschen. Der größte Vorteil dieser Methode sind die schnelle und einfache Anwendbarkeit. Je nach Aufbau des Messgerätes sind auch Ausführungen als Erdungszange (2 Spulen sind in einem Messgerät verbaut) möglich. [17]

Folgende Punkte müssen bei der Anwendung dieser Methode beachtet werden [17]:

- Man kann damit nur den Erdungswiderstand eines Erders bestimmen, welcher mit einem niederohmigen Erdungssystem (= Gegenerde) verbunden ist
- Das Verfahren eignet sich aufgrund der Höhe des Prüfstromes nur für kleine Erdungssysteme
- Hochfrequente Einkopplungen (FU Betrieb, ...) in das System können die Messung verfälschen

2.9.2.3 3-Punkt-Methode

Die 3-Punkt-Methode ist das am häufigsten in der Praxis angewendete Verfahren, und in den meisten handelsüblichen Erdungsmessgeräten implementiert. Es wird meist für kleine Erdungsanlagen verwendet. Der Messaufwand ist überschaubar und Messungen sind auch als einzelner Anwender durchführbar. Die Messung wird laut Abbildung 2.36 aufgebaut. Es gibt einen Strom- und einen Spannungszweig. Zwischen dem Erdungssystem und der Hilfselektrode wird ein Strom eingespeist, und gleichzeitig zwischen dem Erdungssystem und der Sonde die Spannung gemessen. Der Spannungszweig soll mindestens in einem Winkel von 60° zum Stromzweig stehen, um etwaige Beeinflussungen zu vermeiden. [17]

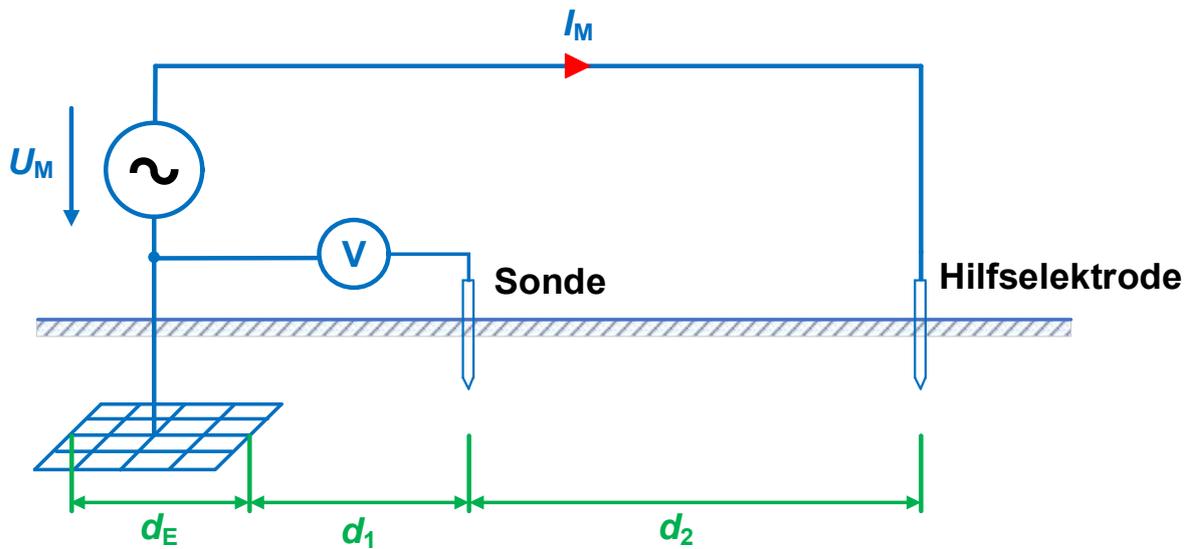


Abbildung 2.36: 3-Punkt-Methode (in Anlehnung an [44])

Bei der Wahl des Messelektrodenabstandes muss wieder darauf geachtet werden, dass sich die entstehenden Potentialtrichter nicht überschneiden. Als Faustregel kann Formel (2.68) verwendet werden. [44]

$$d_1 + d_2 > 3 \cdot d_E \quad (2.68)$$

2.9.2.4 Fall-of-Potential-Methode

Diese Methode ist eine Abwandlung der 3-Punkt-Methode. Der Messaufbau erfolgt laut Abbildung 2.37 und funktioniert analog zur 3-Punkt-Methode. Die entstehenden Potentialtrichter der einzelnen Elektroden dürfen sich nicht überschneiden, daher ist es vorteilhaft, dass der Abstand d zwischen dem zu untersuchenden Erdungssystem und der Hilfselektrode so groß wie möglich ist. In der Praxis ist man jedoch oft durch bauliche Gegebenheiten begrenzt, bzw. ist auch die Messstromhöhe ein limitierender Faktor.

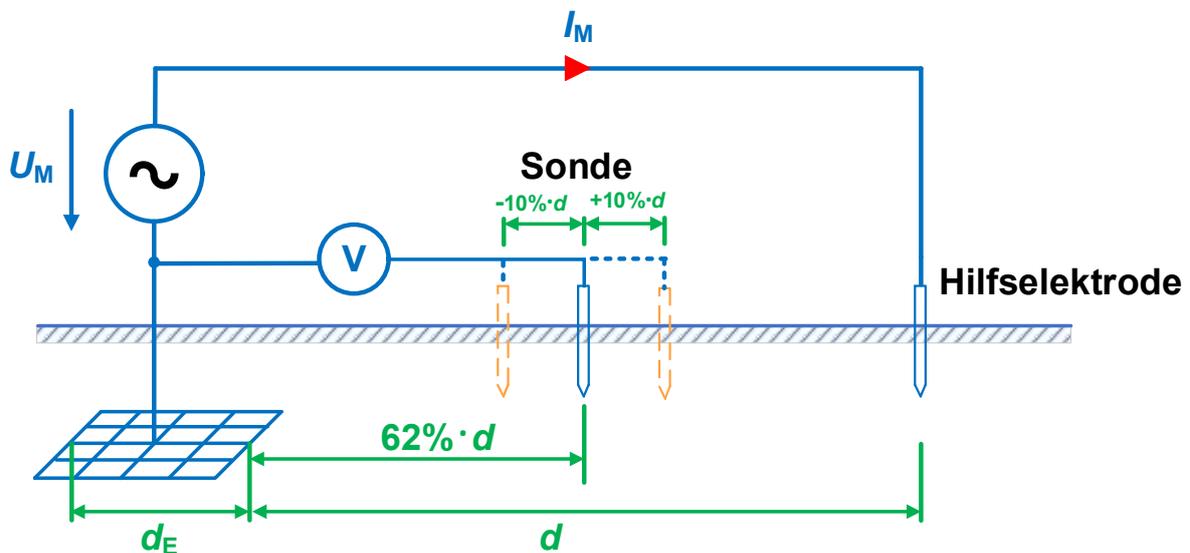


Abbildung 2.37: Fall-of-Potential-Methode (in Anlehnung an [39])

Nach [17] soll der Abstand d mindestens dem 5-Fachen der Abmessung d_E des Erdungssystems entsprechen. Die Sonde für die Spannungsmessung muss weit genug vom Erdungssystem entfernt sein, um nicht in den Einflussbereich des Potentialtrichters des Erdungssystems zu kommen. Durch analytische Berechnungen mit Halbkugelerdern hat sich ergeben, dass der ideale Spannungswert bei einem Abstand von $62\% \cdot d$ liegt. Zu beachten ist jedoch, dass der Abstand von $62\% \cdot d$ unter der Annahme eines homogenen Erdbodens berechnet wurde, daher kann es in der Praxis zu Abweichungen kommen. Es empfiehlt sich außerdem, die Sonde für die Spannungsmessung jeweils um $\pm 10\%$ von d zu versetzen und zu überprüfen, ob der Spannungs- bzw. Widerstandswert einer großen Änderung unterliegt. Ist dies der Fall, so liegt man im Einflussbereich eines Potentialtrichters und sollte somit die Entfernung zwischen Erdungssystem und Hilfelektrode erhöhen. [17], [23], [39]

2.9.2.5 Methode mit Strominjektion

Diese Methode verwendet man meist für große Erdungssysteme. Der Messaufbau ist in Abbildung 2.38 dargestellt. Durch das Verfahren soll ein Erdschluss mit geringer Fehlerstromamplitude (10 A bis 300 A) simuliert werden. Am zu untersuchenden Erdungssystem (meist eine Mittelspannungsstation, Umspannwerk, ...) wird durch spezielle Messgeräte oder einen Ersatzstromgenerator ein Strom in das System eingespeist.

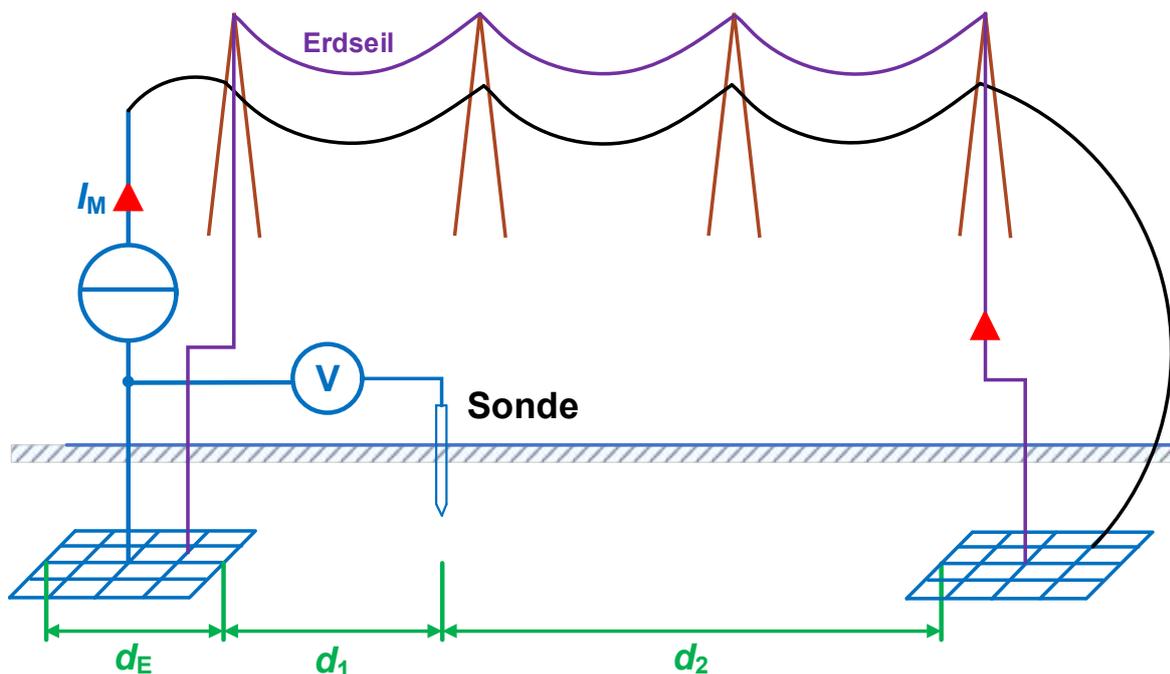


Abbildung 2.38: Methode mit Strominjektion (in Anlehnung an [44])

Die Frequenz des eingespeisten Stromes weicht in den meisten Fällen von der Betriebsfrequenz ab, um etwaige Einkopplungen zu vermeiden. Mit frequenzselektiven Messgeräten können während der Messung alle interessierenden Ströme und Spannungen gemessen werden (siehe hierzu auch Abschnitt 2.9.2.9). Anschließend kann man die Messwerte auf den realen Fehlerstrom skalieren, jedoch sollte dafür der Messaufbau den realen Netzkonstellationen entsprechen, ansonsten muss mit entsprechenden Fehlern gerechnet werden. Anzumerken ist hier, dass aufgrund des hohen Prüfstromes eine entsprechende Entfernung zur Gegenelektrode eingehalten werden muss. Für den Versuch

benötigt man deshalb eine freigeschaltete Leitung oder ein Kabel, was daher mit einem größeren Organisationsaufwand verbunden ist. [17], [45]

Folgende Parameter können beispielsweise festgestellt werden [45]:

- Durchgängigkeit des Erdungssystems
- Bestimmung der Erdungsspannung
- Bestimmung der Erdungsimpedanz
- Schritt- und Berührungsspannung
- Stromverteilung aufgrund angeschlossener Erdseile, Kabelschirme, ...

2.9.2.6 Netzversuch mit Nennspannung - Staged fault tests

Bei diesem Versuch wird ein realer Erdschlussversuch durchgeführt und zeitgleich alle interessierenden Spannungen und Ströme gemessen. Der Versuch kann mit voller oder verminderter Nennspannung durchgeführt werden. Aufgrund der Spannungs- sowie Stromhöhe müssen meist Spannungs- und Stromwandler eingesetzt werden. Alle bisherigen Verfahren arbeiten nur mit verminderten Spannungen und Strömen, wohingegen bei dieser Methode die realen Verhältnisse festgestellt werden können. Durch dieses Verfahren können außerdem transiente Vorgänge im Fehlerfall aufgenommen und analysiert werden. Der große Nachteil ist der hohe Organisations- und Sicherheitsaufwand. Bevor der Test durchgeführt wird, muss der Versuchsaufbau mit einer anderen Methode (z.B. 3-Punkt-Methode) auf gefährliche Schritt- und Berührungsspannungen überprüft werden. [17]

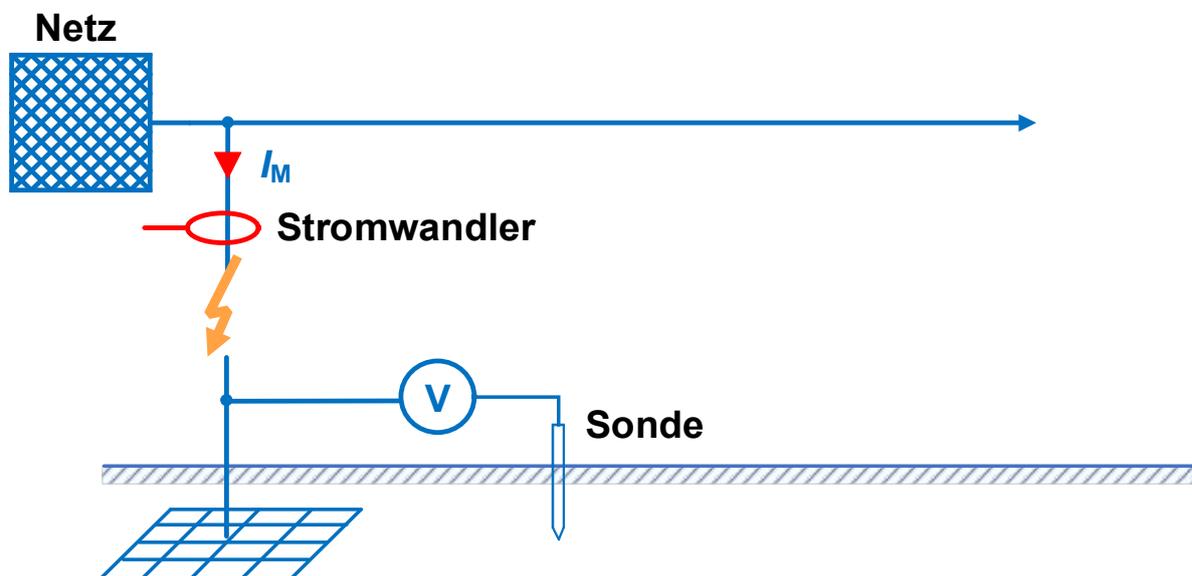


Abbildung 2.39: Netzversuch mit Nennspannung (in Anlehnung an [44])

2.9.2.7 Zusammenfassung

Tabelle 5: Zusammenfassung Methoden-Erdungsmessung [44]

Methode	Vorteile	Nachteile	Anwendung
2-Punkt / Zangen-Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr schnell • Keine Unterbrechung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ungenau • Begrenzte Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgangsprüfung • Erste Abschätzung
3-Punkt-Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Schnell • Keine Unterbrechung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine Erdungssysteme • Keine Verbindung zu anderen Systemen 	<ul style="list-style-type: none"> • Privatbereich, Gewerbe • Kleine Mittelspannungsstationen
Fall-of-Potential	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Unterbrechung • Messung von Schritt- und Berührungsspannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Breites Anwendungsspektrum
Methode mit Strominjektion	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Ströme • Messung von Schritt- und Berührungsspannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Aufwand • Freischalten von Kabel oder Leitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Große Erdungssysteme
Staged fault tests	<ul style="list-style-type: none"> • Realitätsnahe Nachbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hoher Aufwand • Sicherheitsrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr große Erdungssysteme • Umspannwerke

2.9.2.8 Messabweichungen

Die Messabweichung beschreibt den Unterschied zwischen dem gemessenen und dem wahren Wert. Man unterscheidet zwischen zufälligen und systematischen Messabweichungen. Zufällige Messabweichungen schwanken in Größe und Vorzeichen, des Weiteren treten sie zufällig auf und sind nicht beeinflussbar. Systematische Abweichungen sind in Betrag und Vorzeichen bekannt und wiederholen sich bei gleichem Versuchsaufbau und Umgebungsbedingungen. Ein Beispiel für eine systematische Abweichung ist beispielsweise ein nicht kalibriertes Messgerät. Bei Erdungsmessungen ereignen sich häufig folgende Abweichungen [23]:

Tabelle 6: Messabweichungen

Zufällige Messabweichungen	Systematische Messabweichungen
<ul style="list-style-type: none"> • Induktive Beeinflussung • Kapazitive Beeinflussung • Ohm'sche Beeinflussung • Metallische Körper im Erdreich (Tanks, Pipelines, ...) • Strömungsfelder im Erdreich (Bahnanlagen, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wandlerfehler • Messgerätefehler (Kalibrierung, Messabweichung, ...)

2.9.2.9 Frequenzselektive Messung

Dieses Verfahren wird zum Beispiel bei der Methode mit Strominjektion angewendet. Der in das Erdungssystem eingespeiste Strom weist eine Frequenz auf, welche sich von den Betriebsfrequenzen (50 Hz, 60 Hz, 16,7 Hz, Oberschwingungsfrequenzen) unterscheidet. Die Schritt- und Berührungsspannungen sollen jedoch bei Betriebsfrequenz bestimmt werden, daher dürfen die gewählten Frequenzen nicht zu weit davon abweichen. Es sind aber interpolierte Werte aus mehreren Messungen mit verschiedenen Frequenzen erlaubt, beispielsweise kann eine Messung bei 30 Hz und eine weitere bei 70 Hz erfolgen und aus den beiden Messwerten der Mittelwert berechnet werden. Meist wird die frequenzselektive Messung mithilfe einer Fourier-Transformation verwirklicht. Zur Messung der Spannungen sind am Markt eigens dafür entwickelte Messgeräte erhältlich. [22]

2.10 Softwarepaket XGSLab™

Mit der Software XGSLab™ können elektromagnetische Simulationen für energietechnische Anwendungen durchgeführt werden. Hauptsächlich wird es für die Simulation von Erdungs- und Blitzschutzanlagen verwendet. Eine Auswertung von Schritt- und Berührungsspannungen ist nach den aktuell geltenden EN- und IEEE Normen möglich. Die Software gliedert sich in unterschiedliche anwendungsspezifische Module, welche in Abbildung 2.40 kurz erläutert werden.

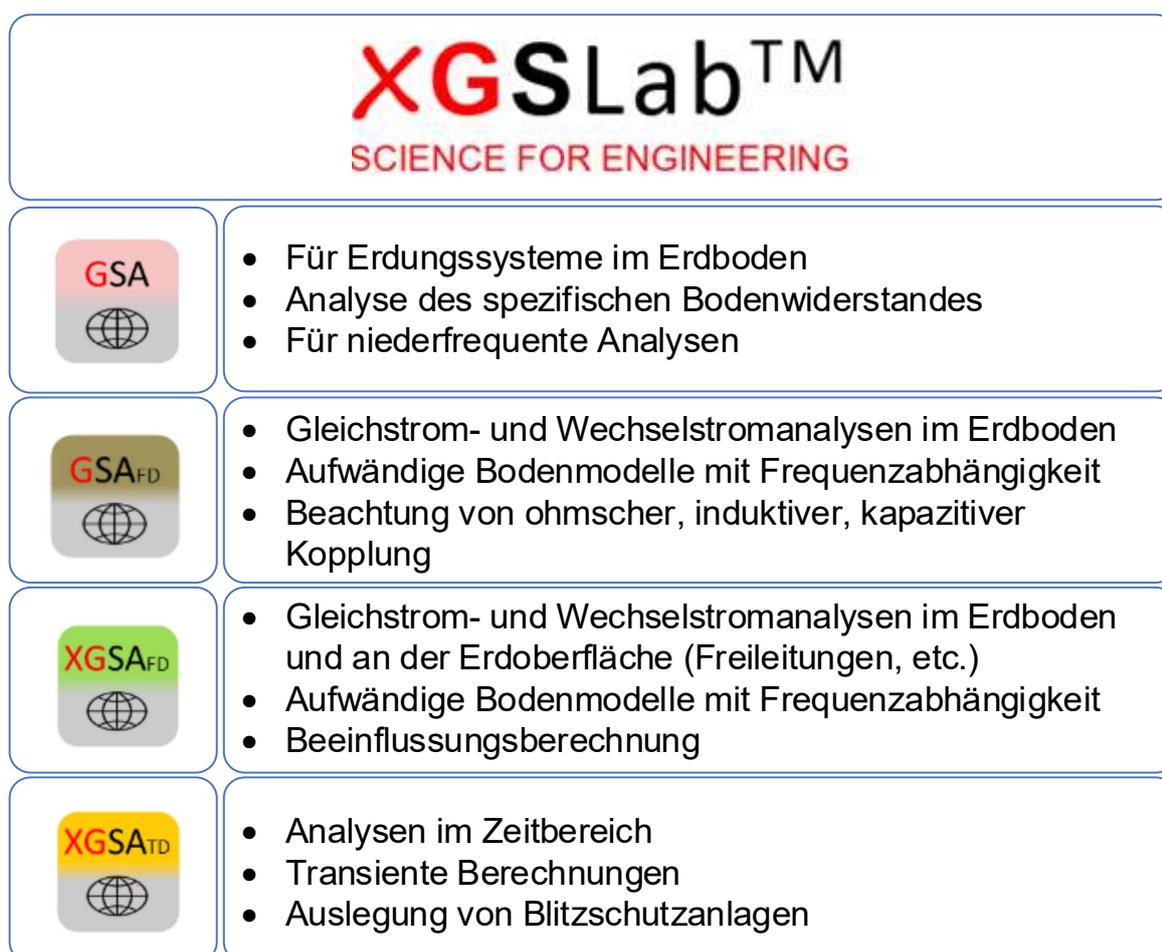


Abbildung 2.40: Übersicht der Software XGSLab™ (Informationen aus [46])

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird das Modul XGSA_{FD} verwendet. Das Modul unterstützt alle in Abbildung 2.41 angegebenen Bodenmodelle, bis auf Nummer 4. Es können die Messwerte, die bei der spezifischen Bodenwiderstandsmessung ermittelt wurden, in das Programm eingegeben werden und dieses errechnet ein passendes Bodenmodell dafür, welches für die weitere Simulation verwendet werden kann.

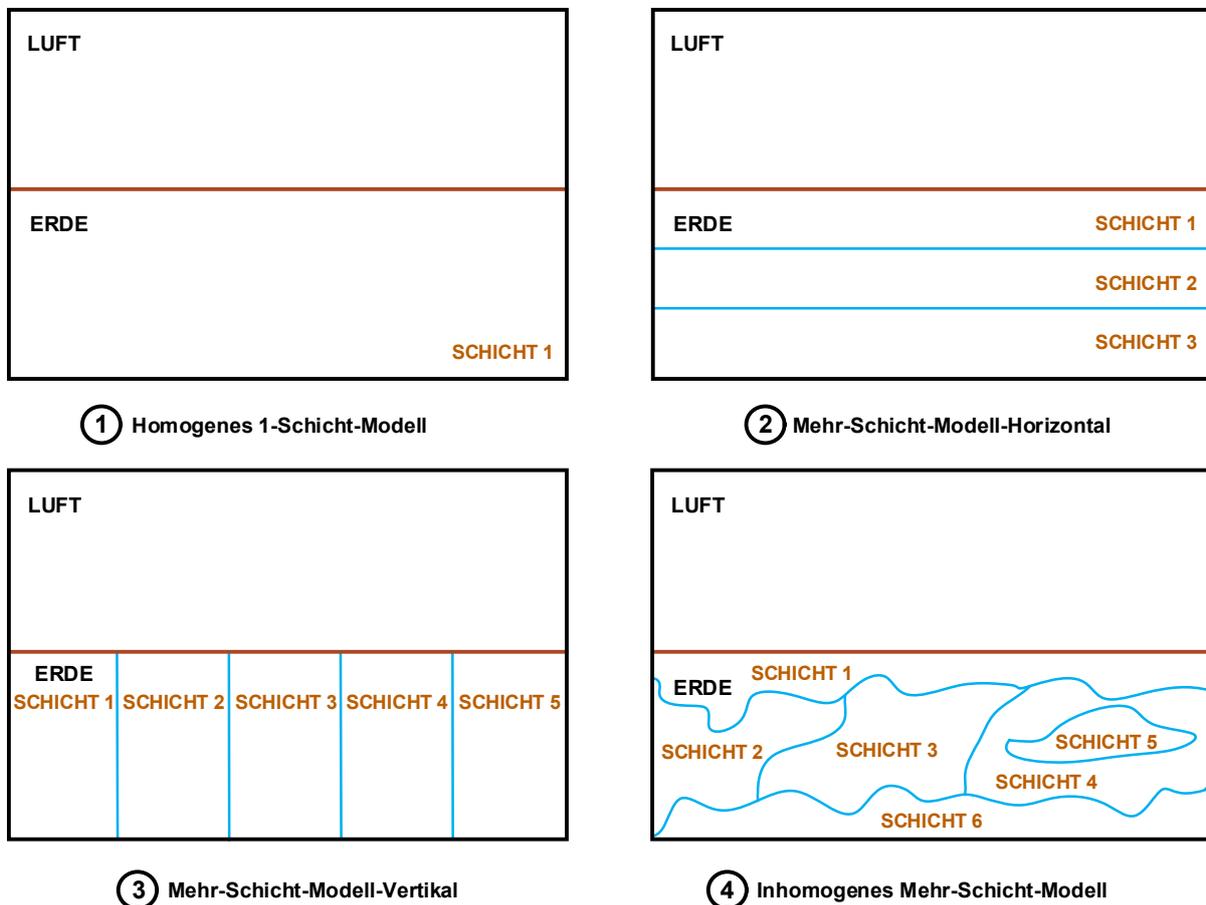


Abbildung 2.41: Bodenmodelle (in Anlehnung an [47])

Das zu untersuchende Simulationsmodell kann direkt in XGSLabTM erstellt werden oder durch eine externe CAD-Software wie beispielsweise Autodesk AutoCAD[®] modelliert und anschließend als dxf-Dateiformat importiert werden. Alle Elemente mit denselben Eigenschaften sollen auf einem gemeinsamen Layer gezeichnet werden. Bei der Modellierung ist außerdem zu beachten, dass die positive z-Achse nun in den Erdboden zeigt (siehe Abbildung 2.42).

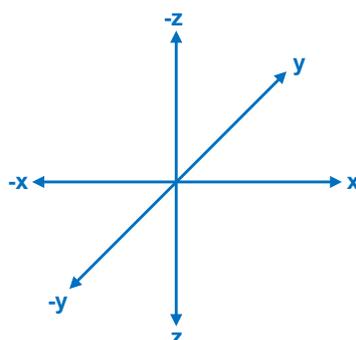


Abbildung 2.42: Koordinatensystem in XGSLabTM

In der Simulationssoftware können jedem einzelnen Element seine entsprechenden Eigenschaften wie Material oder Durchmesser zugewiesen werden. Durch die Simulation ist es möglich, beispielsweise die Fehlerstromaufteilung im Erdungssystem sowie die Erdungsspannung und Schritt- sowie Berührungsspannung darzustellen bzw. zu analysieren. Außerdem können alle Messdaten als csv-Datei exportiert werden, um eine Weiterverarbeitung in Microsoft Excel® oder MATLAB® zu ermöglichen. In den folgenden Abbildungen werden kurze Einblicke in die Software gegeben, für den interessierten Leser*in wird für genauere Informationen auf den ausführlichen User-Guide von XGSLab™ verwiesen.

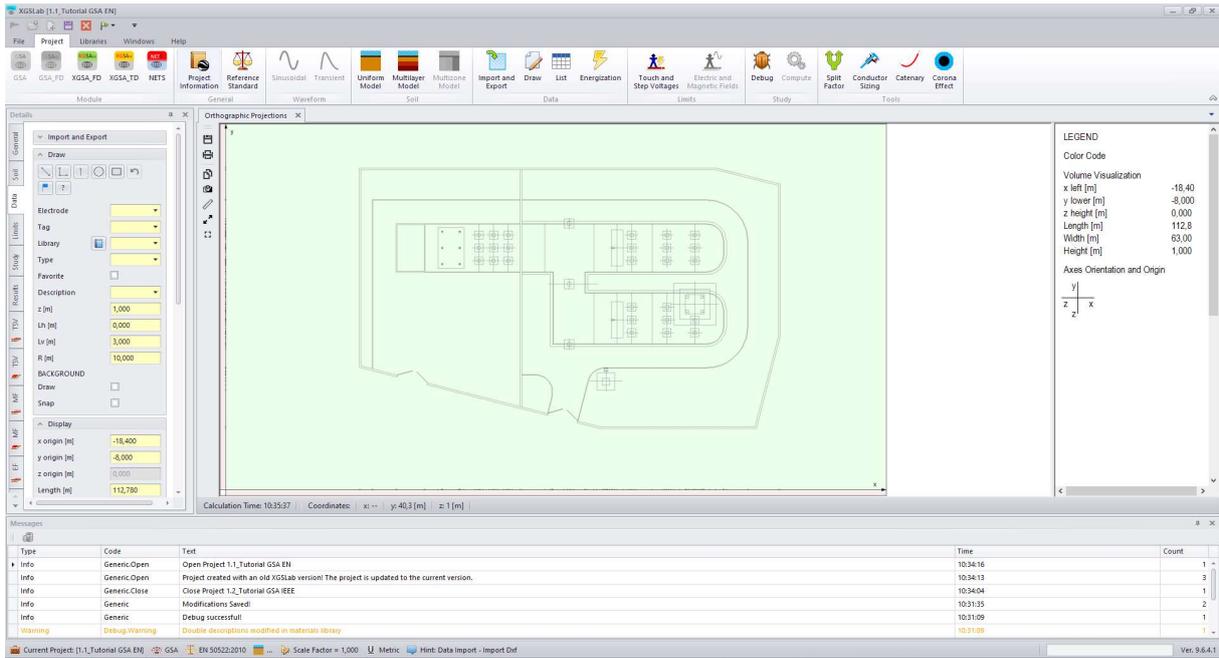


Abbildung 2.43: Grafik-Editor

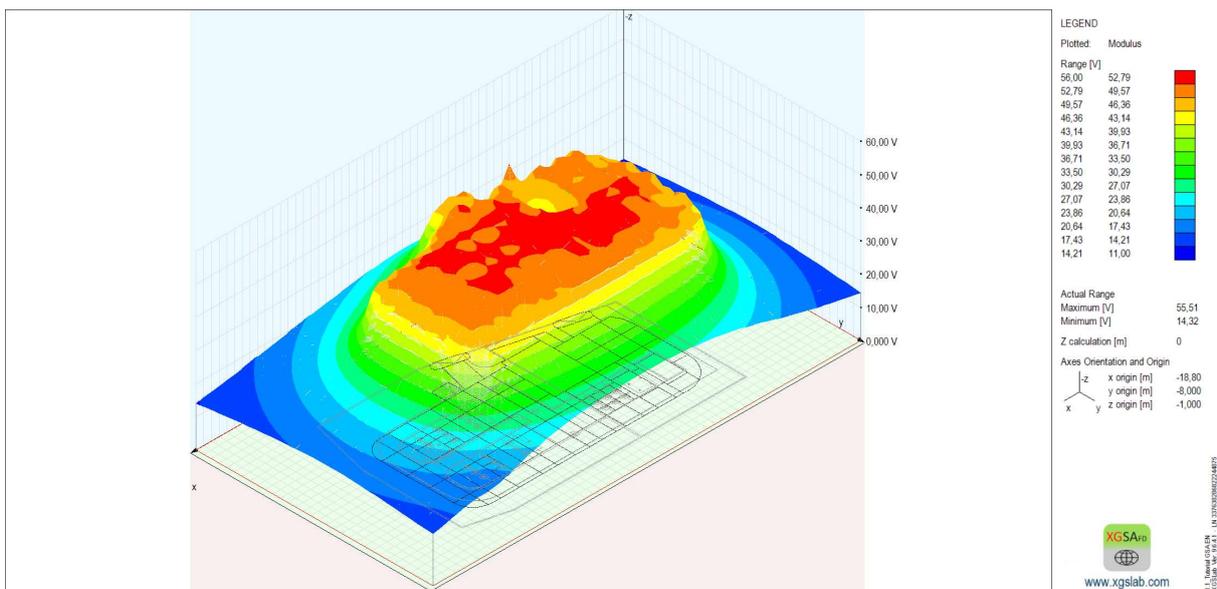
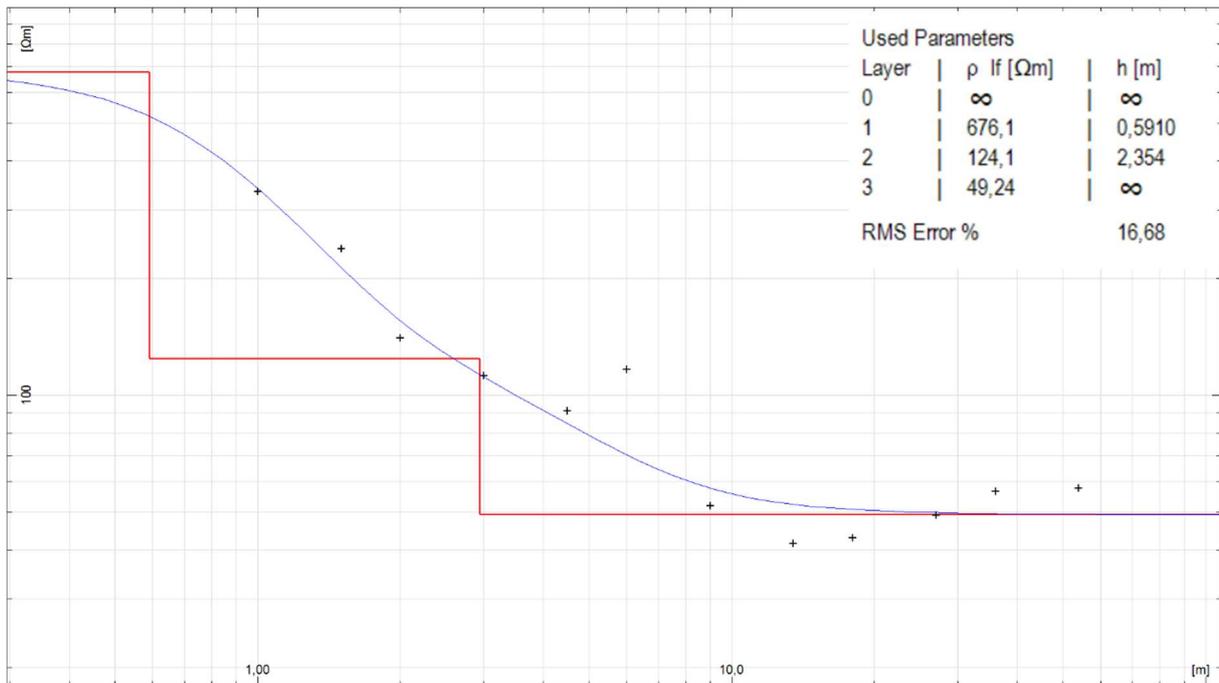


Abbildung 2.44: Darstellung des Potentialverlaufs



Legende:

- Gemessene Werte +
- Berechnete Werte —
- Verwendetes Modell —

Abbildung 2.45: 3-Schicht-Bodenmodell in XGSLab™

2.11 Formeln für einfache Erderanordnungen

Um Simulationsergebnisse auf ihre Plausibilität zu überprüfen, werden die unten angegebenen Formeln für vereinfachte Erderanordnungen verwendet. Die Formeln (2.69) und (2.70) wurden aus [48] entnommen.

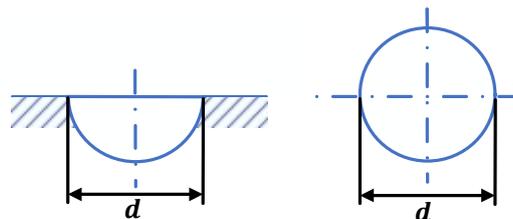


Abbildung 2.46: Halbkugelerder

$$R_{E_HK} = \frac{\rho_E}{\pi \cdot d} \tag{2.69}$$

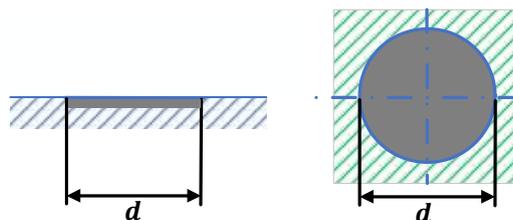


Abbildung 2.47: Kreisplattenerder

$$R_{E_KP} = \frac{\rho_E}{2 \cdot d} \tag{2.70}$$

3 Modellbildung und Simulation

In diesem Kapitel werden die verwendeten Simulationsmodelle genauer erläutert. Die in Abbildung 3.1 aufgelisteten Softwarepakete werden dafür verwendet. In Microsoft Excel® und MATLAB® wird jeweils eine Kettenleiterstruktur, welche einzelne Nieder- bzw. Mittelspannungsabzweige simuliert, implementiert. Die Herleitung des Kettenleitermodells sowie seine Struktur und Eigenschaften werden in den Abschnitten 3.1 und 3.2 näher erläutert.

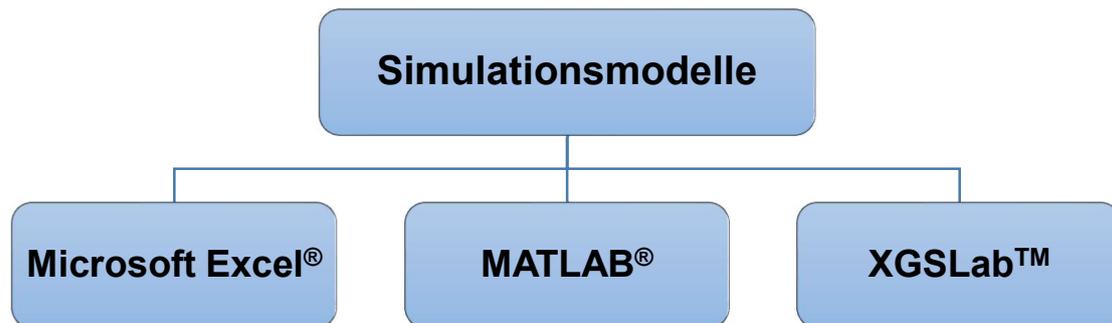


Abbildung 3.1: Verwendete Softwarepakete

In Microsoft Excel® wird ein aus modularen Bausteinen bestehender Kettenleiter entwickelt, welcher in der Praxis zur schnellen Abschätzung der Erdungsimpedanz von Mittelspannungsschaltstationen dient. Die einzelnen Bausteine und Eingabefelder werden in Abschnitt 3.3 erklärt. Des Weiteren wird ein Kettenleiter in MATLAB® implementiert und einzelne Netzstrukturen damit simuliert und analysiert (siehe Abschnitt 3.4). Außerdem wird die Auswirkung der einzelnen Bauteilparameter auf den Kettenleiter untersucht. Für eine Mittelspannungsschaltstation mit angeschlossenen Niederspannungsabzweigen werden für bestimmte Parameterkonstellationen, Bereiche für die Erdungsimpedanz in Betrag und Winkel angegeben. Bei ähnlichen realen Anlagenverhältnissen ist so eine erste, wenn auch fehlerbehaftete, grobe Aussage über die Erdungsimpedanz möglich. Mithilfe einer Impedanzmessung können die Simulationswerte verifiziert werden. Mit XGSLab™ werden ebenfalls Netzstrukturen simuliert und analysiert. In Abschnitt 3.5 werden einzelne Simulationen von XGSLab™ mit dem Kettenleiter in MATLAB® verglichen und auftretende Abweichungen diskutiert.

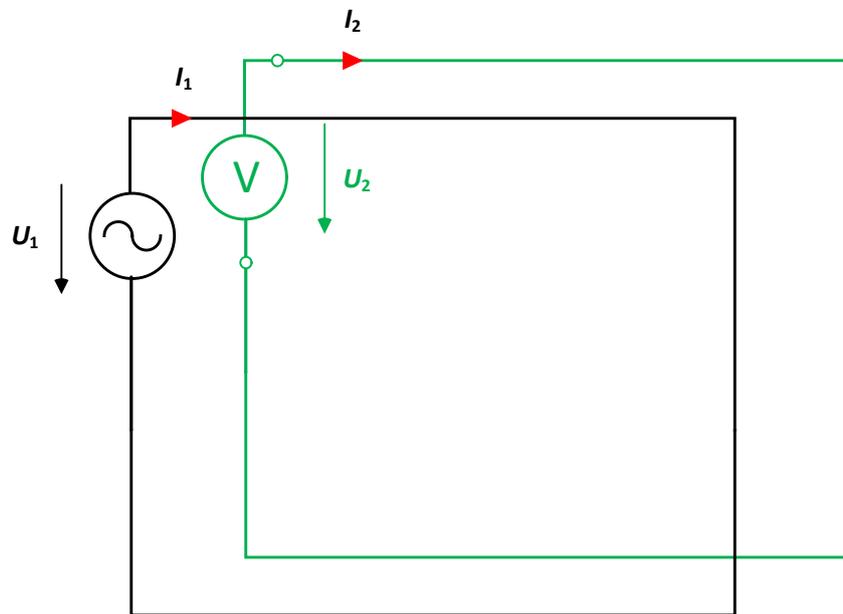
3.1 Herleitung des Kettenleitermodelles

Bei der Herleitung des Kettenleitermodells geht man von zwei induktiv gekoppelten Leiterschleifen (siehe Abbildung 3.2) aus. Legt man an eine Leiterschleife die Spannung U_1 an, so fließt dort bedingt durch die Impedanz des Leiters ein Strom I_1 . Misst man nun mit einem (im Idealfall unendlich hoher Innenwiderstand) Voltmeter an den Klemmen der zweiten Leiterschleife, so misst man dort bedingt durch die induktive Kopplung der Leiter eine Spannung U_2 . Nun werden beide Leiterschleifen teilweise in Erde vergraben (siehe Abbildung 3.3). Dadurch werden die fließenden Ströme von den Selbstimpedanzen der Leiter sowie von den Koppelimpedanzen zwischen den Leitern beeinflusst. Dies

ist auch zu erkennen, wenn man die in Abbildung 3.3 eingezeichneten Maschengleichungen aufstellt, dadurch erhält man folgende Formeln:

$$U_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 \quad (3.1)$$

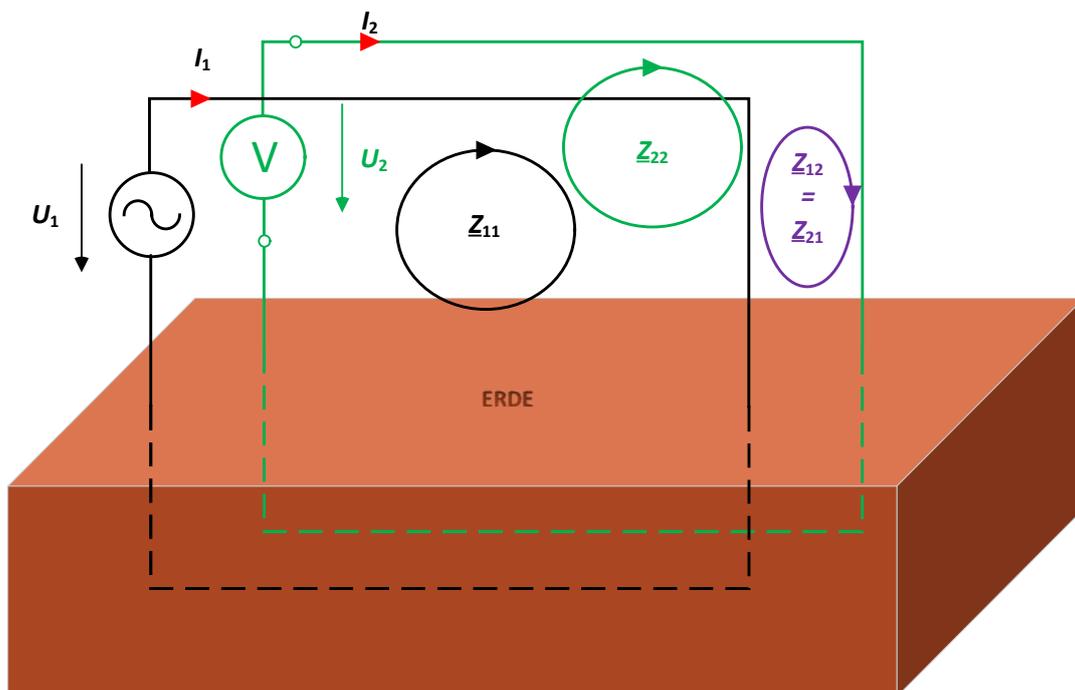
$$U_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 \quad (3.2)$$



Legende:

- | | | | |
|-------|--|-------|---|
| U_1 | Angelegte Spannung an Leiterschleife 1 | U_2 | Induzierte Spannung in Leiterschleife 2 |
| I_1 | Strom in Leiterschleife 1 | I_2 | Strom in Leiterschleife 2 |

Abbildung 3.2: Induktiv gekoppelte Leiterschleifen (in Anlehnung an [12])



Legende:

- | | | | |
|----------|---------------------------------|----------|---------------------------------|
| Z_{11} | Selbstimpedanz Leiterschleife 1 | Z_{22} | Selbstimpedanz Leiterschleife 2 |
|----------|---------------------------------|----------|---------------------------------|

\underline{Z}_{12} Koppelimpedanz Schleife 1 und 2 | \underline{Z}_{21} Koppelimpedanz Schleife 2 und 1

Abbildung 3.3: Induktiv gekoppelte Leiterschleife im Erdboden (in Anlehnung an [12])

Im nächsten Schritt werden die Leiter in der Erde zu einem gemeinsamen Rückleiter zusammengefasst (siehe Abbildung 3.4). Die Verbindung, an welcher sich das Voltmeter befindet, ist in der Realität durchverbunden. Das Modell spiegelt jetzt einen Leiter mit angrenzendem Schirm wider. Es kann daher für die Modellierung von Kabeln oder Freileitungen mit Erdseil verwendet werden. Die Bedingung dabei ist aber, dass der Abstand zwischen Leiter und Kabelschirm bzw. Erdseil gering ist, welche in der Praxis zutrifft.

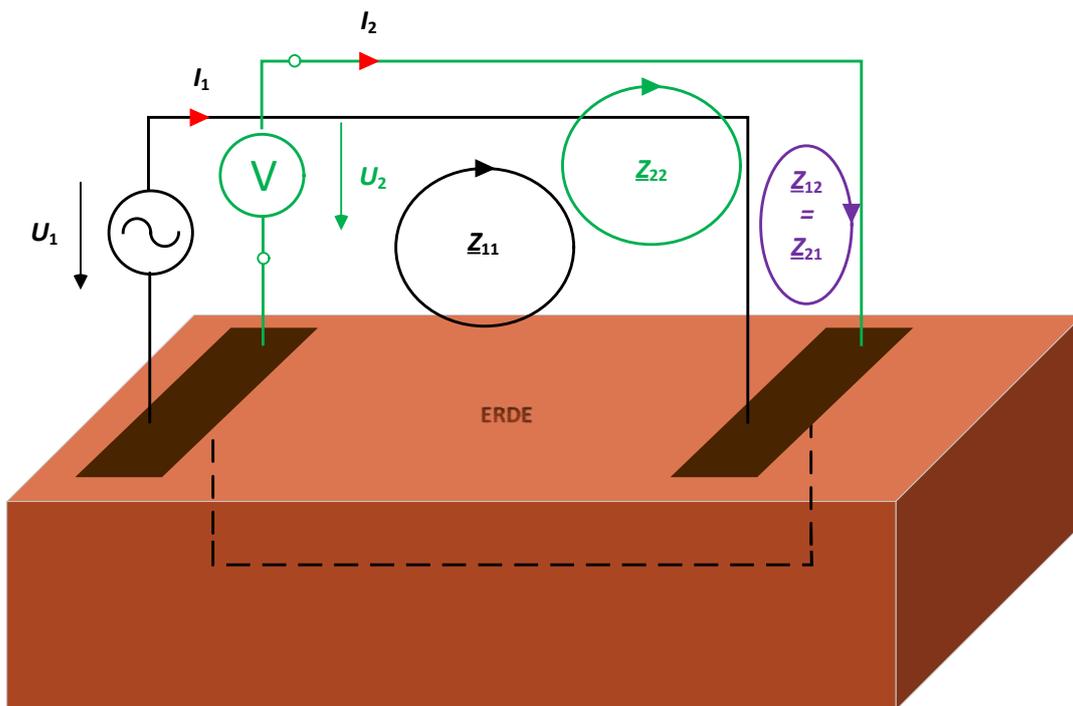
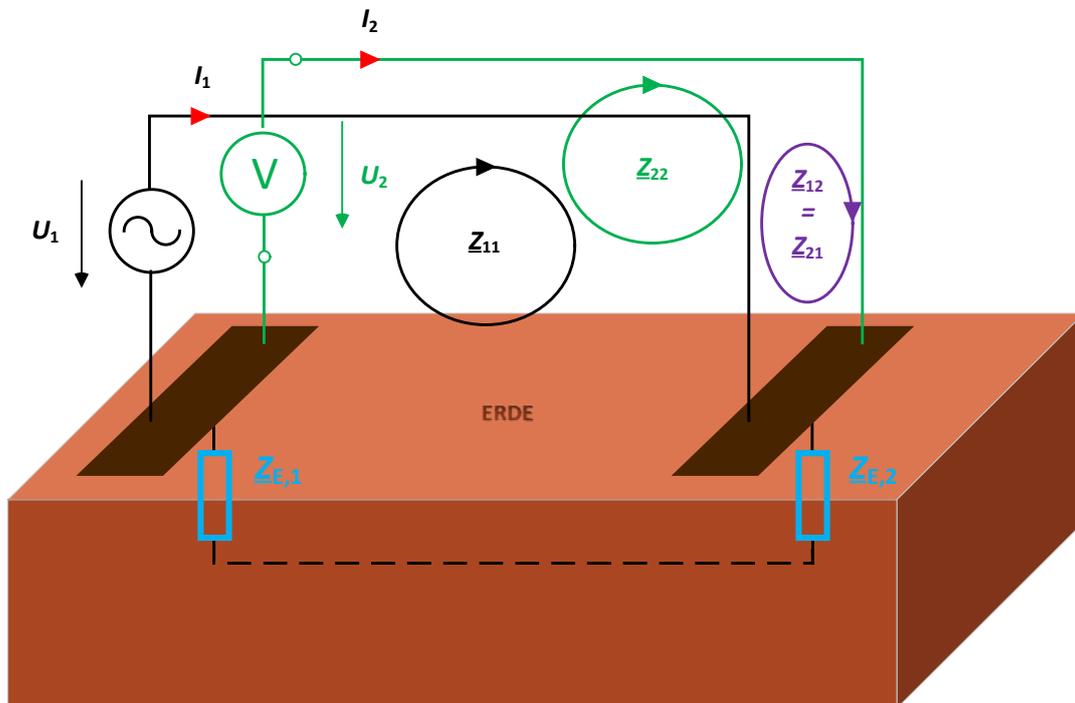


Abbildung 3.4: Leiterschleifen mit gemeinsamer Rückleitung über Erde (in Anlehnung an [12])

Im nächsten Schritt werden die Übergangsimpedanzen an den Leitungsenden miteinbezogen (siehe Abbildung 3.5). In der Realität stellen diese Widerstände die Erdungswiderstände, welche in der Regel nur einen ohmschen Anteil aufweisen, von den jeweiligen Anlagen dar. Man kann dieses Modell, wie in Abbildung 3.6 gezeigt, auf ein reales Szenario übertragen. Der linke Zweig stellt ein Umspannwerk dar, in welchem der Sternpunkt durch eine Impedanz $\underline{Z}_{\text{sternp}}$ mit der lokalen Anlagenerde verbunden ist. Der Übergangswiderstand zur Erde wird hier als $R_{E,1}$ bezeichnet. Der rechte Zweig stellt eine Ortsnetzstation dar, in welcher sich ein einpoliger Erdschluss ereignet. Der Erdungswiderstand der Ortsnetzstation wird als $R_{E,2}$ bezeichnet. Die Verbindung zwischen den beiden Anlagen wird durch ein Kabel mit Schirm hergestellt. Der Leiter sowie der Schirm des Kabels weisen je eine Impedanz auf. An der Fehlerstelle teilt sich der Fehlerstrom je nach Reduktionsfaktor auf. Ein Teil fließt über die Anlagenerde der Ortsnetzstation zur Quelle zurück, der andere Fehlerstromanteil fließt über den niederohmigen Kabelschirm zur Spannungsquelle zurück. Der Stromfluss in Erde erfolgt je nach Länge des verwendeten Leiters und der Frequenz in der Tiefe δ_E bzw. d_E , welche wie bereits im Theorieteil dieser

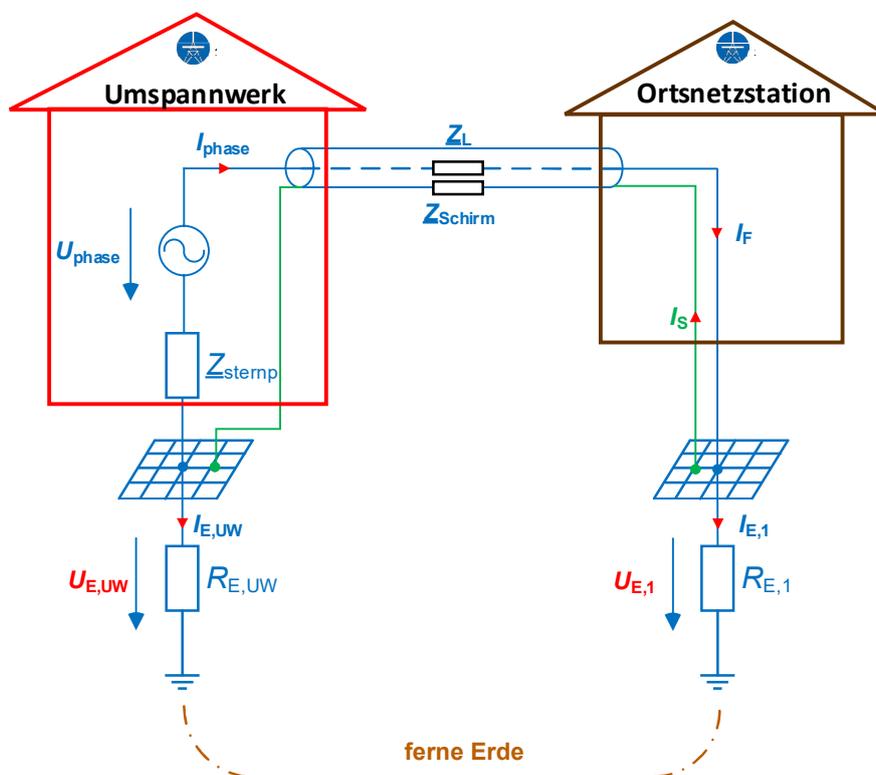
Arbeit (Abschnitt 2.7) die Rückstromtiefe des Stromes darstellt. Das Modell aus Abbildung 3.6 lässt sich nun auf mehrere angeschlossene Ortsnetzstationen erweitern (siehe Abbildung 3.7).



Legende:

$Z_{E,1}$ Übergangsimpedanz Kabelanfang | $Z_{E,2}$ Übergangsimpedanz Kabelende

Abbildung 3.5: Leiterschleifen mit Übergangsimpedanzen (in Anlehnung an [12])



Legende:

$R_{E,UW}$ Übergangsimpedanz Umspannwerk | $R_{E,1}$ Übergangsimpedanz Gebäude 1

I_F	Fehlerstrom	I_E	Fehlerstrom durch die Anlagenerde
I_S	Fehlerstrom durch den Kabelschirm	U_E	Erdungsspannung
Z_L	Impedanz des Leiters	Z_{Schirm}	Schirmimpedanz
U_{phase}	Netzspannung	Z_{sternp}	Impedanz des Sternpunktes

Abbildung 3.6: Geändertes Modell (in Anlehnung an [12])

Der Fehlerstromanteil I_E , welcher durch die Anlagenerdung fließt, verursacht dort die Erdungsspannung U_E . Diese ist für das Entstehen von Schritt- und Berührungsspannungen verantwortlich. Durch die Berücksichtigung von mehreren Ortsnetzstationen teilt sich der Fehlerstrom auf, dies führt wiederum zu einer niedrigeren Erdungsspannung an den einzelnen Ortsnetzstationen, und schmälert daher den Betrag der dort entstehenden Schritt- und Berührungsspannungen. Auf diesen Sachverhalt wird in späteren Simulationen noch genauer eingegangen.

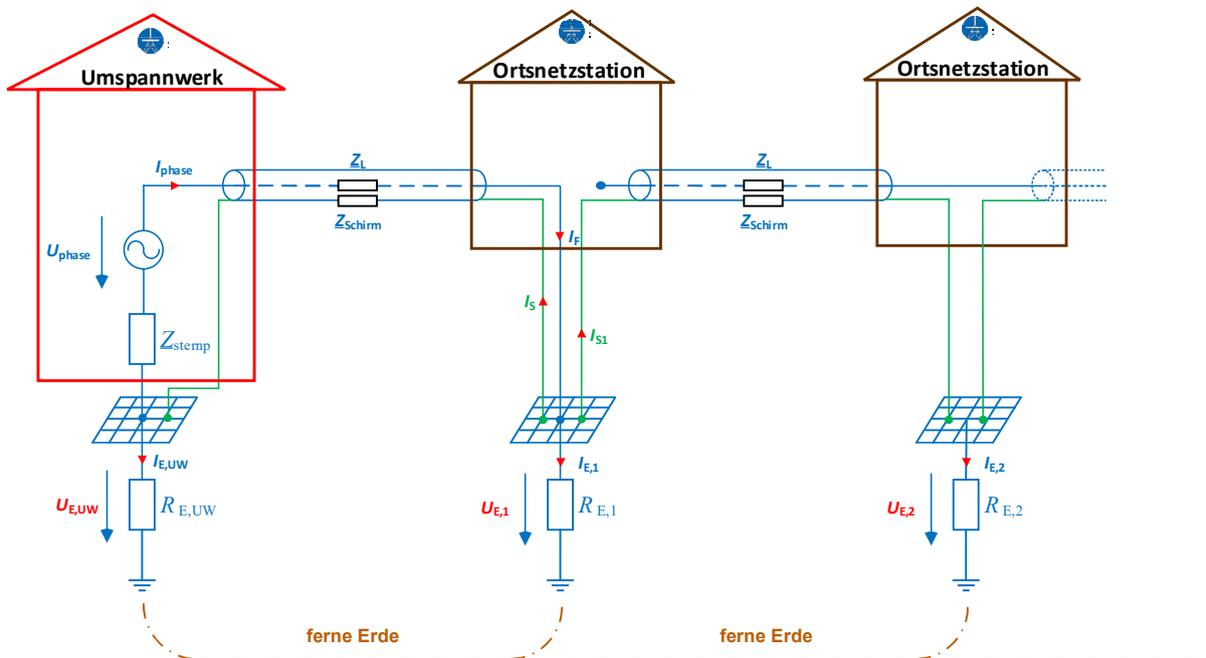


Abbildung 3.7: Modell mit mehreren Ortsnetzstationen (in Anlehnung an [12])

Als Fehlerort wird die erste Ortsnetzstation nach dem Umspannwerk gewählt, da dies bezogen auf die Höhe des Fehlerstromes, den ungünstigsten Fehlerfall darstellt. Wie die Erkenntnisse in [23] zeigen, verbessert sich die Situation durch das Hinzufügen von zusätzlichen Ortsnetzstationen / Gebäuden. In der Ortsnetzstation wird von der Mittel- auf die Niederspannung transformiert. Dort sind auch die Abgänge der Niederspannungsverbraucher angeschlossen. Abhängig vom verwendeten Netzsystem sind die Erdungsanlagen der Niederspannungsverbraucher mit der Mittelspannungsschaltstation meistens über den PEN-Leiter verbunden [23]. Dadurch ergibt sich das vollständige Modell in Abbildung 3.8. Durch die Verbindung der Erdungsanlagen ist es daher möglich, dass es durch einen Fehler auf der Mittelspannungsseite zu einer ungewollten Spannungsverschleppung in den Niederspannungsbereich kommen kann. Die Folge davon ist, dass es an den Verbraucheranlagen zu einer Potentialanhebung des Erdungssystems kommen kann, welche hohe Schritt- und Berührungsspannungen verursachen kann.

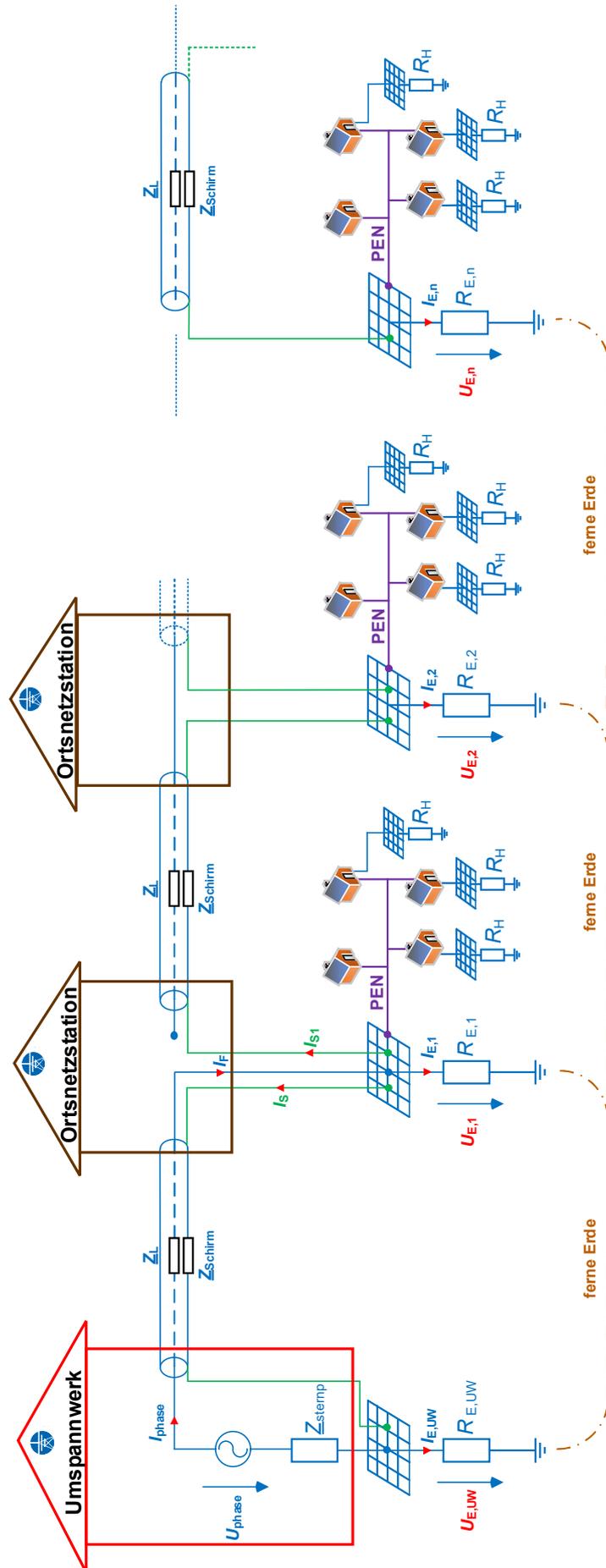


Abbildung 3.8: Vollständiges Modell (in Anlehnung an [12])

3.2 Struktur und Eigenschaften des Kettenleiters

Das Modell von Abbildung 3.8 lässt sich in eine Kettenleiterstruktur überführen, die dann mit Microsoft Excel® oder MATLAB® einfach berechnet und analysiert werden kann. Grundsätzlich besteht die Struktur eines solchen Leiters aus mehreren Kettengliedern, die hintereinandergeschaltet sind. Ein Kettenglied besteht je aus einem Längs- und einem Querelement. Beim homogenen Kettenleiter (siehe Abbildung 3.9) sind alle Längselemente gleich groß und alle Querelemente weisen den identen Wert auf. Wohingegen beim inhomogenen Kettenleiter alle Längs- und Querelemente unterschiedliche Werte annehmen können.

Beim homogenen Kettenleiter gibt es eine Besonderheit. Durch die homogene Struktur hat der Kettenleiter die gleiche Struktur wie eine unendliche Reihe. Es ist daher möglich, einen mathematischen Ausdruck für die Gesamtimpedanz des Kettenleiters zu finden, wenn dieser eine unendliche Anzahl von Kettengliedern besitzt. Diese Formel lässt sich allerdings nur bei einer homogenen Struktur des Kettenleiters anwenden. Dafür wählt man folgenden Ansatz:

$$\underline{Z}_{\text{inf}} = \underline{Z}_S + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_E} + \frac{1}{\underline{Z}_{\text{inf}}}} \quad (3.3)$$

Löst man die Formel (3.3) nach $\underline{Z}_{\text{inf}}$ so ergibt sich Formel (3.4) als Ergebnis, welche der Lösung einer quadratischen Gleichung entspricht.

$$\underline{Z}_{\text{inf}} = \frac{\underline{Z}_S}{2} + \underline{Z}_S \cdot \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_S}} \quad (3.4)$$

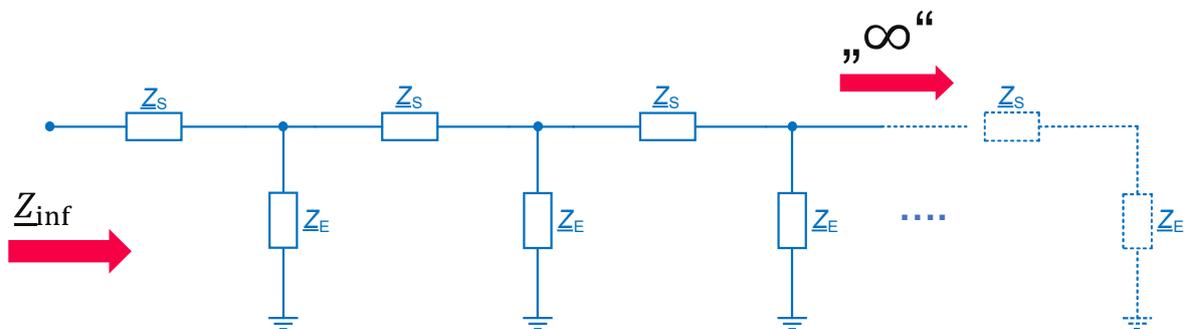


Abbildung 3.9: Homogene Kettenleiterstruktur

Bei einem inhomogenen Kettenleiter kann die Gesamtimpedanz durch mehrmaliges Berechnen einer Serien- und Parallelschaltung ermittelt werden, jedoch hat man hier eine endliche Anzahl von Kettengliedern. Der Mittelspannungsweig kann laut Abbildung 3.10 modelliert werden. Die Querelemente stellen den als rein ohmsch angenommenen Erdungswiderstand (R_E) der verschiedenen Ortsnetzstationen dar. Die Längselemente sind die Schirmimpedanzen (Z_{Schirm}) der Mittelspannungskabel, welche die Ortsnetzstationen miteinander verbinden. Außerdem kann der Erdungswiderstand des Umspannwerkes ($R_{E,UW}$) berücksichtigt werden. An die verschiedenen Ortsnetzstationen werden beliebig viele Niederspannungsabgänge angeschlossen (siehe Abbildung 3.11). Die Querelemente der Niederspannungsabgänge stellen die Erdungswiderstände (R_H) der

Gebäude dar. Die Längselemente stellen die Impedanz des PEN-Leiters (Z_{PEN}) dar, mit welchem die Gebäude mit der Ortsnetzstation verbunden sind. Das vollständige Kettenleiternetzwerk zeigt Abbildung 3.12.

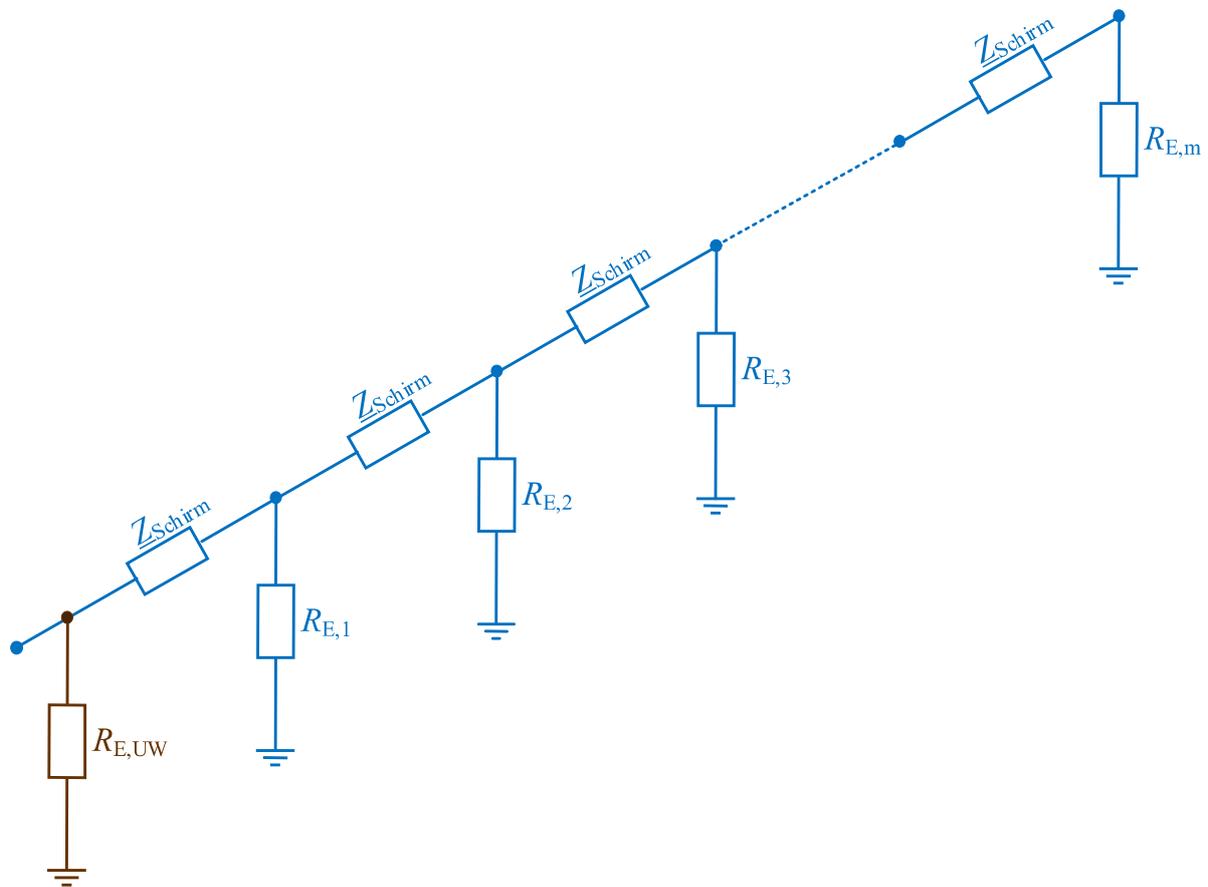


Abbildung 3.10: Kettenleiter des Mittelspannungssystems

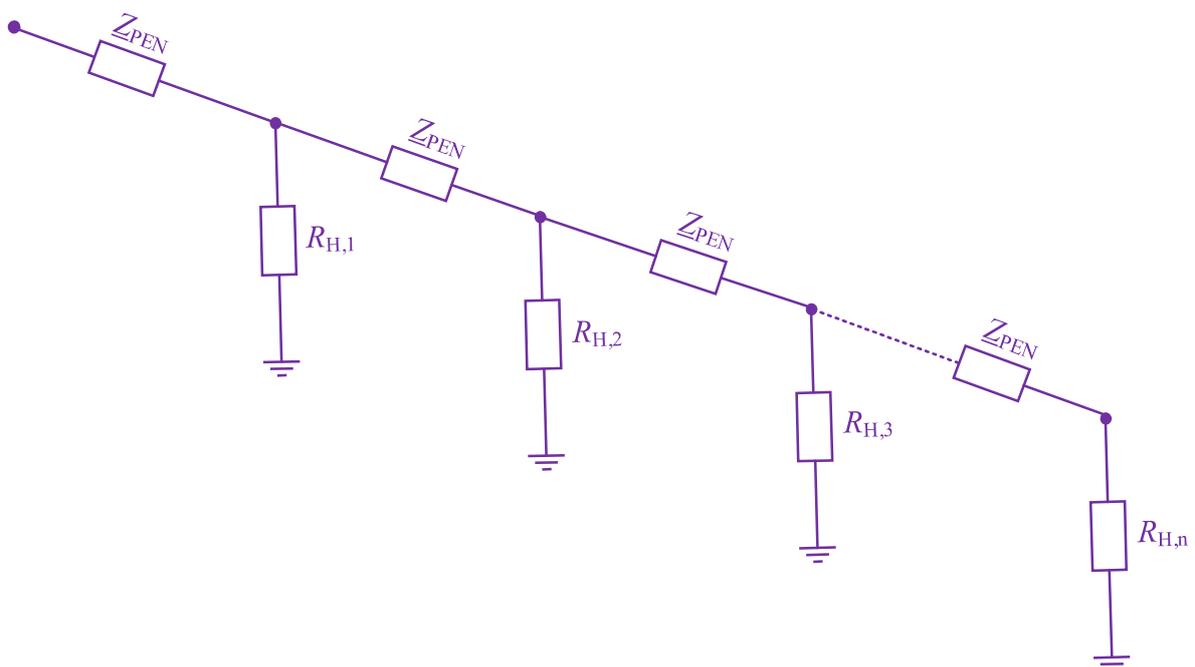


Abbildung 3.11: Kettenleiter eines Niederspannungsabzweiges

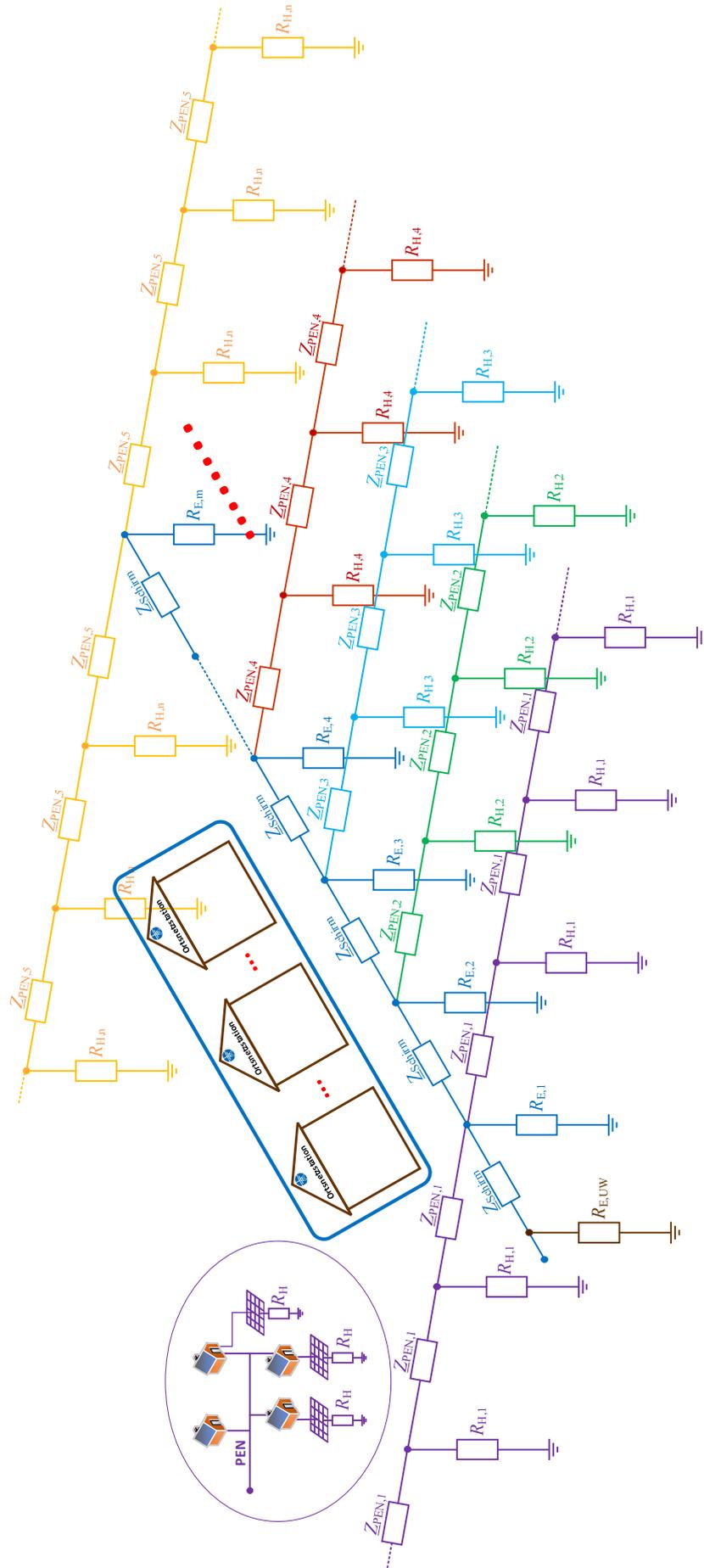


Abbildung 3.12: Vollständiges Kettenleiternetzwerk

3.3 Realisierung des Kettenleiters in Microsoft Excel®

In den folgenden Abschnitten wird auf die Realisierung des Kettenleiters in Microsoft Excel® genauer eingegangen. Dieser besteht aus verschiedenen Modulen, die beliebig miteinander verbunden werden können. Das Excel®-Sheet berechnet nach der Eingabe der Daten die effektive Erdungsimpedanz aller angeschlossenen Abgänge. Mithilfe des Tools soll eine erste Abschätzung der Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation möglich sein, wenn die Netztopologie sowie Abschätzungen für spezifische Parameter (siehe Abschnitt 3.3.1) bekannt sind. Dadurch kann ein grober Wertebereich für die Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation angegeben werden. Anzumerken sei außerdem, dass das Tool keine PEN-Leiter Impedanzen in den Niederspannungsabgängen berücksichtigt. Alle weiteren Simulationen und Auswertungen wurden aufgrund des Realisierungsaufwandes mit MATLAB® und XGSLab™ durchgeführt. Ein Anwendungsbeispiel des Kettenleiters in Microsoft Excel® befindet sich im Anhang dieser Arbeit unter Abschnitt 7.1.

3.3.1 Eingabefelder und Berechnung

Die Abbildung 3.13 zeigt die Parametereingaben und Berechnungen, welche für die Impedanzen des Kettenleiters benötigt werden (siehe hierzu auch Abbildung 7.1 im Anhang). Die Berechnungen erfolgen aufgrund der in den Abschnitten 2.7 und 2.8 erläuterten theoretischen Zusammenhänge.

Parameter	Formel	Wert	Einheit
Netz, Globalparameter			
Frequenz	f	50	[Hz]
Kreisfrequenz	$\omega = 2\pi \cdot f$	314.16	[s ⁻¹]
Permeabilität	μ_0	1.25664E-06	[Vs/Am]
"Basisimpedanz"	$\omega \cdot \mu_0 / 2\pi$	0.0628318530719590	[Ω/km]
Erdboden			
spez. Bodenwid.	ρ	100	[Ω·m]
Eindringtiefe	$\delta_e = 1,85137 / (\omega \cdot \mu_0 / \rho)^{0,5}$	931.80	[m]
Rückstromtiefe	$D_e = (2e)^{0,5} / \gamma \cdot 6e \quad (\gamma = 1,78 ; \text{Besselkonstante})$	1220.51	[m]
Kabel zwischen den Abgängen			
Fläche Leiter	AL	240	[mm ²]
Leitfähigkeit Leiter (Cu= 52 / Al = 37) inklusive Skineffekt (Al = 32,1)	γ_L	37	[Sm/mm ²]
spez. Leiterwiderstand	$r_L' = 1 / (\gamma_L \cdot AL)$	0.1126	[Ω/km]
Radius Leiter	$radL = (AL / \pi)^{0,5}$	8.74	[mm]
Isolationsstärke	diso	5.5	[mm]
Anzahl wirksamer Schirme	#s_zu	3	[#]
Fläche Schirm	AS	25	[mm ²]
Leitfähigkeit Schirm (Cu = 52 / Al = 37)	γ_S	52	[Sm/mm ²]
spez. Schirmwiderstand (Hier nur 1 Schirm gerechnet)	$r_S' = 1 / (\gamma_S \cdot AS)$	0.76923	[Ω/km]
Innenradius Schirm	$radSi = radL + diso$	14.240387	[mm]
Außenradius Schirm	$radSa = (AS / \pi + radSi^2)^{0,5}$	14.517107	[mm]
Stärke Schirm	$t = radSa - radSi$	0.2767	[mm]
spez. Selbstinduktivität Schirm	$xSS' = \omega \cdot \mu_0 / 2\pi \cdot \ln(D_e / (radSa \cdot \exp(-4/3 \cdot radSi \cdot t / (2 \cdot radSi + t)^2)))$	0.7129	[Ω/km]
Schirmimpedanz bezogen auf Kilometer	$Zschirm = (r_S' + j(xSS')) \cdot 1 / \#s$	0,256410256410256+0,237625923324434j	[Ω/km]
Gebäude, Masten			
Widerstand Gebäude	RH	20	[Ω]
Widerstand Masten	RM	100	[Ω]
Blindwiderstand Masten	XM	0.0003142	[Ω]

Abbildung 3.13: Parameterberechnung

Folgende Eingabeparameter (in Abbildung 3.13 gelb markiert) werden für die Berechnung benötigt:

- Frequenz bei der die Berechnung durchgeführt werden soll
- Spezifischer Bodenwiderstand
- Querschnitt (innen) des Leiters
- Leitfähigkeit des Leiters
- Isolationsstärke des Leiters
- Anzahl der wirksamen Kabelschirme
- Querschnitt des Kabelschirmes

- Leitfähigkeit des Kabelschirmes
- Erdungswiderstände der Gebäude
- Ohm'scher Erdungswiderstand Leitungsmast
- Blindwiderstand Erdungsanlage Leitungsmast

3.3.2 Modul Kabel

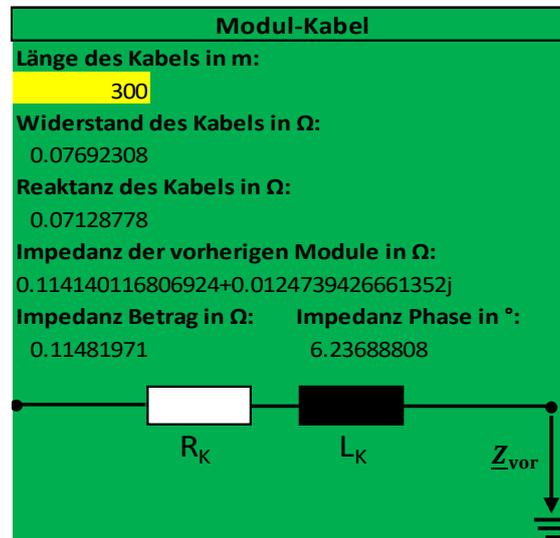


Abbildung 3.14: Modul-Kabel

Das Modul repräsentiert die Kabelverbindung zwischen den Ortsnetzstationen. Es muss lediglich die Kabellänge (gelbe Zelle in Abbildung 3.14) in das Modul eingegeben werden, anschließend berechnet es automatisch die Impedanz des Kabels, sowie die Impedanz Z_{vor} , welche die Gesamtimpedanz der vorhergehenden Module darstellt. Diese wird in Komponenten- und Polarform dargestellt.

3.3.3 Modul Abzweig

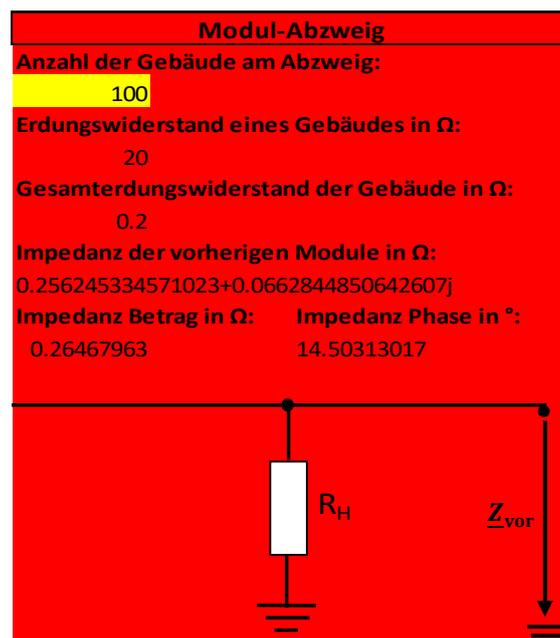


Abbildung 3.15: Modul-Abzweig

Das Modul stellt die Niederspannungsabgänge der Ortsnetzstationen dar. Es muss nur die Anzahl der Gebäude, die am Abzweig angeschlossen sind, eingegeben werden. Der Gesamtwiderstand wird durch die vernachlässigten PEN-Leiter Verbindungen und aufgrund dessen, dass alle Erdungswiderstände denselben Wert aufweisen, nach Formel (3.5) berechnet. Wie bereits im vorherigen Modul wird die Gesamtimpedanz Z_{vor} der vorherigen Module in Komponenten- und Polarform dargestellt.

$$R_H = \frac{R_E}{\text{Anzahl der Gebäude}} \quad (3.5)$$

3.3.4 Modul Mast / Ringschluss

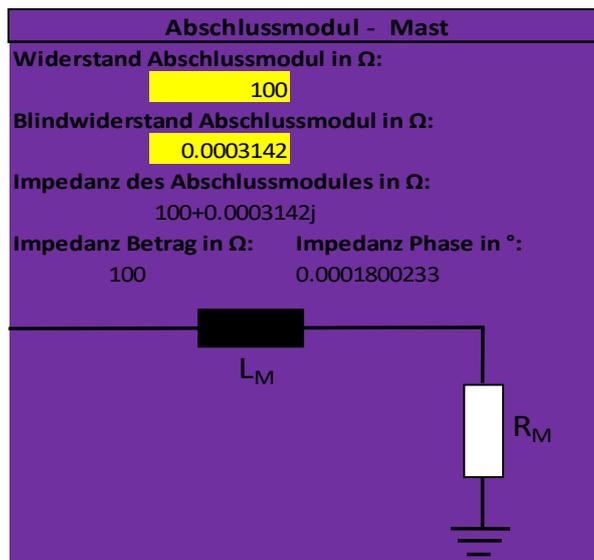


Abbildung 3.16: Abschlussmodul-Mast

Beim Abschlussmodul kann der ohmsche Widerstand und der Blindanteil eingegeben werden. Die Abschlussimpedanz wird in Komponenten- und Polarform dargestellt. Das Modul kann zur Darstellung von Kabelübergangsmasten oder Ringabschlüssen verwendet werden.

3.3.5 Modul Substation

Modul-Substation			
	Abgang 1 Impedanz in Ω	Betrag in Ω	Phase in °:
	0.600077492323651+0.0950512586784837j	0.60755884	9.000775041
	Abgang 2 Impedanz in Ω	Betrag in Ω	Phase in °:
	100.076923076923+0.0716019769973302j	100.076949	0.040993371
	Abgang 3 Impedanz in Ω	Betrag in Ω	Phase in °:
	100.179487179487+0.166652346327104j	100.179626	0.095313597
Abgang 4 Impedanz in Ω	Betrag in Ω	Phase in °:	
0	0	Nicht definiert!	
Abgang 5 Impedanz in Ω	Betrag in Ω	Phase in °:	
0	0	Nicht definiert!	
Abgang 6 Impedanz in Ω	Betrag in Ω	Phase in °:	
0	0	Nicht definiert!	

Abbildung 3.17: Modul-Substation

Durch dieses Modul können mehrere Abgänge zusammengefasst werden. Von jedem angeschlossenen Abgang wird die Gesamtimpedanz des Abganges in Komponenten- und Polarform dargestellt. Zur Veranschaulichung wird auf das Beispiel im Anhang, Abschnitt 7.1 verwiesen.

3.3.6 Modul Abgang

Abgang #Name
Impedanz Strang in Ω: 0.191063193730001+0.0837617196634654j
Impedanz Betrag in Ω: 0.20861728
Impedanz Phase in $^\circ$: 23.67254851
Admittanz Strang in $1/\Omega$: 4.39012083402081-1.92462013959442j
Admittanz Betrag in $1/\Omega$: 4.793466764
Admittanz Phase in $^\circ$: -23.67254851

Abbildung 3.18: Modul-Abgang

Dieses Modul berechnet die Gesamtimpedanz bzw. Gesamtadmittanz eines Abganges, der an die Mittelspannungsschaltstation angeschlossen ist. Impedanz sowie Admittanz werden in Komponenten- und Polarform dargestellt.

3.3.7 Modul Auswertung

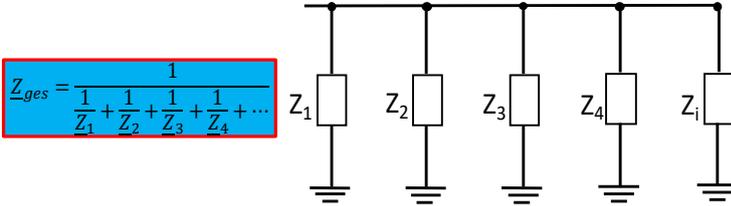
Ersatzschaltbild der Abgänge	Gesamtadmittanz der SST in $1/\Omega$:
	10.4837175596316-3.52163998400858j
	Betrag der Gesamtadmittanz der SST in $1/\Omega$: 11.05939791
	Winkel der Gesamtadmittanz der SST in $^\circ$: -18.56798212
	Gesamtimpedanz der SST in Ω: 0.085714114824744+0.0287926732329222j
	Betrag der Gesamtimpedanz der SST in Ω: 0.090420836
	Winkel der Gesamtimpedanz der SST in $^\circ$: 18.56798212

Abbildung 3.19: Modul Auswertung

Das Modul berechnet die Gesamtimpedanz bzw. Gesamtadmittanz aller angeschlossenen Abgänge der Schaltstation. Impedanz sowie Admittanz werden in Komponenten- und Polarform dargestellt. Die Gesamtimpedanz bzw. Gesamtadmittanz ergibt sich, wie in Abbildung 3.19 angegeben, durch die Parallelschaltung aller Abgänge, die an die Schaltstation angeschlossen sind.

3.4 Simulationsergebnisse in MATLAB®

In den folgenden Abschnitten werden die Simulationsergebnisse des Kettenleiters, welcher in MATLAB® implementiert wurde, dargestellt und erläutert. Mit dem MATLAB® - Skript ist es, wie bereits mit dem Tool in Microsoft Excel® möglich, die Kettenleiterimpedanz zu berechnen. Dadurch soll eine erste Abschätzung der Erdungsimpedanz eines Niederspannungsabzweiges sowie für eine Mittelspannungsschaltstation möglich sein, wenn die Netztopologie, sowie Abschätzungen für spezifische Parameter (siehe Abschnitt 3.4.1) bekannt sind. Damit kann ein grober Wertebereich für die Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation angegeben werden. Das MATLAB® - Skript berücksichtigt, im Gegensatz zum Tool in Microsoft Excel®, die PEN-Leiter Impedanz zwischen den Gebäuden in den Niederspannungsabzweigen. Zusätzlich kann mit dem Skript eine Parameteranalyse durchgeführt werden, welche zeigt, wie durch Variation einzelner Parameter die Kettenleiterimpedanz beeinflusst wird. In den Unterkapiteln 3.4.2 und 3.4.3 wird auf die Bestimmung der PEN-Leiter Impedanz von Niederspannungskabeln bzw. der Schirmimpedanz von Mittelspannungskabeln eingegangen. Zusätzlich wird ein Vergleich der Impedanzen für kurze und sehr lange Kabellängen durchgeführt. Anschließend wird eine Parameteranalyse durchgeführt und Wertebereiche für die Erdungsimpedanz angegeben.

3.4.1 Datenerhebung Simulation

Folgende Eingabeparameter werden für die Berechnung benötigt:

- Frequenz f bei der die Berechnung durchgeführt werden soll
- Spezifischer Bodenwiderstand ρ_E
- Querschnitt A_L (innen) des Leiters für die Nieder- bzw. Mittelspannungskabel
- Leitfähigkeit γ_L des Leiters
- Anzahl n_{KS} der wirksamen Kabelschirme
- Querschnitt A_S des Kabelschirmes
- Leitfähigkeit γ_S des Kabelschirmes
- Erdungswiderstand der Gebäude R_H
- Abstand l_{GB} zwischen den Gebäuden im Niederspannungsweig
- Abstand l_{MS} zwischen den Mittelspannungsschaltstationen
- Anzahl der Abgänge n_{AB} im Niederspannungsabzweig

Um möglichst realitätsnahe Eingabeparameter für Simulationen zu erhalten, wurden unabhängig voneinander zwei Verteilnetzbetreiber befragt. Die Antworten der Verteilnetzbetreiber A und B sind in Rot angegeben.

- **Wie weit sind im Schnitt Ihre Mittelspannungsschaltstationen voneinander entfernt?**
 Verteilnetzbetreiber A: 500 m bis ca. 1400 m
 Verteilnetzbetreiber B: 400 m bis ca. 2000 m
- **Welchen Leiterquerschnitt verlegen Sie bei den Niederspannungsabgängen der Schaltstation für den PEN-Leiter zu den Gebäuden bzw. Schleifenkästen?**

Verteilnetzbetreiber A: 95 mm² bis max. 240 mm²

Verteilnetzbetreiber B: 70 mm² bis max. 150 mm²

- **Welchen Querschnitt weist Ihr Kabelschirm bei den Mittelspannungskabeln im Durchschnitt auf?**

Verteilnetzbetreiber A: 25 mm² bis max. 50 mm²

Verteilnetzbetreiber B: 50 mm²

- **Was schätzen Sie, wie viele Meter sind im Durchschnitt die Gebäude im Niederspannungspfad voneinander entfernt?**

Verteilnetzbetreiber A: Ortschaften: 20 m, Freiland: ca. 100 m

Verteilnetzbetreiber B: Ortschaften: 20 m – 30 m, Freiland: 40 m bis 100 m

- **Wie viele Abgänge je Schaltstation existieren im Durchschnitt? Wie viele Gebäude werden von einer Schaltstation versorgt? (Erfahrungswerte reichen)**

Verteilnetzbetreiber A:

- Durchschnittliche Gebäudeanzahl pro Station: 31
- Im Schnitt 3 Ableitungen pro Station
- Pro Ableitung: ca. 10 Anlagen

Verteilnetzbetreiber B:

- Durchschnittliche Gebäudeanzahl pro Station: 20-22
- Im Schnitt 5 Ableitungen (Maximum 6 – 7 Abgänge) pro Station
- Pro Ableitung: ca. 4 Anlagen

- **In welchem Widerstandsbereich bewegt sich der Anlagenerder (PEN-Leiter nicht angeschlossen) von den Gebäuden (Kunden, Betriebsgebäuden, ...)?**

Verteilnetzbetreiber A: $R_H: \geq 5 \Omega / \leq 35 \Omega$

Verteilnetzbetreiber B: R_H : im Durchschnitt 10 Ω

3.4.2 Impedanz PEN-Leiter Niederspannungskabel

Für die Berechnung des Kettenleiters benötigt man die Nullimpedanz für ein PEN-Leiter Niederspannungskabel. Häufig wird dafür von einem unendlich langen Leiter mit Erdrückleitung ausgegangen. Diese Anordnung beschreibt die Gleichung nach Carson (siehe Abschnitt 2.7). Der Impedanzbelag sowie sein Real- und Imaginärteil sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Der Realteil des Impedanzbelages fällt mit zunehmendem Leiterquerschnitt stark ab, da hier die Beziehung (2.33) gilt. Daher ist für Querschnitte $> 150 \text{ mm}^2$ der induktive Anteil dominant. Bei der Berechnung nach Carson wird von einer Erdstromtiefe von ca. 932 m ausgegangen. Wie in Abbildung 3.21 dargestellt wird, kann davon ausgegangen werden, dass dies für große Kabel- bzw. Leitungslängen ($> 1000 \text{ m}$) zutrifft. Für den Bereich der Niederspannung, wo meist geringe Kabel- und Leitungslängen ($\leq 100 \text{ m}$) vorherrschen, weicht die Eindringtiefe jedoch deutlich von den 932 m ab, wie die rote Funktion in Abbildung 3.21 zeigt.

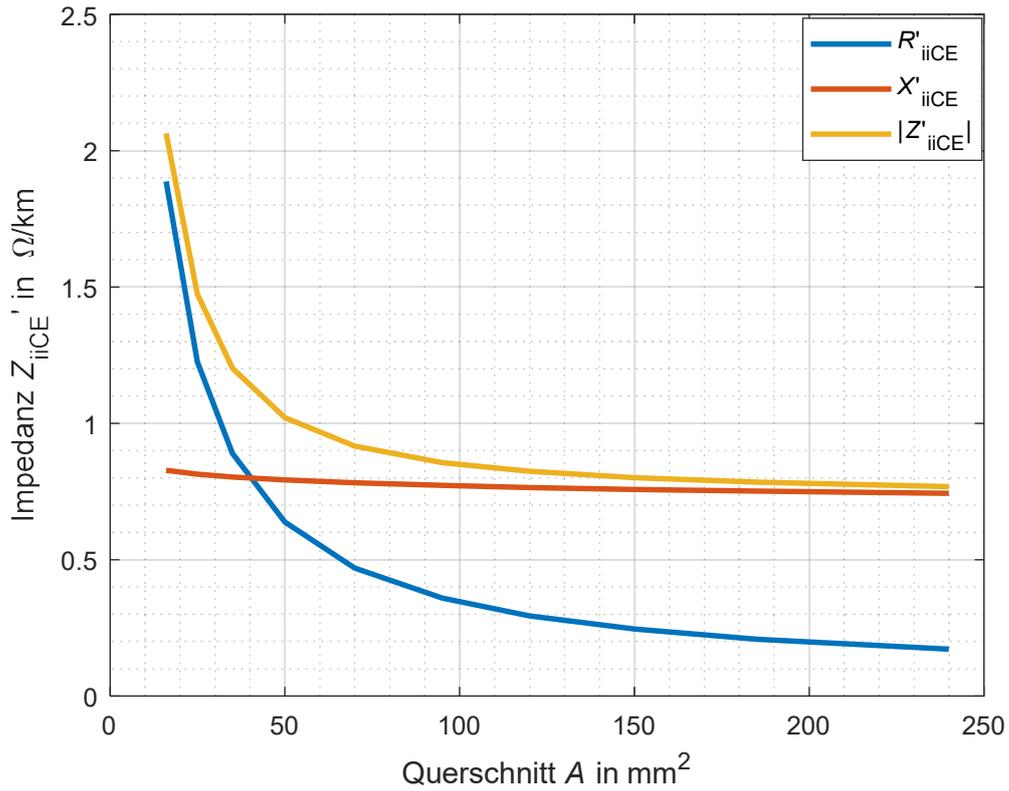


Abbildung 3.20: Impedanzbelag PEN-Leiter nach Carson

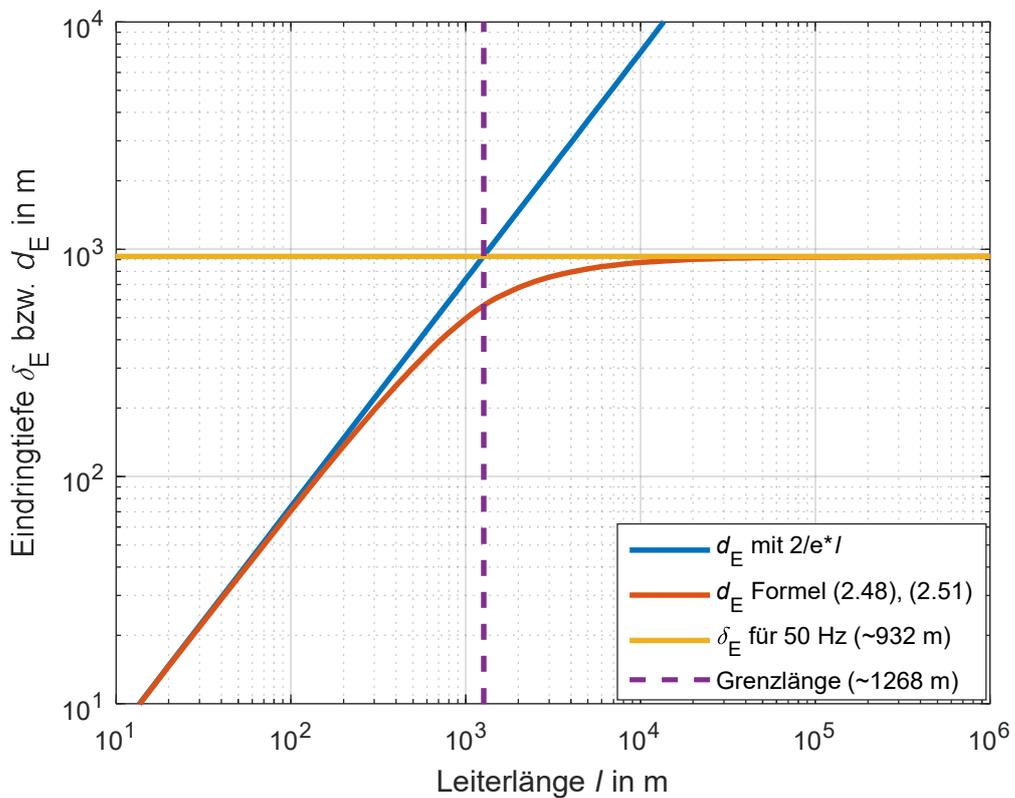


Abbildung 3.21: Erdstromtiefe für kurze und sehr lange Leiter

Die rote Funktion besteht aus zwei Teilfunktionen, wobei eine Teilfunktion für den Bereich definiert ist, der größer als die Grenzlänge ist und eine Teilfunktion, welche geringere Leiterlängen umfasst als die Grenzlänge. Für den Niederspannungsbereich ist somit nur der Wertebereich interessant, der kleiner als die Grenzlänge ist. Aus der obigen Abbildung kann man daher erkennen, je kürzer eine Leitung bzw. ein Kabel ist, desto geringer ist die Erdstromtiefe, damit weist jene eine Abhängigkeit von der Leiterlänge auf. Um eine schnelle Abschätzung für die Erdstromtiefe des Niederspannungsbereiches zu ermöglichen, kann laut [36] folgende Formel (3.6) verwendet werden (blaue Funktion in Abbildung 3.21).

$$d_E = \frac{2}{e} \cdot l \tag{3.6}$$

Vergleicht man die Impedanzbeläge für einen kurzen und einen langen Leiter, so kann man in Abbildung 3.22 erkennen, dass sich der Impedanzbelag für kurze Leiter (Index N) mit steigender Leitungslänge, jenem für lange Leitungen asymptotisch nähert. In der Praxis kommen laut [1], Querschnitte für den PEN-Leiter meist in der Größenordnung von 16 mm² bis 240 mm² vor. Der Impedanzbelag für lange Leiter sowie der entsprechende Winkel für den Querschnitt werden in Abbildung 3.23 und 3.24 gezeigt. Daraus ergibt sich so ein durchschnittlicher Impedanzbelag von $0,8 \frac{\Omega}{\text{km}}$ mit einem Winkel von ca. 75°. Für weitere Querschnitte sind die Impedanzbeläge und zugehörigen Winkel in Abschnitt 7.2.1 angegeben. Berechnet man den absoluten Fehler zwischen der Impedanz für kurze und lange Leiter, so erhält man einen maximalen Fehler von 0,046 Ω, welcher in Abbildung 3.25 ersichtlich ist. Für den Winkelfehler kann ein Maximalfehler von ca. 8° welcher bei einem Querschnitt von 16 mm² auftritt, angegeben werden (siehe Abbildung 3.26). Da in der Praxis jedoch größere Querschnitte und kürzere Leitungslängen auftreten, ist laut den Diagrammen mit noch geringeren Fehlern zu rechnen. Somit kann für die Berechnung des Kettenleiters, ohne größere Abweichungen einzugehen, die Formel nach Carson mit einer Erdstromtiefe von 932 m verwendet werden.

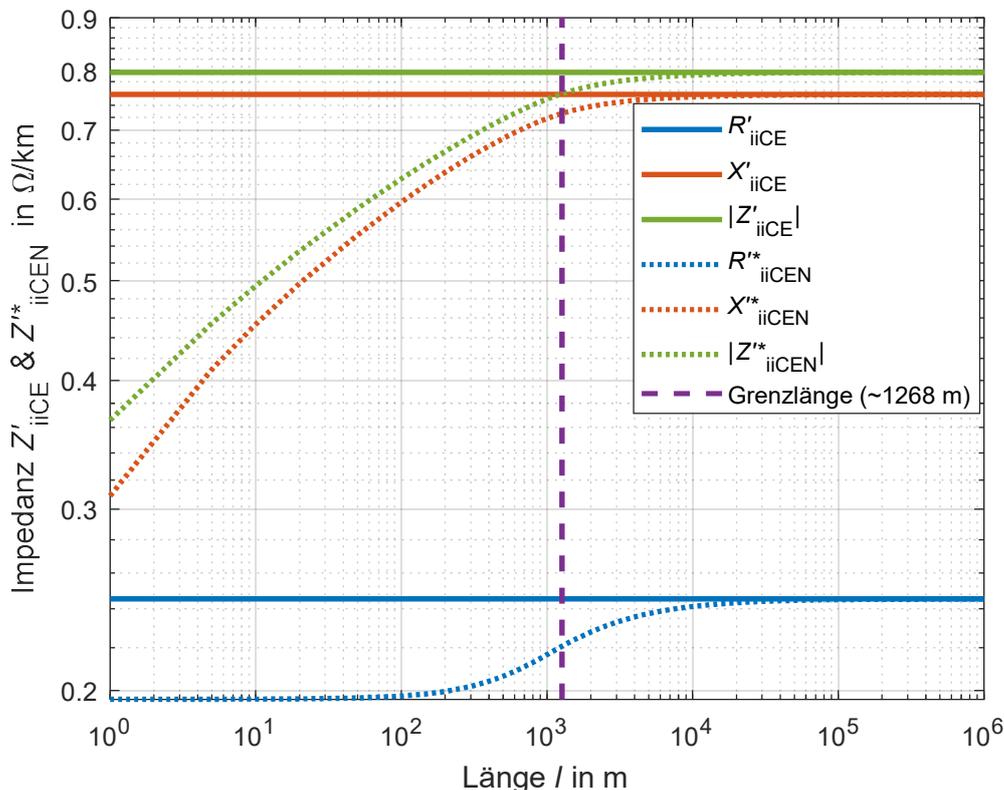


Abbildung 3.22: Impedanzbelag für kurze und sehr lange PEN-Leiter

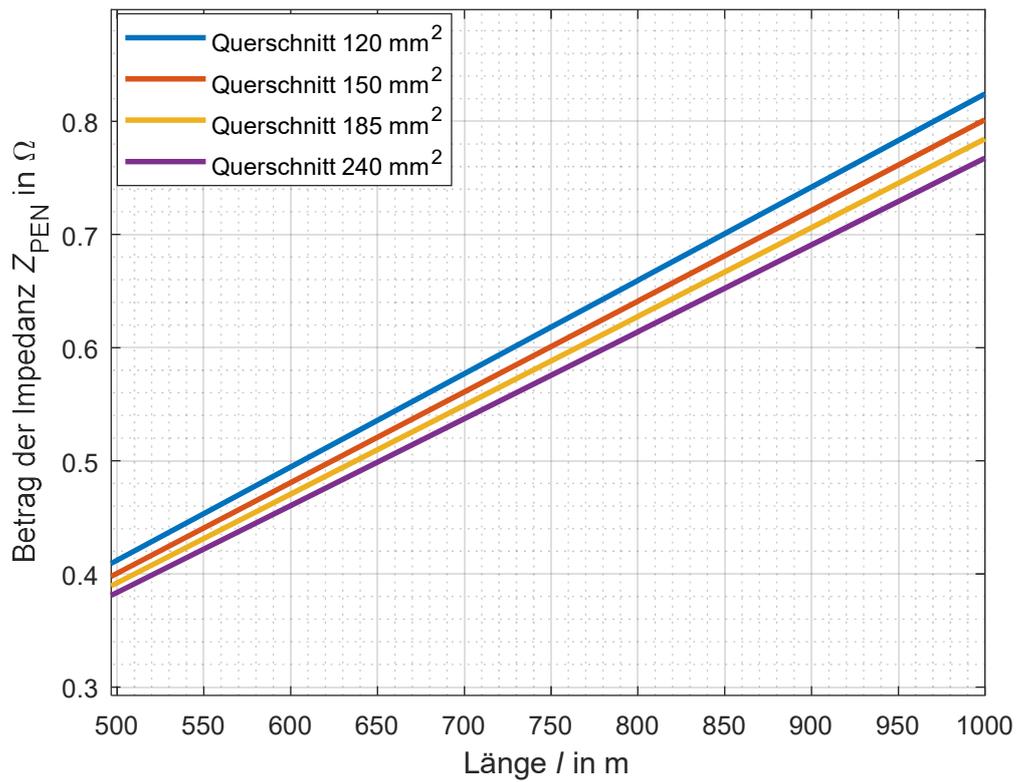


Abbildung 3.23: Impedanz Z_{PEN} für häufig verwendete Querschnitte

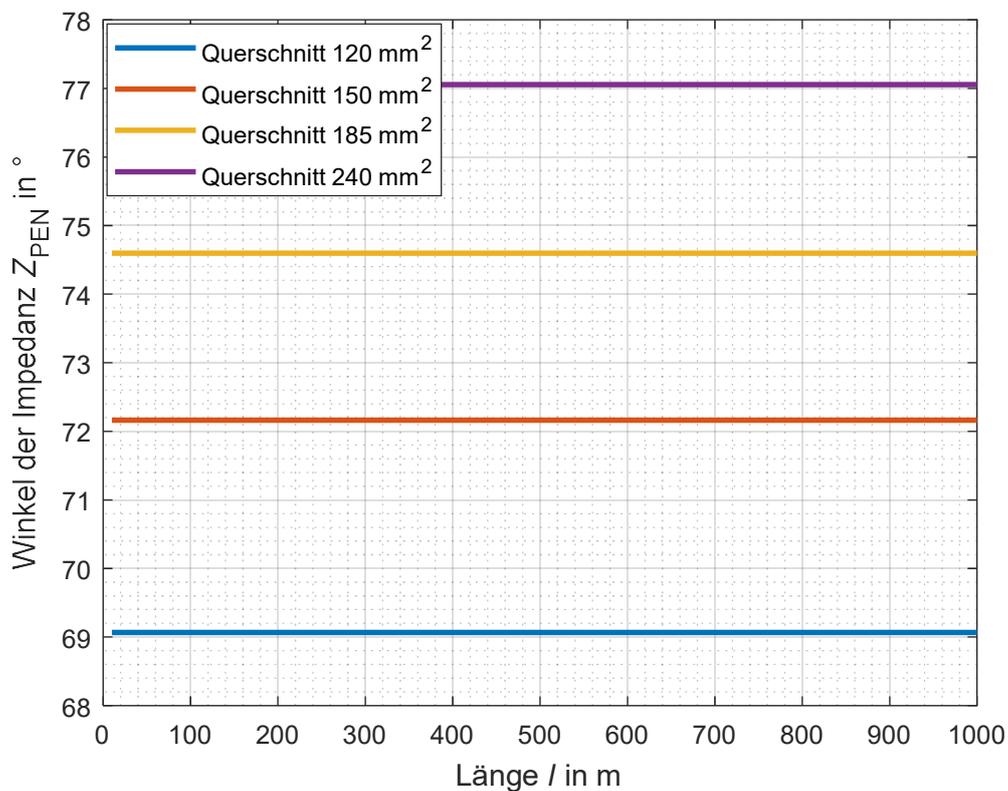


Abbildung 3.24: Winkel der Impedanz Z_{PEN} für häufig verwendete Querschnitte

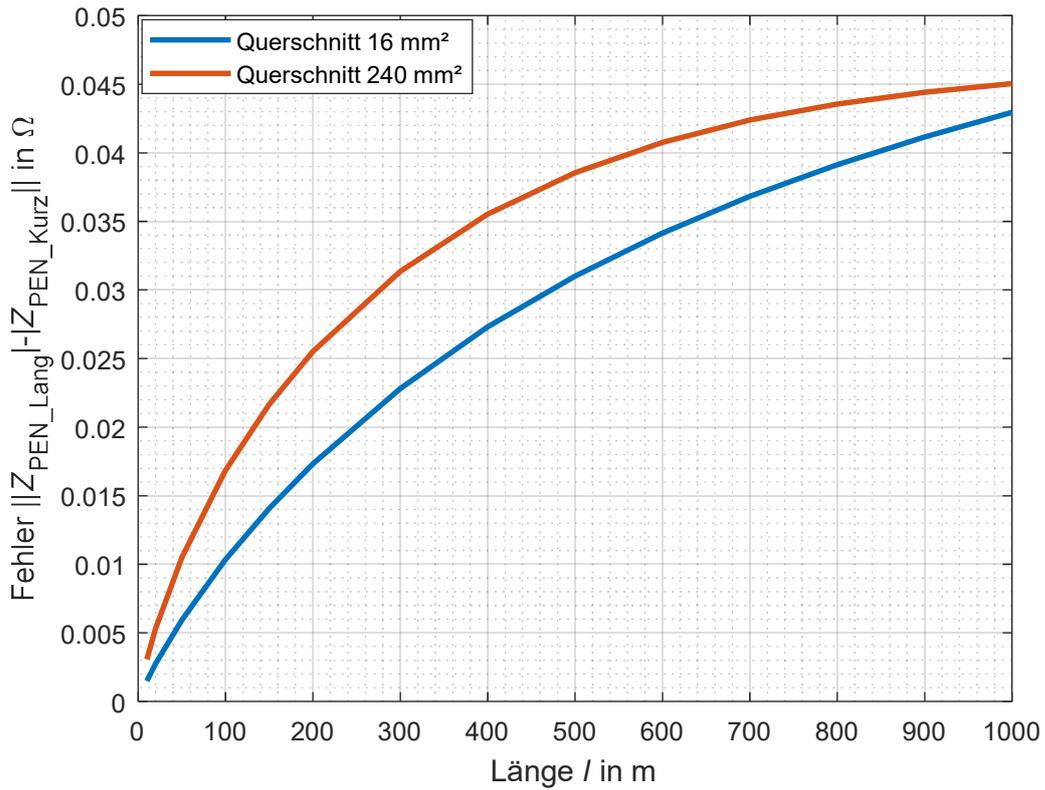


Abbildung 3.25: Absoluter Fehler PEN-Leiter Impedanzen

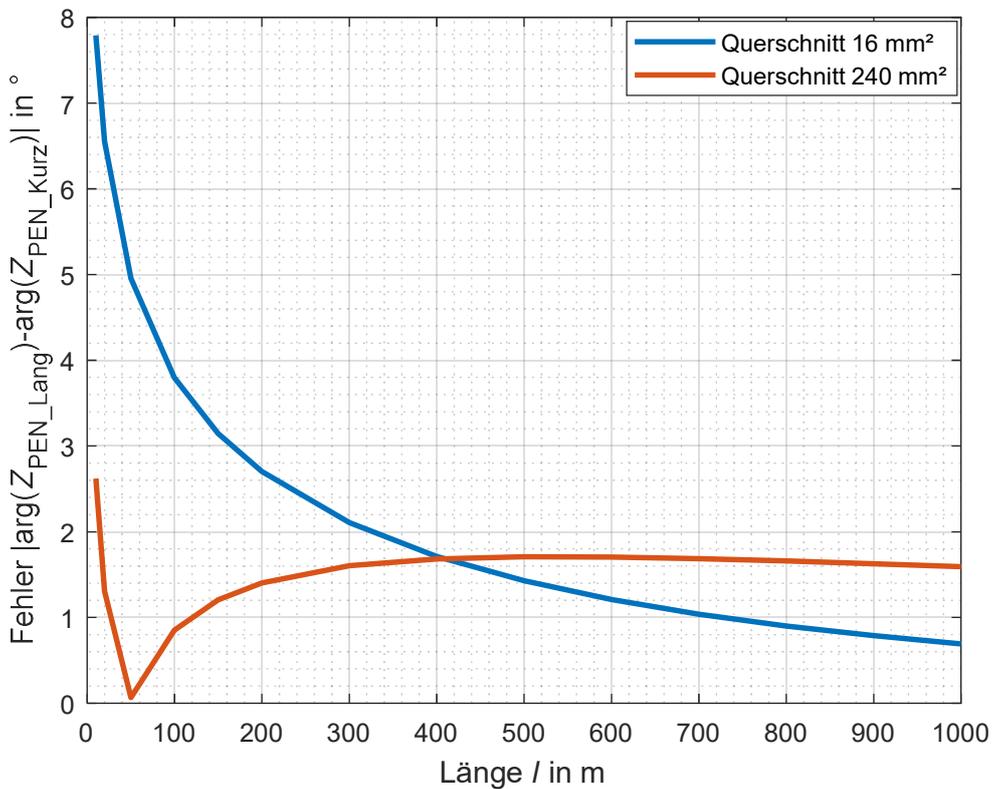


Abbildung 3.26: Absoluter Fehler PEN-Leiter Impedanzwinkel

3.4.3 Schirmimpedanz Mittelspannungskabel

Da die Ortsnetzstationen über Mittelspannungskabel miteinander verbunden sind, wird zur Berechnung des Kettenleiters die Impedanz des Kabelschirmes benötigt. Auch hier wird, wie bereits bei der PEN-Leiter Impedanz von einem unendlich langen Leiter mit Erdrückleitung ausgegangen. Die Berechnung der Schirmimpedanz erfolgt gemäß Abschnitt 2.8. Ausgehend von einer Erdstromtiefe von ca. 932 m, ergibt sich für den Impedanzbelag des Kabelschirmes ein Verlauf gemäß Abbildung 3.27. Der Realteil der Impedanz nimmt gemäß Beziehung (2.33) mit steigendem Querschnitt stark ab, somit ist erkennbar, dass der Betrag der Gesamtimpedanz stark vom Imaginärteil abhängt. Auch bei der Schirmimpedanz ergibt sich für kürzere Leitungslängen (< 1000 m) eine kleinere Erdstromtiefe, aus welcher ein geringerer Impedanzbelag (Index N) resultiert, wie in Abbildung 3.28 zu sehen ist. In der Praxis weisen laut [1], Mittelspannungskabel häufig einen Schirmquerschnitt zwischen 25 mm^2 und 50 mm^2 auf. Berechnet man die Schirmimpedanz mit einer Erdstromtiefe von 932 m so ergibt sich ein durchschnittlicher Impedanzbelag von $0,7 \frac{\Omega}{\text{km}}$ und einem Winkel von ca. 70° (Abbildung 3.29 und 3.30). Betrachtet man den absoluten Fehler zwischen der Impedanz für kurze und lange Leiter, so erhält man einen maximalen Fehler von $0,045 \Omega$, welcher in Abbildung 3.31 ersichtlich ist. Für den Fehler des Impedanzwinkels kann ein Maximalfehler von ca. 11° , welcher bei einem Querschnitt von 25 mm^2 auftritt, angegeben werden (siehe Abbildung 3.32). Laut der Datenerhebung ist in der Praxis mit größeren Querschnitten ($\approx 50 \text{ mm}^2$) und Leitungslängen ≥ 400 m zu rechnen. Laut den Diagrammen ist daher mit noch geringeren Fehlern zu rechnen. Aufgrund der Fehlergröße kann daher für die Berechnung der Schirmimpedanz die Formel nach Carson mit einer Erdstromtiefe von 932 m verwendet werden, ohne größere Abweichungen einzugehen.

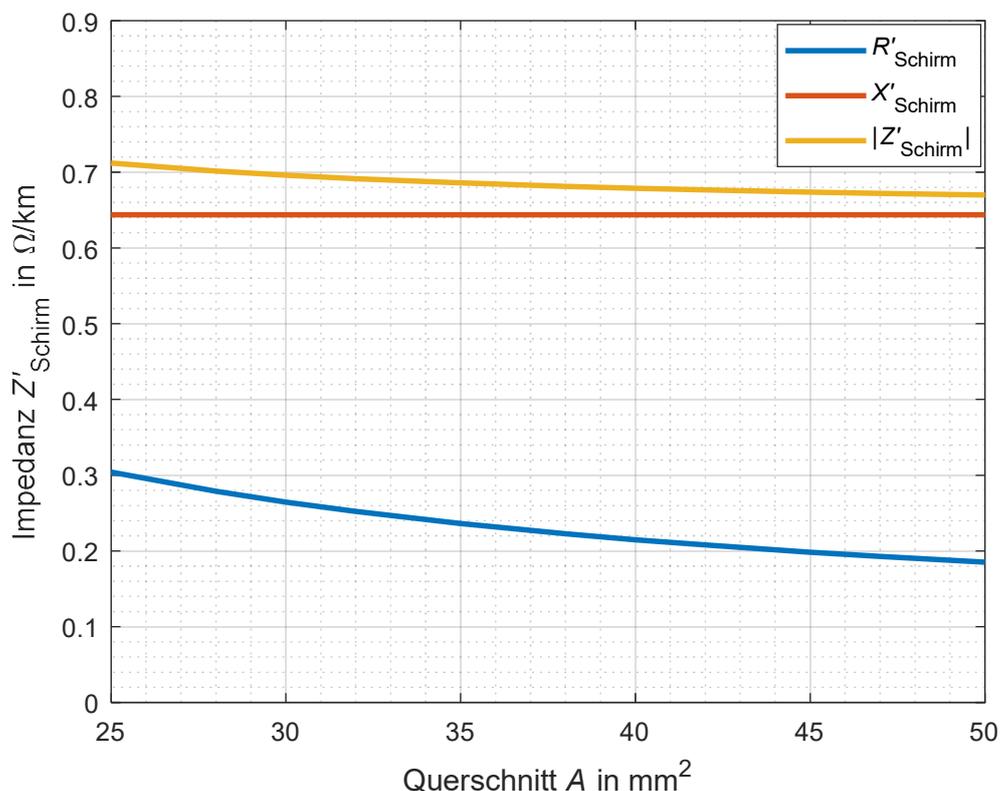


Abbildung 3.27: Impedanzbelag für Kabelschirme

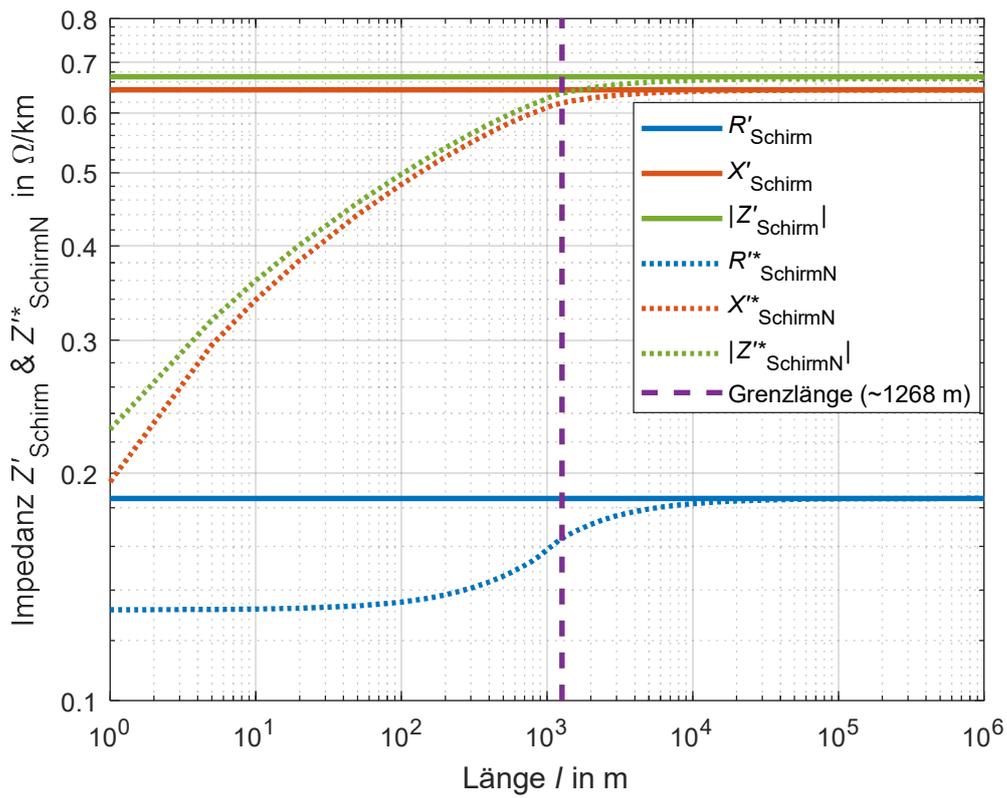


Abbildung 3.28: Impedanzbelag für kurze und sehr lange Kabelschirme

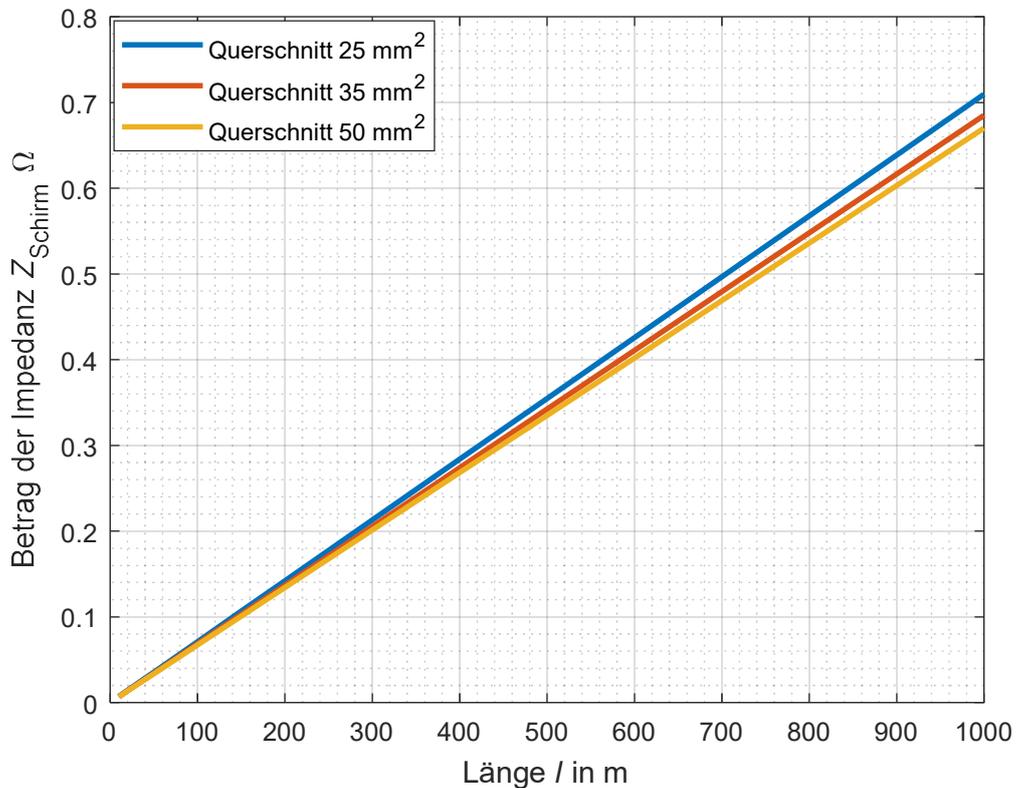


Abbildung 3.29: Impedanz Z_{Schirm} für häufig verwendete Querschnitte

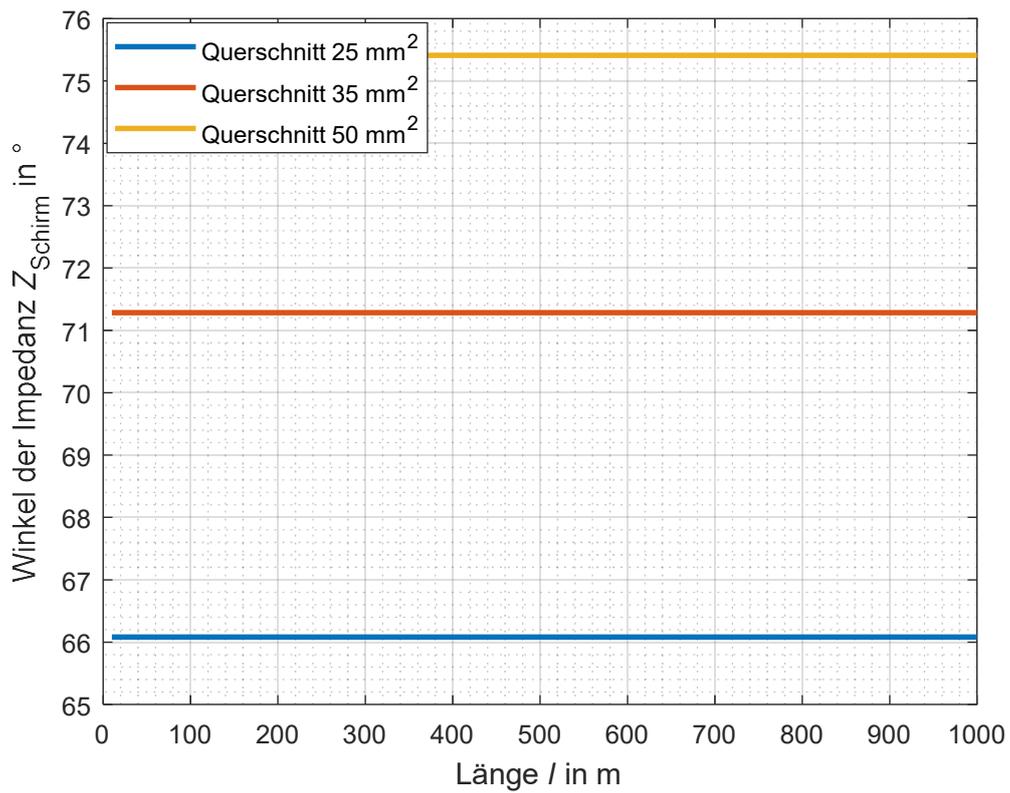


Abbildung 3.30: Winkel der Impedanz Z_{Schirm} für häufig verwendete Querschnitte

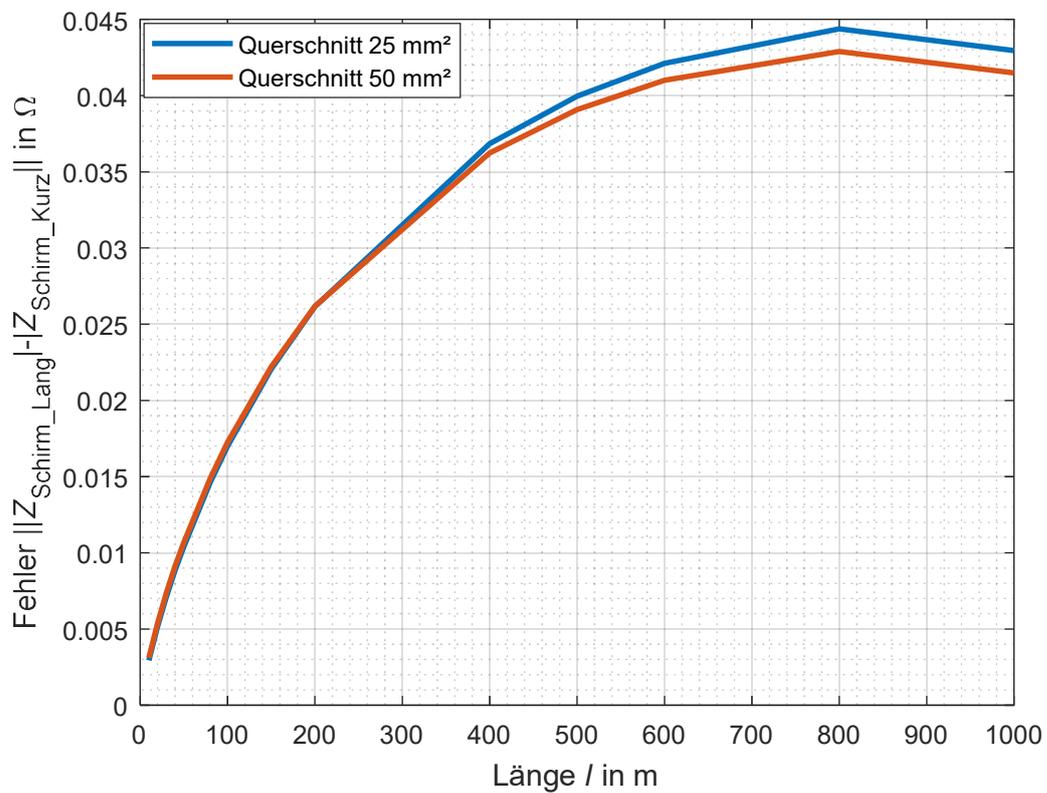


Abbildung 3.31: Absoluter Fehler Schirmimpedanzen

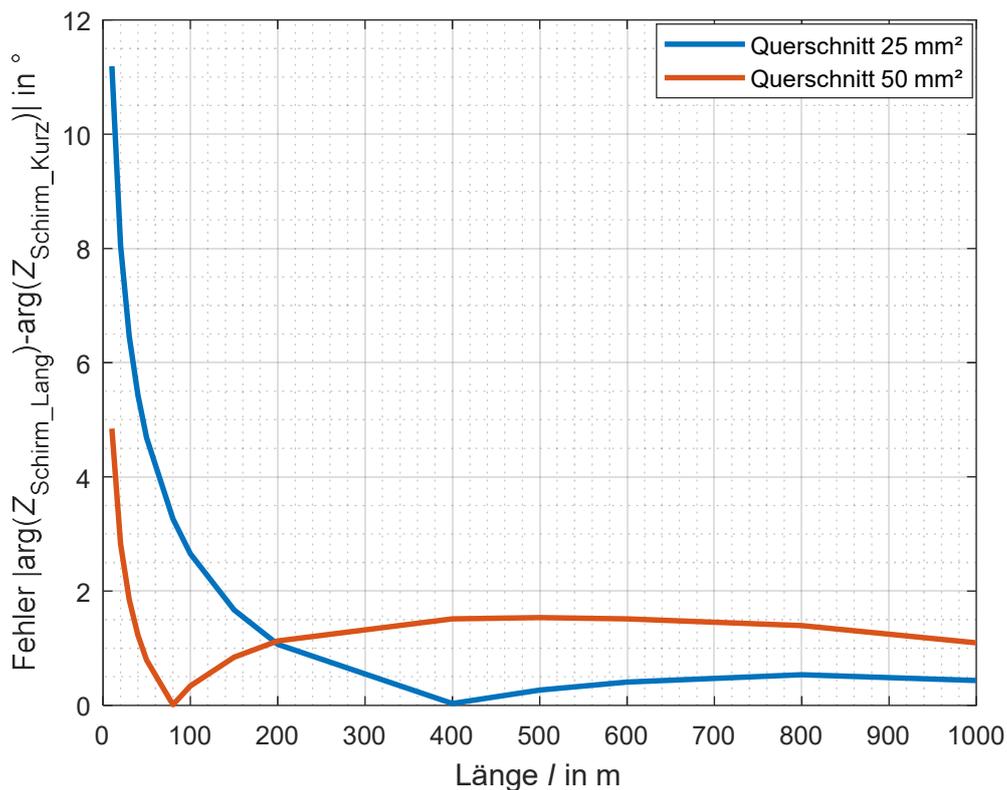


Abbildung 3.32: Absoluter Fehler Kabelschirm Impedanzwinkel

3.4.4 Kettenleiter eines Niederspannungsabzweiges – Parameteranalyse

In diesem Abschnitt wird ein Niederspannungsabgang des Kettenleiters, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, analysiert. In dem gewählten Beispiel, gemäß Abbildung 3.33, geht man von einer Distanz zwischen den Gebäuden von 100 m aus, wobei der Querschnitt des PEN-Leiters 240 mm² beträgt, und der Erdungswiderstand eines Gebäudes mit 10 Ω angenommen wird. Dargestellt sind in Blau, der Verlauf der Kettenleiterimpedanz Z_{Kette} für 100 Gebäude. In Rot wird die Impedanz Z_{inf} abgebildet. Dieser Impedanzverlauf ergibt sich, wenn am Kettenleiter eine unendlich hohe Anzahl von Gebäuden angeschlossen ist. Die Funktion in Orange zeigt eine Näherung der Kettenleiterimpedanz, wenn man die PEN-Leiter zwischen den Gebäuden vernachlässigt. Es ist zu erkennen, dass diese Näherung, abhängig von den gewählten Parametern, nur für eine geringe Anzahl von Gebäuden ein ausreichend genaues Ergebnis liefert. Mit einer steigenden Gebäudeanzahl vergrößert sich der Fehler zur Kettenleiterimpedanz Z_{Kette} . Daher muss bei der Vernachlässigung der PEN-Leiter Impedanz mit einer großen Abweichung gerechnet werden. Generell wird daher von dieser Art der Näherung abgeraten. Da man in der Praxis häufig einen Schätzwert für die Anzahl der Gebäude kennt, welche an einem Niederspannungsabzweig angeschlossen sind, soll durch die Simulation mit MATLAB® die folgende Frage beantwortet werden. „Wie viele Gebäude müssen beachtet werden, damit der absolute Fehler zwischen der Kettenleiterimpedanz Z_{Kette} und der Impedanz Z_{inf} kleiner als ein gewählter Betrag ist?“ Damit liefert die Näherung eine bestimmte Gebäudeanzahl, ab welcher die obige Bedingung erfüllt ist und somit die Impedanz Z_{inf} direkt als Kettenleitergesamtimpedanz verwendet werden kann. Daher ist keine exakte Angabe über die Gebäudeanzahl nötig.

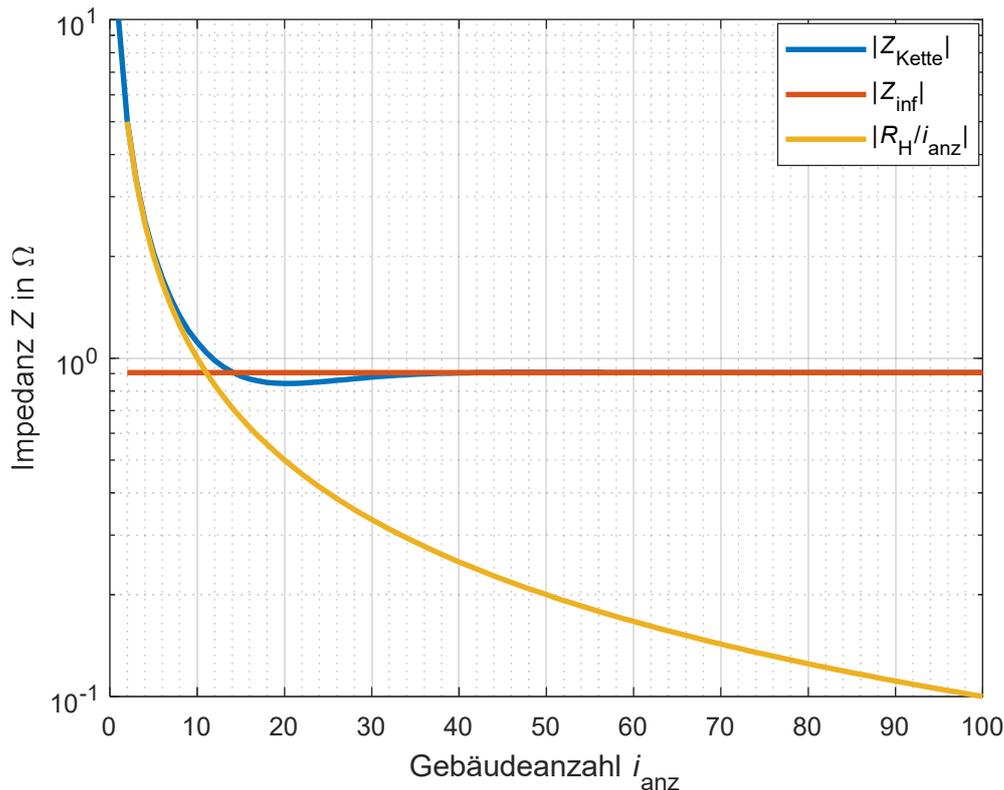


Abbildung 3.33: Impedanzverläufe Kettenleiter für $l = 100$ m, $A = 240$ mm², $R_H = 10$ Ω

Anhand dieser Abschätzung werden Parameteranalysen durchgeführt. Es wird gezeigt, welche Auswirkungen die Distanz l , der Querschnitt des PEN-Leiters A und der Erdungswiderstand R_H der einzelnen Querelemente auf die Kettenleiterimpedanz bzw. auf die Anzahl der zu beachtenden Gebäude haben. In Abbildung 3.34 wird ein konstanter Erdungswiderstand von $R_H = 10$ Ω für alle Gebäude angenommen. Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit der Gebäudeanzahl vom Querschnitt A sehr gering ist, da bei den einzelnen Kennlinien keine großen Änderungen auftreten. Jedoch spielt die Distanz zwischen den Gebäuden eine bedeutende Rolle. Je größer die Distanz zwischen den Gebäuden ist, desto größer ist auch die Impedanz des PEN-Leiters Z_{PEN} . Dadurch erhöht sich auch der Betrag der Impedanz Z_{inf} . Man muss daher bei einer längeren Leitungslänge l eine geringere Anzahl von Gebäuden beachten, da das Fehlerkriterium schneller erfüllt wird. In Abbildung 3.35 geht man von einem konstanten PEN-Leiter Querschnitt von $A = 240$ mm² aus. Auch hier ist wieder die starke Abhängigkeit von der Distanz l zu erkennen. Mit einem größeren Erdungswiderstand R_H müssen eine höhere Anzahl von Gebäuden berücksichtigt werden. Der Verlauf der Impedanz Z_{Kette} fällt bei einem größeren Erdungswiderstand langsamer ab, daher wird das Fehlerkriterium erst bei einer höheren Gebäudeanzahl erfüllt. Mit der Hilfe von Abbildung 3.36 kann so die Anzahl an Gebäuden ermittelt werden, ab welcher man Z_{inf} als Kettenleiterimpedanz verwenden darf. Dafür wurden die Daten der Verteilnetzbetreiber aus Abschnitt 3.4.1 verwendet. Man benötigt dafür nur die Impedanz des PEN-Leiters Z_{PEN} und den Erdungswiderstand der Gebäude R_H , aus diesen beiden bildet man das Verhältnis und kann anschließend die Gebäudeanzahl i_{anz} ablesen. Anhand der Auswertung mit MATLAB® ergibt sich die größte Häufung, bei einem absoluten Fehler von $< 0,1$ Ω, bei einer Gebäudeanzahl zwischen 6 und 15 Gebäuden.

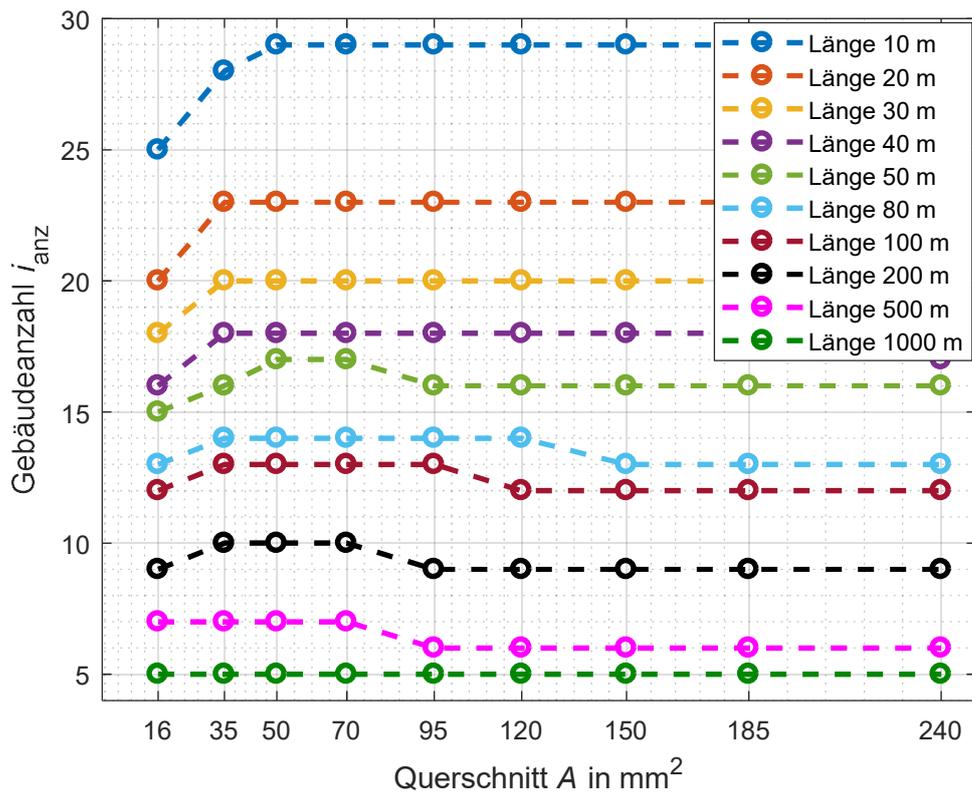


Abbildung 3.34: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $R_H = 10 \Omega$

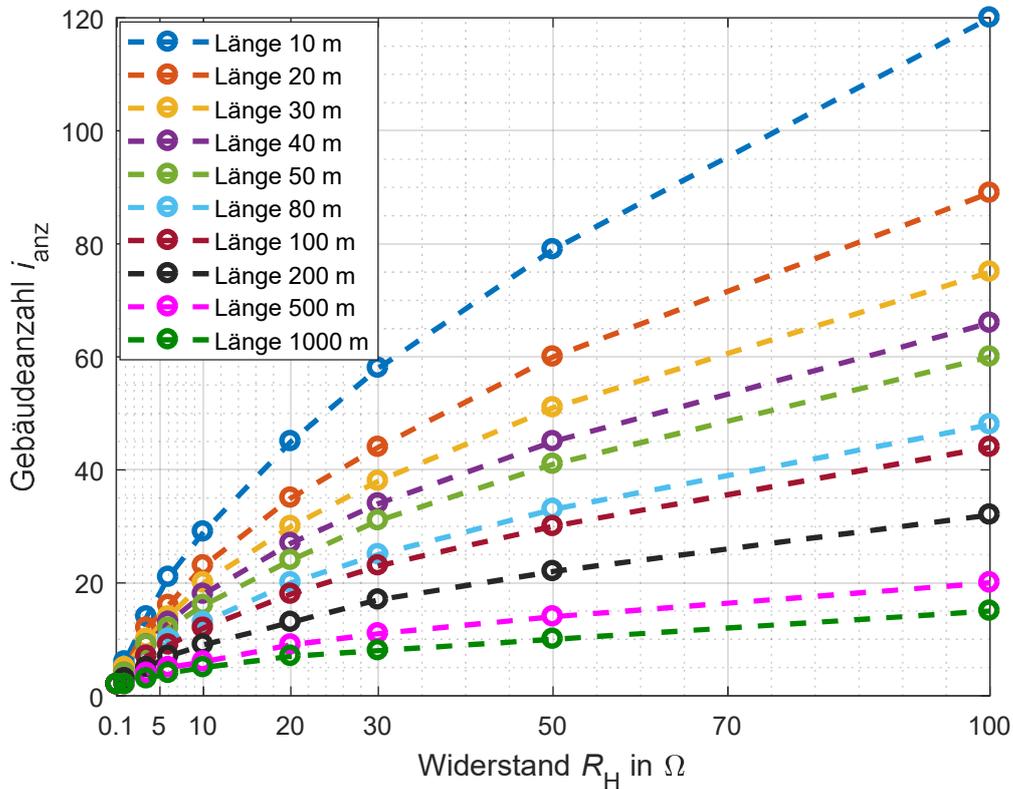


Abbildung 3.35: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 240 mm^2$

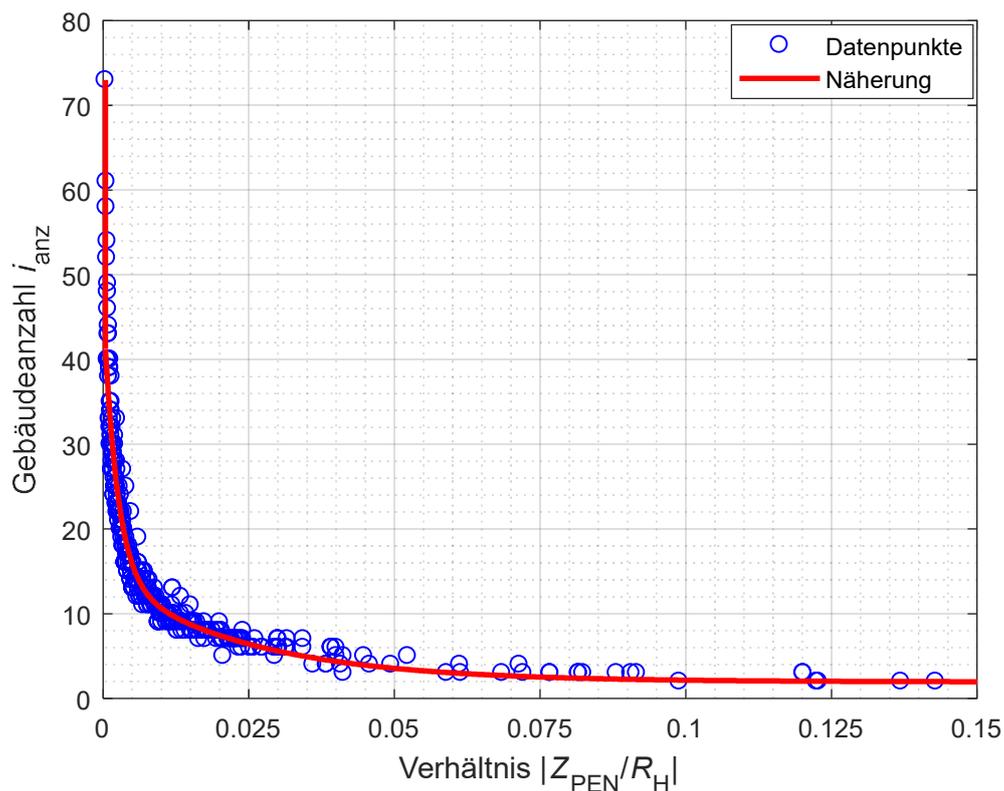


Abbildung 3.36: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$

3.4.5 Kettenleiter einer Mittelspannungsschaltstation

Nun betrachtet man den kompletten Kettenleiter wie er in Abbildung 3.12 dargestellt ist. Die Querelemente weisen die Impedanz \underline{Z}_E auf, welche sich aus dem Kettenleiter des Niederspannungsabzweiges und dem Anlagenerdungswiderstand $R_{E,m}$ der jeweiligen Ortsnetzstation ergibt. Der Schirm des Mittelspannungskabels, welcher die einzelnen Ortsnetzstationen miteinander verbindet, wird durch die Impedanz \underline{Z}_{Schirm} berücksichtigt. Es wird nun gezeigt, welche Auswirkungen die Distanz l , der Querschnitt des Kabelschirmes A und die Erdungsimpedanz \underline{Z}_E der einzelnen Querelemente auf die Kettenleiterimpedanz bzw. auf die Anzahl der zu beachtenden Mittelspannungsschaltstationen haben.

In Abbildung 3.37 wird eine konstante Erdungsimpedanz für den Niederspannungsabzweig von $\underline{Z}_E = 1,5 \Omega \angle 20^\circ$ für alle Gebäude angenommen. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit der Gebäudeanzahl vom Querschnitt A sehr gering ist, da bei den einzelnen Kennlinien keine großen Änderungen auftreten, jedoch hat auch hier die Distanz zwischen den Schaltstationen eine große Auswirkung. Die Impedanz \underline{Z}_{Schirm} des Kabelschirmes steigt proportional mit der Distanz l . Dadurch erhöht sich auch der Betrag der Impedanz \underline{Z}_{inf} . Bei einer längeren Distanz l ergibt sich daher eine geringere Anzahl von Schaltstationen, welche beachtet werden muss, da das Fehlerkriterium (absoluter Fehler zwischen der Kettenleiterimpedanz \underline{Z}_{Kette} und der Impedanz \underline{Z}_{inf}) schneller erfüllt wird.

In Abbildung 3.38 wird von einem konstanten Schirmquerschnitt von $A = 50 \text{ mm}^2$ ausgegangen. Auch hier ist die starke Abhängigkeit der Distanz l zu erkennen. Der Verlauf der Impedanz \underline{Z}_{Kette} fällt bei einer

höheren Erdungsimpedanz \underline{Z}_E langsamer ab, daher wird das Fehlerkriterium erst bei einer größeren Stationsanzahl erfüllt.

Durch Abbildung 3.39 kann für den gesamten Kettenleiter die Anzahl an Schaltstationen ermittelt werden, ab welcher man \underline{Z}_{inf} als Kettenleiterimpedanz verwenden darf. Auch hier werden die Daten der Verteilnetzbetreiber aus Abschnitt 3.4.1 verwendet. Man benötigt dafür die Impedanz des Kabelschirmes \underline{Z}_{Schirm} und die Erdungsimpedanz \underline{Z}_E der Niederspannungsabzweige. Aus diesen beiden bildet man das Verhältnis und kann anschließend die Stationsanzahl i_{anz} ablesen. Anhand der Auswertung mit MATLAB® ergibt sich, dass je nach Verhältnis zwischen 2 und 7 Schaltstationen für die Berechnung beachtet werden müssen. Die größte Häufung (ca. 80 %) der Datenpunkte ergibt sich bei einer Stationsanzahl zwischen 2 und 4 Ortsnetzstationen, damit man einen absoluten Fehler von $< 0,1 \Omega$ erhält.

Erhöht man die Anzahl der Abgänge an einem Niederspannungsabzweig, so verringert sich durch die Parallelschaltung der Abzweige die Erdungsimpedanz der jeweiligen Schaltstation. Dadurch erreicht man schlussendlich eine geringere Gesamtimpedanz des Kettenleiters, das führt dazu, dass geringere Schritt- bzw. Berührungsspannungen auftreten, auch bei einem Vergleich von Abbildung 3.39 und 3.40 ist dies zu erkennen. Bei der Abbildung 3.39 wurde je Schaltstation nur ein Niederspannungsabgang angeschlossen. In Abbildung 3.40 wurden 5 parallele Niederspannungsabgänge angeschlossen, dies vermindert die Gesamtimpedanz. Daher müssen hier nur 2 bis 3 Schaltstationen beachtet werden.

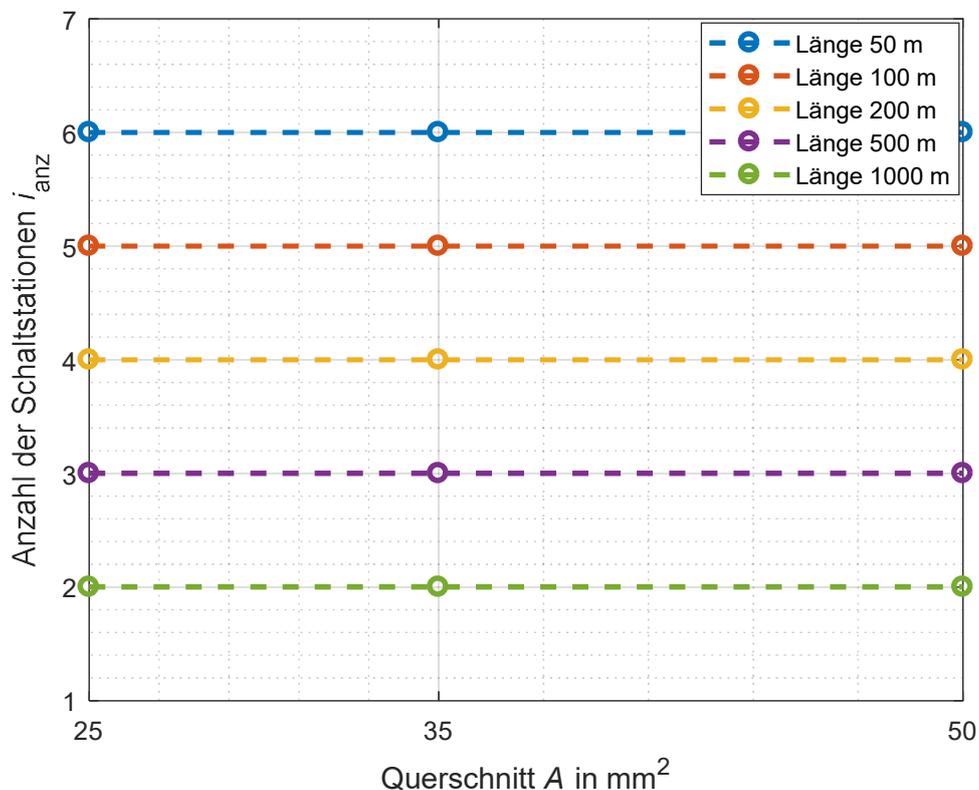


Abbildung 3.37: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $\underline{Z}_E = 1,5 \Omega \angle 20^\circ$

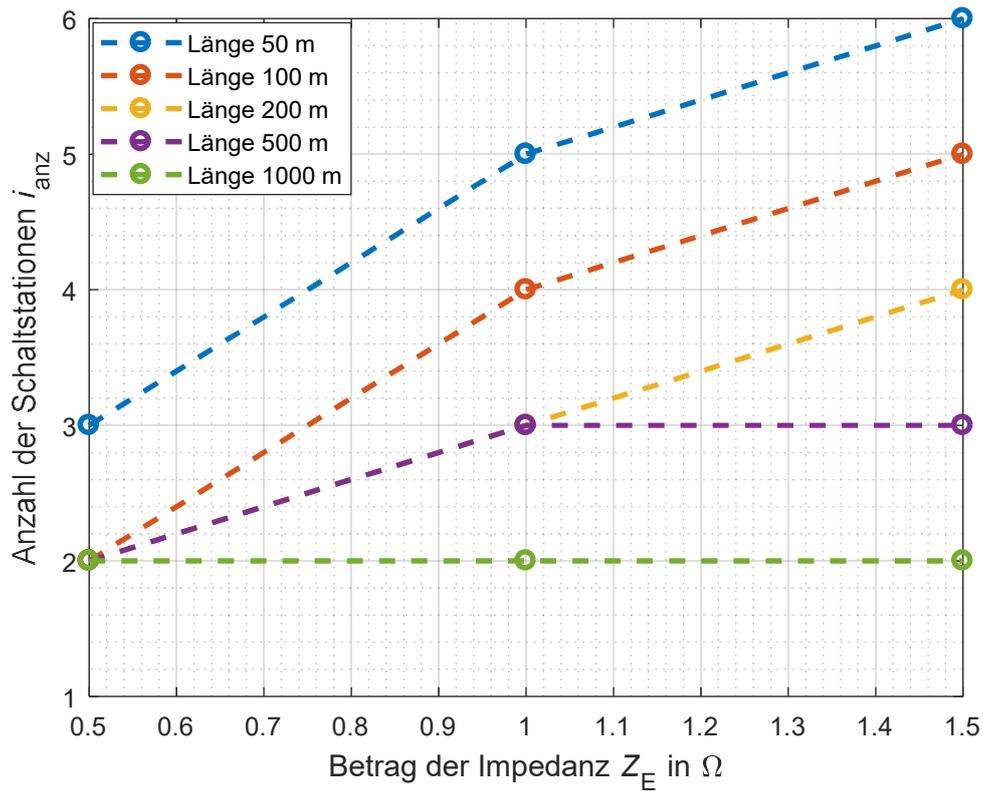


Abbildung 3.38: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 50 \text{ mm}^2$

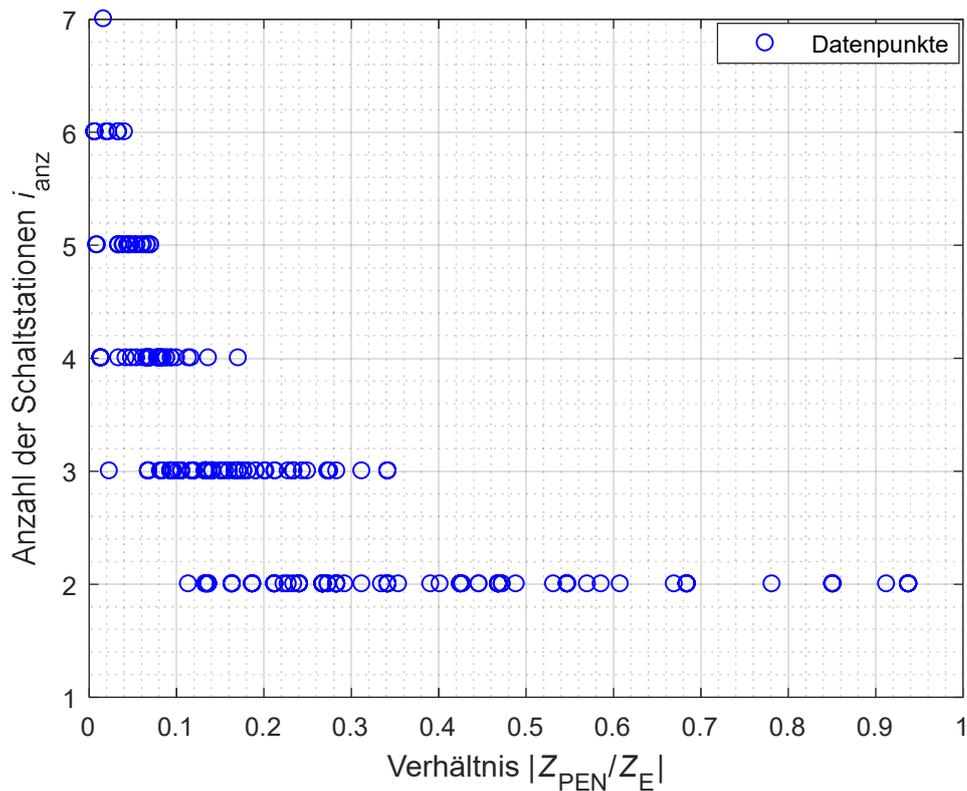


Abbildung 3.39: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$; 1 Abzweig

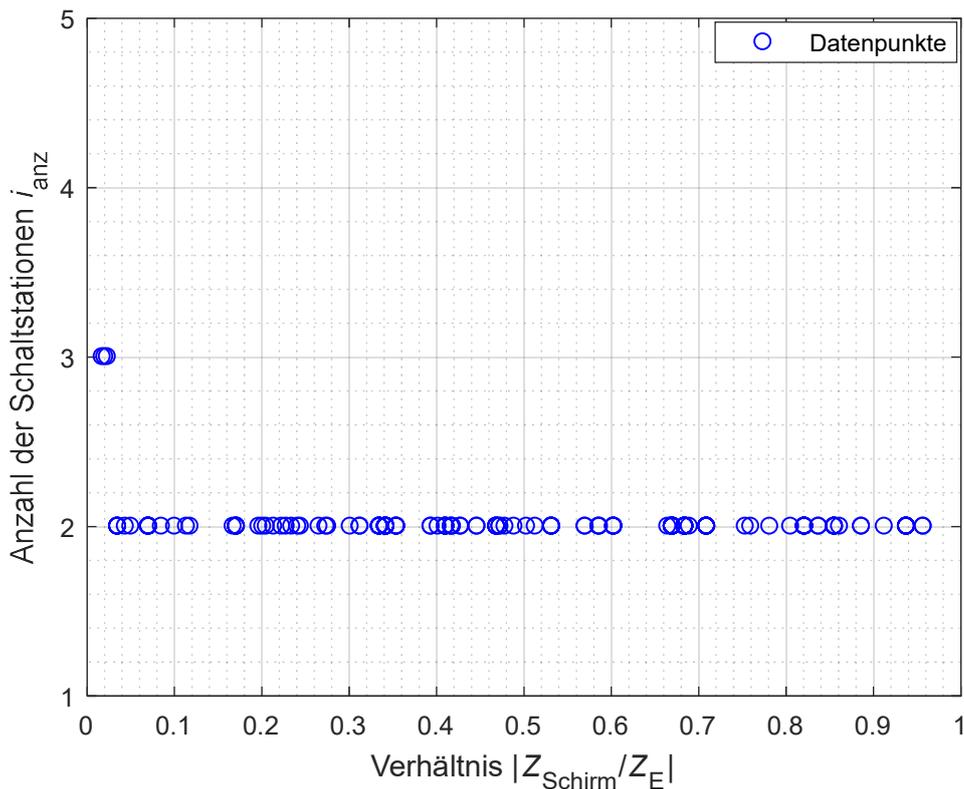


Abbildung 3.40: Näherung für absoluten Fehler < 0,1 Ω; 5 Abzweige

3.4.6 Wertebereiche für die Erdungsimpedanz

In Tabelle 7 sind die Wertebereiche für die Erdungsimpedanz angegeben, die nach der Landschaftsstruktur kategorisiert werden. Es wird hierbei auf die Daten bzw. Erkenntnisse von [49] und Abschnitt 3.4.1 zurückgegriffen, und mit den vorliegenden Daten die Kettenleiterimpedanz in MATLAB® berechnet. In Abbildung 3.41 und 3.42 sind beispielhafte Simulationsergebnisse für einen Niederspannungskettenleiter dargestellt, aus denen der Wertebereich für die Impedanz bestimmt werden kann. Weitere Ergebnisse können dem Anhang (Abschnitte 7.2.5, 7.2.6) entnommen werden.

Tabelle 7: Wertebereiche für die Erdungsimpedanz kategorisiert nach der Landschaftsstruktur

Struktur	Ländlich	Dorf	Stadt
Anzahl der Verbraucher	gering	mittel	hoch
Distanz Gebäude	40 m – 150 m	40 m – 100 m	10 m – 40 m
Art der Verbraucher	Gewerbe, Landwirtschaft	Einfamilienhäuser, Gewerbe	Mehrparteienhäuser, Bürogebäude, ...
Anlagenerder Gebäude	5 Ω - 35 Ω	5 Ω - 35 Ω	10 Ω - 35 Ω
Querschnitt PEN-Leiter	95 mm ² – 240 mm ²	95 mm ² – 240 mm ²	150 mm ² – 240 mm ²
Querschnitt Kabelschirm	25 mm ² – 50 mm ²	25 mm ² – 50 mm ²	25 mm ² – 50 mm ²
Distanz Schaltstation	400 m – 2000 m	ca. 800 m	ca. 300 m
Erdungsimpedanz Z_{Kette_NS}	0,5 Ω – 2,6 Ω 11° – 40°	0,3 Ω – 1,4 Ω 5° – 40°	0,4 Ω – 2,3 Ω 5° – 35°
Erdungsimpedanz Z_{Kette_MS}	0,05 Ω – 1,8 Ω 10° – 45°	0,05 Ω – 1,1 Ω 15° – 55°	0,03 Ω – 2,0 Ω 20° – 65°

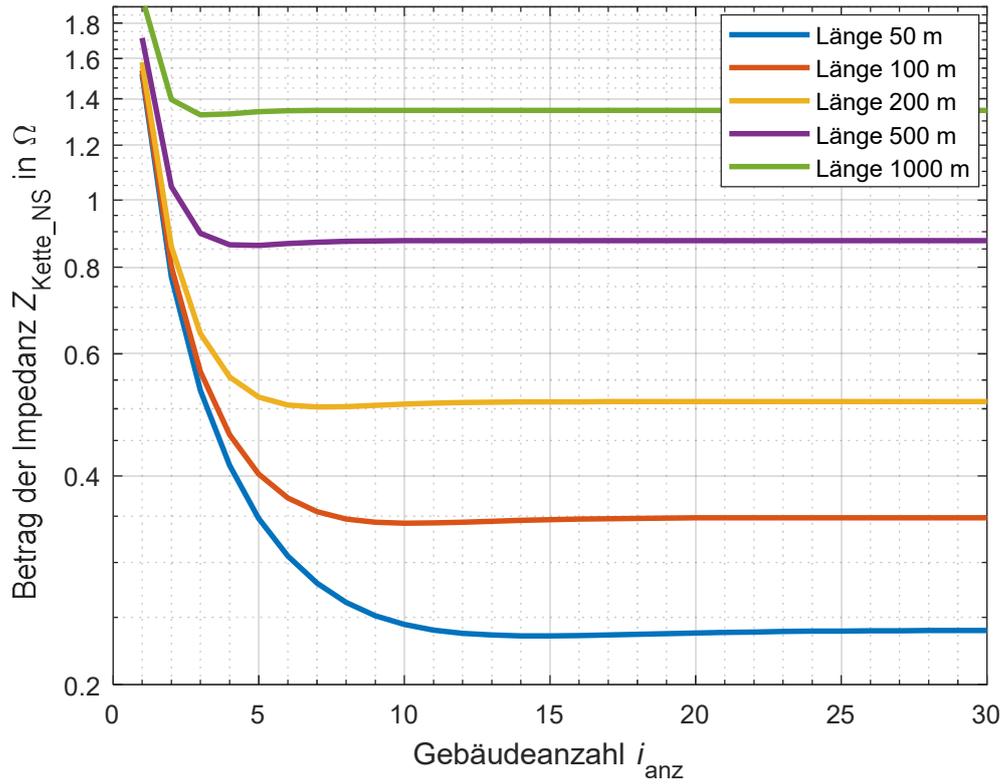


Abbildung 3.41: Impedanzverlauf Z_{Kette_NS} für variable Distanz l

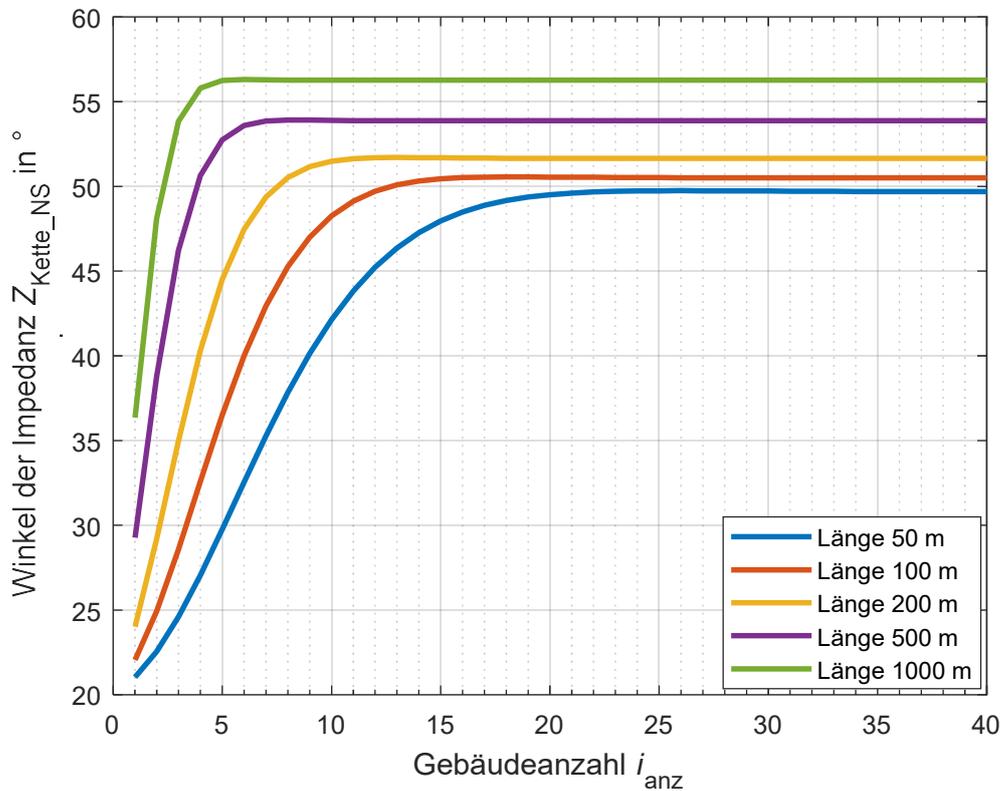


Abbildung 3.42: Winkelverlauf der Impedanz Z_{Kette_NS} für variable Distanz l

3.5 Simulationsergebnisse in XGSLab™

In den folgenden Abschnitten werden die Simulationsergebnisse, welche mithilfe von XGSLab™ erstellt wurden, erläutert. Durch XGSLab™ ist es möglich, nicht nur einen Kettenleiter, sondern auch komplexere Erdungssysteme zu berechnen und zu analysieren. Neben der Erdungsimpedanz kann damit auch die Schritt- und Berührungsspannung berechnet und nach den aktuell geltenden Normen bewertet werden. Durch die Simulation soll, wie bereits beim Kettenleiter in MATLAB®, eine Bestimmung der Erdungsimpedanz der Mittelspannungsschaltstation möglich sein, wenn die Netztopologie sowie Abschätzungen für spezifische Parameter bekannt sind. Die Simulationen können durch eine reale Messung einer Mittelspannungsschaltstation verifiziert werden. Dadurch ist es möglich einen groben Wertebereich für die Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation anzugeben. Die Software berücksichtigt neben der Impedanz des PEN-Leiters bzw. des Kabelschirmes zwischen den Gebäuden, auch die Erdungssysteme mit ihren geometrischen Abmessungen. Es ist somit möglich, die Erdungssysteme realitätsgetreu nachzubilden. In Kombination mit MATLAB® wird auch eine Parameteranalyse durchgeführt, welche zeigt, wie durch Variation einzelner Parameter die Kettenleiterimpedanz beeinflusst wird. Weiters werden Abweichungen zwischen der Simulation in XGSLab™ und in MATLAB® analysiert und diskutiert. Es wird außerdem gezeigt, wie man mit Formeln für einfache Erderanordnungen größere Erdungssysteme abschätzen kann. Schlussendlich wird auf die Potentialverteilung bei Erdungssystemen eingegangen.

3.5.1 Erdungswiderstand eines Gebäudes

In XGSLab™ wird der Erdungswiderstand R_H eines einzelnen Gebäudes bestimmt. Das Erdungssystem (siehe Abbildung 3.43) wurde in AutoCAD® konstruiert und anschließend in XGSLab™ importiert. Anschließend werden verschiedene Konfigurationen des Erdungssystems in Abhängigkeit von der Tiefe und des spezifischen Bodenwiderstandes, gemäß Abbildung 3.44, untersucht. Geht man von einem homogenen Bodenmodell mit $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$ aus, so kann man folgendes erkennen. Die rote Kennlinie beschreibt ein Erdungssystem mit 100 m^2 Flächeninhalt ohne Vermaschung. Mit steigender Tiefe nimmt der Erdungswiderstand ab, da zur Stromableitung mehr gut leitfähiges Erdreich im oberen Bereich des Erdungssystems zur Verfügung steht. Vergrößert man die Fläche des Erdungssystems auf 400 m^2 (hellblaue Kennlinie) so sinkt der Erdungswiderstand enorm ab, da mehr Fläche zur Stromableitung vorhanden ist. Durch eine Vermaschung (grüne Kennlinie) kann man den Erdungswiderstand ebenfalls absenken, da wiederum mehr leitfähige Fläche entsteht, über die der Strom abfließen kann. Erhöht man den spezifischen Widerstand des Erdbodens auf $\rho_E = 200 \Omega \cdot m$ (lila Kennlinie) so steigt der Erdungswiderstand verglichen mit der roten Kennlinie um das Doppelte an. Anhand dieses Beispiels lässt sich erkennen, dass der spezifische Bodenwiderstand ρ_E einen großen Einfluss auf die Höhe des Erdungswiderstandes hat. Nun wurde ein Bodenmodell laut Abbildung 3.45 implementiert, welches aus 2 Erdschichten mit $\rho_{E,1} = 100 \Omega \cdot m$ und $\rho_{E,2} = 60 \Omega \cdot m$ besteht. Anhand der dunkelblauen Kennlinie ist klar zu erkennen, dass in ca. 1 m Tiefe der Erdungswiderstand stark absinkt, da hier die niederohmige ($\rho_E = 60 \Omega \cdot m$) Erdschicht beginnt.

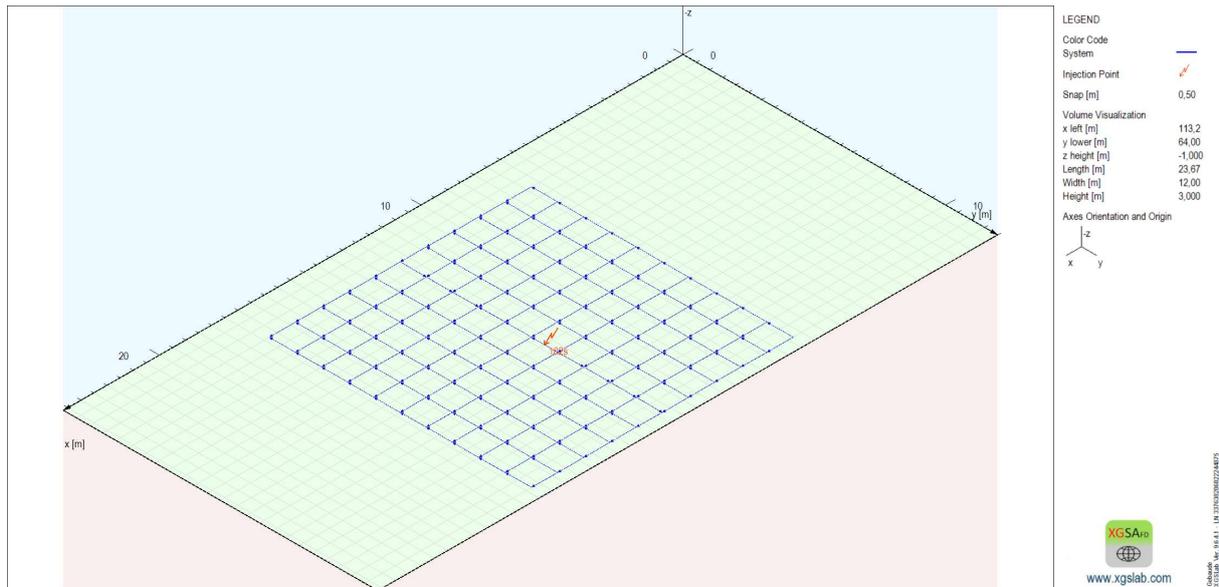
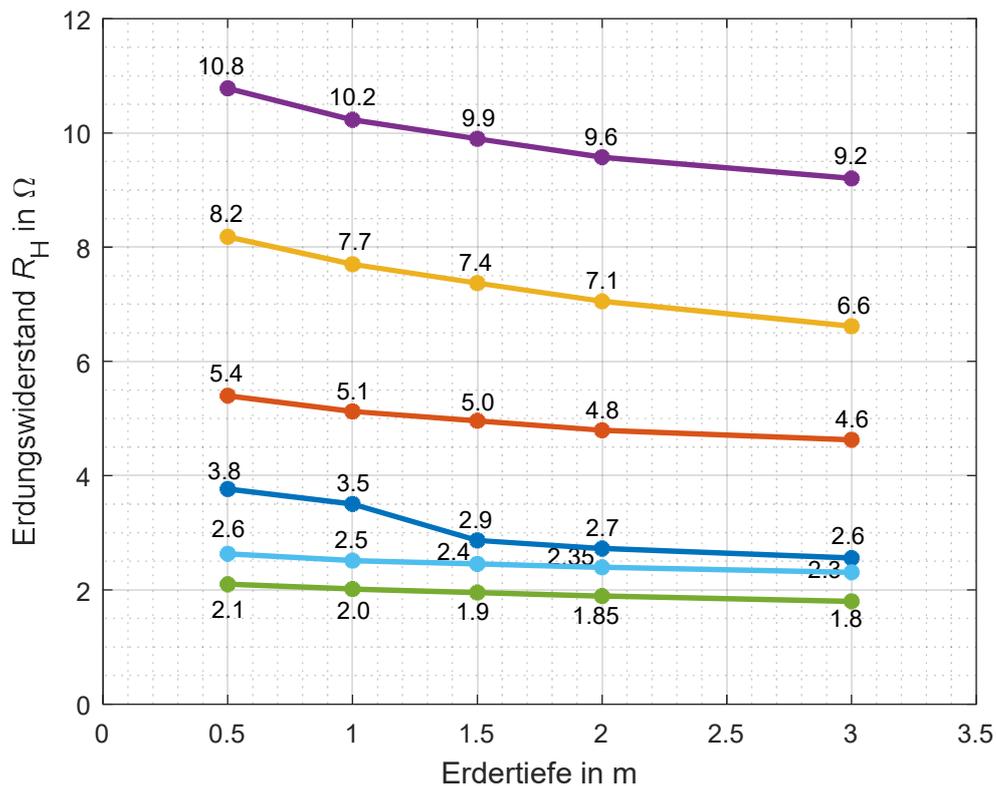


Abbildung 3.43: Vermaschtes Erdungssystem in XGSLab™



Legende:

- Gebäude 10 m X 10 m, ohne Vermaschung, $\rho_E = 200 \Omega \cdot m$
- Gebäude 10 m X 10 m, mit Vermaschung, $\rho_E = 200 \Omega \cdot m$
- Gebäude 10 m X 10 m, ohne Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$
- Gebäude 10 m X 10 m, mit Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 60 \Omega \cdot m$
- Gebäude 20 m X 20 m, ohne Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$
- Gebäude 20 m X 20 m, mit Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$

Abbildung 3.44: Erdungswiderstand als Funktion der Tiefe

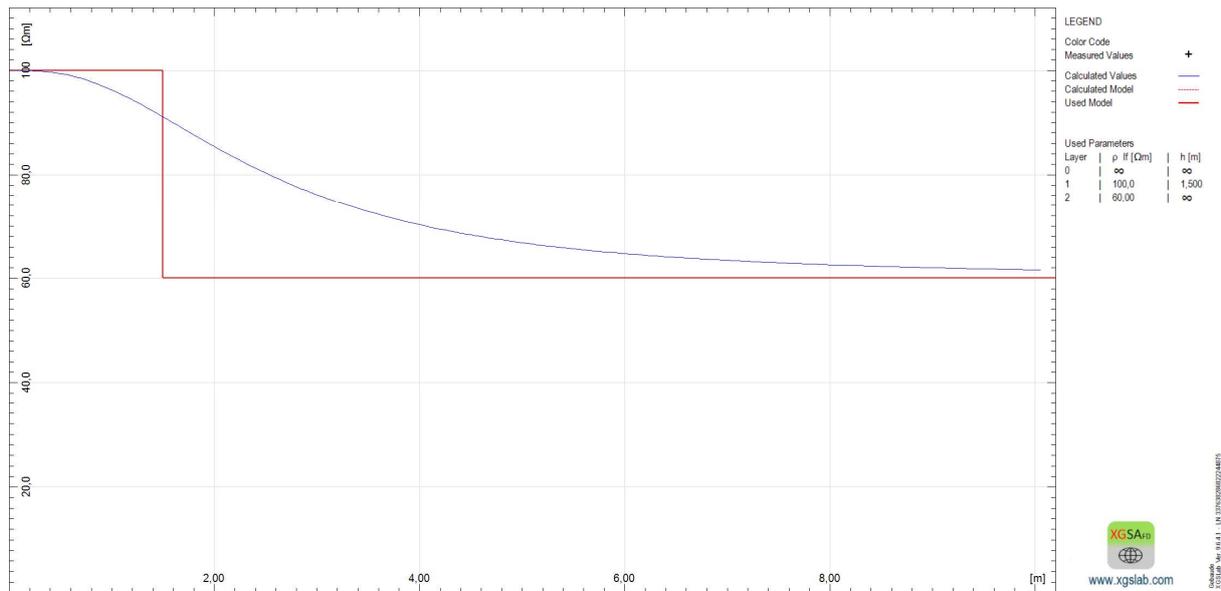


Abbildung 3.45: Bodenmodell $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m} / 60 \Omega \cdot \text{m}$

3.5.2 Einzelnes Gebäude mit angeschlossenem PEN-Leiter

Im folgenden Simulationsszenario wird an das vermaschte Erdungssystem ein PEN-Leiter angeschlossen (siehe Abbildung 3.46). Die Fläche des Erdungssystems beträgt 100 m^2 , der Durchmesser des verwendeten Runddrahtes beträgt 10 mm und für den spezifischen Bodenwiderstand wird $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m}$ angenommen. Es wird der Querschnitt des PEN-Leiters variiert, sowie eine Simulation mit den Längen 20 m und 200 m durchgeführt. Durch die Kenntnis zweier Erdungsimpedanzen bei unterschiedlichen PEN-Leiter Längen lässt sich durch die Bildung der Differenz der beiden Impedanzen und anschließender Schlussrechnung auf den Impedanzbelag des PEN-Leiters rückrechnen, siehe Tabelle 8. Anschließend werden die Impedanzbeläge mit jenen von MATLAB[®] verglichen.

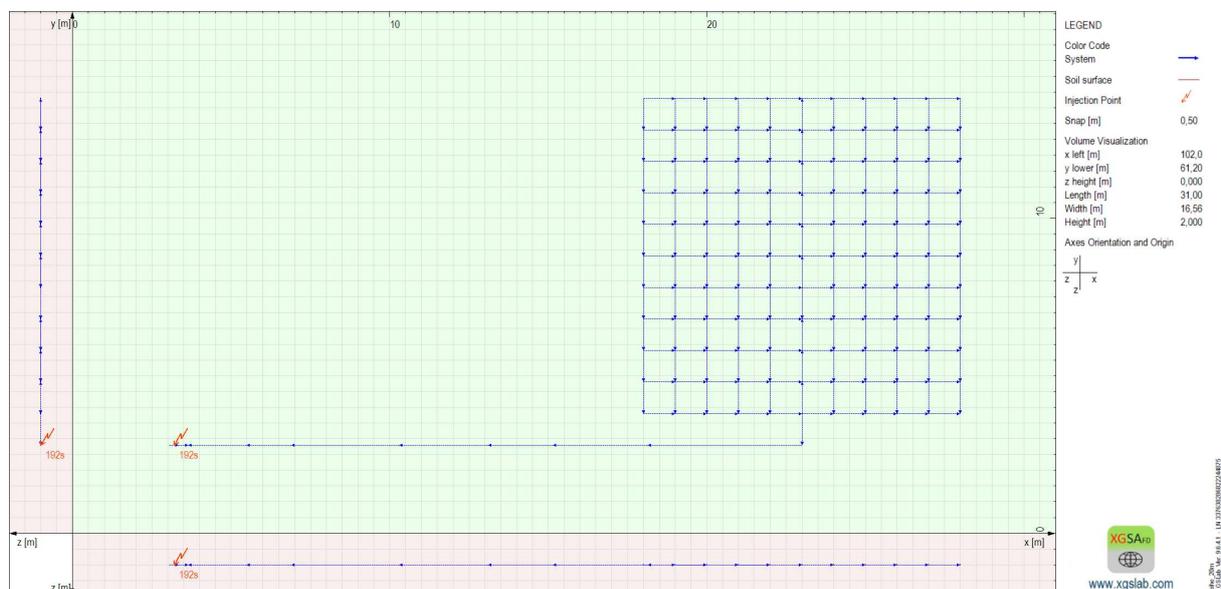
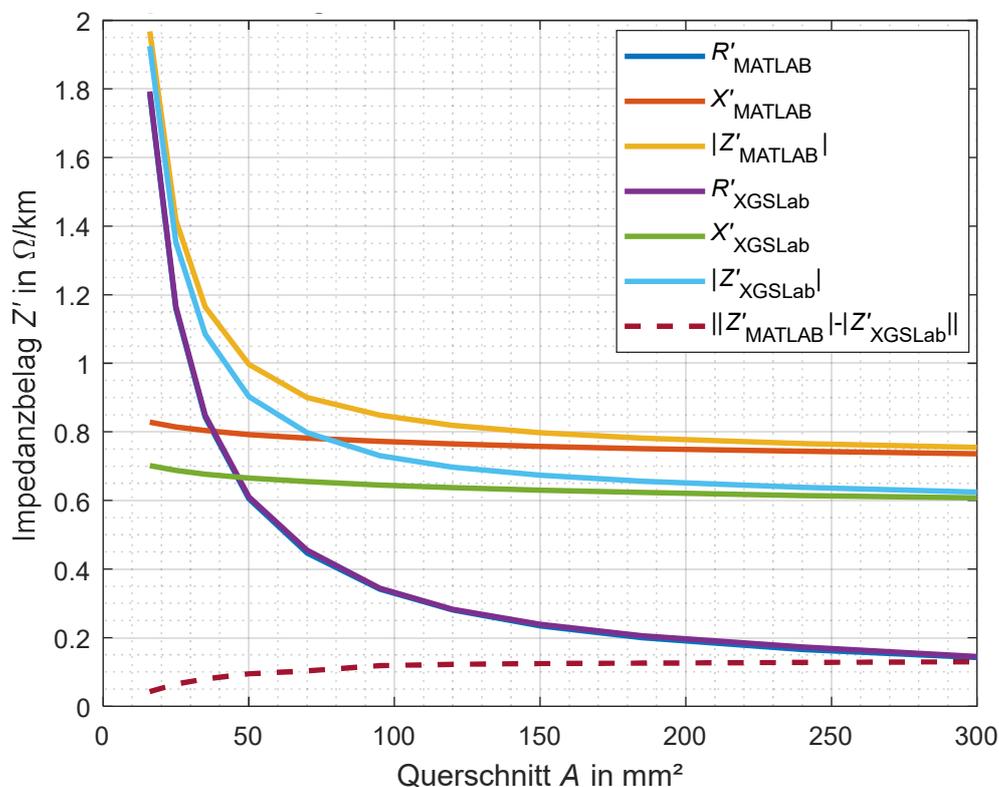


Abbildung 3.46: Erdungssystem mit PEN-Leiter in XGSLabTM

Tabelle 8: Berechnung Impedanzbelag PEN-Leiter

Querschnitt A in mm ²	l = 20 m		l = 200 m		Differenz l = 180 m		Impedanz l = 1000 m	
	Z in Ω	∠ in °	Z in Ω	∠ in °	Z in Ω	∠ in °	Z in Ω / km	∠ in °
16	3,95	0,21	4,20	1,91	0,35	21,37	1,93	21,37
25	3,92	0,20	4,00	1,93	0,24	30,54	1,35	30,54
35	3,88	0,20	4,00	1,93	0,20	38,56	1,09	38,56
50	3,87	0,20	3,98	1,92	0,16	47,48	0,90	47,48
70	3,86	0,20	3,95	1,90	0,14	55,22	0,80	55,22
95	3,86	0,19	3,92	1,88	0,13	61,92	0,73	61,92
120	3,86	0,19	3,91	1,87	0,13	66,05	0,70	66,00
150	3,86	0,19	3,90	1,85	0,12	69,24	0,67	69,23
185	3,86	0,19	3,90	1,84	0,12	71,74	0,66	71,74
240	3,86	0,18	3,89	1,81	0,12	74,31	0,64	74,31
300	3,86	0,18	3,88	1,79	0,11	76,57	0,62	76,57

Abbildung 3.47: Vergleich der Impedanzbeläge Z'_{MATLAB} und Z'_{XGSLab}

In Abbildung 3.47 sind die Impedanzbeläge, sowie deren Imaginär- und Realteil, welche mit MATLAB® und XGSLab™ berechnet werden, dargestellt. Der Realteil beider Simulationen stimmt nahezu perfekt überein. Beim Imaginärteil hingegen ergibt sich eine Abweichung von ca. $0,14 \frac{\Omega}{\text{km}}$. Ein Grund dafür ist, dass in MATLAB® von einem unendlich langen Leiter mit Erdrückleitung ausgegangen wird, wohingegen XGSLab™ einen endlichen Leiter berücksichtigt. Weiters werden in MATLAB® keine Randeffekte, wie ohmsche oder induktive Kopplungen berücksichtigt. Es wird auch ein Vergleich mit den Impedanzen für kurze Leiter in MATLAB® gemacht, aber auch dies ergibt nur einen minimal kleineren Fehler. Der Hauptgrund liegt in den unterschiedlichen Rechenmodellen von XGSLab™ und MATLAB®.

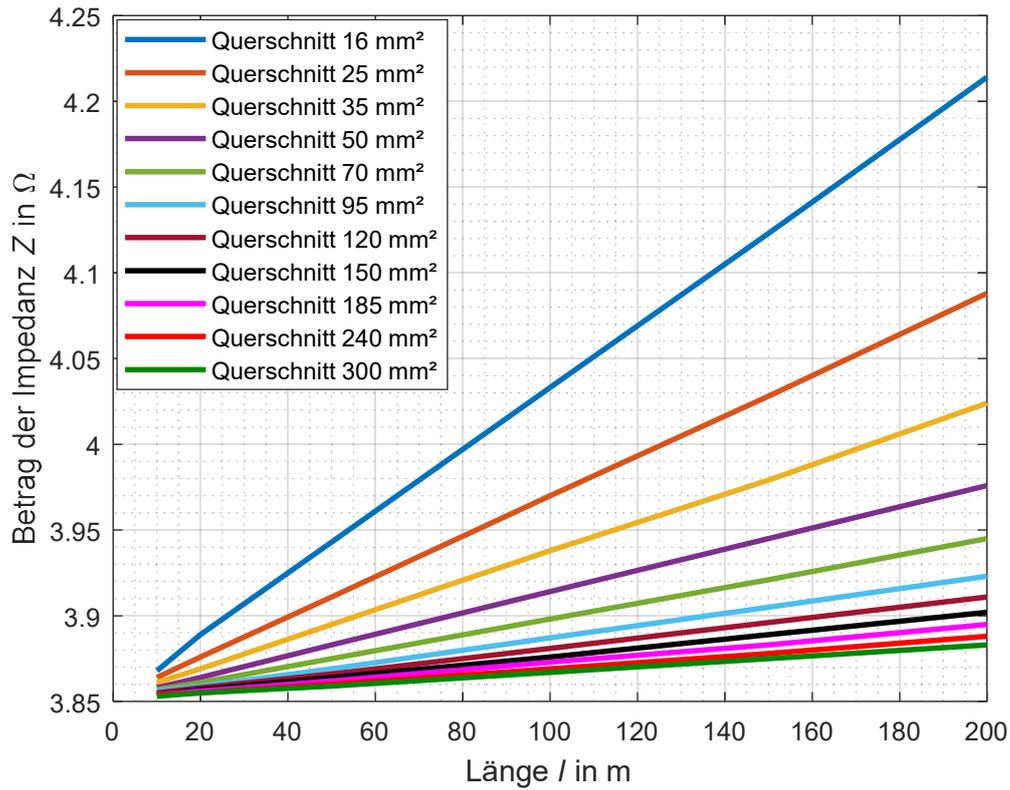


Abbildung 3.48: Impedanz $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}} = R_H + \underline{Z}_{\text{PEN}}$ für verschiedene Querschnitte

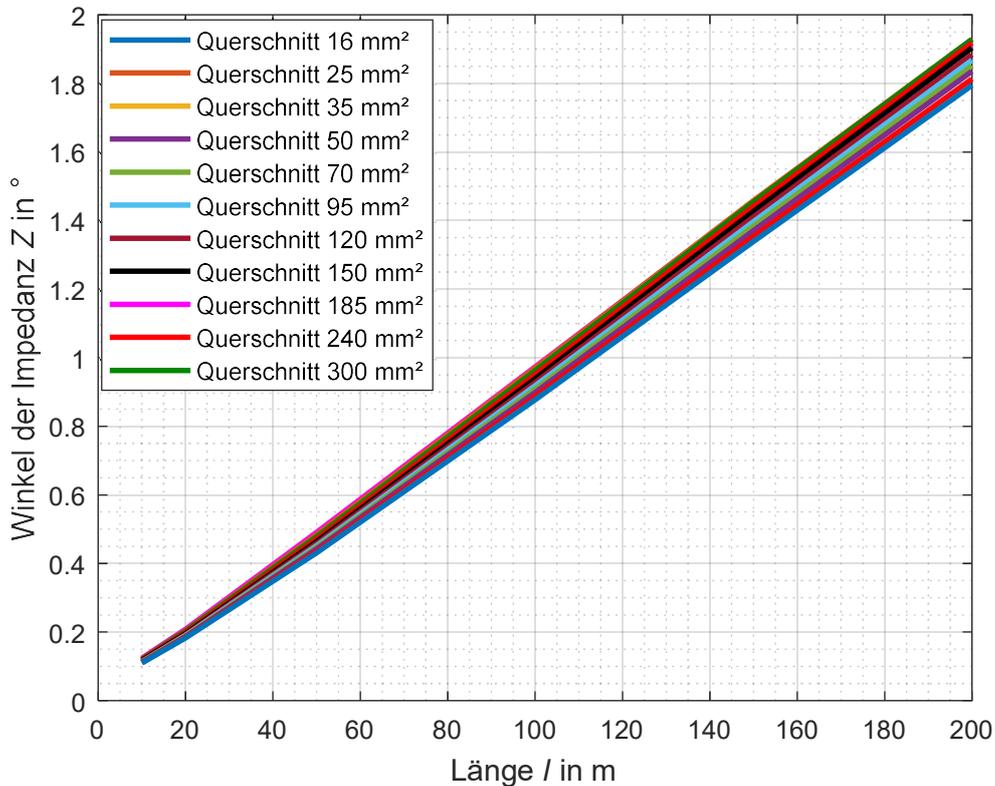


Abbildung 3.49: Winkel der Impedanz $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}} = R_H + \underline{Z}_{\text{PEN}}$ für verschiedene Querschnitte

Es wird auch die Impedanz $Z_{\text{Kette_NS}}$, welche sich aus der Serienschaltung vom Erdwiderstand R_H und der Impedanz des PEN-Leiters Z_{PEN} ergibt, betrachtet, um die Auswirkung des PEN-Leiters auf diese zu untersuchen. In Abbildung 3.48 ist zu erkennen, dass die Gesamtimpedanz mit steigendem Querschnitt abnimmt, da der Realteil des Impedanzbelages für den PEN-Leiter mit größerem Querschnitt stark abfällt. In der Praxis kommen häufig die Querschnitte zwischen 120 mm^2 und 240 mm^2 vor. Hier ist zu erkennen, dass sich der Querschnitt nahezu gar nicht auf die Gesamtimpedanz auswirkt. Der Querschnitt hat außerdem nur einen geringen Einfluss auf den Impedanzwinkel, wie man in Abbildung 3.49 sehen kann. Jedoch hat der Winkel eine große Abhängigkeit von der Leitungslänge des PEN-Leiters.

3.5.3 Mehrere Gebäude mit angeschlossenem PEN-Leiter

Bei diesem Simulationsszenario wird die Anzahl an Gebäuden sowie die Distanz zwischen diesen variiert (siehe Abbildung 3.50). Jedes Gebäude weist einen Anlagenerdungswiderstand R_H von ca. $3,8 \Omega$ bei einer Fläche von 100 m^2 auf. Die Simulationsdaten sind im Anhang, Abschnitt 7.3.3 ersichtlich. Zum Vergleich der Simulation in XGSLab™ wird dieses Szenario auch in MATLAB® simuliert. In Abbildung 3.51 sind die Ergebnisse der Simulationen für die Kettenleiterimpedanz $Z_{\text{Kette_NS}}$ in Abhängigkeit vom Abstand l für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden ersichtlich. Für einen steigenden Abstand zwischen den Gebäuden nimmt die Erdungsimpedanz zu, da die PEN-Leiter Impedanz direkt proportional der Länge ist. Erhöht man die Gebäudeanzahl, so erreicht man für Längen $> 300 \text{ m}$ eine höhere Erdungsimpedanz, da der Kettenleiter eine höhere Kettenleitergesamtimpedanz Z_{inf} besitzt. Für die Szenarien im Niederspannungsbereich ($< 100 \text{ m}$) kann grundsätzlich die Aussage getroffen werden, dass aus einer höheren Gebäudeanzahl eine geringere Erdungsimpedanz resultiert. Im rot markierten Bereich in Abbildung 3.51 ist die Abweichung zwischen der Erdungsimpedanz, welche in XGSLab™ ermittelt wurde und jener vom Kettenleiter aus MATLAB® besonders groß. In diesem Bereich steigt die Erdungsimpedanz aus XGSLab™ im Vergleich zur Impedanz aus MATLAB® stark an. Grund dafür ist die ohmsche Kopplung der Erdungssysteme, welche die Erdungsimpedanz erhöht.

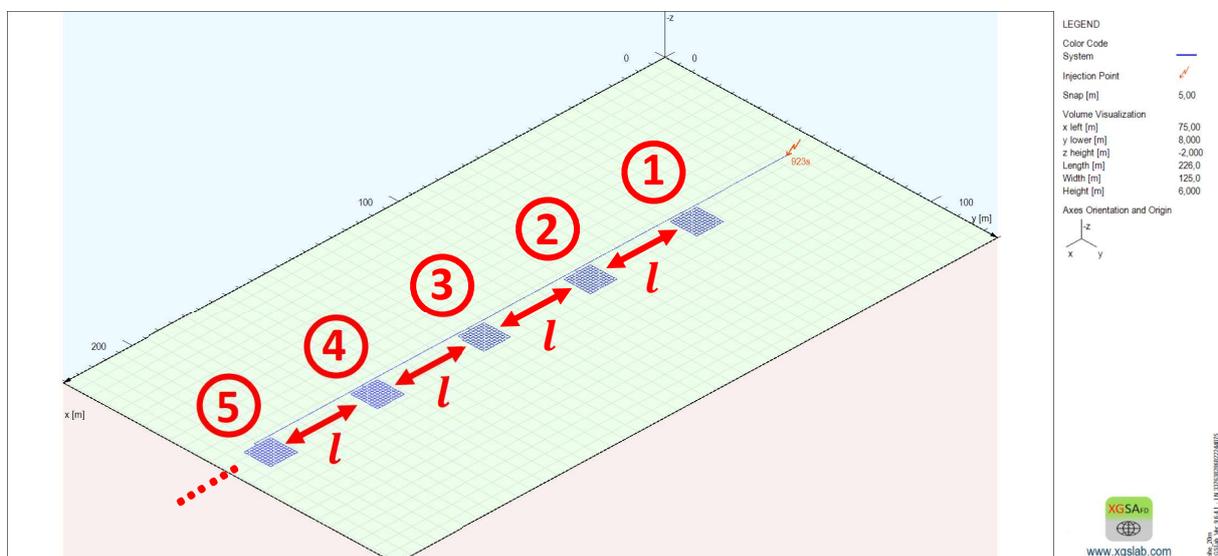


Abbildung 3.50: Simulationsszenario

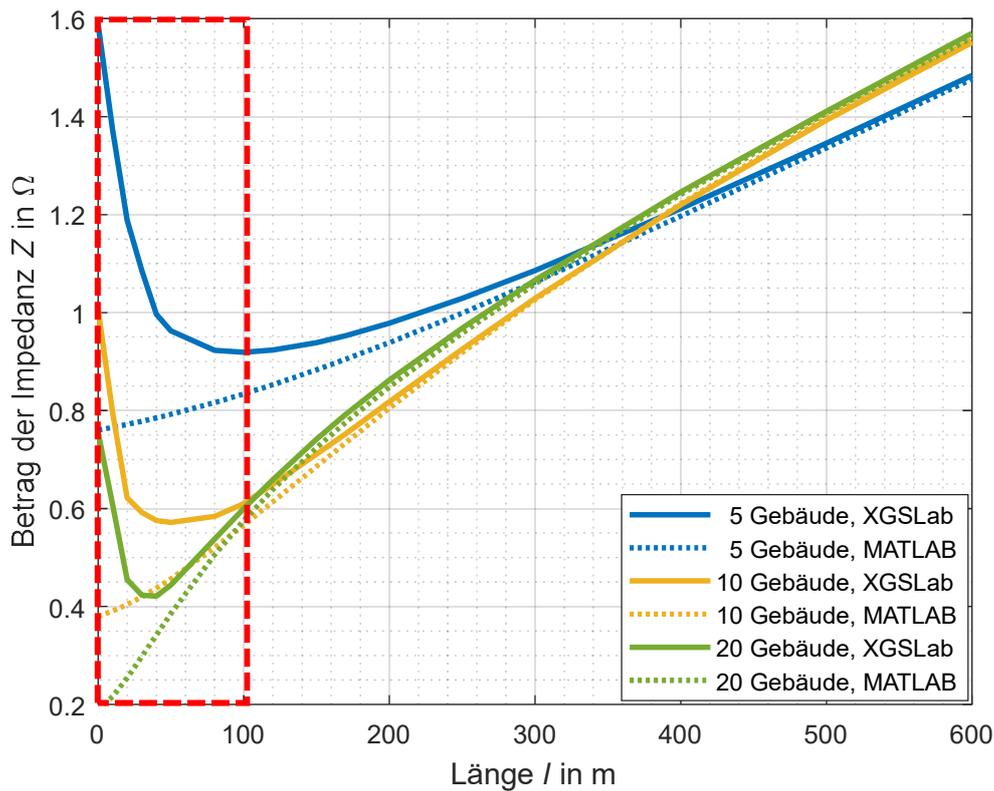


Abbildung 3.51: Impedanz $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}$ für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden

Die ohmsche Kopplung wird beim Kettenleiter, der in MATLAB® realisiert wurde, nicht betrachtet, daher ergibt sich für jene Kennlinien eine kleinere Erdungsimpedanz für den rot markierten Bereich.

Die Wirkungsweise der ohmschen Kopplung kann zudem mit der Simulation in XGSLab™ verdeutlicht werden. In Abbildung 3.52 beträgt der Abstand zwischen den Gebäuden 600 m, es tritt keine gegenseitige Beeinflussung auf. Die Erdungsimpedanz hat einen Wert von $|\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}| = 1,5 \Omega$ aufgrund der hohen Leitungslänge. Verringert man die Distanz auf 100 m, so ist in Abbildung 3.53 die gegenseitige Beeinflussung der Erdungssysteme zu sehen. Die zugehörige Erdungsimpedanz beträgt $|\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}| = 0,9 \Omega$. Nähert man sich auf 20 m, wie in Abbildung 3.54 gezeigt ist, so erhöht sich die Impedanz auf $|\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}| = 1,2 \Omega$.

Die ohmsche Beeinflussung lässt sich auch anhand der Kennlinien in Abbildung 3.55 erkennen. Betrachtet man nur den Realteil der Impedanz $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}$, so ist zu erkennen, dass dieser bei kurzen Distanzen dominant ist.

Die Impedanzwinkel sind in Abbildung 3.56 dargestellt. Der Winkel der Impedanz, welcher mit MATLAB® ermittelt wurde, nähert sich, wie auch schon der Betrag, mit zunehmender Leitungslänge, dem von XGSLab™ an. Somit ist der PEN-Leiter maßgeblich für den Betrag des Winkels verantwortlich. Je mehr Gebäude man berücksichtigt, desto größer ist der effektive Winkel. Dies ergibt sich dadurch, dass aus einer höheren Gebäudeanzahl, eine größere PEN-Leiter Länge resultiert.

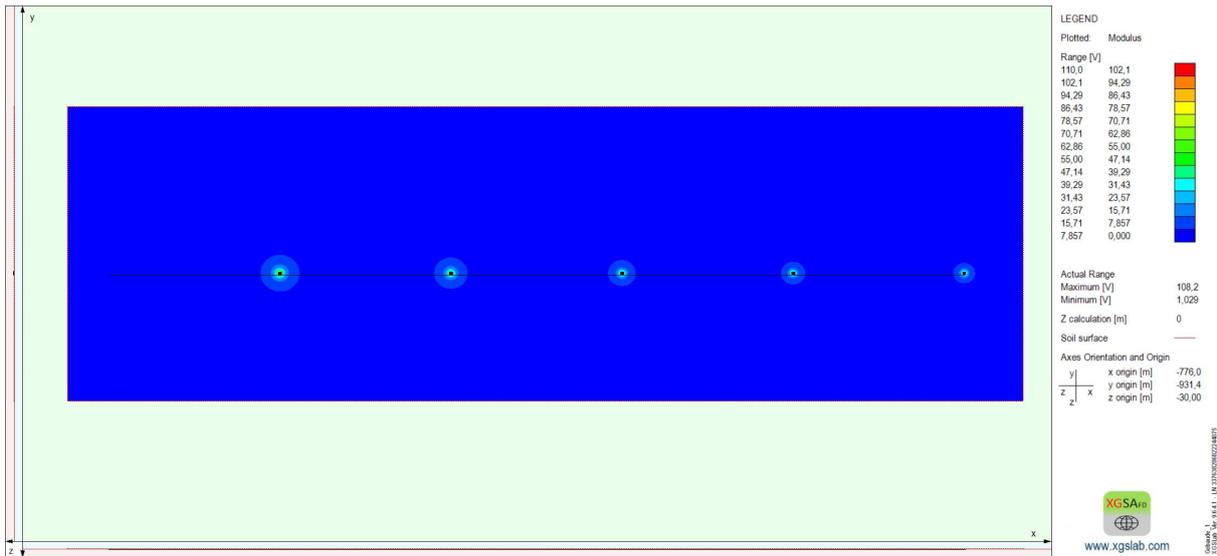


Abbildung 3.52: Ohmsche Kopplung 600 m

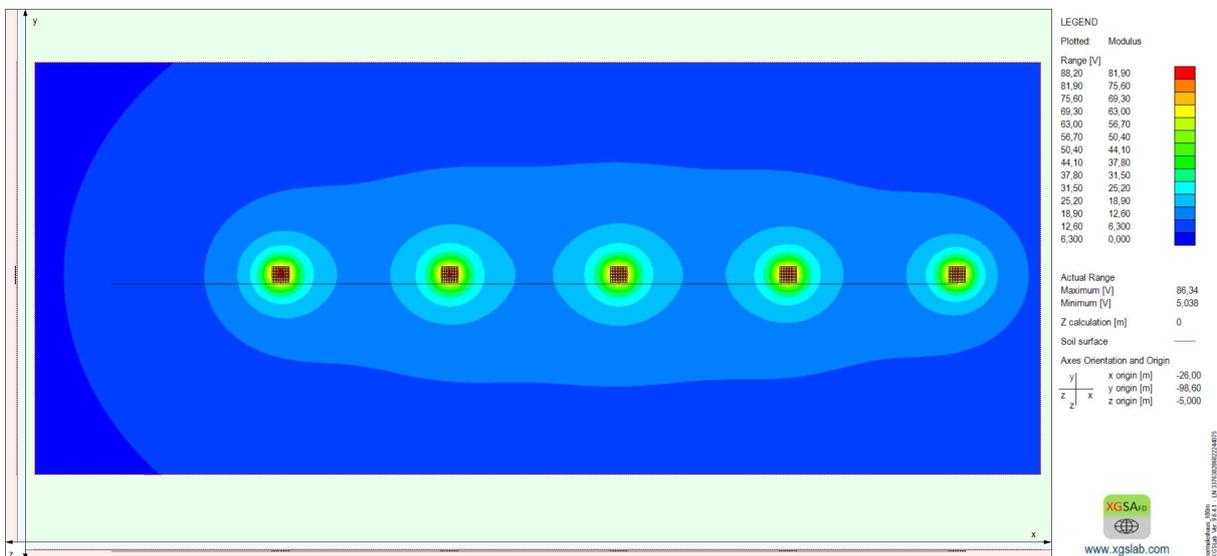


Abbildung 3.53: Ohmsche Kopplung 100 m

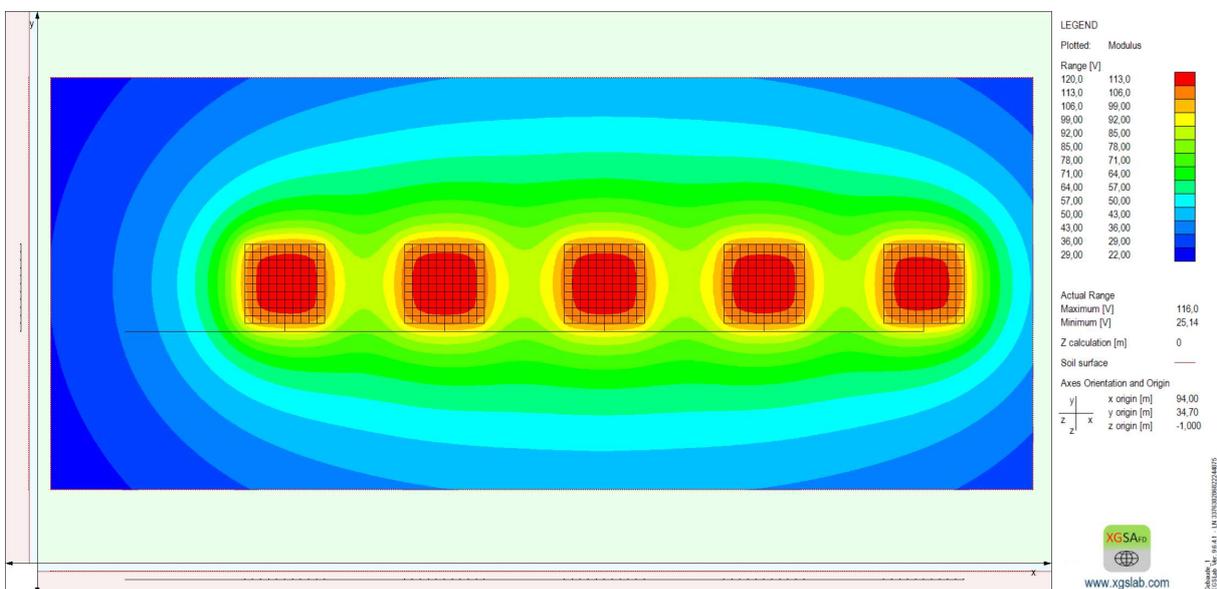


Abbildung 3.54: Ohmsche Kopplung 20 m

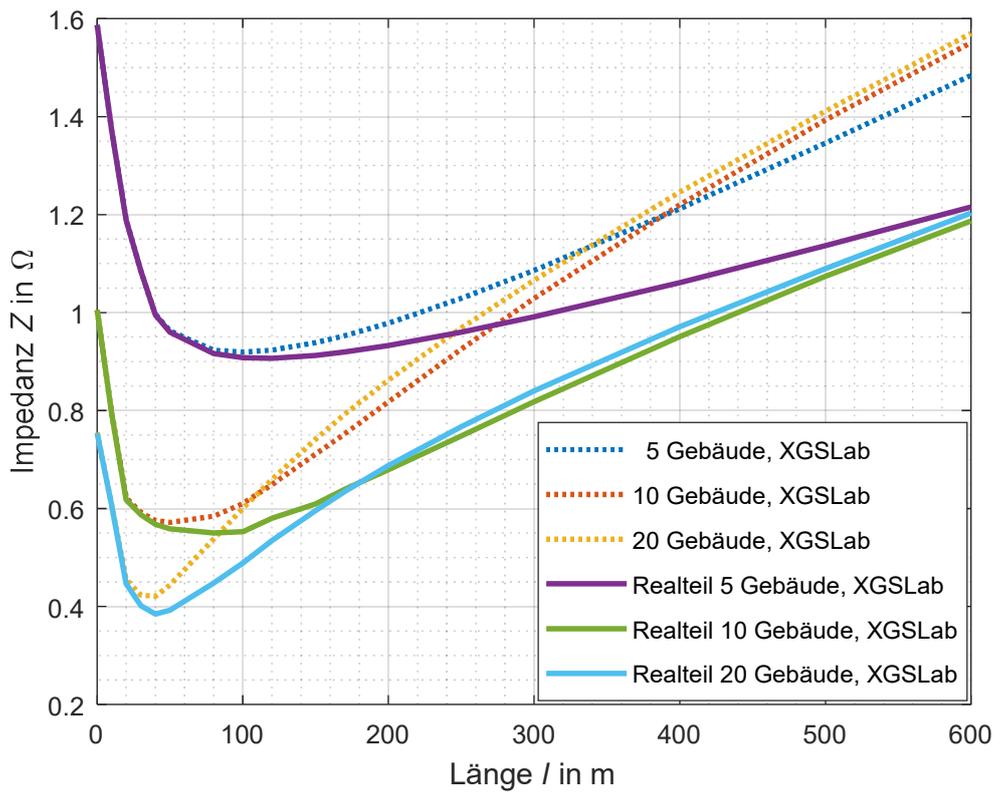


Abbildung 3.55: Realteil von Z_{Kette_NS} für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden

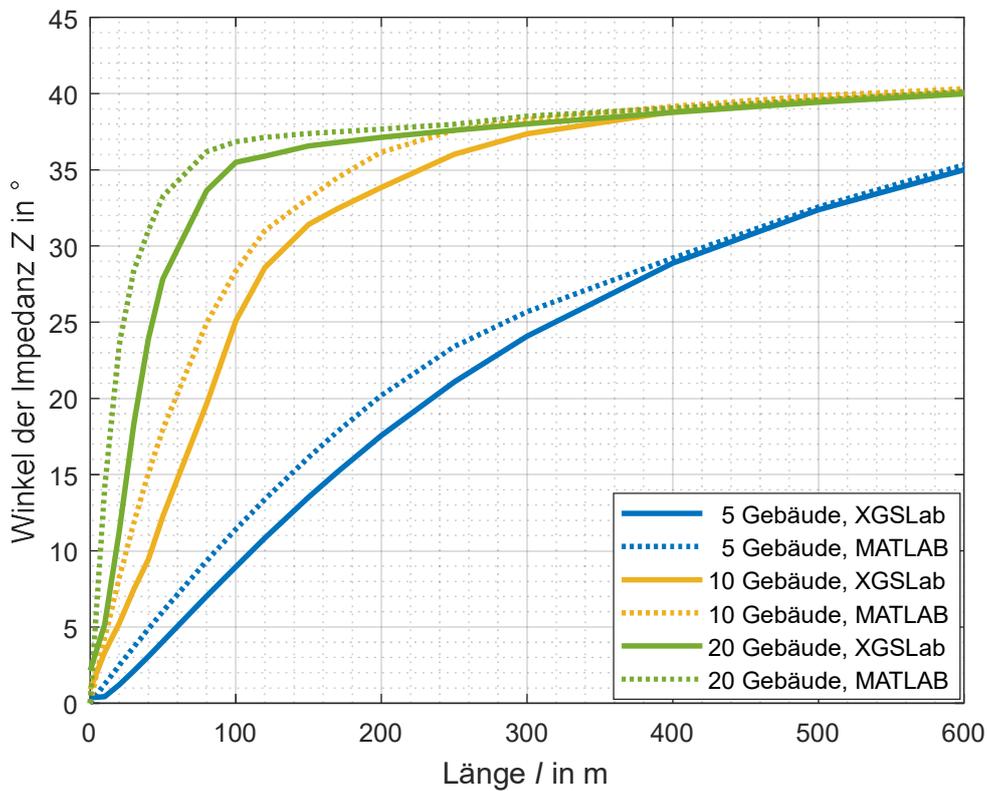


Abbildung 3.56: Impedanzwinkel von Z_{Kette_NS} für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden

3.5.4 Abschätzung des Erdungswiderstandes von einfachen Netzstrukturen

Um in der Praxis eine schnelle Abschätzung des Erdungswiderstandes vorzunehmen, kann man Formeln für vereinfachte Erderanordnungen verwenden, welche in Abschnitt 2.11 angegeben sind. Dabei muss man die Fläche der Erderanordnung mithilfe von geometrischen Formen abschätzen (siehe Abbildung 3.57 und 3.58) und anschließend einen Ersatzradius berechnen, um danach den Erdungswiderstand zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Fläche mit AutoCAD® abgeschätzt. Bei der Verwendung der Formeln werden alle Leitungsverbindungen vernachlässigt, daher ist es auch nicht möglich eine Aussage über den Impedanzwinkel zu treffen. Mit dieser Methode kann schnell ein grober Wertebereich für den Erdungswiderstand ermittelt werden.

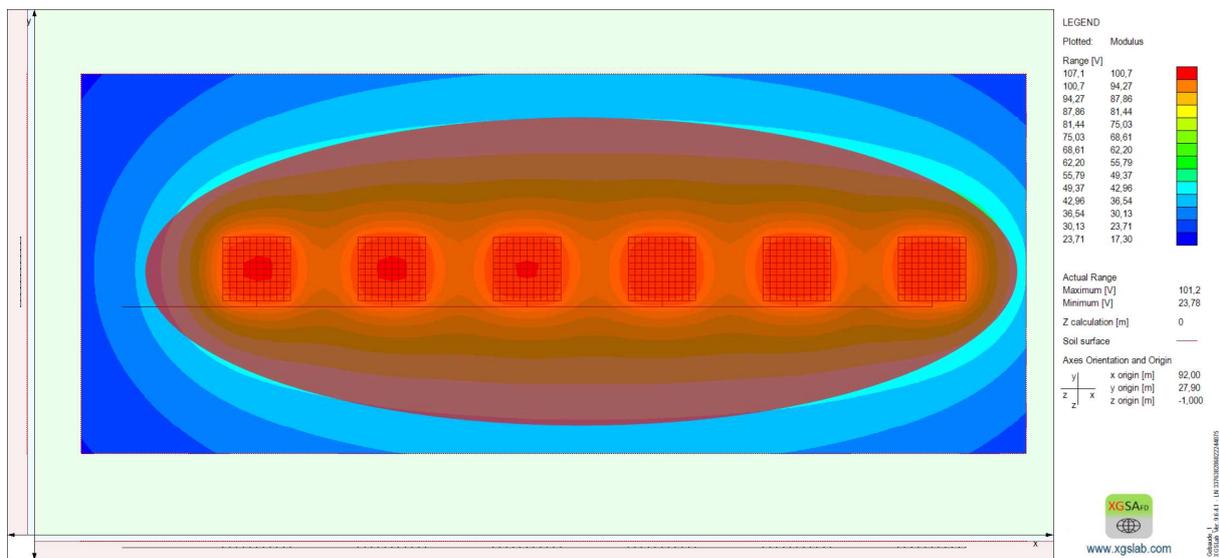


Abbildung 3.57: Abschätzung der Fläche

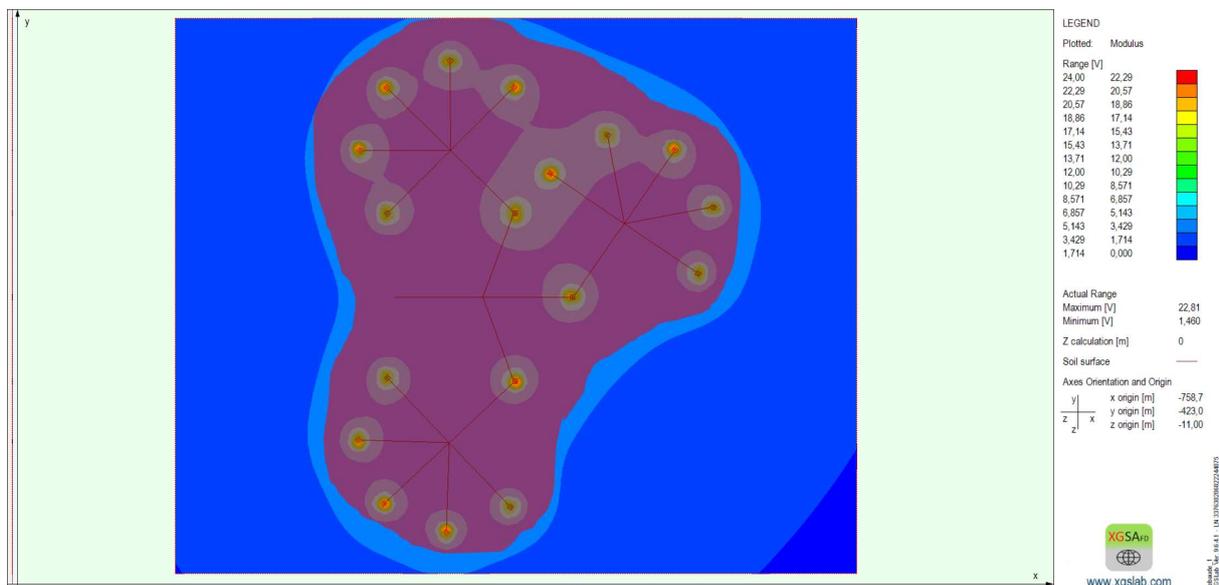


Abbildung 3.58: Abschätzung von Netzstrukturen

Im ersten Simulationsszenario (siehe Abbildung 3.57) wird gemäß Tabelle 9, die Anzahl der Gebäude variiert und der Erdungswiderstand R_{H_XGS} des Kettenleiters bestimmt. Der Widerstand wird mit Hilfe eines Kreisplattenerders R_{H_KP} abgeschätzt und der relative Fehler der Erdwiderstände berechnet. Wie die Auswertung zeigt, vergrößert sich der Fehler mit steigender Gebäudeanzahl. Dies liegt einerseits am Fehler, den man bei der Abschätzung der Fläche macht und andererseits, steigt mit der Gebäudeanzahl auch die Länge der PEN-Leiter, die man in der Betrachtung vernachlässigt.

Tabelle 9: Vergleich Messdaten XGSLab™ und Plattenerder (Distanz $l = 50$ m)

Anzahl von Gebäuden	R_{H_XGS} in Ω	R_{H_KP} in Ω	Fehler Kreisplatte in %
1	3,12	3,33	6,7
4	1,16	1,32	13,8
6	0,83	0,98	18,1
12	0,52	0,64	23,0

In Abbildung 3.58 wird der Erdungswiderstand einer gesamten Netzstruktur abgeschätzt. Die Simulation in XGSLab™ ergibt einen Wert von $R_{H_XGS} = 0,43 \Omega$. Verwendet man die Formel für den Kreisplattenerder so erhält man einen Wert von $R_{H_KP} = 0,68 \Omega$. Auch an diesem Beispiel ist zu erkennen, dass man durch die Anwendung von Näherungsformeln ohne großen Simulationsaufwand einen Anhaltswert für den Wertebereich des Erdungswiderstandes erhält. Außerdem sieht man an diesem Beispiel, dass durch den Verbund von Erdungssystemen der Erdungswiderstand sinkt und so geringere Schritt- bzw. Berührungsspannungen auftreten (siehe auch Abschnitt 2.3).

3.5.5 Potentialverteilung bei einem Fehler

In diesem Abschnitt wird kurz die auftretende Erdungsspannung U_E bei einem einpoligen Erdschluss näher analysiert. Das Simulationsszenario umfasst einen Kettenleiter aus mehreren Erdungssystemen mit je 100 m^2 Fläche und einem spezifischen Bodenwiderstand von $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m}$. Zusätzlich wird die Länge des PEN-Leiters zwischen den Gebäuden variiert. Die Höhe des Fehlerstromes beträgt 100 A .

Anhand von Abbildung 3.59 kann man erkennen, dass mit steigender Gebäudeanzahl die Erdungsspannung abnimmt. Dies resultiert daraus, dass bei einer geringen PEN-Leiter Länge ($< 100 \text{ m}$) die Erdungsimpedanz mit steigender Gebäudeanzahl sinkt. Man kann anhand der Kennlinien auch feststellen, dass sich die Spannungen an den Gebäuden nur geringfügig ändern, da sich diese nur um den Spannungsabfall des PEN-Leiters unterscheiden. Erhöht man den Abstand zwischen den Gebäuden (blaue Kennlinie), so resultiert dies in einer niedrigeren Erdungsspannung, da der Spannungsabfall über den PEN-Leiter größer ist.

In Abbildung 3.60 sind besonders die Kennlinie in Schwarz und Lila hervorzuheben. Wie bereits in Abbildung 3.51 zu sehen ist, steigt für Längen $> 100 \text{ m}$, die Erdungsimpedanz aufgrund des starken Einflusses des PEN-Leiters an. Daher ergibt sich für Längen $> 100 \text{ m}$ auch eine höhere Erdungsspannung. Jedoch ist durch die hohe PEN-Leiter Impedanz ein großer Spannungsabfall zwischen den einzelnen Erdungssystemen der Gebäude zu erkennen. In Abbildung 3.61 ist der Verlauf des Oberflächenpotentials für einen Kettenleiter von 12 Gebäuden in XGSLab™ dargestellt.

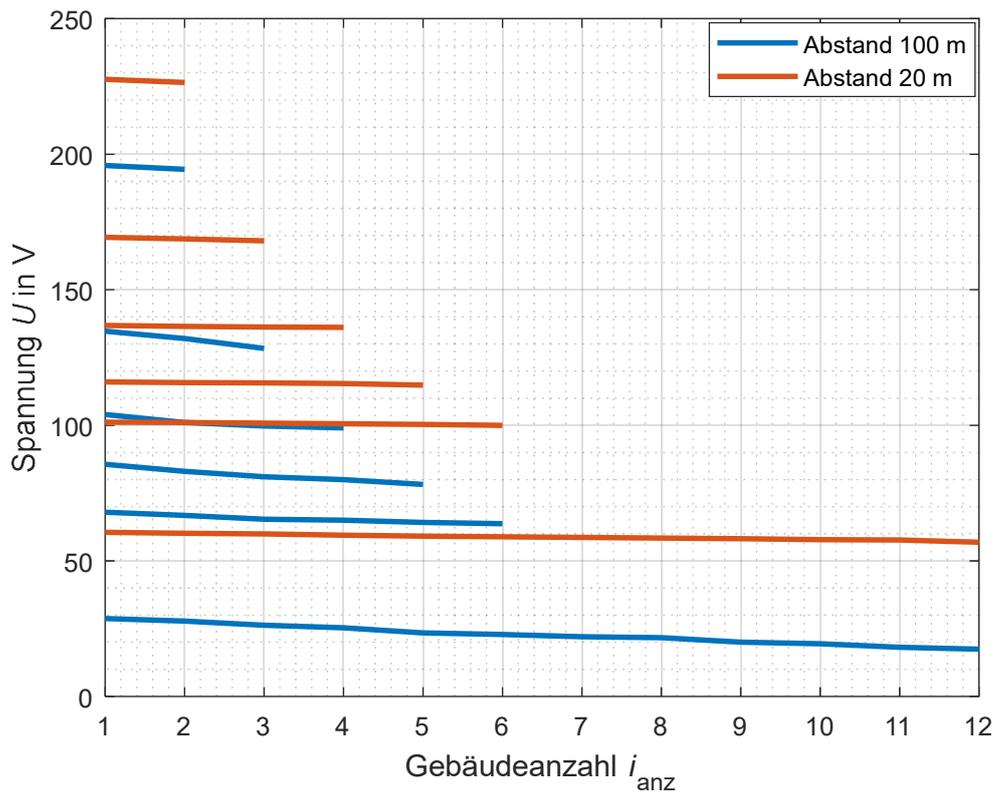


Abbildung 3.59: Erdungsspannung U_E Verteilung

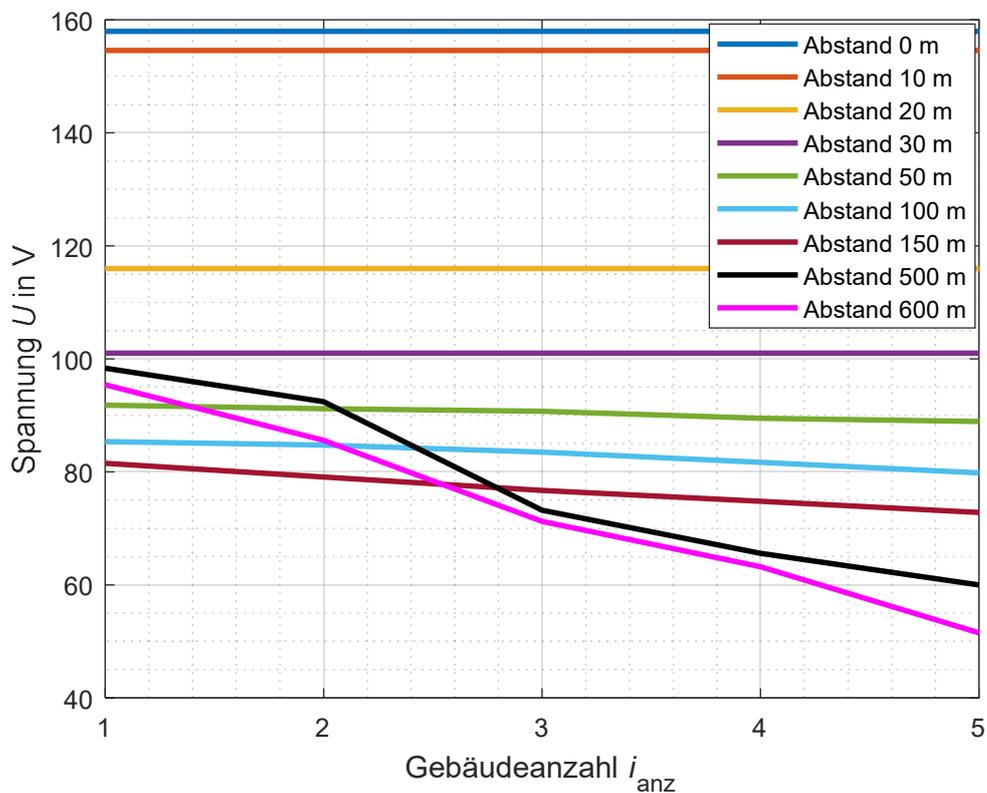


Abbildung 3.60: Erdungsspannung U_E für verschiedene Abstände

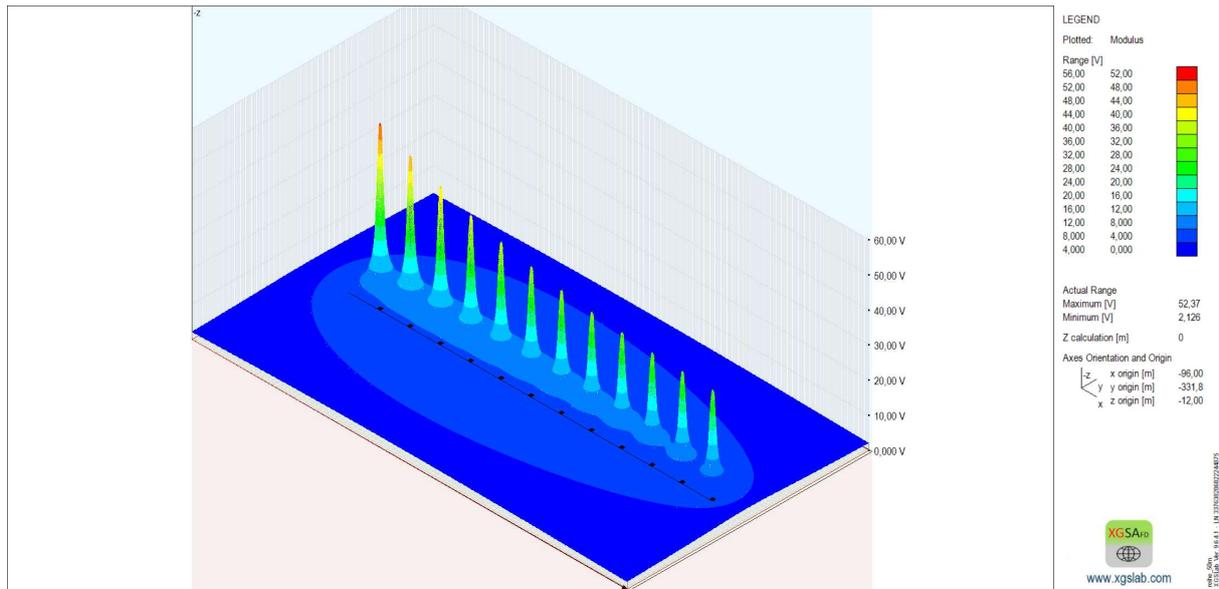


Abbildung 3.61: Potentialverlauf 12 Gebäude, Distanz $l = 50$ m

4 Messung an einer Mittelspannungsstation

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wird eine Erdungsimpedanzmessung an einer Mittelspannungsschaltstation durchgeführt. Zu Beginn werden die Aufgabenstellung und der Messaufbau erläutert. Anschließend werden die Messergebnisse dargestellt und diskutiert. Um die Erdungsimpedanz zu bestimmen, wird auch eine Simulation der Mittelspannungsschaltstation in XGSLab™ durchgeführt. Die einzelnen Niederspannungsabgänge werden zudem in XGSLab™ und zusätzlich in MATLAB® nachgebildet und deren Erdungsimpedanz ermittelt. Die Ergebnisse der Simulationen werden sowohl mit den Messungen als auch untereinander verglichen.

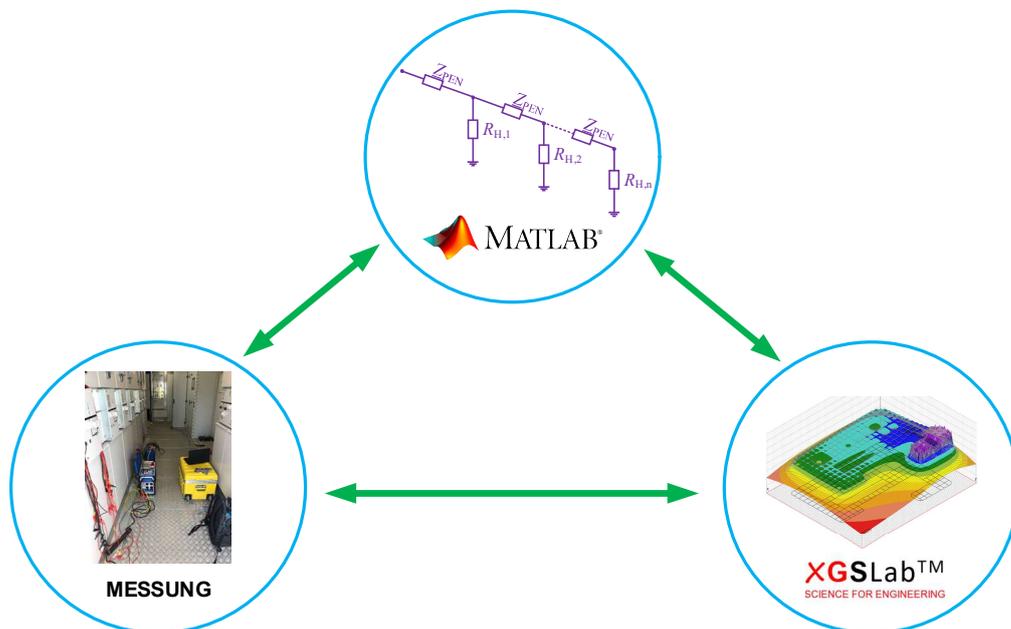


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung Vergleich Simulation und Messung

4.1 Aufgabenstellung

In einer Ortsnetzstation in der Steiermark wird eine dezentrale Erdschlusskompensationsspule installiert. Daher sollen die Erdungsverhältnisse der Station näher untersucht werden. Mithilfe von Messungen und Simulationen soll die Erdungsimpedanz der Station bestimmt werden. Folgende Aufgaben, welche die Messung betreffen, müssen dafür bearbeitet werden.

- Anforderungen an das Messkonzept für:
 - Bestimmung der Gefährdungspotentiale im Netz (Erdungsspannungen, Schritt- und Berührungsspannungen, Spannungsverschleppungen)
 - Messung kritischer Außenleiterströme
 - Abschätzung relevanter Schirmströme
- Durchführung von folgenden Messungen:
 - Messungen des spezifischen Bodenwiderstandes

- Bestimmung der Erdungsimpedanz für 2 verschiedene Methoden (freigeschaltete Leitung, Gegenelektrode) zur Bestimmung der Gefährdungspotentiale im Netz (Erdungsspannungen, Berührungsspannungen, Spannungsverschleppungen)
- Auswertung der Messungen bezüglich:
 - Gefährdungspotenziale im Netz (Erdungsspannungen, Schritt- und Berührungsspannungen, Spannungsverschleppungen)
 - Bestimmung der Erdungsimpedanz der Niederspannungsabzweige
 - Bestimmung der Erdungsimpedanz der Mittelspannungsschaltstation

4.2 Grundsatzuntersuchung Reduktionsfaktor / Erdungsstrom

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, berechnet man den Reduktionsfaktor r aus dem Verhältnis des Erdungsstromes I_E und des Fehlerstromes I_F . Der Reduktionsfaktor lässt sich bei Kabeln aus der Selbstimpedanz des Kabelschirmes und der Koppelimpedanz zwischen den Schirmen und den Innenleitern berechnen. Dieser gibt im Falle eines beidseitig geerdeten Kabelschirmes an, wie viel Prozent des Fehlerstromes, aufgrund der induktiven Kopplung zwischen dem Innenleiter und dem Kabelschirm, über den Kabelschirm zurück zur Quelle fließen. Der Rest des Fehlerstromes fließt über das Erdreich zurück zur Quelle.

Für ein 20 kV-XLPE Mittelspannungskabel mit einem Schirmquerschnitt von 16 mm² ergibt sich gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] ein Reduktionsfaktor im Bereich von $r = 0,5 \dots 0,6$. In der ausgewählten Schaltstation weisen die Mittelspannungskabel einen Schirmquerschnitt von 25 mm² auf. Laut den internen Berechnungen des Institutes für Elektrische Anlagen und Netze ergab sich hierfür ein Reduktionsfaktor von $r = 0,3$ [50]. Für die weitere Berechnung wird ein Reduktionsfaktor von $r = 0,5$ verwendet.

Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] ergibt sich für eine elektrische Anlage mit Erdschlusskompensation der für die Beurteilung von Erdungs- und Berührungsspannungen maßgebliche Erdungsstrom nach der Beziehung (4.1).

$$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{\text{Rest}}^2} \quad (4.1)$$

Mit einem Reduktionsfaktor von $r = 0,5$, einem induktiven Spulenstrom von $I_L = 433 \text{ A}$ und einem Erdschlussreststrom von $I_{\text{Rest}} = 60 \text{ A}$ ergibt sich ein Erdungsstrom I_E von 218 A. Für die weitere Bewertung und Hochrechnung wird ein Erdungsstrom von $I_E = 220 \text{ A}$ verwendet.

4.3 Messungen

In den folgenden Abschnitten werden die Messergebnisse dargestellt und diskutiert.

4.3.1 Messung des spezifischen Bodenwiderstandes

Zur Bestimmung des spezifischen Bodenwiderstandes wird eine elektrotomografische Messung durchgeführt, dafür verwendet man das Messgerät IRIS Syscal Kid. Es werden 24 Elektroden mit einem Abstand von 3 m in einer Reihe platziert. Pro Messschritt wird in 2 Elektroden ein Strom injiziert, wobei über zwei andere Elektroden der Spannungsabfall gemessen wird. Anschließend wird die Elektrodenreihenfolge automatisch durch das Gerät geändert. Für die Messung wurde das Verfahren nach Wenner (gleich große Abstände zwischen den Elektroden) verwendet, jedoch sind auch andere Varianten wie das Verfahren nach Schlumberger oder das Dipol-Dipol-Verfahren möglich. Die gesamte Länge der Messtrasse beträgt bei 24 Elektroden 69 m. In der Tabelle 10 sind die gemessenen scheinbaren spezifischen Bodenwiderstände in Abhängigkeit vom Sondenabstand angegeben.

Tabelle 10: Messdaten Scheinbarer spezifischer Bodenwiderstand $\rho_{E,S}$

Sondenabstand in m	$\rho_{E,S}$ in $\Omega \cdot m$			Anzahl der Messungen
	Minimum	Mittelwert	Maximum	
3	63,4	75,4	98,9	21
6	76,7	84,1	96,1	18
9	79,3	85,8	96,2	15
12	81,3	87,2	91,0	12
15	76,3	79,4	83,5	9
18	68,1	69,5	71,2	6
21	61,1	61,7	62,3	3

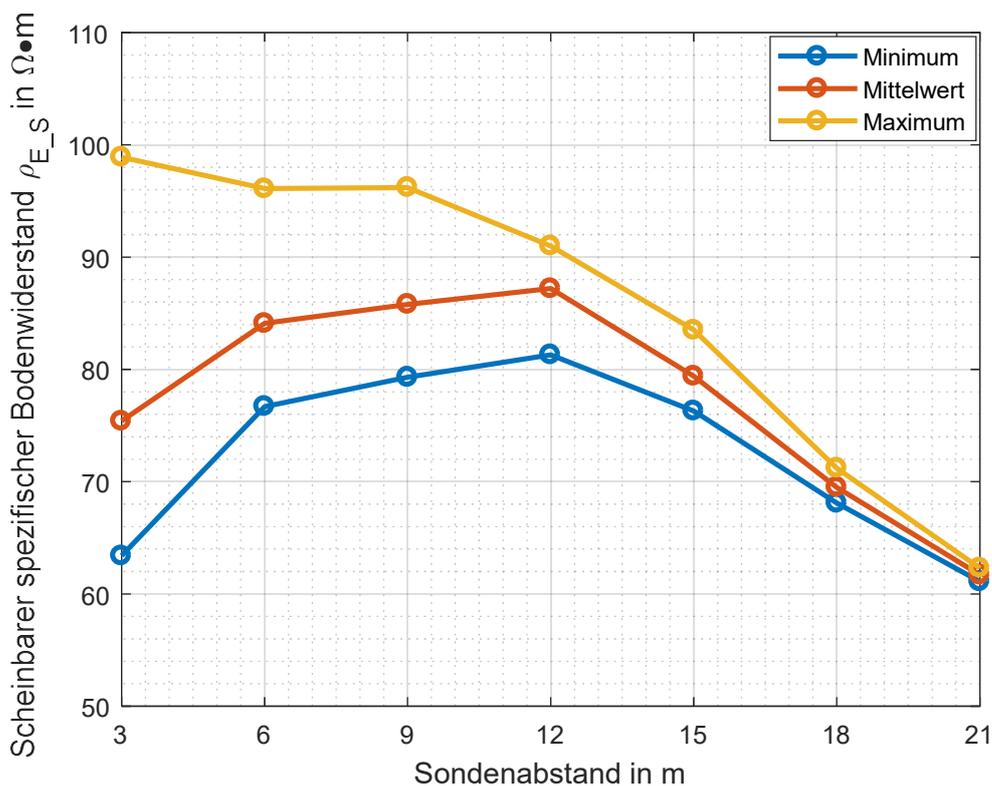


Abbildung 4.2: Scheinbarer spezifischer Bodenwiderstand $\rho_{E,S}$ in Abhängigkeit vom Sondenabstand

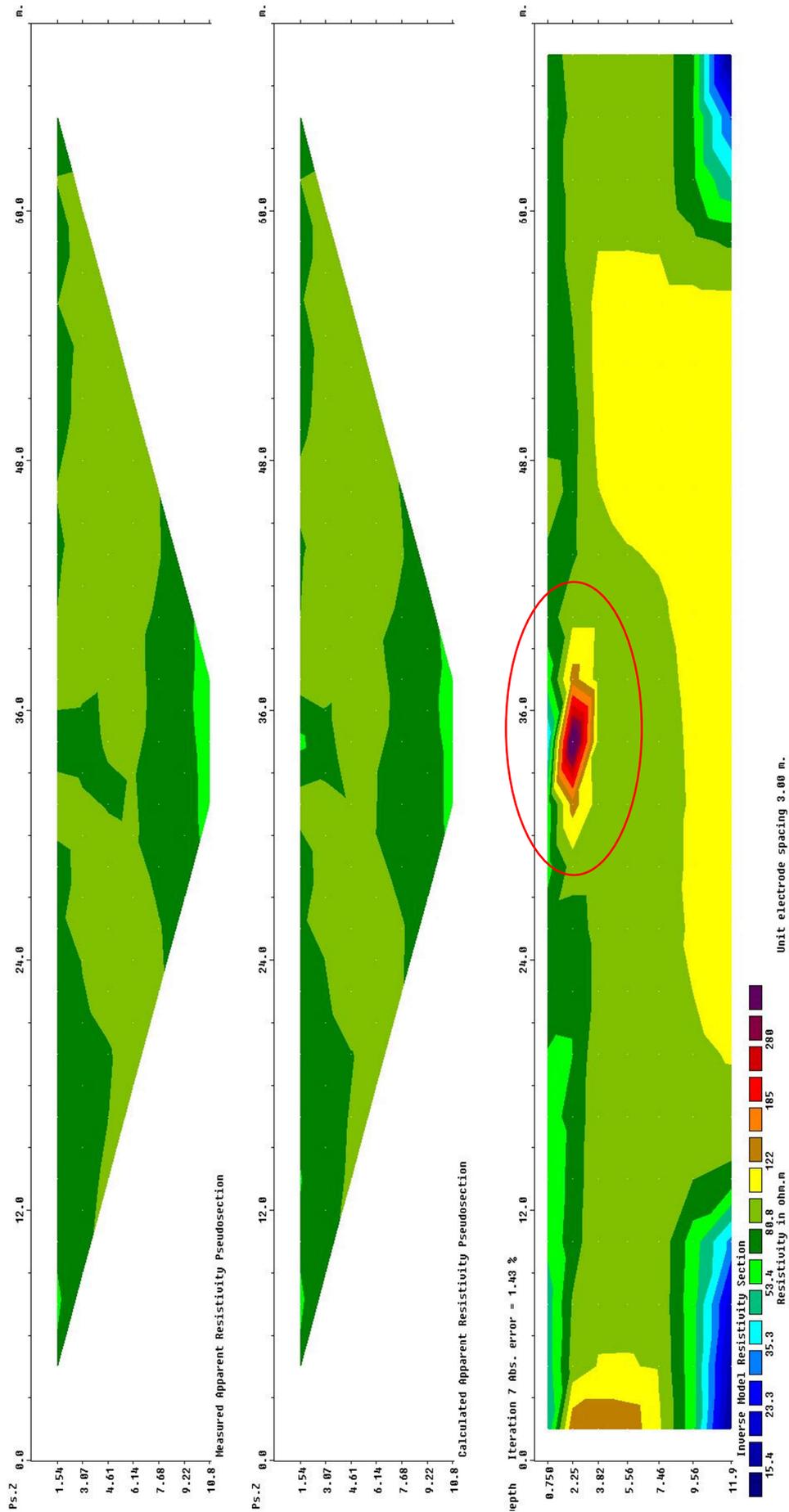


Abbildung 4.3: Inverses Modell des spezifischen Bodenwiderstandes ρ_E

Anhand von Abbildung 4.2 erkennt man, dass sich der gemessene scheinbare spezifische Bodenwiderstand $\rho_{E,S}$ zwischen $60 \Omega \cdot m$ und $100 \Omega \cdot m$ bewegt. Mit den Messwerten für die scheinbaren spezifischen Bodenwiderstände ist es möglich, durch ein inverses Modell auf die spezifischen Bodenwiderstände in den verschiedenen Erdschichten zurückzurechnen (siehe Abbildung 4.3). Der hochohmige rot markierte Bereich in Abbildung 4.3 kennzeichnet eine Zisterne, welche die Messstrasse gekreuzt hat. Das Bodenmodell wird für die Simulation in XGSLab™ implementiert.

4.3.2 Messung der Erdungsimpedanz mit Strominjektion in die Gegenstation

Die Messung der Erdungsimpedanz wird mit der Methode Strominjektion (siehe Abschnitt 2.9.2.5) durchgeführt. Der Messaufbau wird gemäß Abbildung 4.4 durchgeführt. Um die Plausibilität der Messwerte zu überprüfen, werden zwei verschiedene Einspeisepunkte für den Messstrom ausgewählt. Für den ersten Injektionspunkt wird das Erdungssystem der Ortsnetzstation Ebersberg verwendet. Mithilfe des Messgerätes Omicron CPC 100 wird über die abgeklemmten Kabelschirme (siehe Abbildung 4.5) ein Messstrom in die oben genannte Ortsnetzstation eingespeist. Durch die Verwendung der ortsveränderlichen Messsonde wird mit dem Messgerät Omicron HGT1 der Potentialverlauf der Schaltstation ermittelt. Das Omicron CPC berechnet aus der Information von Messstrom und dem Potentialverlauf die Impedanz. Der Vorteil dieser Art der Strominjektion ist die große Entfernung und der geringe Erdungswiderstand der Gegenstation, wodurch ein hoher Messstrom (ca. 50 A) in den Messkreis eingespeist werden kann, was zu genaueren Messwerten führt. Dies spiegelt sich auch in der niedrigen Schleifenimpedanz von $0,62 \Omega \angle 52^\circ$ wider.

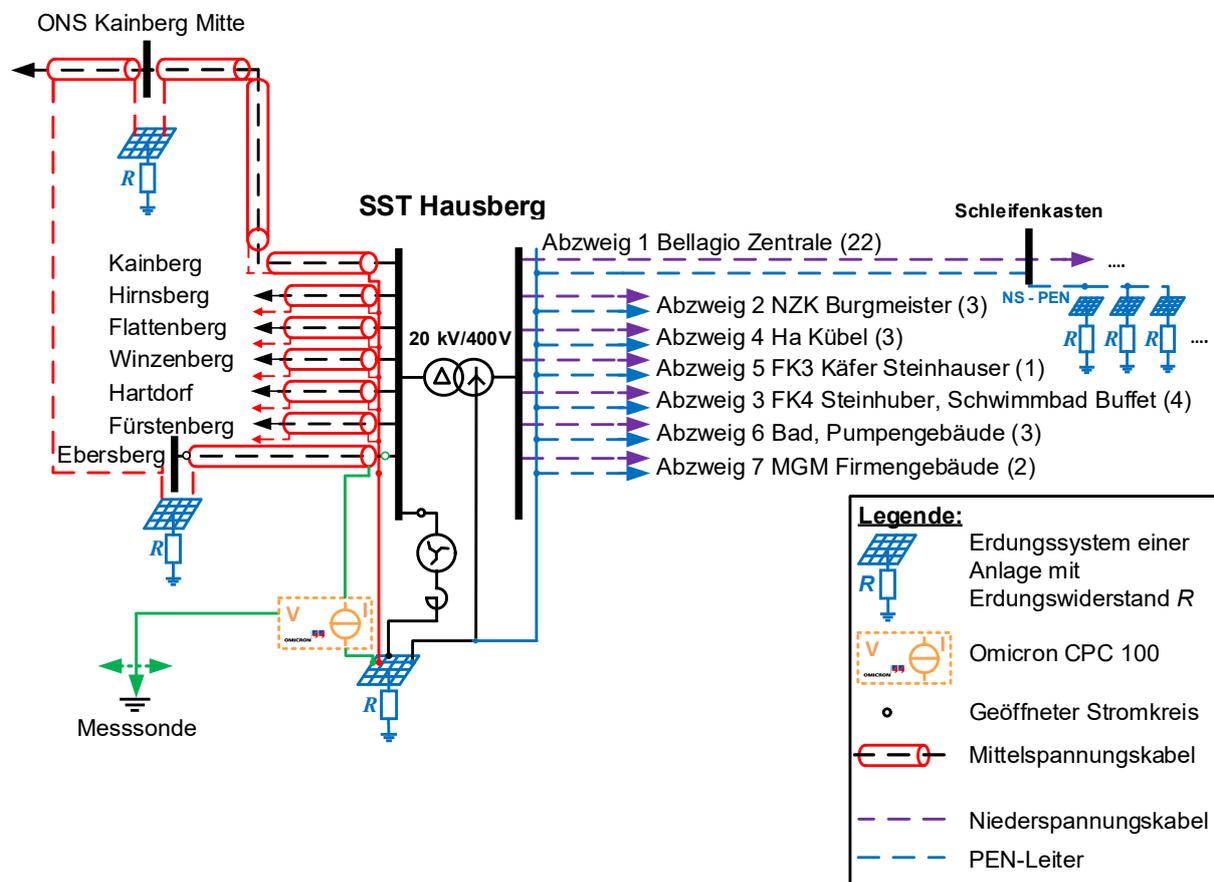


Abbildung 4.4: Messaufbau mit Strominjektion in die Kabelschirme

Der Nachteil ist, dass die Ortsnetzstation Ebersberg mit einem weiteren Kabelschirm verbunden ist. Über diesen Schirm fließt über die Ortsnetzstation Kainberg Mitte ein Teil des Messstromes zurück zur Quelle, daher wird das Messergebnis ein wenig verfälscht. Um hier einen Vergleich der Messwerte durchzuführen, werden zwei Messtrassen (Trasse West und Trasse Nord) vermessen.



Abbildung 4.5: Strominjektion über die Kabelschirme der Mittelspannungskabel



Abbildung 4.6: Messtrasse Norden und Westen

4.3.2.1 Trasse West

In Tabelle 11 sind die Messdaten für die Messtrasse West dargestellt. Es wird eine frequenzselektive Spannungsmessung angewandt. Einmal wird die Messung bei 55 Hz vorgenommen und einmal bei 30 Hz sowie 70 Hz und anschließend aus den beiden Frequenzen der Mittelwert (MW) gebildet (siehe Abbildung 4.7). Der Potentialverlauf wird auf den Erdungsstrom von 220 A hochgerechnet. Für die Schaltstation Hausberg ergibt sich für die Messtrasse West (bei 300 m Abstand) und der Strominjektion in der Ortsnetzstation Ebersberg eine Gesamtimpedanz Z_E von 0,08 Ω mit einem Winkel von ca. 51 ° (orange markiert in Tabelle 11). Dadurch ergibt sich mit dem Erdungsstrom von 220 A eine Erdungsspannung U_E von ca. 18 V. Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] ist eine Erdungsspannung von $2 \cdot U_{Tp} = 2 \cdot 80 \text{ V} = 160 \text{ V}$ zulässig. Damit liegt man mit der gemessenen Spannung von $U_E = 18 \text{ V}$ unter dem zulässigen Grenzwert.

Tabelle 11: Messergebnisse Messtrasse West, Strominjektion Ebersberg

Messzeitpunkt hh:mm	Abstand m	Messwerte Spannung U bei 50 A						Impedanz Z_E (U/I)				Hochrechnung φ auf 220 A			
		30 Hz		70 Hz		55 Hz		MW 30 Hz & 70 Hz		55 Hz		MW 30 Hz & 70 Hz		55 Hz	
		V	<°	V	<°	V	<°	Ω	<°	Ω	<°	V	<°	V	<°
10:29	1	0,669	7,8	0,728	15,2	0,709	12,7	0,014	11,5	0,014	12,7	3,1	11,5	3,1	12,7
10:30	2	0,767	10,7	0,872	20,1	0,832	17,7	0,016	15,4	0,017	17,7	3,6	15,4	3,7	17,7
10:32	5	1,220	18,8	1,560	31,0	1,430	26,8	0,028	24,9	0,029	26,8	6,1	24,9	6,3	26,8
10:34	10	1,510	22,0	2,000	34,9	1,810	31,0	0,035	28,5	0,036	31,0	7,7	28,5	8,0	31,0
10:38	20	1,750	24,4	2,390	37,6	2,150	34,3	0,041	31,0	0,043	34,3	9,1	31,0	9,5	34,3
10:38	30	1,860	25,6	2,580	38,9	2,310	34,1	0,044	32,3	0,046	34,1	9,8	32,3	10,2	34,1
10:41	40	1,900	26,7	2,700	40,0	2,400	37,4	0,046	33,4	0,048	37,4	10,1	33,4	10,6	37,4
10:42	50	2,000	27,7	2,850	41,1	2,540	36,7	0,049	34,4	0,051	36,7	10,7	34,4	11,2	36,7
10:45	75	2,100	29,0	3,000	42,5	2,660	38,9	0,051	35,8	0,053	38,9	11,2	35,8	11,7	38,9
10:49	100	2,200	31,4	3,300	45,1	2,900	40,0	0,055	38,3	0,058	40,0	12,1	38,3	12,8	40,0
10:50	300	2,900	40,5	4,680	54,0	4,000	50,8	0,076	47,3	0,080	50,8	16,7	47,3	17,6	50,8

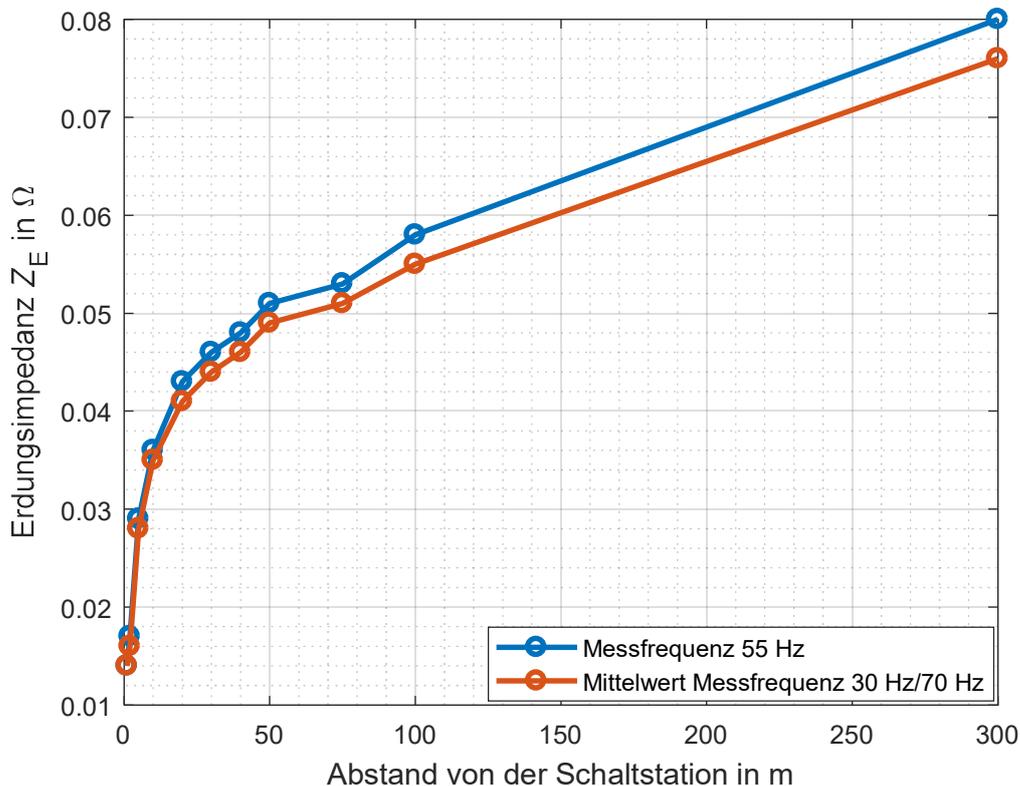


Abbildung 4.7: Verlauf der Erdungsimpedanz, Messtrasse West, Strominjektion Ebersberg

4.3.2.2 Trasse Nord

In Tabelle 12 sind die Messdaten für die Messtrasse Nord dargestellt. Es wird wie in Abschnitt 4.3.2.1 eine frequenzselektive Spannungsmessung durchgeführt. Der Potentialverlauf wird auf den Erdungsstrom von 220 A hochgerechnet. In Abbildung 4.8 ist der Verlauf der Erdungsimpedanz dargestellt. Beginnend bei einer Entfernung von 250 m von der Schaltstation fällt die Erdungsimpedanz stark ab, Grund dafür ist die Schirmverbindung eines Kabelübergangsmastes. Für die Schaltstation Hausberg ergibt sich für die Messtrasse Nord (bei 250 m Abstand) und der Strominjektion in der Ortsnetzstation Ebersberg eine Gesamtimpedanz Z_E von 0,046 Ω mit einem Winkel von ca. 34 ° (orange markiert in Tabelle 12). Dadurch ergibt sich mit dem Erdungsstrom von 220 A eine Erdungsspannung U_E von ca. 10,1 V. Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] ist eine Erdungsspannung von $2 \cdot U_{Tp} = 2 \cdot 80 \text{ V} = 160 \text{ V}$ zulässig. Damit liegt man mit der gemessenen Spannung von $U_E = 10,1 \text{ V}$ unter dem zulässigen Grenzwert.

Tabelle 12: Messergebnisse Messtrasse Nord, Strominjektion Ebersberg

Messzeitpunkt hh:mm	Abstand m	Messwerte Spannung U bei 50 A						Impedanz Z_E (U/I)				Hochrechnung φ auf 220 A			
		30 Hz		70 Hz		55 Hz		MW 30 Hz & 70 Hz		55 Hz		MW 30 Hz & 70 Hz		55 Hz	
		V	<°	V	<°	V	<°	Ω	<°	Ω	<°	V	<°	V	<°
12:29	6	0,9	14,2	1,1	25,46	1,1	20,8	0,020	19,8	0,021	20,8	4,4	19,8	4,7	20,8
12:31	10	1,3	19,6	1,7	32,14	1,6	27,4	0,030	25,9	0,031	27,4	6,6	25,9	6,9	27,4
12:33	20	1,6	21,5	2,1	34,37	1,9	28,8	0,036	27,9	0,038	28,8	8,0	27,9	8,3	28,8
12:35	50	1,8	22,7	2,4	35,78	2,1	30,8	0,041	29,2	0,043	30,8	9,1	29,2	9,4	30,8
12:37	100	1,8	23,1	2,5	36,1	2,2	29,6	0,043	29,6	0,045	29,6	9,4	29,6	9,8	29,6
12:45	250	1,9	23,5	2,6	36,4	2,3	34,0	0,044	29,9	0,046	34,0	9,8	29,9	10,1	34,0
12:52	295	1,6	22,5	2,2	35,97	2,0	30,0	0,038	29,2	0,040	30,0	8,3	29,2	8,7	30,0
12:48	299	1,5	22,2	2,1	35,81	1,9	29,8	0,036	29,0	0,037	29,8	7,8	29,0	8,2	29,8
12:47	299,5	1,5	22,2	2,0	35,75	1,8	30,8	0,035	29,0	0,036	30,8	7,7	29,0	7,9	30,8
12:50	300	0,8	16,9	0,9	32,57	0,9	26,8	0,017	24,7	0,018	26,8	3,7	24,7	4,0	26,8

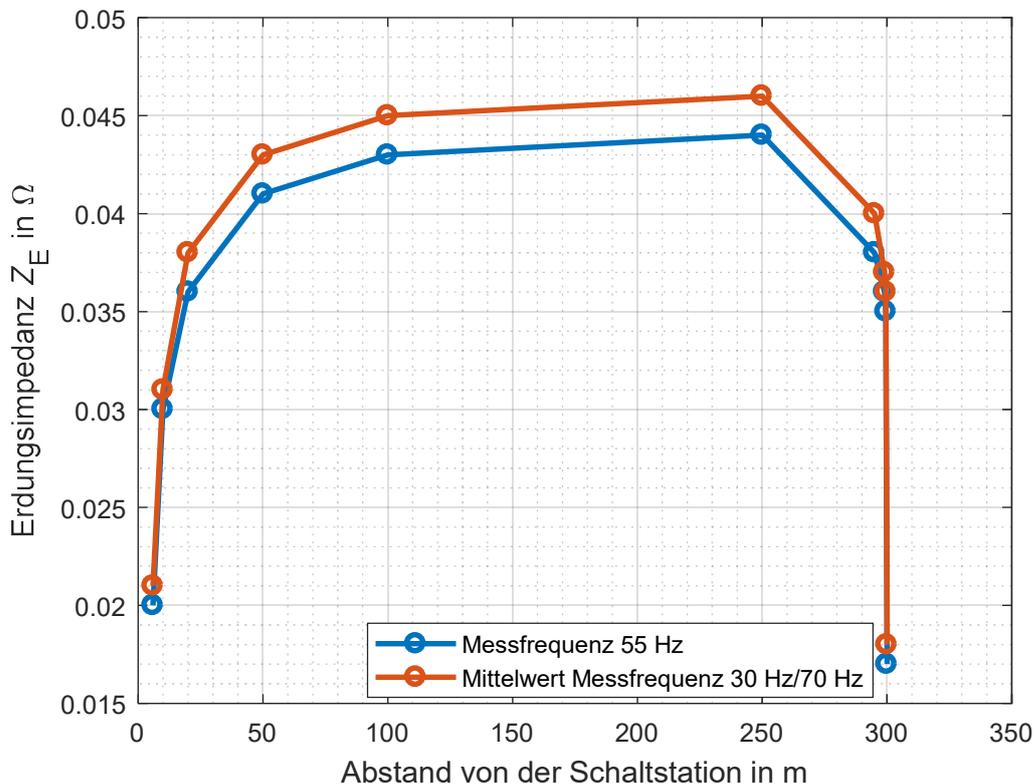


Abbildung 4.8: Verlauf der Erdungsimpedanz, Messtrasse Nord, Strominjektion Ebersberg

4.3.3 Messung der Erdungsimpedanz mit Strominjektion in die Gegenelektrode

Der Messaufbau wird laut Abbildung 4.9 durchgeführt. Bei dieser Methode wird als Einspeisepunkt für den Messstrom eine Gegenelektrode, bestehend aus 5 parallel geschalteten Erdspeissen verwendet (siehe Abbildung 4.10). Die Gegenelektrode befindet sich in einer Entfernung von ca. 300 m von der Schaltstation. Die Schleifenmessung ergibt einen Widerstand von 39,6 Ω . Dies ist auf den hohen Übergangswiderstand zwischen der Gegenelektrode und dem Erdboden zurückzuführen. Aufgrund der maximalen zulässigen Berührungsspannung nach [6] muss der Messstrom auf ca. 1 A begrenzt werden. Da das Erdungssystem eine große Ausdehnung besitzt und der injizierbare Messstrom nur eine geringe Höhe hat, erhält man ungenauere Messwerte.

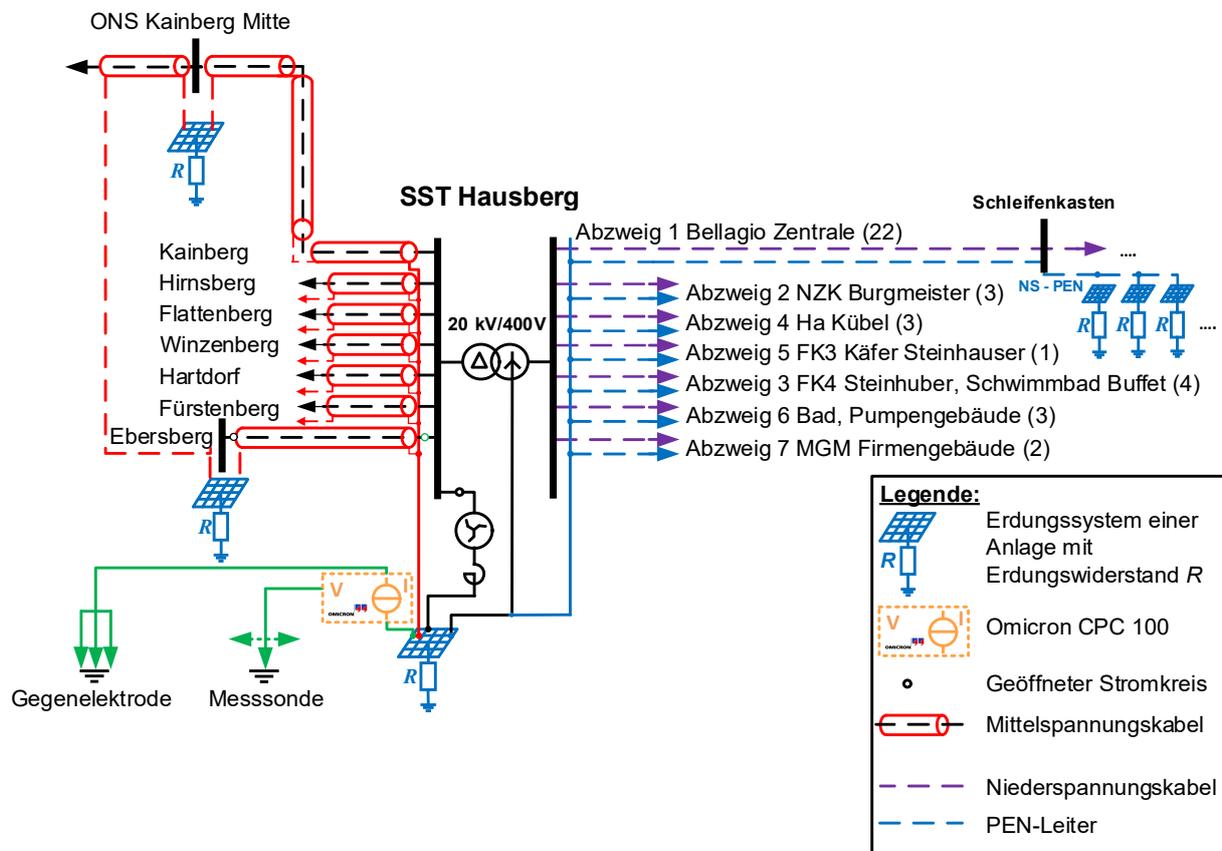


Abbildung 4.9: Messaufbau mit Strominjektion in die Gegenelektrode

In Tabelle 13 sind die Messdaten für die Weststrasse dargestellt. Es wird wieder eine frequenzselektive Spannungsmessung angewandt. Der Potentialverlauf wird auf den Erdungsstrom von 220 A hochgerechnet. In Abbildung 4.11 ist der Verlauf der Erdungsimpedanz dargestellt. Für die Schaltstation Hausberg ergibt sich für die Messtrasse West (bei 150 m Abstand) und der Strominjektion in der Gegenelektrode eine Gesamtimpedanz \underline{Z}_E von 0,111 Ω mit einem Winkel von ca. 52° (orange markiert in Tabelle 13). Dadurch ergibt sich mit dem Erdungsstrom von 220 A eine Erdungsspannung U_E von ca. 24,5 V. Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] ist eine Erdungsspannung von $2 \cdot U_{Tp} = 2 \cdot 80 \text{ V} = 160 \text{ V}$ zulässig. Damit liegt man mit der gemessenen Spannung von $U_E = 24,5 \text{ V}$ unter dem zulässigen Grenzwert.



Abbildung 4.10: Gegenelektrode

Tabelle 13: Messergebnisse Messtrasse West, Strominjektion Gegenelektrode

Messzeitpunkt hh:mm	Abstand m	Messwerte Spannung U bei 50 A						Impedanz Z_E (U/I)				Hochrechnung ϕ auf 220 A			
		30 Hz		70 Hz		55 Hz		MW 30 Hz & 70 Hz		55 Hz		MW 30 Hz & 70 Hz		55 Hz	
		V	\angle°	V	\angle°	V	\angle°	Ω	\angle°	Ω	\angle°	V	\angle°	V	\angle°
14:48	1	13,6	16,6	16,7	26,62	16,5	15,4	0,015	21,6	0,017	15,4	3,3	21,6	3,6	15,4
14:49	5	31,7	26,7	46,1	40,99	42,3	37,2	0,039	33,9	0,042	37,2	8,6	33,9	9,3	37,2
14:51	10	41,2	29,5	60,5	42,92	50,0	58,3	0,051	36,2	0,050	58,3	11,2	36,2	11,0	58,3
14:53	20	48,0	30,6	71,6	43,28	64,6	36,0	0,060	36,9	0,065	36,0	13,2	36,9	14,2	36,0
14:55	30	53,6	30,7	82,4	47,06	78,7	3,2	0,068	38,9	0,079	3,2	15,0	38,9	17,3	3,2
14:56	40	57,0	35,1	88,0	47,7	62,4	94,2	0,073	41,4	0,062	94,2	16,0	41,4	13,7	94,2
14:59	50	58,7	33,9	93,0	48,7	78,2	43,3	0,076	41,3	0,078	43,3	16,7	41,3	17,2	43,3
15:01	75	65,6	35,2	99,4	49,59	82,4	90,8	0,083	42,4	0,082	90,8	18,2	42,4	18,1	90,8
15:04	100	70,6	35,5	114,9	53,12	102,3	61,2	0,093	44,3	0,102	61,2	20,4	44,3	22,5	61,2
15:07	150	82,3	36,2	133,8	53,52	111,4	52,2	0,108	44,9	0,111	52,2	23,8	44,9	24,5	52,2

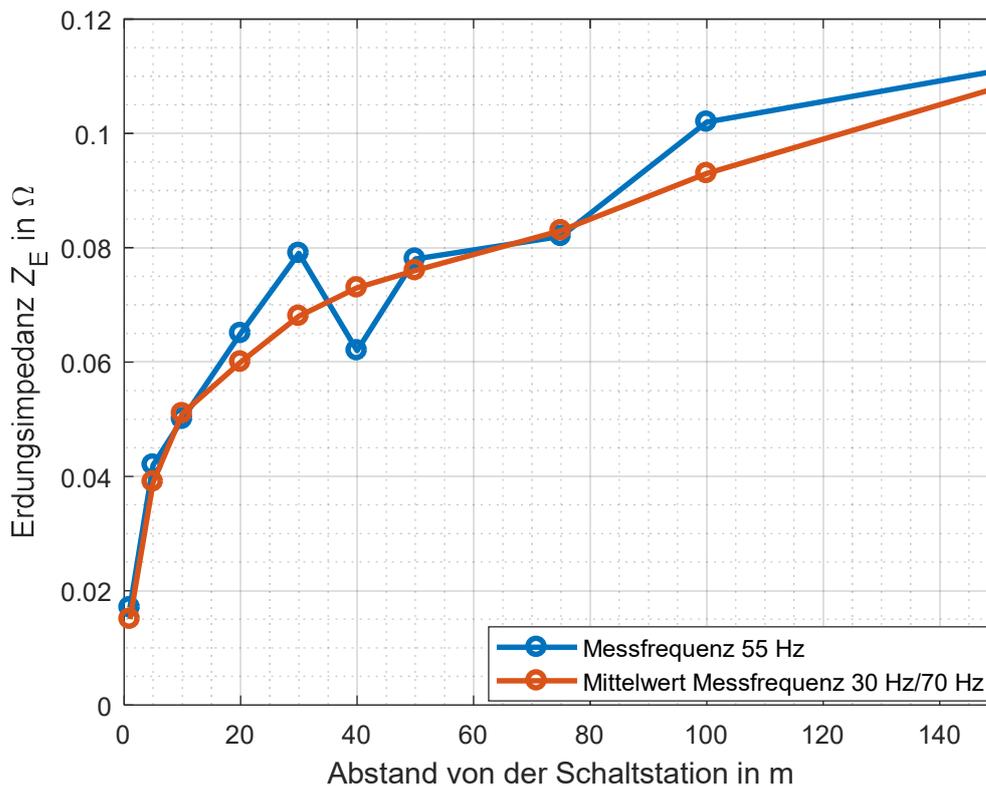


Abbildung 4.11: Verlauf der Erdungsimpedanz, Messtrasse Nord, Strominjektion Gegenelektrode

4.4 Vergleich von Messung und Simulation der Schaltstation

In Tabelle 14 sind die Mess- sowie Simulationsergebnisse der Schaltstation Hausberg zusammengefasst dargestellt. Als Worst-Case Szenario kann die Messung der Trasse West mit dem Einspeisepunkt bei der Gegenelektrode angegeben werden. Bei einem Erdschluss an der Schaltstation Hausberg würde bei einem maximal eingestellten Spulenstrom von 433 A, wobei dort nach den in Abschnitt 4.2 getroffenen Annahmen ein maximaler Erdungsstrom von 220 A fließt, eine Erdungsspannung von $U_E = 0,111 \Omega \cdot 220 \text{ A} = 24,42 \text{ V}$ auftreten. Das bedeutet, Spannungsverschleppungen aus der Schaltstation sowie die ermittelten Erdungsspannungen sind unterhalb der maximal zulässigen Berührungsspannung gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] von 80 V.

Tabelle 14: Gegenüberstellung der ermittelten Erdungsimpedanzen

Messung bzw. Simulation	Z_E in Ω	\angle in $^\circ$
Trasse Norden, Einspeisepunkt: Kabelschirm	0,05	34,0
Trasse Westen, Einspeisepunkt: Kabelschirm	0,08	50,8
Trasse Westen, Einspeisepunkt: Gegenelektrode	0,111	52,2
Simulation in XGSLab™	0,25	26,8

Die Messungen der Trasse Norden sowie Westen mit dem Einspeisepunkt über die Kabelschirme ergeben nahezu idente Ergebnisse. Bei der Messung mit der Strominjektion über die Gegenelektrode kann, aufgrund des hohen Übergangswiderstandes zwischen der Gegenelektrode und dem Erdboden, ein größerer Wert für den Betrag der Erdungsimpedanz festgestellt werden.

Aufgrund fehlender Informationen über die Leitungsführung zu einzelnen Niederspannungsverbrauchern wird nur ein Teil des Versorgungsgebietes der Schaltstation Hausberg in XGSLab™ simuliert. Dafür wird der Versorgungsplan des dort ansässigen Netzbetreibers in AutoCAD® importiert und die Leitungsführung für die Simulationssoftware XGSLab™ angepasst. In Abbildung 4.12 ist das Modell in XGSLab™ dargestellt. Es wird die Erdungsimpedanz, die Oberflächen-Potentialverteilung sowie die Erdungsspannung berechnet. In Abbildung 4.13 und 4.14 ist die Oberflächen-Potentialverteilung dargestellt. Man kann erkennen, dass in der Nähe des Fehlers (roter Kreis) eine hohe Spannung auftritt und diese mit zunehmender Entfernung abnimmt. Die Simulation in XGSLab™ ergibt eine Erdungsimpedanz von 0,25 Ω mit einem Winkel von 26,8 $^\circ$. Die hohe Abweichung gegenüber der Messung kann durch folgende Faktoren begründet werden. Der Einfluss des Bodenmodells hat große Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse in XGSLab™. Da der spezifische Bodenwiderstand in der Realität nicht nur ortsabhängig sondern auch von vielen anderen Faktoren, wie beispielsweise dem Wetter und der Luftfeuchte abhängt, welche nicht im Bodenmodell von XGSLab™ berücksichtigt werden, stellt dieser einen Unsicherheitsfaktor für die Simulation dar. Wie bereits oben beschrieben, wurden nicht alle Erdungssysteme, aufgrund fehlender Informationen über die Leitungsführung zu einzelnen Verbrauchern, berücksichtigt, somit ergibt die Simulation eine größere Erdungsimpedanz. Aufgrund einer unzureichenden Dokumentation wurden keine Begleiterder, welche die Erdungssituation verbessern, in der Simulation berücksichtigt. In der Realität sind Rohrleitungen

oder leitfähige Konstruktionen im Erdreich vorzufinden, die oft nicht optisch zu erkennen sind, auch diese werden in der Simulation nicht berücksichtigt. Erdverbindungen und vermaschte Erdungssysteme die nicht ausreichend dokumentiert oder offensichtlich erkennbar sind werden auch nicht in der Simulation berücksichtigt.

Die maximal auftretende Erdungsspannung U_E , welche durch die Simulation ermittelt werden konnte, ergibt einen Wert von 22,40 V.

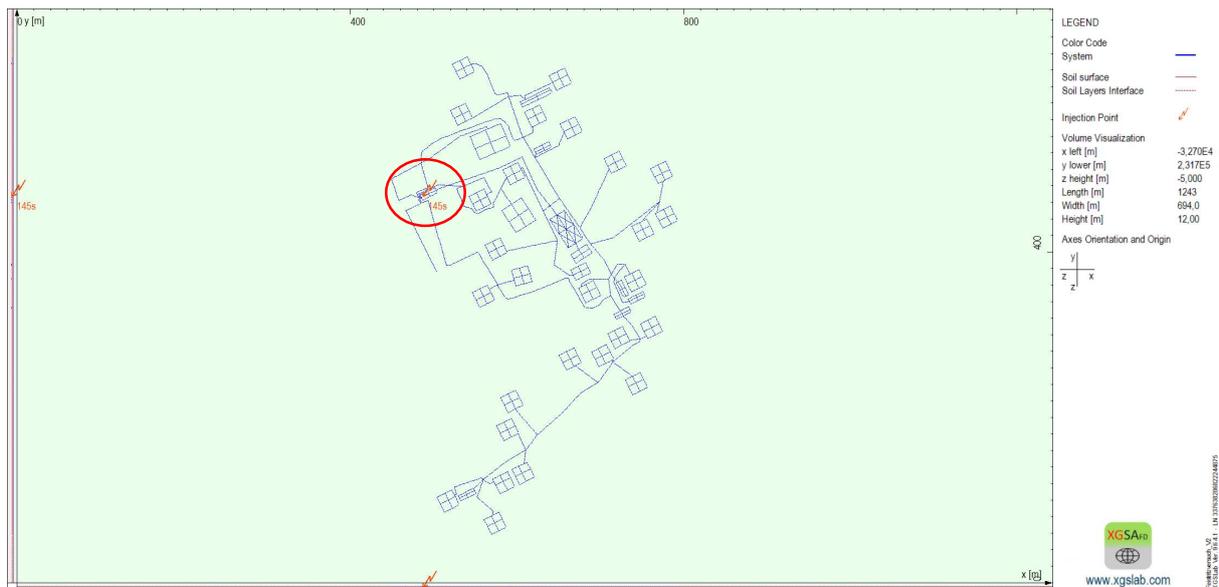


Abbildung 4.12: Simulationsmodell in XGSLab™

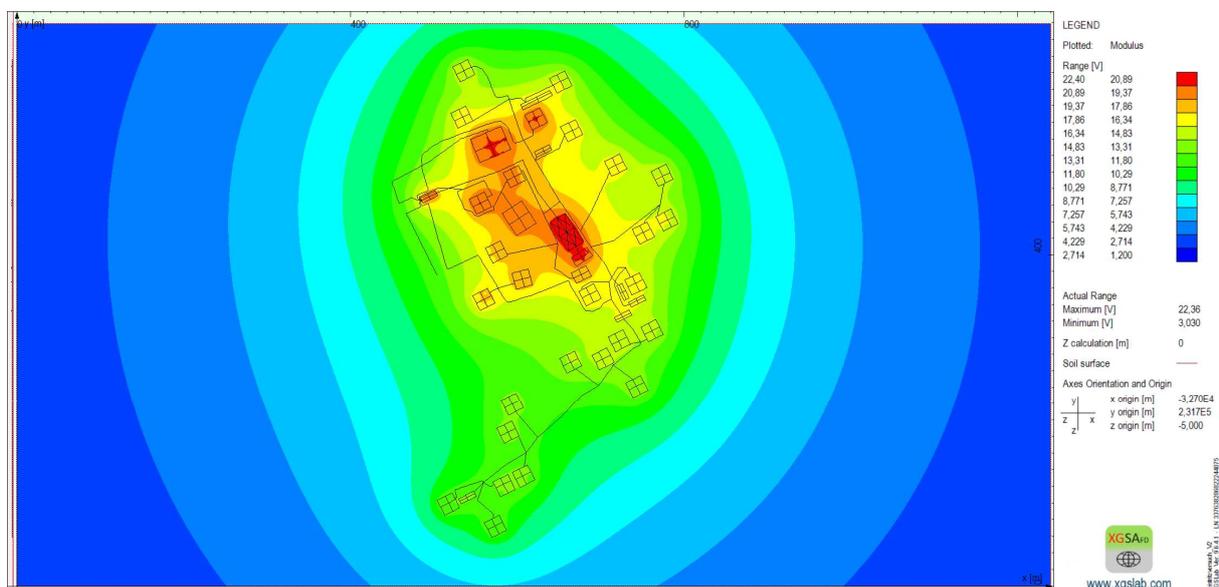


Abbildung 4.13: Oberflächenpotential Schaltstation Hausberg 2D-Ansicht

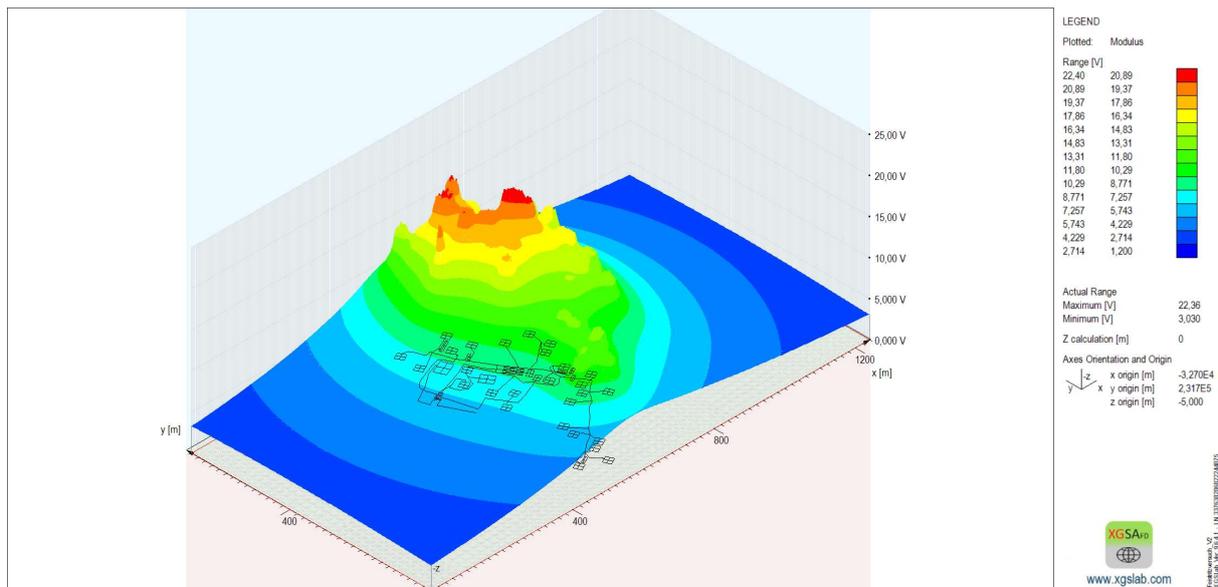


Abbildung 4.14: Oberflächenpotential Schaltstation Hausberg 3D-Ansicht

4.5 Vergleich von Messung und Simulation der Niederspannungsabgänge

Es wird wieder von der Messanordnung aus Abbildung 4.9 ausgegangen. Es werden die Ströme, welche über die einzelnen PEN-Leiter der Niederspannungsabzweige abfließen, gemessen. Anschließend werden die entsprechenden Impedanzen der Abzweige berechnet (siehe Tabelle 15). Bei dieser Messung werden auch etwaige Begleiterder bei Schleifenkästen mitgemessen. Die Niederspannungsabzweige werden mit Kettenleiter-Modellen in MATLAB® und XGSLab™ nachgebildet und simuliert, sowie mit einfachen Erderanordnungen (siehe Abschnitt 3.5.4) abgeschätzt.

Tabelle 15: Vergleich Mess- und Simulationswerte Niederspannungsabgänge

Abzweig	Messung Z_E		MATLAB® Z_E		XGSLab™ Z_E		Plattenerder R_E
	Ω	$<^\circ$	Ω	$<^\circ$	Ω	$<^\circ$	Ω
Abzweig 1 Bellagio Zentrale (22)	1,90	15,1	0,62	29,0	0,68	26,0	1,1
Abzweig 2 NZK Burgmeister (3)	0,77	20,0	1,14	36,0	1,31	34,8	0,4
Abzweig 3 FK4 Steinhuber, Schwimmbad Buffet (4)	1,50	27,5	1,28	5,4	1,34	4,8	1,8
Abzweig 4 Ha Kübel (3)	1,26	0,4	1,60	4,4	1,68	3,2	1,9
Abzweig 5 FK3 Käfer Steinhauser (1)	1,15	43,2	5,08	3,1	5,11	2,5	2,2
Abzweig 6 Bad, Pumpengebäude (3)	2000,00	132,4	2,40	2,6	2,52	2,1	2,8
Abzweig 7 MGM Firmengebäude (2)	2,37	63,7	2,80	3,0	2,64	1,8	3,4

Berechnet man den absoluten Fehler zwischen den Impedanzen von MATLAB® und XGSLab™ so erhält man 0,06 Ω ... 0,17 Ω . Die Abweichung ist, wie bereits in Abschnitt 3.5.3 erläutert, auf die ohmsche Kopplung zurückzuführen, welche in XGSLab™ berücksichtigt wird und beim Modell in MATLAB® nicht. Für den absoluten Fehler zwischen der Messung und dem Modell in MATLAB® erhält man 0,21 Ω ... 3,93 Ω . Für den absoluten Fehler zwischen der Messung und dem Modell in XGSLab™ erhält man 0,16 Ω ... 3,96 Ω . Für die Abweichungen können, die bereits in Abschnitt 4.4 beschriebenen Gründe genannt werden. Die in Tabelle 15 orange markierte Impedanz ist besonders hoch. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der PEN-Leiter der Pumpstation nicht mit der Schaltstation

verbunden ist, daher wird dieser Wert bei der Berechnung des absoluten Fehlers außer Acht gelassen. Schätzt man die Kettenleiter mit einem Kreisplattenerder ab, so erhält man einen absoluten Fehler zwischen $0,3 \Omega \dots 1,05 \Omega$. Daher ist mit vereinfachten Erderanordnungen eine schnelle und einfache Abschätzung möglich, mit deren Hilfe man den Wertebereich der Messwerte grob eingrenzen kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Großteil der Mittelspannungsnetze in Europa wird aufgrund der hohen Versorgungssicherheit als gelöschtes Netz betrieben. Tritt ein einzelner Erdschluss auf, so muss der betroffene Netzabschnitt nicht sofort abgeschaltet werden. Bei Beobachtungen in der Praxis hat sich gezeigt, dass bei einem Erdschlussreststrom von ca. 60 A der auftretende Lichtbogen, welcher beim Erdschluss entsteht, in den meisten Fällen von selbst erlischt. Jedoch sind auch dem Betrieb von gelöschten Netzen bestimmte Grenzen gesetzt. Es muss die Lichtbogenlöschgrenze sowie die zulässige Schritt- bzw. Berührungsspannung gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [6] eingehalten werden. Da sich das gegenwärtige Energiesystem aufgrund der Energiewende in einem bedeutenden Transformationsprozess befindet, steigt die Anzahl an erneuerbaren Energieerzeugern rasant an. Die Integration dieser erfolgt meist über Kabelverbindungen an das bestehende Energiesystem. Dadurch steigt der kapazitive Fehlerstrom, welcher bei einem Erdschluss fließt, an und das gelöschte Netz gerät schnell an die zuvor besprochenen Grenzen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, haben sich mehrere Lösungsmöglichkeiten etabliert. Eine mögliche Lösung wäre die Netztrennung, wobei man von dieser in der Praxis absieht, da es meist ein sehr komplexer und teurer Prozess ist. Auch die Installation von dezentralen Kompensationsspulen wird immer häufiger angewendet. Hierbei kann auf eine Netztrennung verzichtet werden, jedoch muss das Erdungssystem, in welches die Erdschlusskompensationsspule den induktiven Strom leitet, dafür ausgelegt sein bzw. sind die Anforderungen an die Personensicherheit zu erfüllen. Zur Beurteilung dieser Kriterien wird die Erdungsimpedanz der Mittelspannungsschaltstation bzw. der daran angeschlossenen Niederspannungsabzweige benötigt. Das Ziel dieser Masterarbeit war daher die Bestimmung der Erdungsimpedanz einer Mittelspannungsschaltstation mit zugehörigen Niederspannungsabgängen durch Simulationen, sowie die Verifikation dieser durch eine entsprechende Messung.

In MATLAB® wurde ein Kettenleitermodell erstellt, mit welchem die Erdungsimpedanz ermittelt, sowie Parameteranalyse durchgeführt werden können. Die Impedanz für einen PEN-Leiter und für die Kabelschirme wurde bestimmt. Da die Formel von Carson und Pollaczek streng genommen, nur unter der Annahme eines unendlich langen Leiters gilt, wurden laut [36] die Impedanzbeläge von endlich langen Leitern mit Erdrückleitung für die PEN-Leiter und die Kabelschirme bestimmt und mit dem Impedanzbelag der unendlichen langen Leiter verglichen. Wie die Untersuchung zeigte, ist der auftretende Fehler äußerst gering. Damit wurde für alle weiteren Betrachtungen der Impedanzbelag für die unendlich langen Leiter verwendet. Für den durchschnittlichen Impedanzbelag eines PEN-Leiters ergibt sich ein Wert von $0,8 \frac{\Omega}{\text{km}}$ mit einem Winkel von 75° . Für den durchschnittlichen Impedanzbelag eines Kabelschirmes ergibt sich ein Wert von $0,7 \frac{\Omega}{\text{km}}$ mit einem Winkel von 70° . Um realitätsnahe Parameter für die Simulation zu erhalten, wurde eine Datenerhebung bei zwei Verteilnetzbetreibern vorgenommen. Parameteranalysen ergaben, dass der Querschnitt des Kabelschirmes bzw. des PEN-Leiters eine sehr geringe Auswirkung auf die Erdungsimpedanz hat. Die Distanz l zwischen den Gebäuden bzw. der Erdungswiderstand R_H jener, beeinflusst die Erdungsimpedanz jedoch stark. Die Analyse des Kettenleiters zeigt zudem, dass eine Kenntnis über die genaue Anzahl der Gebäude,

welche am Kettenleiter angeschlossen sind, nicht notwendig ist. Mit steigender Gebäudeanzahl nähert sich die Kettenleiterimpedanz $Z_{\text{Kette_NS}}$ bzw. $Z_{\text{Kette_MS}}$ immer näher an die Impedanz Z_{inf} an. Die Impedanz Z_{inf} beschreibt hierbei einen Kettenleiter, an dem eine unendliche Anzahl von Gebäuden angeschlossen ist. Es wurde eine Grafik erstellt mit deren Hilfe man, bei der Kenntnis der Impedanz des PEN-Leiters Z_{PEN} bzw. des Kabelschirmes Z_{Schirm} und des Erdungswiderstandes R_{H} , die Anzahl der Gebäude ermitteln kann, welche für den Kettenleiter beachtet werden müssen. Zudem ist zu erkennen, dass durch eine hohe Anzahl von Niederspannungsabgängen die effektive Erdungsimpedanz der Mittelspannungsstation signifikant sinkt, dies hat eine niedrigere Erdungsspannung zur Folge. Weiters wurden für die von den Netzbetreibern zur Verfügung gestellten Daten, Bereiche für die Erdungsimpedanz berechnet, welche nach der Landschaftsstruktur eingeteilt wurden.

Das Simulationsmodell in MATLAB® wurde mit jenem in XGSLab™ verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die berechneten Erdungsimpedanzen Z_{E} für kleine Distanzen zwischen den Gebäuden aufgrund der ohmschen Kopplung unterscheiden. Das Simulationsmodell in MATLAB® berücksichtigt keine Kopplungen zwischen den einzelnen Erdungssystemen, wohingegen die Simulationssoftware XGSLab™ diese berücksichtigt. Für große Distanzen liefern beide Simulationen nahezu das gleiche Ergebnis.

Die Durchführung einer Simulation mithilfe von XGSLab™ ist äußerst zeitintensiv, da die gewünschten Simulationsszenarien erst in einer CAD-Software, aufgrund der umständlichen Design-Umgebung, erstellt werden müssen. Ein weiterer Vorteil der Software ist, dass komplexere Erdungssysteme simuliert werden können. Das Modell in MATLAB® kann zur schnellen Abschätzung der Erdungsimpedanz für die Praxis verwendet werden, um den möglichen Wertebereich der Impedanz zu bestimmen.

Im Zuge der Masterarbeit wurde die Messung einer Mittelspannungsschaltstation vorgenommen. Es wurde die Erdungsimpedanz der Schaltstation, sowie von den angeschlossenen Niederspannungsabzweigen bestimmt. Die Simulationen in MATLAB® und XGSLab™ wurden durch eine reale Messung einer Mittelspannungsschaltstation verifiziert. Die Gründe für die Abweichungen wurden in den entsprechenden Abschnitten erläutert. Besonders hervorzuheben ist hier die komplexe Modellierung des Erdbodens, welche einen großen Unsicherheitsfaktor darstellt, sowie die Erdverbindungen von vermaschten Erdungssystemen, die nicht offensichtlich erkennbar oder dokumentiert sind.

Grundsätzlich empfiehlt sich, die Erdungsimpedanzmessung mit einer entsprechenden Simulation zu kombinieren, da sich mithilfe der Simulation der mögliche Wertebereich für die Erdungsimpedanz abschätzen lässt. Bei der Messung muss besonders auf die Wahl der Gegenelektrode geachtet werden, da diese die Messwerte, aufgrund des Übergangswiderstandes zum Erdboden, maßgeblich beeinflusst. Es ist außerdem ratsam, mehrere Messtrassen in verschiedene Himmelsrichtungen zu messen, um die Plausibilität der Messwerte sicherzustellen.

Für weiterführende Arbeiten wäre es möglich, die Kopplungseffekte im MATLAB®-Modell zu integrieren. Weiters könnte angedacht werden, noch mehrere Mittelspannungsschaltstationen in verschiedenen Landschaftsstrukturen zu messen und diese mit den Simulationen zu vergleichen.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- [1] D. Oeding, B. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, Mannheim: Springer Vieweg, 2016.
- [2] APG, „Unternehmenswebsite APG,“ 12.06.2021. [Online]. Available: <https://www.apg.at/de/markt/strommarkt/tarife>.
- [3] Oberösterreich Netz, „Hochspannungsblog,“ 09. Juni 2021. [Online]. Available: <https://www.hochspannungsblog.at/Wissenswertes/Netzaufbau>.
- [4] R. Schürhuber, „Vorlesungsskriptum zur Vorlesung Energiesysteme 2 TU-Graz,“ Graz, 2021.
- [5] ÖVE/Austrian Standards, „ÖVE / ÖNORM B 1/1976 Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV,“ Wien, 1976.
- [6] ÖVE/Austrian Standards, „EN 50522 Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV,“ Wien, 2011.
- [7] G. Banerjee, W. Heckmann, „Increasing Limits of Grid Extension for Renewable Integration through Decentralized Compensation,“ *Internation ETG Congress 2015*, pp. 400-405, 17-18 November 2015.
- [8] K. Friedl, L. Fickert, R. Braunstein, W. Hipp, R. Schürhuber, „Decentralized earth fault compensation in MV-grids-challenges and solutions,“ *CIGRE 2021 Conference*, pp. 1-5, 21-24 Juni 2021.
- [9] C. Schneider, „Erdschlusslöschung im 20-kV-Verteilernetz der KELAG Netz GmbH,“ TU Graz, Graz, 2010.
- [10] W. Sporer, „Erdschlussortung durch Fehlerstromeinspeisung,“ TU Graz, Graz, 2011.
- [11] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie., „Betriebserdung,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Betriebserdung>. [Zugriff am 18. Juni 2021].
- [12] T. Mallits, L. Fickert, E. Schmutzner, „Globales Erdungssystem in urbanen Kabelnetzen,“ *e&i elektrotechnik und informationstechnik*, pp. 420-425, 14.11.2017.
- [13] ÖVE/Austrian Standards, „ÖVE/ÖNORM E 8383 Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV,“ Wien, 2000.
- [14] ÖVE/ÖNORM, „ÖVE E 8101 - Errichtungsbestimmungen für elektrische Niederspannungsanlagen,“ Wien, 2019.
- [15] ÖVE/ÖNORM, „ÖVE E 8014 Fundamenterde und ergänzende Maßnahmen mit Erdung und Potentialausgleich für Einrichtungen der Informationstechnik,“ Wien, 2019.
- [16] IEEE Std. 80, „IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,“ 2013.
- [17] IEEE Std. 81, „IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System,“ 2012.

- [18] OVE EN, „Anwendung von Maßnahmen für Erdung und Potentialausgleich in Gebäuden mit Einrichtungen der Informationstechnik,“ 2017.
- [19] ÖVE/ÖNORM, „Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze,“ Wien, 2012.
- [20] ÖVE/ÖNORM, „Blitzschutz - Teil 2: Risiko-Management,“ 2013.
- [21] ÖVE/ÖNORM, „Blitzschutz - Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen,“ 2012.
- [22] M. Lindinger, „Nachweis globaler Erdungssysteme durch Messung und Berechnung von verteilten Erdungsanlagen,“ TU-Graz, Graz, 2012.
- [23] T. Mallits, „Dissertation: Fehlerstromaufteilung und Potentialverhältnisse in komplexen (Globalen-) Erdungssystemen und deren Einfluss auf die Beurteilung,“ TU-Graz, Graz, 2018.
- [24] G. Zizzo, L. Martirano, G. Parise, „The Global Grounding System: Definitions and Guidelines,“ 2015.
- [25] A. Campoccia, G. Zizzo, „The Quest for Global Safety,“ 2007.
- [26] W. Plaßmann, D. Schulz, Handbuch Elektrotechnik, Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker, Hannover: Springer Vieweg, 2016.
- [27] B. Trenkler, „Verlegung von Kunststoff-Höchstspannungskabeln-Argumente zur Systemauswahl,“ TU-Graz, Graz, 2010.
- [28] G. Wurzer, „Verkabelung von Verteilernetzen $\leq 20\text{kV}$,“ TU-Graz, Graz, 2013.
- [29] B. Heine, „Qualitätssicherung für Mittelspannungskabelanlagen,“ TU-Graz, Graz, 2018.
- [30] NKT, „NKT-Kabel-Mittelspannung,“ [Online]. Available: <https://www.nkt.de/produkte-loesungen/mittelspannung/mittelspannungskabel/na2xs-fl-2y-12-20-kv>. [Zugriff am 01 07 2021].
- [31] Waskönig+Walter, „Waskönig+Walter Kabel,“ [Online]. Available: https://de.waskoenig.de/produkte/energiekabel-1kv_3.php?grp=Spannung%20bis%20110kV&dt=PEX-S-AL%2012kV. [Zugriff am 01 07 2021].
- [32] D. Aegerter, „Erdung und Schirmbehandlung von Hochspannungskabeln,“ FKH - Fachtagung, Schweiz, 2019.
- [33] NKT, „NKT-Kabel-Niederspannung,“ [Online]. Available: <https://www.nkt.de/produkte-loesungen/niederspannung/1-kv-kabel/e-yy-0-6-1-kv>. [Zugriff am 01 07 2021].
- [34] NKT, „NKT-Niederspannung-Schirm,“ [Online]. Available: <https://www.nkt.de/produkte-loesungen/niederspannung/1-kv-kabel/naycwy-0-6-1-kv>. [Zugriff am 01 07 2021].
- [35] O. Biro, „Skript Theorie der Elektrotechnik,“ TU Graz, Graz, 2018.
- [36] R. Schürhuber, „Vorlesungsskriptum zur Vorlesung Energiesysteme 1 TU-Graz,“ Graz, 2020.
- [37] H. Koglin, E. Meyer, „Selbstimpedanzen von endlich und unendlich langen Leitern mit Erdrückleitung,“ *Archiv für Elektrotechnik*, pp. 125-133, 01 04 1981.
- [38] K. Nowak, „Bestimmung des spezifischen Bodenwiderstandes,“ *11. Praxistag Korrosionsschutz 2017*, pp. 1-29, 2017.
- [39] CHAUVIN ARNOUX GROUP, „Leitfaden zur Erdungsprüfung,“ *Erdungsprüfung und Messung des spezifischen Widerstandes*, pp. 1-32, 1 August 2010.

- [40] DEHN, „Wegfall des Wasserrohrnetzes als Erder“, *Praxislösung*, pp. 1-4, 2015.
- [41] C. Moreira, M. Lapola, A. Carrara, „Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer,“ *Geofisica Internaciona*, pp. 1-12, 1 April 2016.
- [42] IRIS Instruments, „IRIS,“ [Online]. Available: <http://www.iris-instruments.com/syscal-kidsw.html>. [Zugriff am 12 Juli 2021].
- [43] AGI, „AGI-USA,“ [Online]. Available: <https://www.agiusa.com/blog/comparison-11-classical-electrode-arrays>. [Zugriff am 12 Juli 2021].
- [44] K. Friedl, „New developments in earthing design including risk analysis,“ CIRED, TU Graz, 2021.
- [45] C. Barton, M. Kurri, „ZERO SEQUENCE EARTHING,“ [Online]. Available: <http://zsearthing.com/earthing-grounding-assessment-using-current-injection-testing/>. [Zugriff am 15 Juli 2021].
- [46] „XGSLab,“ [Online]. Available: <http://www.xgslab.com/>. [Zugriff am 18 Juli 2021].
- [47] B. Jauk, „Influence of arbitrary resistivity distribution of ground on the surface potential of earthing systems,“ TU Graz, Graz, 2020.
- [48] E. Schmutzner, „Einführung Elektromagnetische Verträglichkeit elektrischer Systeme,“ TU-Graz, Graz, 2014/2015.
- [49] Georg Kerber, „Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen,“ TU München, München, 2010.
- [50] F. Fickert, „Untersuchung der Erdungssituation im Bereich einer Schaltstation,“ TU Graz, Graz, 2021.

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Netzebenen	2
Abbildung 1.2: Funktion eines kompensierten Netzes	3
Abbildung 1.3: Kompensiertes Netz mit zusätzlicher dezentraler Kompensationsspule (in blau)	5
Abbildung 1.4: Verbindung der Erdungssysteme eines Mittel- und Niederspannungsnetzes	5
Abbildung 2.1: Isoliertes Netz.....	10
Abbildung 2.2: Richtwerte für Erdschlussströme im isolierten Netz (Daten aus [5]).....	10
Abbildung 2.3: Starre / Niederohmige Sternpunkterdung	12
Abbildung 2.4: Kompensiertes Netz	13
Abbildung 2.5: Richtwerte für den Erdschlussreststrom im kompensierten Netz, (Daten aus [5])	14
Abbildung 2.6: Kompensiertes Netz mit vorübergehender niederohmiger Sternpunkterdung.....	15
Abbildung 2.7: Kompensiertes Netz mit vorübergehender niederohmiger Phasenerdung	15
Abbildung 2.8: Betriebsbereich von Kompensationsspulen [9]	17
Abbildung 2.9: Aufbau einer Kompensationsspule [10]	18

Abbildung 2.10: Übersicht (keine Vollständigkeit) der Normen für Erdungsanlagen	19
Abbildung 2.11: Begriffe für Erdungssysteme (in Anlehnung an [6])	23
Abbildung 2.12: Zulässige Berührungsspannung [6]	25
Abbildung 2.13: Auslegung von Erdungsanlagen [6]	26
Abbildung 2.14: Auslegung für den Erdungsleiter bei kreisförmigem Querschnitt [6].....	29
Abbildung 2.15: Modellversuch eines globalen Erdungssystems	31
Abbildung 2.16: Ablauf zur Identifikation eines globalen Erdungssystems [25].....	32
Abbildung 2.17: Einleiter Mittelspannungskabel NA2XS(FL)2Y [30]	35
Abbildung 2.18: Mehrleiter Mittelspannungskabel PEX-S-AL 3X 95 SE/25 12 kV RT [31]	36
Abbildung 2.19: Beidseitige Erdung des Kabelschirmes.....	36
Abbildung 2.20: Einseitige Erdung des Kabelschirmes.....	37
Abbildung 2.21: Cross-Bonding-Anordnung (in Anlehnung an [27])	38
Abbildung 2.22: Mehrleiter Niederspannungskabel E-YY 0.6/1 kV [33].....	38
Abbildung 2.23: Mehrleiter Niederspannungskabel NYCWY 0.6/1 kV [34].....	39
Abbildung 2.24: Potentialverlauf eines Erdungssystems (in Anlehnung an [22]).....	39
Abbildung 2.25: Modellierung eines Staberders als Ellipse (in Anlehnung an [22]).....	41
Abbildung 2.26: Beeinflussung von Erdungssystemen (in Anlehnung an [23])	43
Abbildung 2.27: Leiter-Erde-Schleife (in Anlehnung an [1])	44
Abbildung 2.28: Schaltungsaufbau zur Bestimmung der Mitimpedanz (in Anlehnung an [1])	47
Abbildung 2.29: Definition spezifischer Erdwiderstand (in Anlehnung an [38]).....	50
Abbildung 2.30: Messaufbau Wenner-Verfahren (in Anlehnung an [17])	51
Abbildung 2.31: Messaufbau Schlumberger-Verfahren (in Anlehnung an [17]).....	52
Abbildung 2.32: Messaufbau Dipol-Dipol-Verfahren (in Anlehnung an [41])	53
Abbildung 2.33: Strom-Spannungs-Messung (in Anlehnung an [23]).....	53
Abbildung 2.34: 2-Punkt-Methode (in Anlehnung an [44])	54
Abbildung 2.35: Clamp-on oder Stakeless-Methode (in Anlehnung an [44])	55
Abbildung 2.36: 3-Punkt-Methode (in Anlehnung an [44])	56
Abbildung 2.37: Fall-of-Potential-Methode (in Anlehnung an [39])	56
Abbildung 2.38: Methode mit Strominjektion (in Anlehnung an [44])	57
Abbildung 2.39: Netzversuch mit Nennspannung (in Anlehnung an [44])	58
Abbildung 2.40: Übersicht der Software XGSLab™ (Informationen aus [46])	60
Abbildung 2.41: Bodenmodelle (in Anlehnung an [47]).....	61
Abbildung 2.42: Koordinatensystem in XGSLab™.....	61
Abbildung 2.43: Grafik-Editor	62
Abbildung 2.44: Darstellung des Potentialverlaufs.....	62
Abbildung 2.45: 3-Schicht-Bodenmodell in XGSLab™	63
Abbildung 2.46: Halbkugelerder	63
Abbildung 2.47: Kreisplattenerder	63
Abbildung 3.1: Verwendete Softwarepakete	64
Abbildung 3.2: Induktiv gekoppelte Leiterschleifen (in Anlehnung an [12])	65
Abbildung 3.3: Induktiv gekoppelte Leiterschleife im Erdboden (in Anlehnung an [12]).....	66

Abbildung 3.4: Leiterschleifen mit gemeinsamer Rückleitung über Erde (in Anlehnung an [12])	66
Abbildung 3.5: Leiterschleifen mit Übergangsimpedanzen (in Anlehnung an [12])	67
Abbildung 3.6: Geändertes Modell (in Anlehnung an [12])	68
Abbildung 3.7: Modell mit mehreren Ortsnetzstationen (in Anlehnung an [12]).....	68
Abbildung 3.8: Vollständiges Modell (in Anlehnung an [12]).....	69
Abbildung 3.9: Homogene Kettenleiterstruktur.....	70
Abbildung 3.10: Kettenleiter des Mittelspannungssystems.....	71
Abbildung 3.11: Kettenleiter eines Niederspannungsabzweiges	71
Abbildung 3.12: Vollständiges Kettenleiternetzwerk	72
Abbildung 3.13: Parameterberechnung.....	73
Abbildung 3.14: Modul-Kabel	74
Abbildung 3.15: Modul-Abzweig	74
Abbildung 3.16: Abschlussmodul-Mast	75
Abbildung 3.17: Modul-Substation	75
Abbildung 3.18: Modul-Abgang	76
Abbildung 3.19: Modul Auswertung.....	76
Abbildung 3.20: Impedanzbelag PEN-Leiter nach Carson.....	79
Abbildung 3.21: Erdstromtiefe für kurze und sehr lange Leiter	79
Abbildung 3.22: Impedanzbelag für kurze und sehr lange PEN-Leiter	80
Abbildung 3.23: Impedanz ZPEN für häufig verwendete Querschnitte.....	81
Abbildung 3.24: Winkel der Impedanz ZPEN für häufig verwendete Querschnitte.....	81
Abbildung 3.25: Absoluter Fehler PEN-Leiter Impedanzen	82
Abbildung 3.26: Absoluter Fehler PEN-Leiter Impedanzwinkel	82
Abbildung 3.27: Impedanzbelag für Kabelschirme.....	83
Abbildung 3.28: Impedanzbelag für kurze und sehr lange Kabelschirme	84
Abbildung 3.29: Impedanz ZSchirm für häufig verwendete Querschnitte	84
Abbildung 3.30: Winkel der Impedanz ZSchirm für häufig verwendete Querschnitte	85
Abbildung 3.31: Absoluter Fehler Schirmimpedanzen	85
Abbildung 3.32: Absoluter Fehler Kabelschirm Impedanzwinkel	86
Abbildung 3.33: Impedanzverläufe Kettenleiter für $l = 100 \text{ m}$, $A = 240 \text{ mm}^2$, $RH = 10 \Omega$	87
Abbildung 3.34: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $RH = 10 \Omega$	88
Abbildung 3.35: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 240 \text{ mm}^2$	88
Abbildung 3.36: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$	89
Abbildung 3.37: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $Z_E = 1,5 \Omega \angle 20^\circ$	90
Abbildung 3.38: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 50 \text{ mm}^2$	91
Abbildung 3.39: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$; 1 Abzweig.....	91
Abbildung 3.40: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$; 5 Abzweige	92
Abbildung 3.41: Impedanzverlauf ZKette_NS für variable Distanz l	93
Abbildung 3.42: Winkelverlauf der Impedanz ZKette_NS für variable Distanz l	93
Abbildung 3.43: Vermaschtes Erdungssystem in XGSLab™.....	95
Abbildung 3.44: Erdungswiderstand als Funktion der Tiefe	95

Abbildung 3.45: Bodenmodell $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m} / 60 \Omega \cdot \text{m}$	96
Abbildung 3.46: Erdungssystem mit PEN-Leiter in XGSLab™	96
Abbildung 3.47: Vergleich der Impedanzbeläge Z'_{MATLAB} und Z'_{XGSLab}	97
Abbildung 3.48: Impedanz $Z_{\text{Kette_NS}} = R_H + Z_{\text{PEN}}$ für verschiedene Querschnitte	98
Abbildung 3.49: Winkel der Impedanz $Z_{\text{Kette_NS}} = R_H + Z_{\text{PEN}}$ für verschiedene Querschnitte.....	98
Abbildung 3.50: Simulationsszenario	99
Abbildung 3.51: Impedanz $Z_{\text{Kette_NS}}$ für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden.....	100
Abbildung 3.52: Ohmsche Kopplung 600 m.....	101
Abbildung 3.53: Ohmsche Kopplung 100 m.....	101
Abbildung 3.54: Ohmsche Kopplung 20 m.....	101
Abbildung 3.55: Realteil von $Z_{\text{Kette_NS}}$ für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden.....	102
Abbildung 3.56: Impedanzwinkel von $Z_{\text{Kette_NS}}$ für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden....	102
Abbildung 3.57: Abschätzung der Fläche.....	103
Abbildung 3.58: Abschätzung von Netzstrukturen	103
Abbildung 3.59: Erdungsspannung U_E Verteilung	105
Abbildung 3.60: Erdungsspannung U_E für verschiedene Abstände.....	105
Abbildung 3.61: Potentialverlauf 12 Gebäude, Distanz $l = 50 \text{ m}$	106
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung Vergleich Simulation und Messung.....	107
Abbildung 4.2: Scheinbarer spezifischer Widerstand ρ_{E_S} in Abhängigkeit vom Sondenabstand	109
Abbildung 4.3: Inverses Modell des spezifischen Bodenwiderstandes ρ_E	110
Abbildung 4.4: Messaufbau mit Strominjektion in die Kabelschirme.....	111
Abbildung 4.5: Strominjektion über die Kabelschirme der Mittelspannungskabel	112
Abbildung 4.6: Messtrasse Norden und Westen	112
Abbildung 4.7: Verlauf der Erdungsimpedanz, Messtrasse West, Strominjektion Ebersberg	113
Abbildung 4.8: Verlauf der Erdungsimpedanz, Messtrasse Nord, Strominjektion Ebersberg.....	114
Abbildung 4.9: Messaufbau mit Strominjektion in die Gegenelektrode.....	115
Abbildung 4.10: Gegenelektrode	116
Abbildung 4.11: Verlauf der Erdungsimpedanz, Messtrasse Nord, Strominjektion Gegenelektrode..	116
Abbildung 4.12: Simulationsmodell in XGSLab™	118
Abbildung 4.13: Oberflächenpotential Schaltstation Hausberg 2D-Ansicht	118
Abbildung 4.14: Oberflächenpotential Schaltstation Hausberg 3D-Ansicht	119
Abbildung 7.1: Parametereingabe Kettenleiter-Excel®.....	133
Abbildung 7.2: Modulstruktur 1	134
Abbildung 7.3: Modulstruktur 2.....	135
Abbildung 7.4: Modulstruktur 3.....	136
Abbildung 7.5: Impedanz Z_{PEN} für praxisrelevante Querschnitte.....	137
Abbildung 7.6: Winkel der Impedanz Z_{PEN} für praxisrelevante Querschnitte.....	137
Abbildung 7.7: Vergleich der Impedanz Z_{PEN} für lange und kurze Leiter.....	138
Abbildung 7.8: Vergleich der Impedanzwinkel von Z_{PEN} für lange und kurze Leiter.....	138
Abbildung 7.9: Vergleich der Impedanz Z_{Schirm} für lange und kurze Leiter	139
Abbildung 7.10: Vergleich der Impedanzwinkel von Z_{Schirm} für lange und kurze Leiter	139

Abbildung 7.11: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $RH = 10 \Omega$	140
Abbildung 7.12: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $l = 100 \text{ m}$	140
Abbildung 7.13: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 150 \text{ mm}^2$	141
Abbildung 7.14: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $ZE = 1,5 \Omega \angle 20^\circ$	141
Abbildung 7.15: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $l = 500 \text{ m}$	142
Abbildung 7.16: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 50 \text{ mm}^2$	142
Abbildung 7.17: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variablen Querschnitt A , $l = 100 \text{ m}$	143
Abbildung 7.18: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variablen Querschnitt A , $l = 100 \text{ m}$	143
Abbildung 7.19: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$	144
Abbildung 7.20: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$	144
Abbildung 7.21: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variablen RH , $A = 150 \text{ mm}^2$, $l = 100 \text{ m}$	145
Abbildung 7.22: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variablen Erdungswiderstand RH	145
Abbildung 7.23: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variablen Querschnitt A , $l = 60 \text{ m}$	146
Abbildung 7.24: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variablen Querschnitt A , $l = 60 \text{ m}$	146
Abbildung 7.25: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$	147
Abbildung 7.26: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$	147
Abbildung 7.27: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ variabler RH , $A = 150 \text{ mm}^2$, $l = 60 \text{ m}$	148
Abbildung 7.28: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variablen Erdungswiderstand RH	148
Abbildung 7.29: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variablen Querschnitt A , $l = 30 \text{ m}$	149
Abbildung 7.30: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variablen Querschnitt A , $l = 30 \text{ m}$	149
Abbildung 7.31: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$	150
Abbildung 7.32: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$	150
Abbildung 7.33: Impedanzverlauf $ZKette_NS$ für variablen Erdungswiderstand RH , $l = 30 \text{ m}$	151
Abbildung 7.34: Winkel der Impedanz $ZKette_NS$ für variablen Erdungswiderstand RH	151
Abbildung 7.35: Impedanzverlauf $ZKette_MS$ für variablen Querschnitt A , $l = 500 \text{ m}$	152
Abbildung 7.36: Winkel der Impedanz $ZKette_MS$ für variablen Querschnitt A , $l = 500 \text{ m}$	152
Abbildung 7.37: Impedanzverlauf $ZKette_MS$ für variable Erdungsimpedanz ZE , $l = 500 \text{ m}$	153
Abbildung 7.38: Winkel der Impedanz $ZKette_MS$ für variable Erdungsimpedanz ZE , $l = 500 \text{ m}$	153
Abbildung 7.39: Impedanzverlauf $ZKette_MS$ für variablen Querschnitt A , $l = 500 \text{ m}$	154
Abbildung 7.40: Winkel der Impedanz $ZKette_MS$ für variablen Querschnitt A , $l = 500 \text{ m}$	154
Abbildung 7.41: Impedanzverlauf $ZKette_MS$ für variable Länge l , $A = 50 \text{ mm}^2$	155
Abbildung 7.42: Winkel der Impedanz $ZKette_MS$ für variable Länge l , $A = 50 \text{ mm}^2$	155
Abbildung 7.43: Impedanzverlauf $ZKette_MS$ für variable Erdungsimpedanz ZE , $l = 500 \text{ m}$	156
Abbildung 7.44: Winkel der Impedanz $ZKette_MS$ für variable Erdungsimpedanz ZE	156
Abbildung 7.45: Winkel der Erdungsimpedanz als Funktion der Erdtiefe	159
Abbildung 7.46: Impedanz $ZKette_NS$ für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden	160

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einsatzbereich von Kompensationsspulen.....	18
Tabelle 2: Mindestquerschnitte für Erder [6]	24
Tabelle 3: Anforderungen für den Zusammenschluss von Erdungsanlagen [6]	28
Tabelle 4: Höchst zulässiger Körperstrom und zugehörige Fehlerdauer [6].....	29
Tabelle 5: Zusammenfassung Methoden-Erdungsmessung [44].....	59
Tabelle 6: Messabweichungen	59
Tabelle 7: Wertebereiche für die Erdungsimpedanz kategorisiert nach Landschaftsstruktur.....	92
Tabelle 8: Berechnung Impedanzbelag PEN-Leiter	97
Tabelle 9: Vergleich Messdaten XGSLab™ und Plattenerder (Distanz $l = 50$ m).....	104
Tabelle 10: Messdaten Scheinbarer spezifischer Bodenwiderstand $\rho_{E,S}$	109
Tabelle 11: Messergebnisse Messtrasse West, Strominjektion Ebersberg	113
Tabelle 12: Messergebnisse Messtrasse Nord, Strominjektion Ebersberg	114
Tabelle 13: Messergebnisse Messtrasse West, Strominjektion Gegenelektrode	116
Tabelle 14: Gegenüberstellung der ermittelten Erdungsimpedanzen.....	117
Tabelle 15: Vergleich Mess- und Simulationswerte Niederspannungsabgänge.....	119
Tabelle 16: Gebäude 10 m X 10 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 17: Gebäude 10 m X 10 m, ohne Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 18: Gebäude 10 m X 10 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 19: Gebäude 10 m X 10 m, ohne Bewehrung, $\rho_E = 200 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 20: Gebäude 20 m X 20 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 21: Gebäude 20 m X 20 m, ohne Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 22: Gebäude 10 m X 10 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 80 \Omega \cdot m$	157
Tabelle 23: Gebäude 10 m X 10, ohne Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 80 \Omega \cdot m$	158
Tabelle 24: Gebäude 20 m X 20, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 80 \Omega \cdot m$	158
Tabelle 25: Messdaten Gebäude mit PEN-Leiter, $l = 10$ m ... 20 m	158
Tabelle 26: Messdaten Gebäude mit PEN-Leiter, $l = 50$ m ... 100 m	158
Tabelle 27: Messdaten Gebäude mit PEN-Leiter, $l = 150$ m ... 200 m	159
Tabelle 28: Messdaten Gebäude mit verschiedenen PEN-Leiter Längen	160
Tabelle 29: Vergleich Messdaten XGSLab™ und Halbkugelerder (Distanz $l = 50$ m).....	161
Tabelle 30: Vergleich Messdaten XGSLab™ und Halbkugelerder (Distanz $l = 100$ m).....	161

6.4 Formelverzeichnis

(2.1) Formel Erdschlussstrom isoliertes Netz.....	9
(2.2) Formel Verstimmung	16
(2.3) Formel Dämpfung	16
(2.4) Formel Erdschlussstrom kompensiertes Netz	16

(2.5) Formel Erdschlussreststrom	16
(2.6) Formel Erdschlussreststrom mit Berücksichtigung der Oberschwingungen	16
(2.7) Formel THD.....	17
(2.8) Formel Reduktionsfaktor	23
(2.9) Formel Maxwell 1	40
(2.10) Formel Maxwell 2	40
(2.11) Formel Maxwell 3	40
(2.12) Formel Maxwell 4	40
(2.13) Formel Ableitung ist 0	40
(2.14) Formel Maxwell 1 stationär	40
(2.15) Formel Maxwell 2 stationär	40
(2.16) Formel Maxwell 3 stationär	40
(2.17) Formel Maxwell 4 stationär	40
(2.18) Formel Materialgleichung 1.....	40
(2.19) Formel Materialgleichung 2.....	40
(2.20) Formel Potentialfunktion	40
(2.21) Formel Maxwellgleichung 4 umgeformt	41
(2.22) Formel Maxwellgleichung 4 mit Potentialfunktion.....	41
(2.23) Formel Maxwellgleichung 4 mit Potentialfunktion vereinfacht	41
(2.24) Formel Potential Ellipse	42
(2.25) Formel Hilfsgröße Potential Ellipse.....	42
(2.26) Formel Koppelfaktor.....	42
(2.27) Formel Gesamtpotential.....	42
(2.28) Formel Matrixschreibweise	42
(2.29) Formel Kurzschreibweise Potentialkoeffizienten	42
(2.30) Formel Invertierung Koppelmatrix.....	43
(2.31) Formel Gesamterdungswiderstand.....	43
(2.32) Formel nach Carson.....	44
(2.33) Formel DC-Widerstand	44
(2.34) Formel Widerstandsbelag Erdrückleitung	45
(2.35) Formel Kreisfrequenz.....	45
(2.36) Formel Eindringtiefe	45
(2.37) Formel Grenzlänge	46
(2.38) Formel Angepasste Eindringtiefe.....	46
(2.39) Formel Angepasster Widerstandsbelag Erdrückleitung.....	46
(2.40) Formel nach Carson für kurze Leitungen.....	46
(2.41) Formel Angepasste Eindringtiefe größer als Grenzlänge.....	46
(2.42) Formel Angepasster Widerstandsbelag Erdrückleitung größer als Grenzlänge.....	46
(2.43) Formel nach Carson für kurze Leitungen größer als Grenzlänge	46
(2.44) Formel zur Bestimmung der Mitimpedanz Abkürzung.....	47
(2.45) Formel zur Bestimmung der Mitimpedanz Matrix	47

(2.46) Formel nach Carson Schirm	47
(2.47) Formel nach Carson Gegenimpedanz Schirm.....	48
(2.48) Formel Angepasste Eindringtiefe Schirm.....	48
(2.49) Formel Angepasster Widerstandsbelag Erdrückleitung Schirm	48
(2.50) Formel nach Carson für kurze Leitungen Schirm	48
(2.51) Formel Angepasste Eindringtiefe größer als Grenzlänge.....	48
(2.52) Formel Angepasster Widerstandsbelag Erdrückleitung größer als Grenzlänge.....	48
(2.53) Formel nach Carson für kurze Leitungen größer als Grenzlänge	48
(2.54) Formel Angepasste Eindringtiefe Gegenimpedanz Schirm	49
(2.55) Formel Angepasster Widerstandsbelag Erdrückleitung Gegenimpedanz Schirm.....	49
(2.56) Formel nach Carson für kurze Leitungen Gegenimpedanz Schirm.....	49
(2.57) Formel Angepasste Eindringtiefe Gegenimpedanz größer als Grenzlänge	49
(2.58) Formel Widerstandsbelag Erdrückleitung Gegenimpedanz größer als Grenzlänge	49
(2.59) Formel nach Carson für kurze Leitungen Gegenimpedanz Schirm.....	49
(2.60) Formel in Matrixschreibweise für Schirmimpedanz	49
(2.61) Formel gleiche Selbstimpedanzen.....	49
(2.62) Formel Gleiche Gegenimpedanzen	49
(2.63) Formel zur Bestimmung der Schirmimpedanz.....	49
(2.64) Formel Spezifischer Widerstand Wenner	51
(2.65) Formel Spezifischer Widerstand Wenner vereinfacht.....	51
(2.66) Formel Spezifischer Widerstand Schlumberger.....	52
(2.67) Formel Spezifischer Widerstand Dipol-Dipol-Verfahren	52
(2.68) Formel Abstand Elektroden 3 Punkt Methode	56
(2.69) Formel Halbkugelerder.....	63
(2.70) Formel Kreisplattenerder.....	63
(3.1) Formel Spannungsgleichung 1	65
(3.2) Formel Spannungsgleichung 2	65
(3.3) Formel Ansatz Kettenleiter.....	70
(3.4) Formel Unendliche Reihe.....	70
(3.5) Formel Gesamtwiderstand Niederspannungsabgang	75
(3.6) Formel Näherung Eindringtiefe	80
(4.1) Formel Erdungsstrom.....	108

7 Anhang

7.1 Microsoft Excel®-Kettenleiter

7.1.1 Eingabefeld

Kettenleiter-Parameterberechnung			
Parameter	Formel	Wert	Einheit
Netz, Globalparameter			
Frequenz	f	50	[Hz]
Kreisfrequenz	$\omega = 2\pi f$	314,16	[s ⁻¹]
Permeabilität	μ_0	1,25664E-06	[Vs/Am]
"Basissimpedanz"	$\omega^2 \mu_0 / 2\pi$	0,02818185307179590	[Ω/km]
Erdboden			
spez. Bodenwld.	ρ	100	[Ω²*m]
Eindringtiefe	$\rho_e = 1,85137 / (\omega^2 \mu_0 / \rho)^{0,5}$	931,80	[m]
Rückstromtiefe	$D_e = (2\rho / \omega^2 \mu_0)^{0,5} * \rho_e$ ($\gamma = 1,78$; Besselkonstante)	1220,51	[m]
Kabel zwischen den Abgängen			
Fläche Leiter	Al	240	[mm²]
Leitfähigkeit Leiter (Cu = 52 / Al = 37) inklusive Skinneffekt (Al = 32,1)	yl	37	[Smv/mm²]
spez. Leiterwiderstand	$r_L = 1 / (\gamma L * Al)$	0,1126	[Ω/km]
Radius Leiter	$radL = (AL / \gamma)^{0,5}$	8,74	[mm]
Isolationsstärke	diso	5,5	[mm]
Anzahl wirksamer Schirme	ns, zu	3	[#]
Fläche Schirm	A5	25	[mm²]
Leitfähigkeit Schirm (Cu = 52 / Al = 37)	ys	52	[Smv/mm²]
spez. Schirmwiderstand (Hier nur 1 Schirm gerechnet)	$r_S = 1 / (\gamma S * A5)$	0,76923	[Ω/km]
Innenradius Schirm	$radSi = radL + d_{iso}$	14,240387	[mm]
Außenradius Schirm	$radSa = (A5 / \pi r + radSi^2)^{0,5}$	14,517107	[mm]
Stärke Schirm	$t = radSa - radSi$	0,2767	[mm]
spez. Selbstinduktivität Schirm	$L_{sch} = \omega^2 \mu_0 / 2\pi * \ln(D_e / (radSa * \exp(-d/3) * radSi * \sqrt{2 * radSi * t}))$	0,7129	[Ω/km]
Schirmimpedanz bezogen auf Kilometer	$Z_{sch} = (r_S^2 + j \omega L_{sch}) * \gamma / ns$	0,256410256410256 + j0,237625923324434	[Ω/km]
Gebäude, Masten			
Widerstand Gebäude	RH	20	[Ω]
Widerstand Masten	RM	100	[Ω]
Blindwiderstand Masten	XM	0,0003142	[Ω]

Abbildung 7.1: Parametereingabe Kettenleiter-Excel®

7.1.2 Modulstruktur

		SST									
Gesamtdmittanz der SST in I/O: 6.9751707356954-2.39149249537533i Betrag der Gesamtdmittanz der SST in I/O: 7.373735987 Winkel der Gesamtdmittanz der SST in °: -18.92468315 Gesamtdmittanz der SST in Ω: 0.1282850129841+0.0439836973724015i Betrag der Gesamtdmittanz der SST in Ω: 0.138616153 Winkel der Gesamtdmittanz der SST in °: 18.92468315		Abgang #Kaindorf Impedanz Strang in Ω: 0.23399965271129+0.0746423970894557i Impedanz Betrag in Ω: 0.236007515 Impedanz Phase in °: 18.43757658 Admittanz Strang in I/O: 4.01965502361786-1.3400898928206i Admittanz Betrag in I/O: 4.237153203 Admittanz Phase in °: -18.43757658		Modul-Kabel Länge des Kabels in m: 300 Widerstand des Kabels in Ω: 0.0769231 Reaktanz des Kabels in Ω: 0.0712878 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 0.14698988848052+0.00335462007212559i Impedanz Betrag in Ω: 0.1470082 Impedanz Phase in °: 1.3075617		Modul-Abzweig Anzahl der Gebäude am Abzweig: 100 Erdungswiderstand eines Gebäudes in Ω: 20 Gesamterdungswiderstand der Gebäude in Ω: 0.2 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 0.551282051282051+0.047325184648888i Impedanz Betrag in Ω: 4.927199691 Impedanz Phase in °: 0.5533268		Modul-Kabel Länge des Kabels in m: 200 Widerstand des Kabels in Ω: 0.0512821 Reaktanz des Kabels in Ω: 0.0475252 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 0.5 Impedanz Betrag in Ω: 0.5 Impedanz Phase in °: 0		Modul-Abzweig Anzahl der Gebäude am Abzweig: 40 Erdungswiderstand eines Gebäudes in Ω: 20 Gesamterdungswiderstand der Gebäude in Ω: 0.5 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 0 Impedanz Betrag in Ω: 0 Impedanz Phase in °: Nicht definiert!	
Abgang #Hinsdorf Impedanz Strang in Ω: 0.9186684751167-0.2376295778188928i Impedanz Betrag in Ω: 0.948901868 Impedanz Phase in °: 14.50271454 Admittanz Strang in I/O: 1.02026964971334-0.263911243851119i Admittanz Betrag in I/O: 1.053849753 Admittanz Phase in °: -14.50271454		Modul-Kabel Länge des Kabels in m: 1000 Widerstand des Kabels in Ω: 0.2564103 Reaktanz des Kabels in Ω: 0.23761259 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 0.662255591101414+3.65486449370191E-06i Impedanz Betrag in Ω: 0.6622556 Impedanz Phase in °: 0.0003162		Modul-Abzweig Anzahl der Gebäude am Abzweig: 30 Erdungswiderstand eines Gebäudes in Ω: 20 Gesamterdungswiderstand der Gebäude in Ω: 0.6666667 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 100.089745589744+0.0834832731655519i Impedanz Betrag in Ω: 0.047789493 Impedanz Phase in °: 100.08978		Modul-Kabel Länge des Kabels in m: 350 Widerstand des Kabels in Ω: 0.0897436 Reaktanz des Kabels in Ω: 0.0831691 Impedanz der vorherigen Module in Ω: 100+0.0003142i Impedanz Betrag in Ω: 100 Impedanz Phase in °: 0.00018		Abschlussmodul – Mast Widerstand Abschlussmodul in Ω: 100 Blindwiderstand Abschlussmodul in Ω: 0.0003142 Impedanz des Abschlussmodules in Ω: 100+0.0003142i Impedanz Betrag in Ω: 100 Impedanz Phase in °: 0.000180023			

Abbildung 7.2: Modulstruktur 1

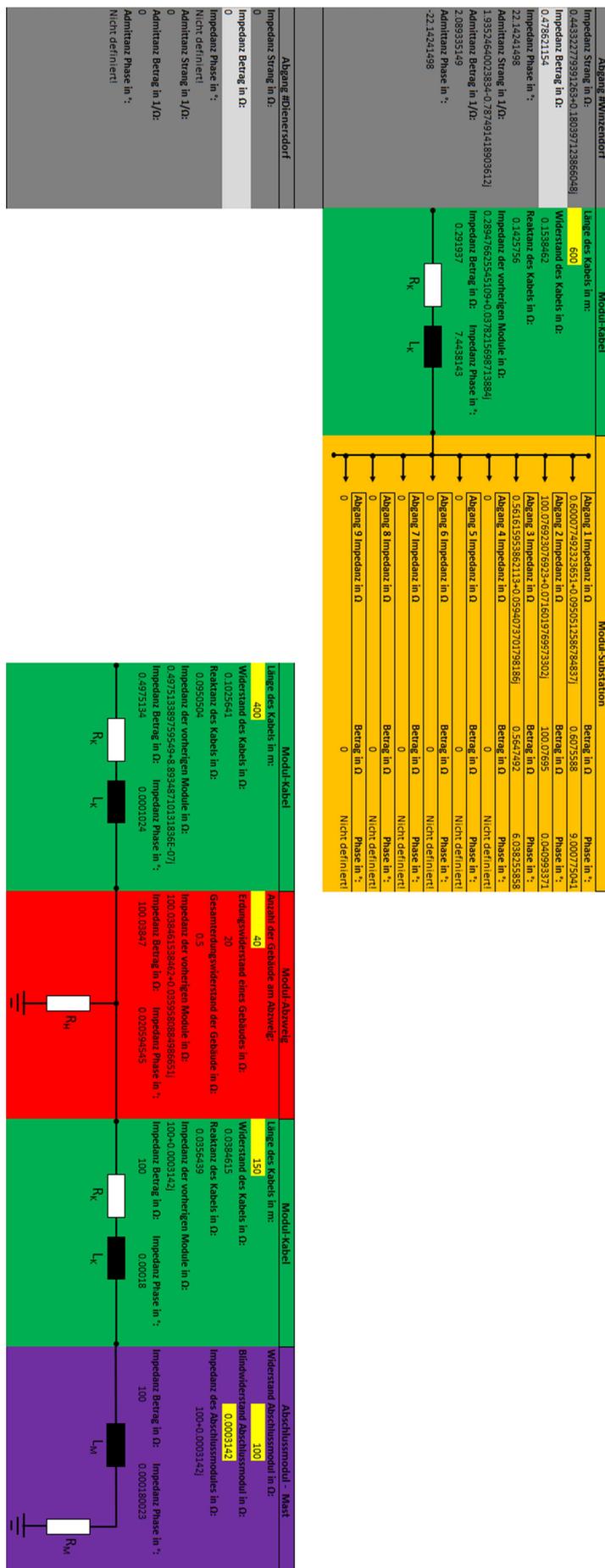


Abbildung 7.3: Modulstruktur 2

7.2 MATLAB®-Simulationen

7.2.1 Impedanzen für den PEN-Leiter

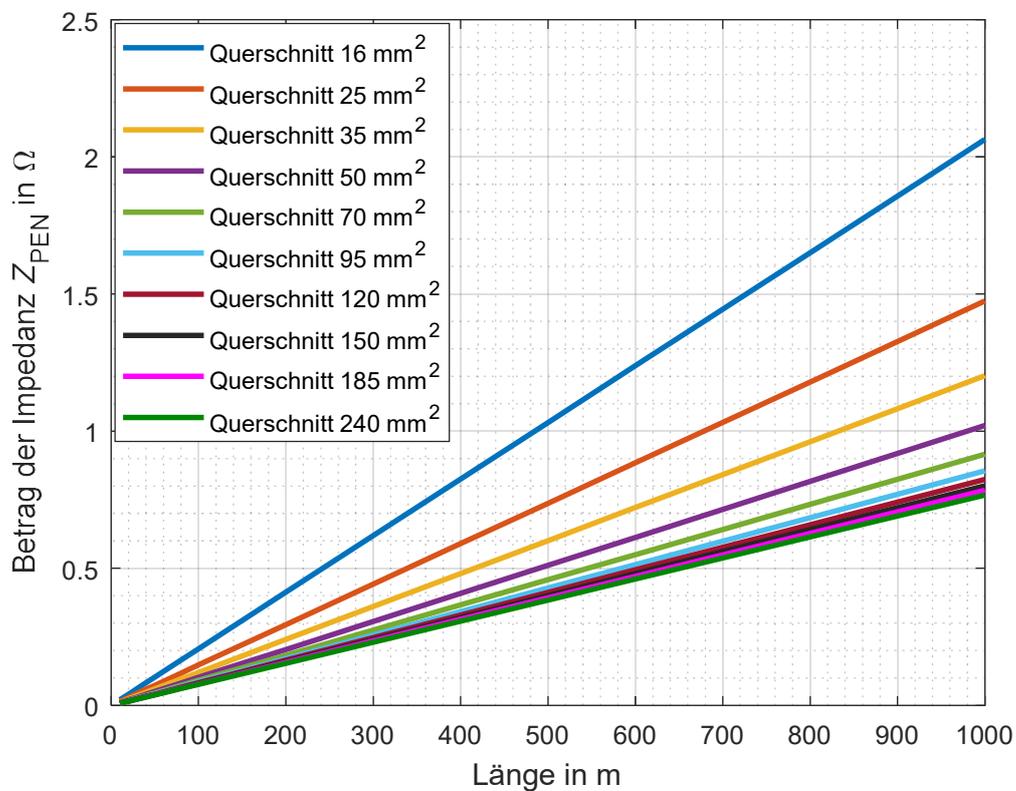


Abbildung 7.5: Impedanz Z_{PEN} für praxisrelevante Querschnitte

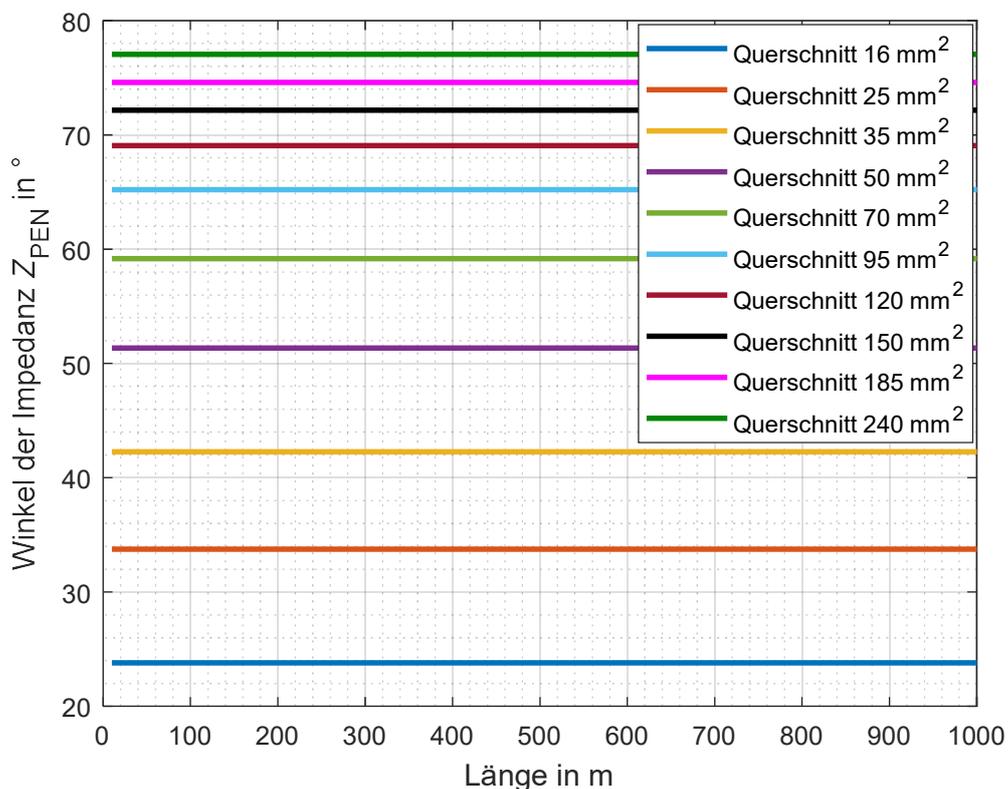


Abbildung 7.6: Winkel der Impedanz Z_{PE} für praxisrelevante Querschnitte

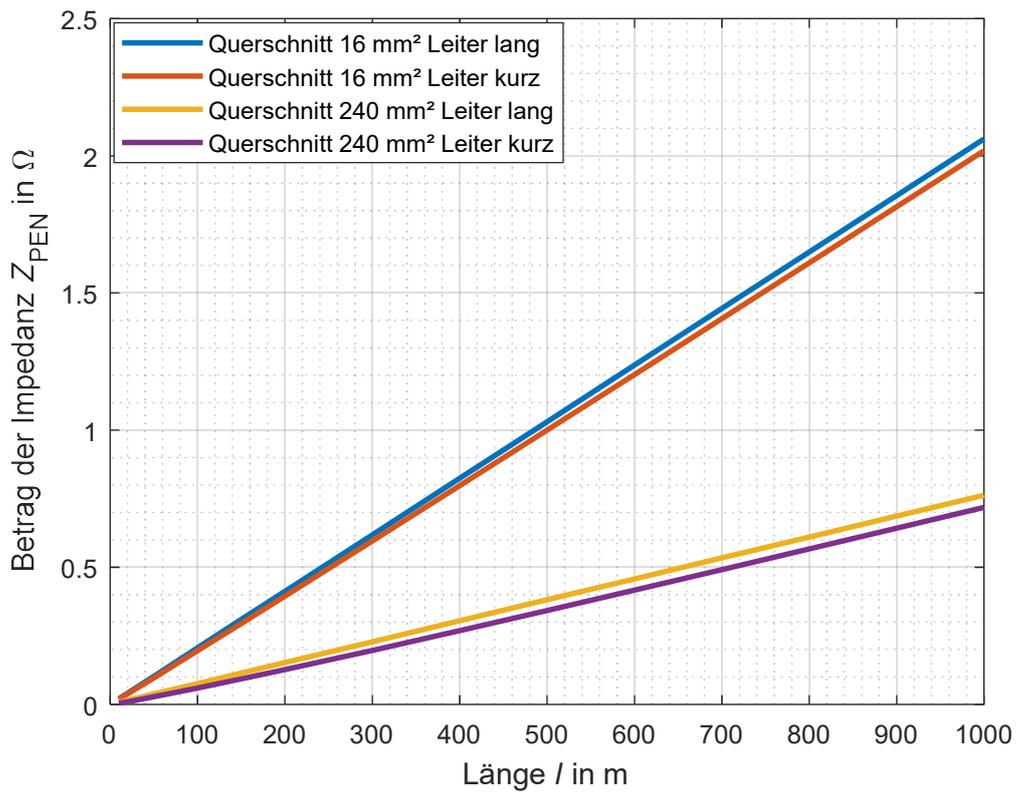


Abbildung 7.7: Vergleich der Impedanz Z_{PEN} für lange und kurze Leiter

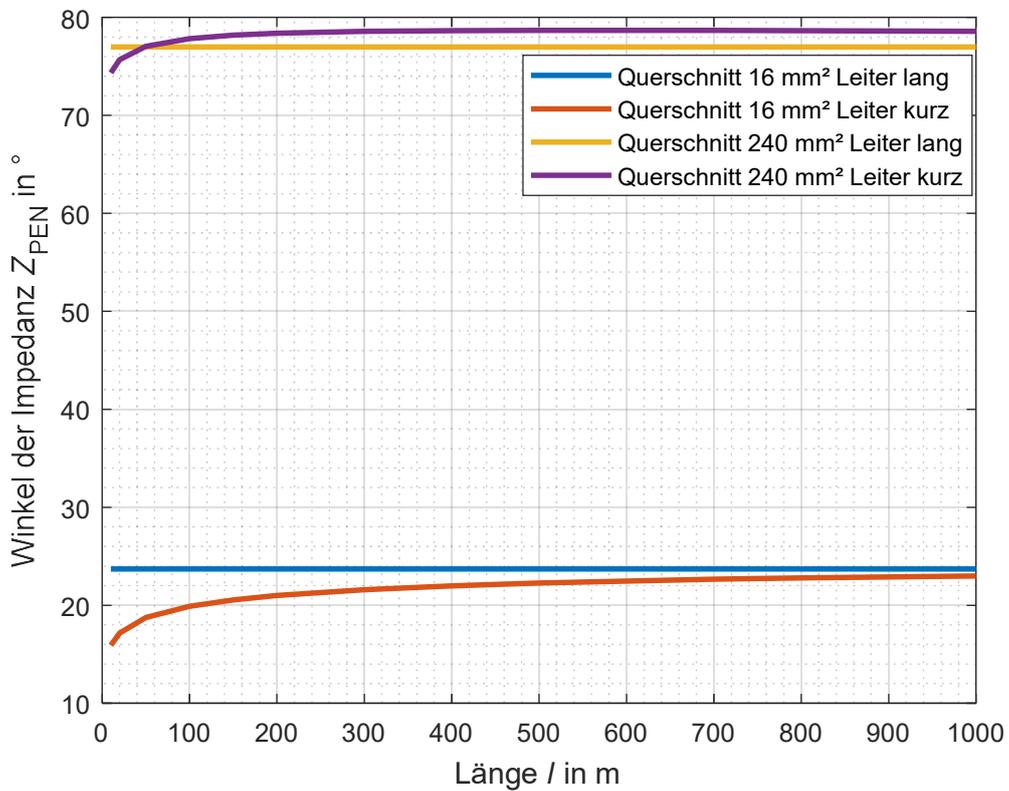


Abbildung 7.8: Vergleich der Impedanzwinkel von Z_{PEN} für lange und kurze Leiter

7.2.2 Impedanzen für den Kabelschirm

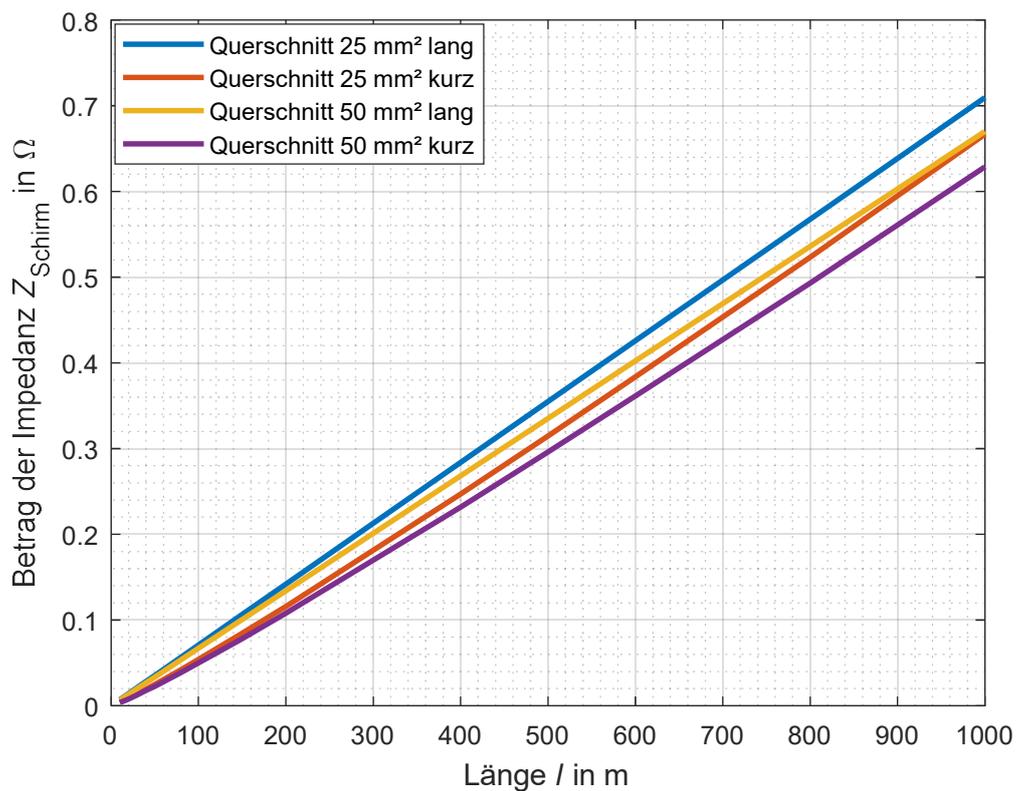


Abbildung 7.9: Vergleich der Impedanz Z_{Schirm} für lange und kurze Leiter

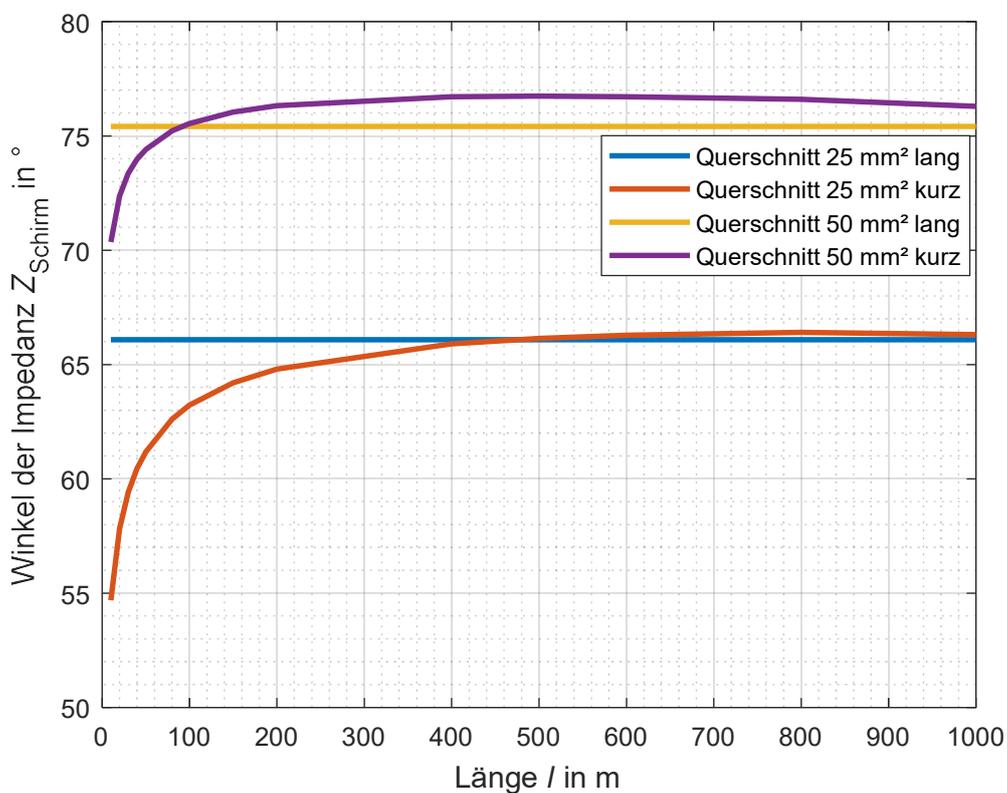


Abbildung 7.10: Vergleich der Impedanzwinkel von Z_{Schirm} für lange und kurze Leiter

7.2.3 Parameteranalyse der Niederspannungsabzweige

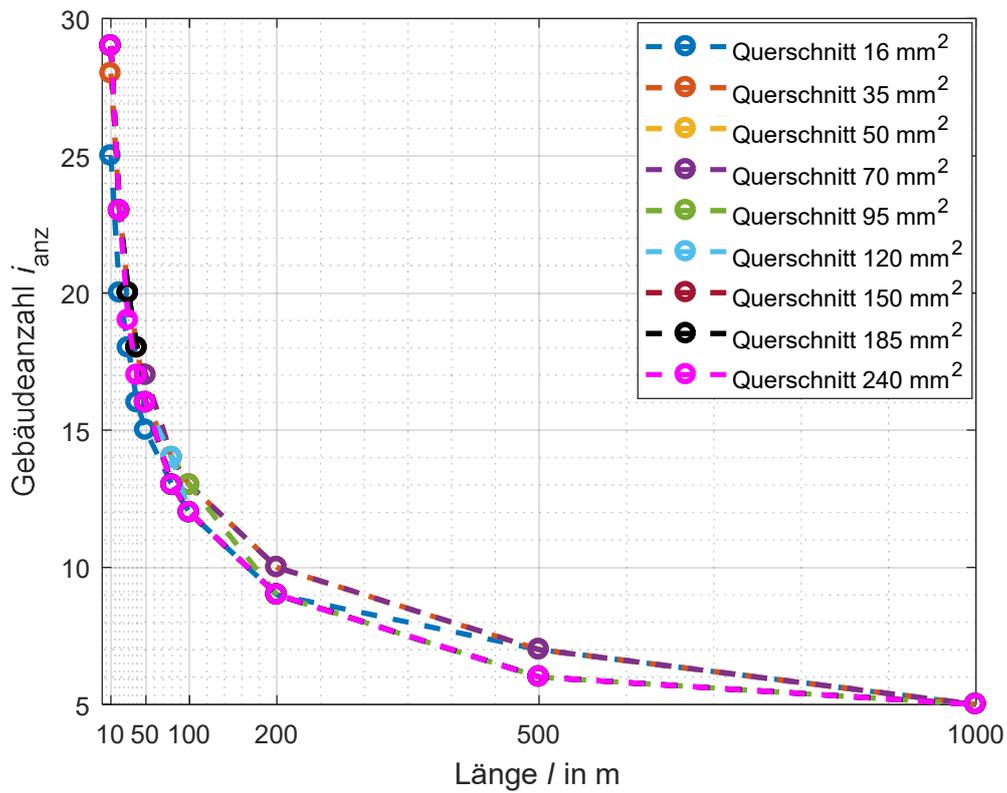


Abbildung 7.11: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $R_H = 10 \Omega$

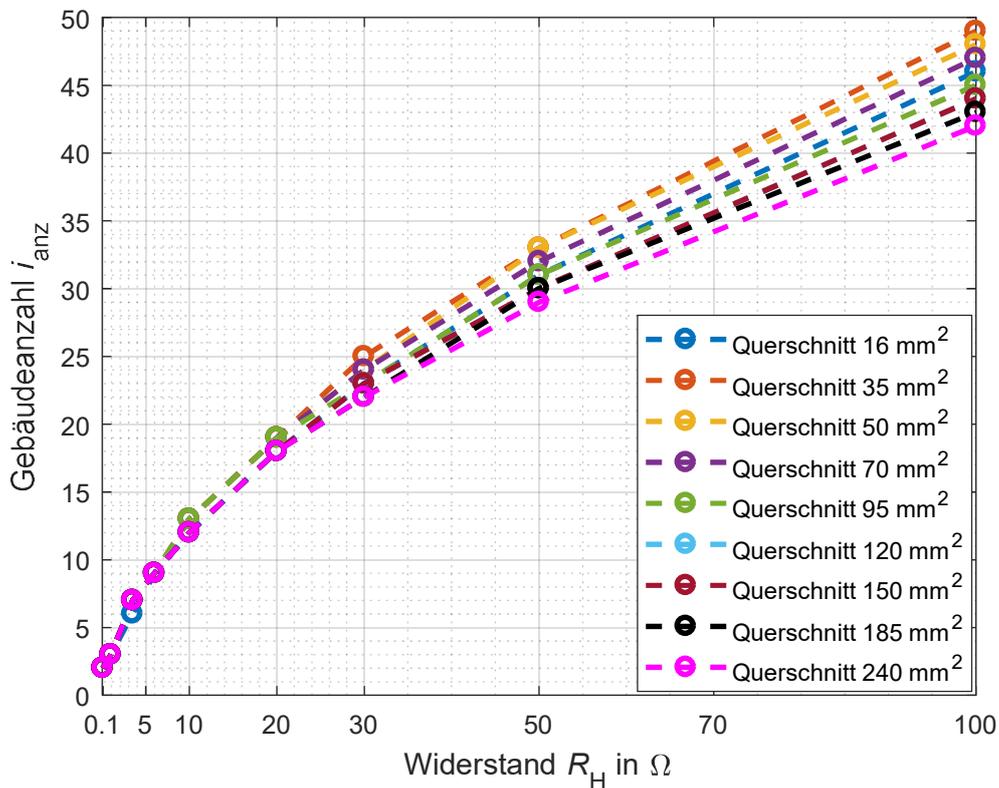


Abbildung 7.12: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $l = 100 \text{ m}$

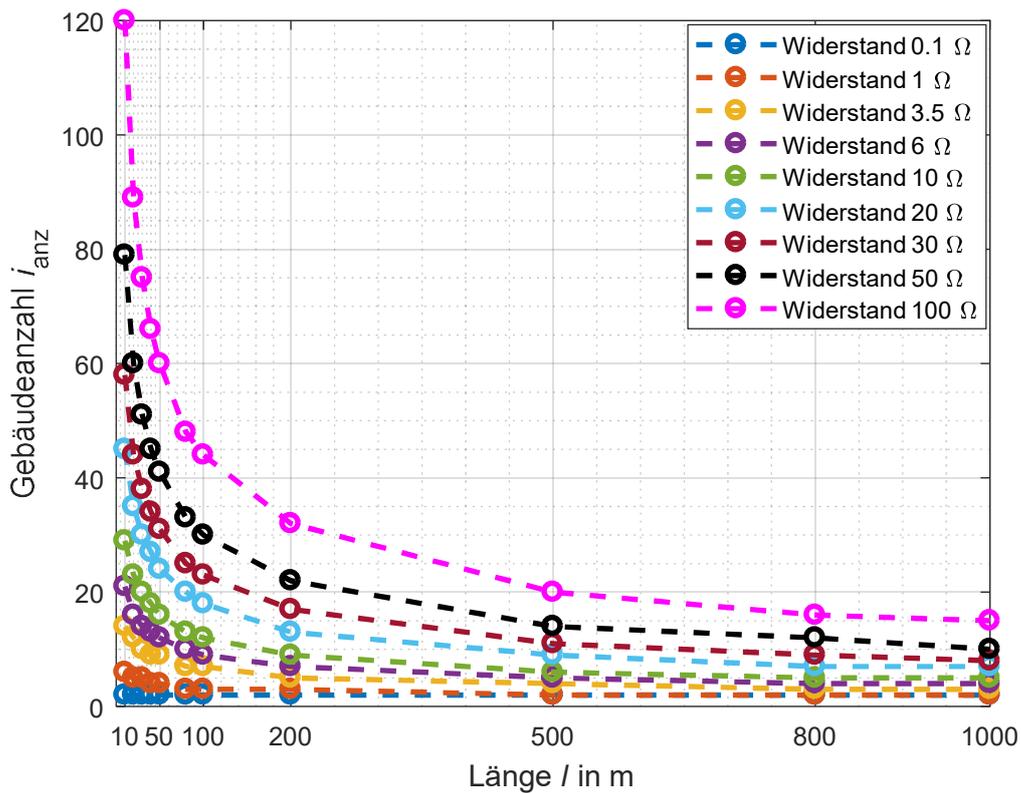


Abbildung 7.13: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 150 \text{ mm}^2$

7.2.4 Parameteranalyse der Mittelspannungsschaltstationen

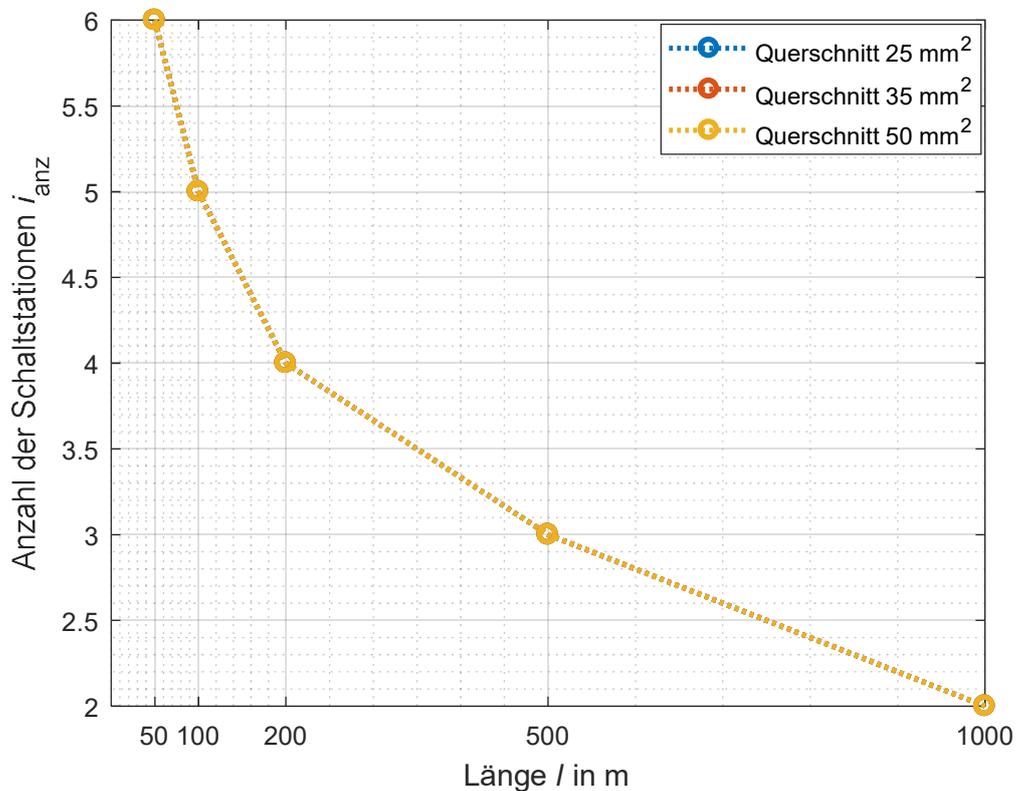


Abbildung 7.14: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $\underline{Z}_E = 1,5 \Omega \angle 20^\circ$

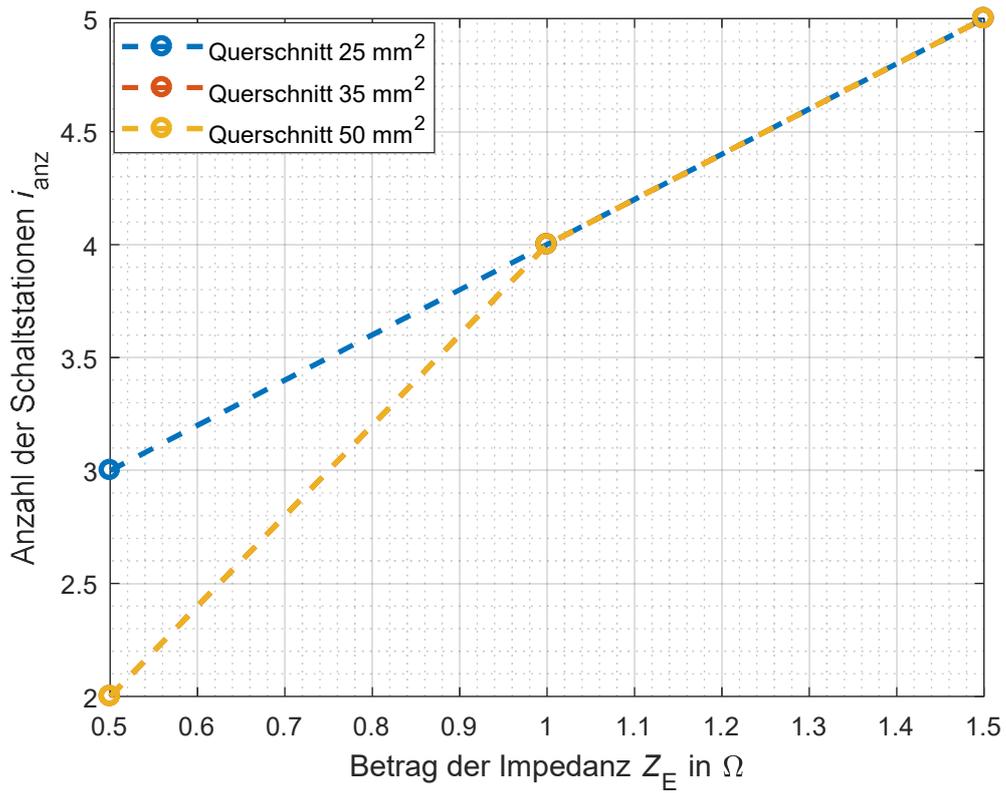


Abbildung 7.15: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $l = 500 \text{ m}$

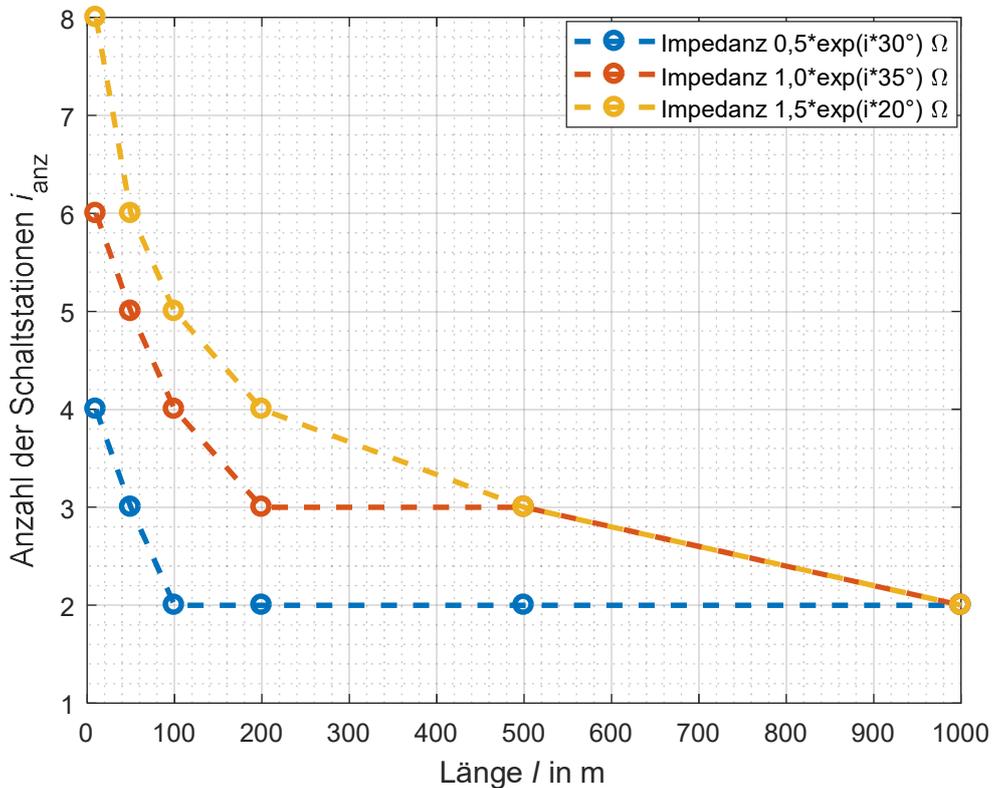


Abbildung 7.16: Näherung für absoluten Fehler $< 0,1 \Omega$, $A = 50 \text{ mm}^2$

7.2.5 Impedanz- und Winkelverläufe Niederspannungskettenleiter

7.2.5.1 Ländliche Struktur

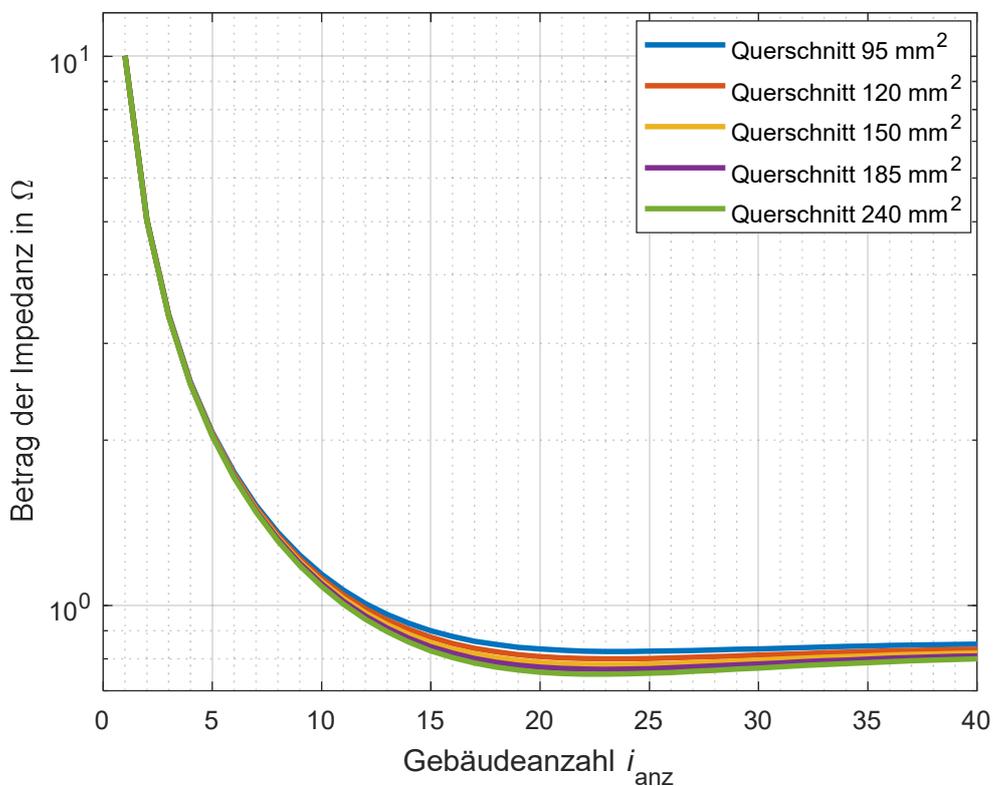


Abbildung 7.17: Impedanzverlauf \underline{Z}_{Kette_NS} für variablen Querschnitt A, $l = 100$ m

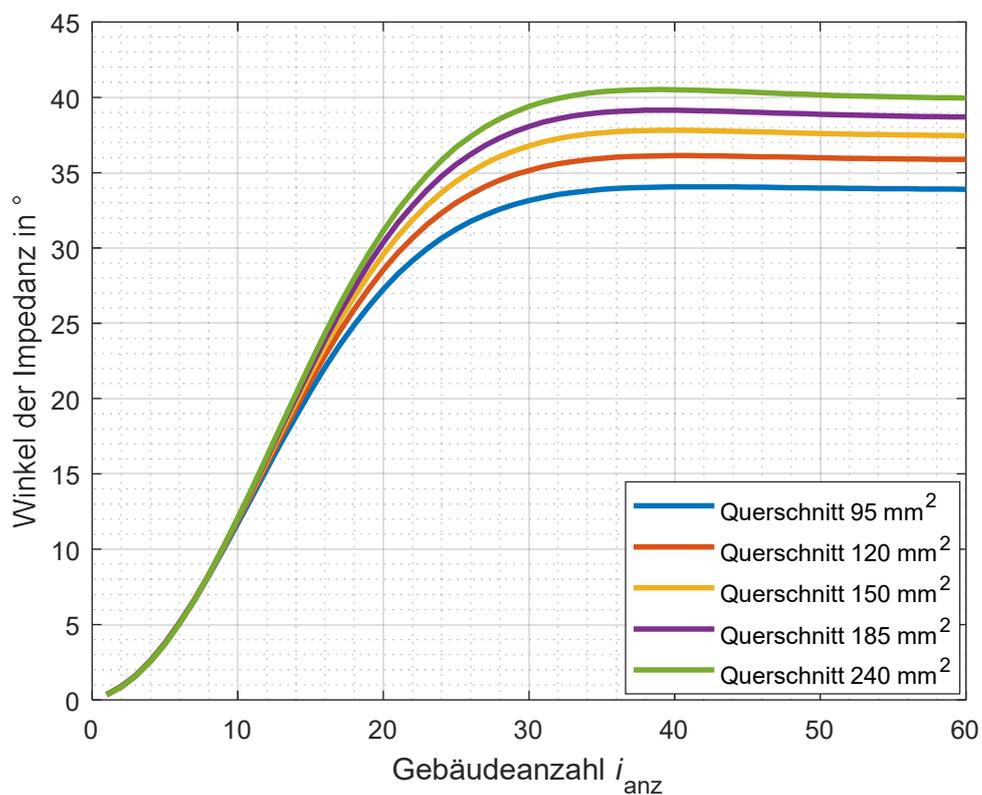


Abbildung 7.18: Winkel der Impedanz \underline{Z}_{Kette_NS} für variablen Querschnitt A, $l = 100$ m

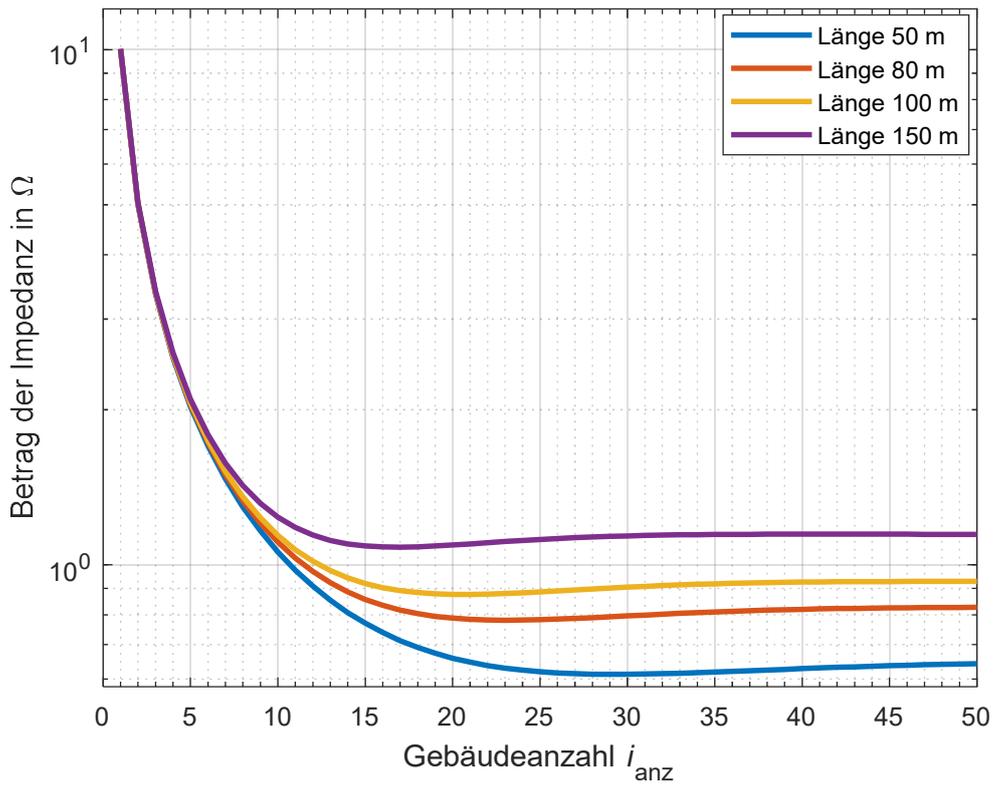


Abbildung 7.19: Impedanzverlauf Z_{Kette_NS} für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$

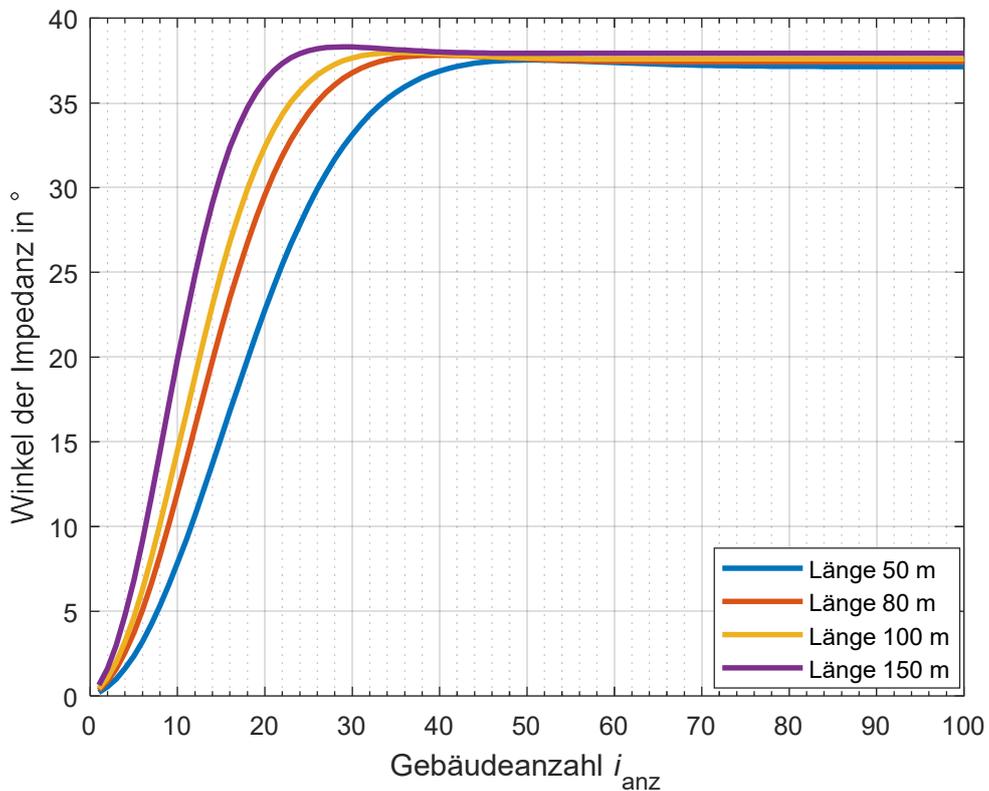


Abbildung 7.20: Winkel der Impedanz Z_{Kette_NS} für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$

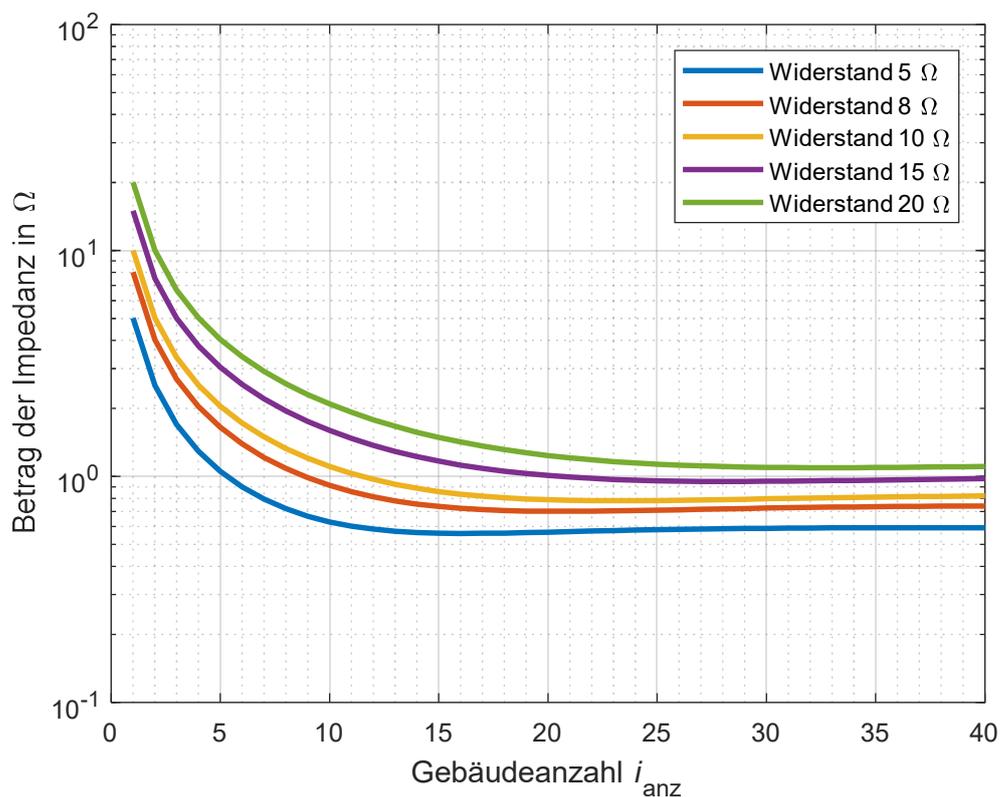


Abbildung 7.21: Impedanzverlauf \underline{Z}_{Kette_NS} für variablen R_H , $A = 150 \text{ mm}^2$, $l = 100 \text{ m}$

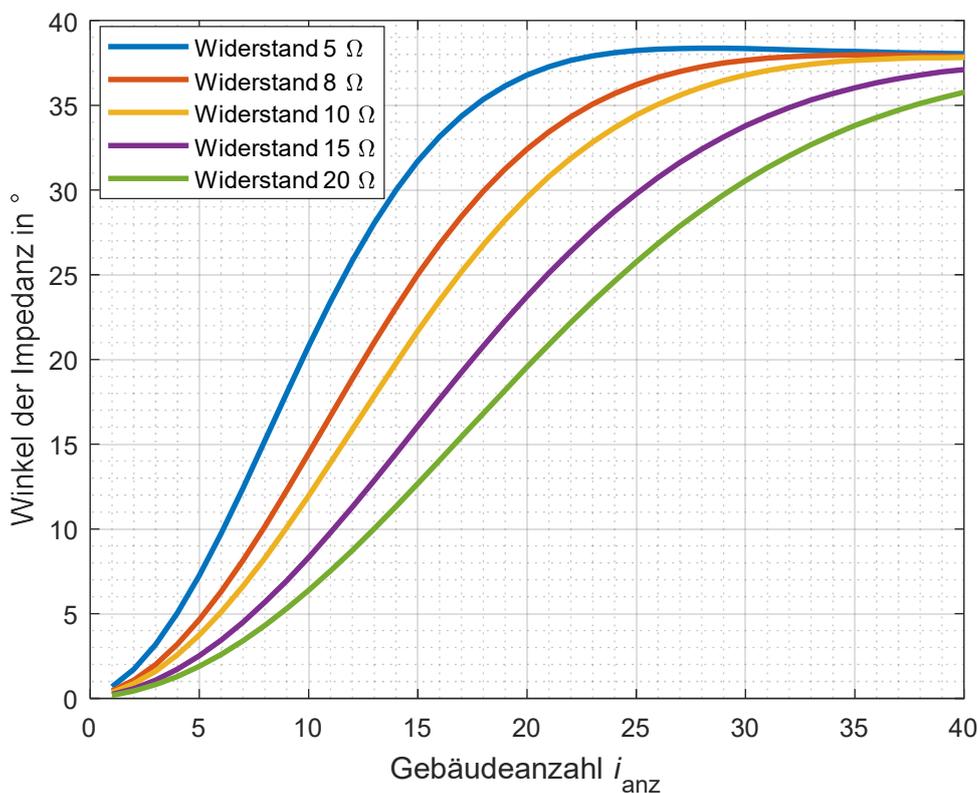


Abbildung 7.22: Winkel der Impedanz \underline{Z}_{Kette_NS} für variablen Erdungswiderstand R_H

7.2.5.2 Dörfliche Struktur

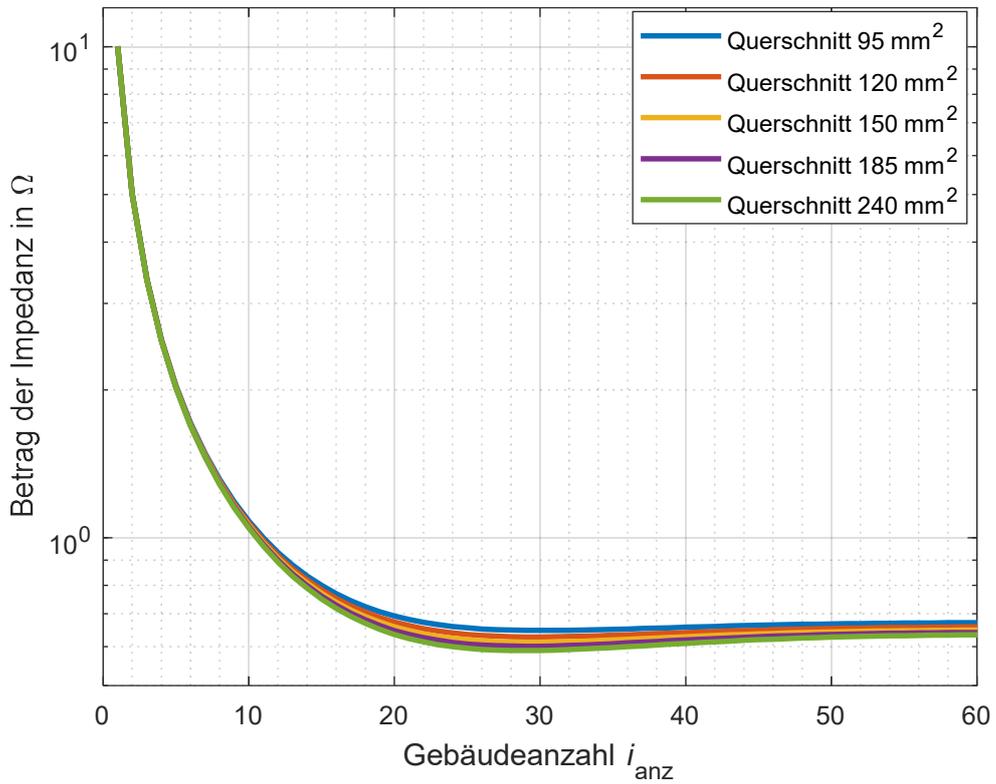


Abbildung 7.23: Impedanzverlauf $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}$ für variablen Querschnitt A, $l = 60$ m

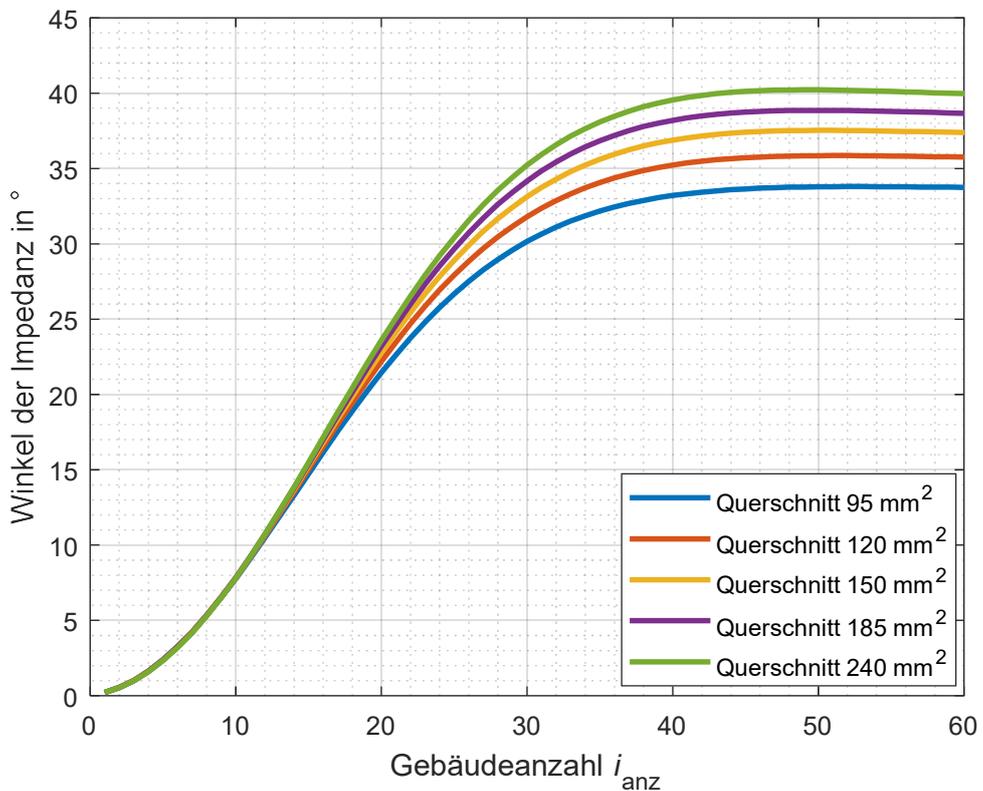


Abbildung 7.24: Winkel der Impedanz $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}$ für variablen Querschnitt A, $l = 60$ m

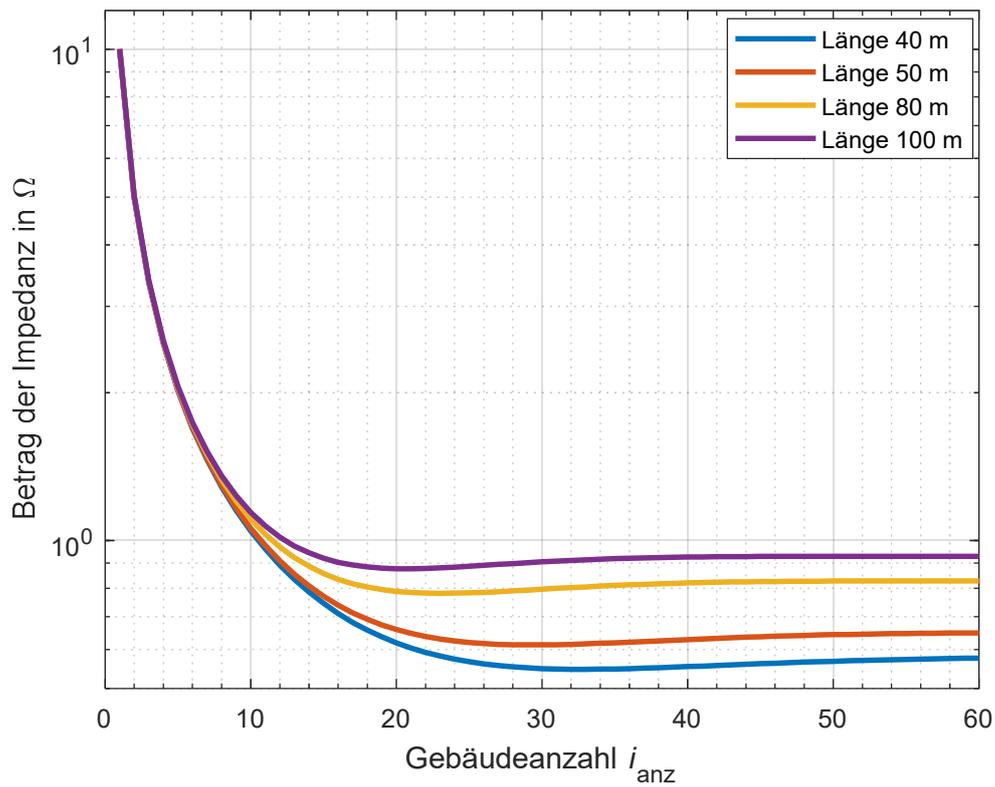


Abbildung 7.25: Impedanzverlauf Z_{Kette_NS} für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$

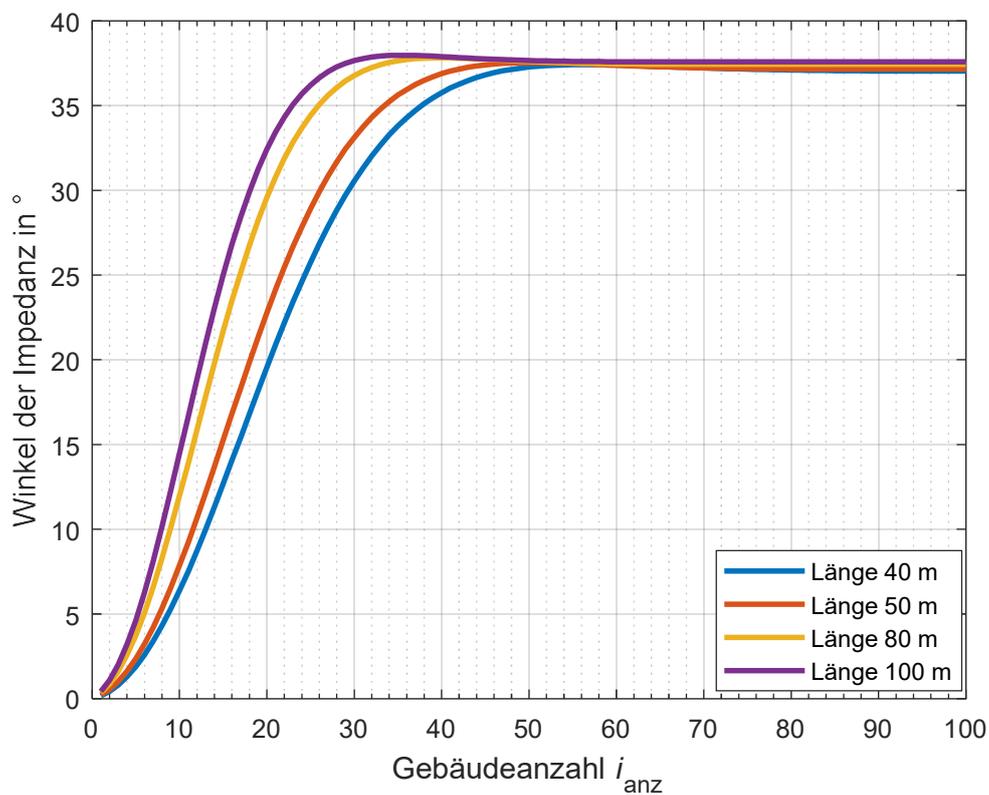


Abbildung 7.26: Winkel der Impedanz Z_{Kette_NS} für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$

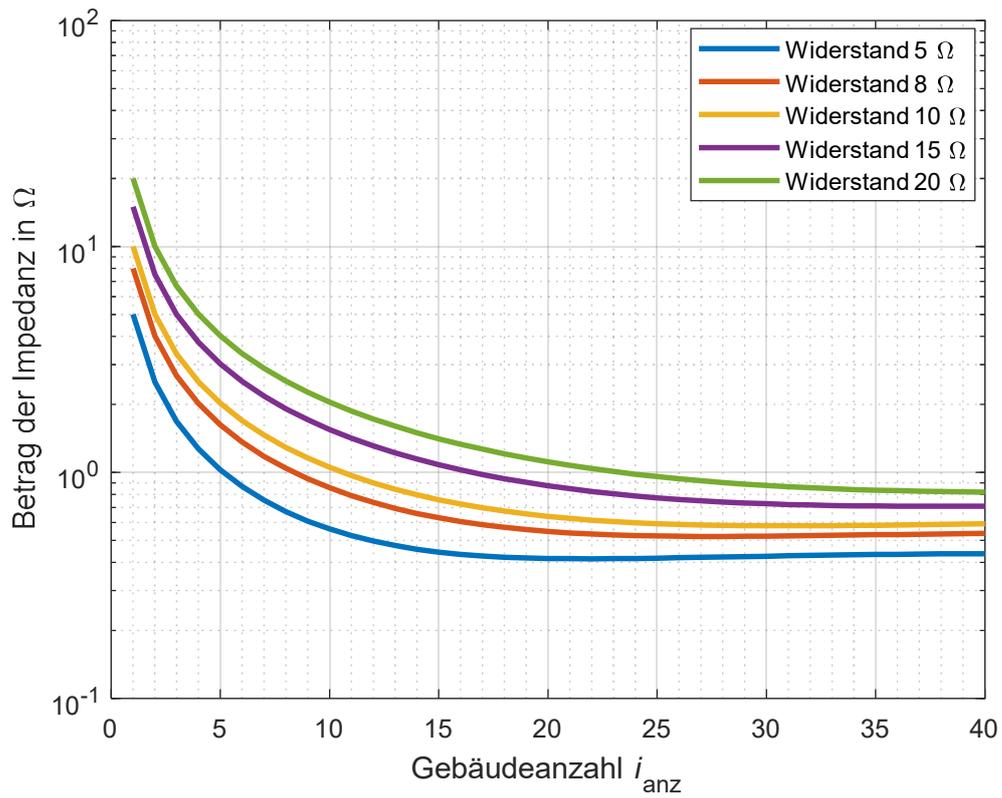


Abbildung 7.27: Impedanzverlauf Z_{Kette_NS} variabler R_H , $A = 150 \text{ mm}^2$, $l = 60 \text{ m}$

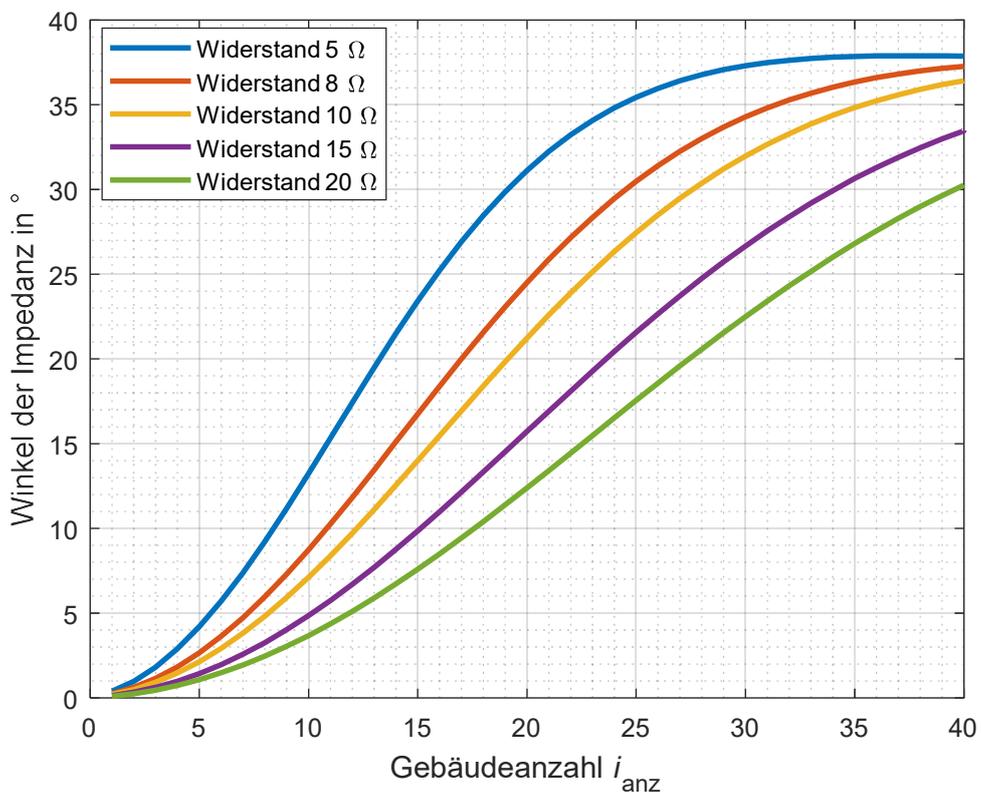
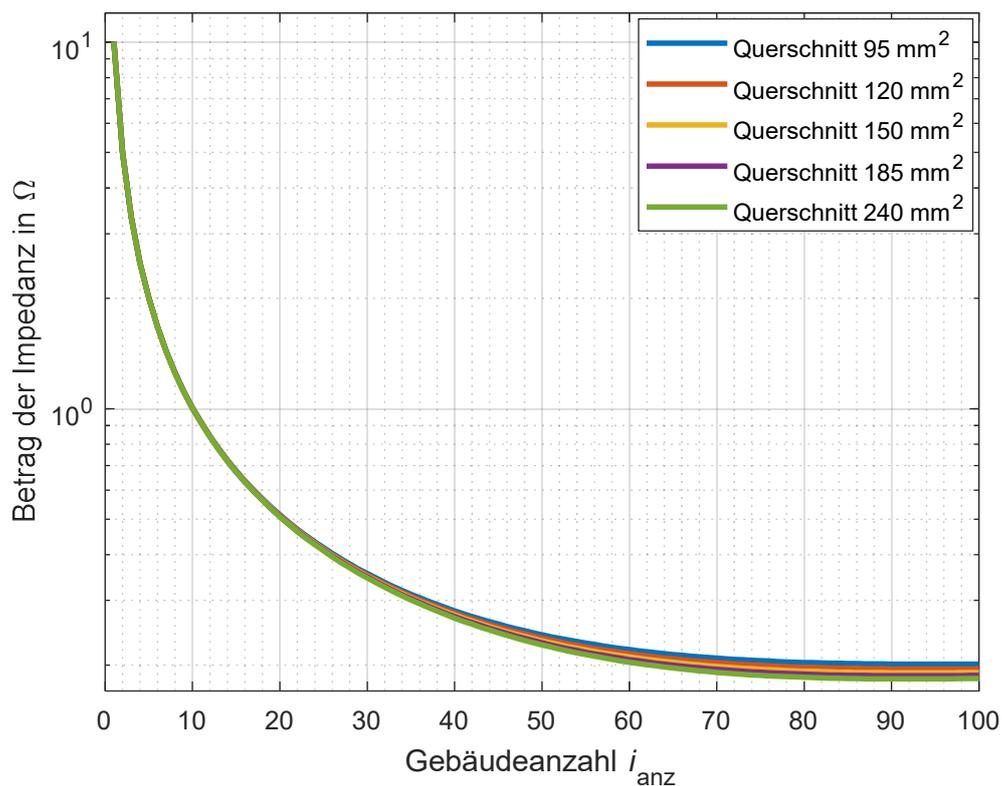
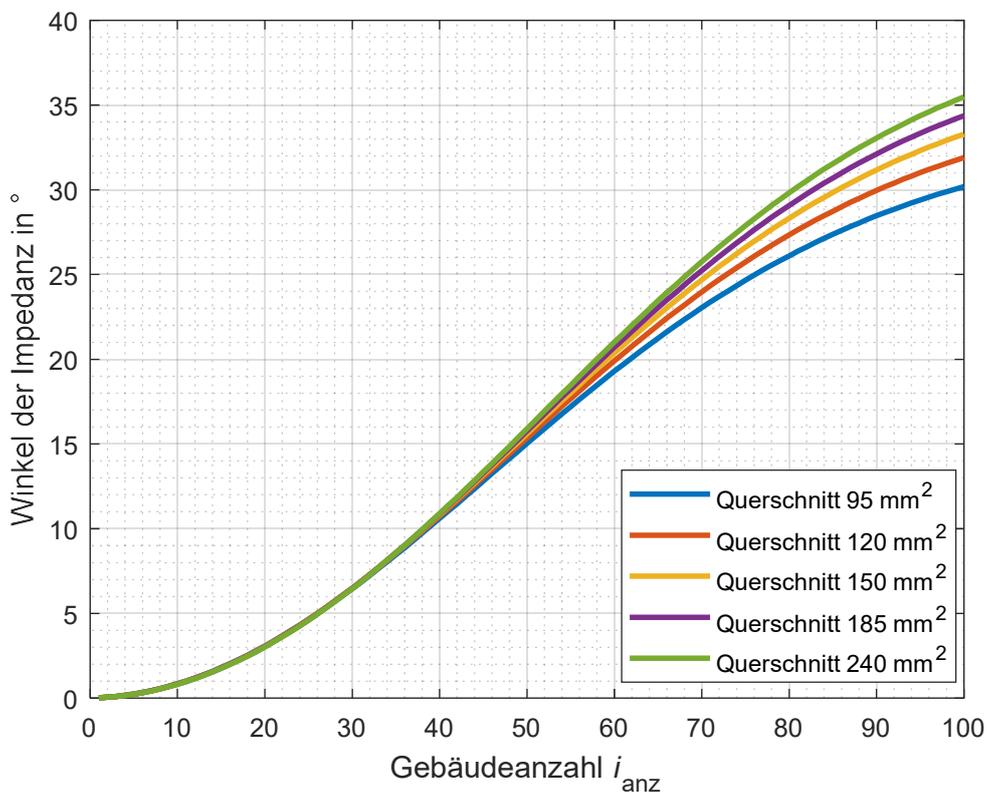


Abbildung 7.28: Winkel der Impedanz Z_{Kette_NS} für variablen Erdungswiderstand R_H

7.2.5.3 Städtische Struktur

Abbildung 7.29: Impedanzverlauf $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}$ für variablen Querschnitt A , $l = 30$ mAbbildung 7.30: Winkel der Impedanz $\underline{Z}_{\text{Kette_NS}}$ für variablen Querschnitt A , $l = 30$ m

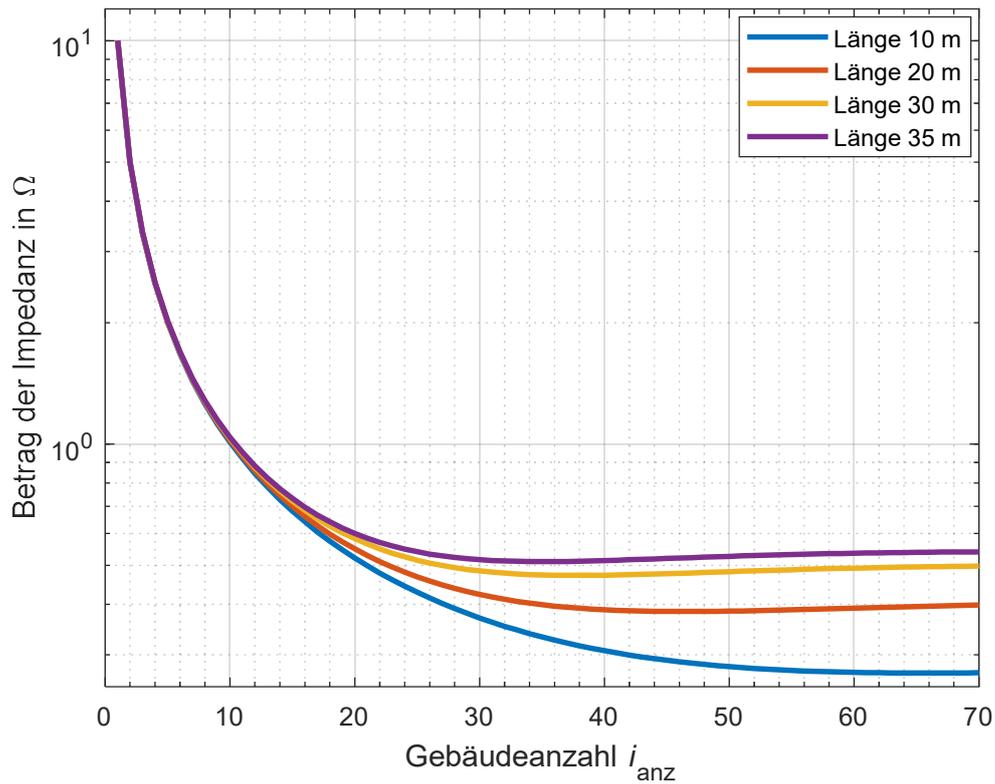


Abbildung 7.31: Impedanzverlauf Z_{Kett_NS} für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$

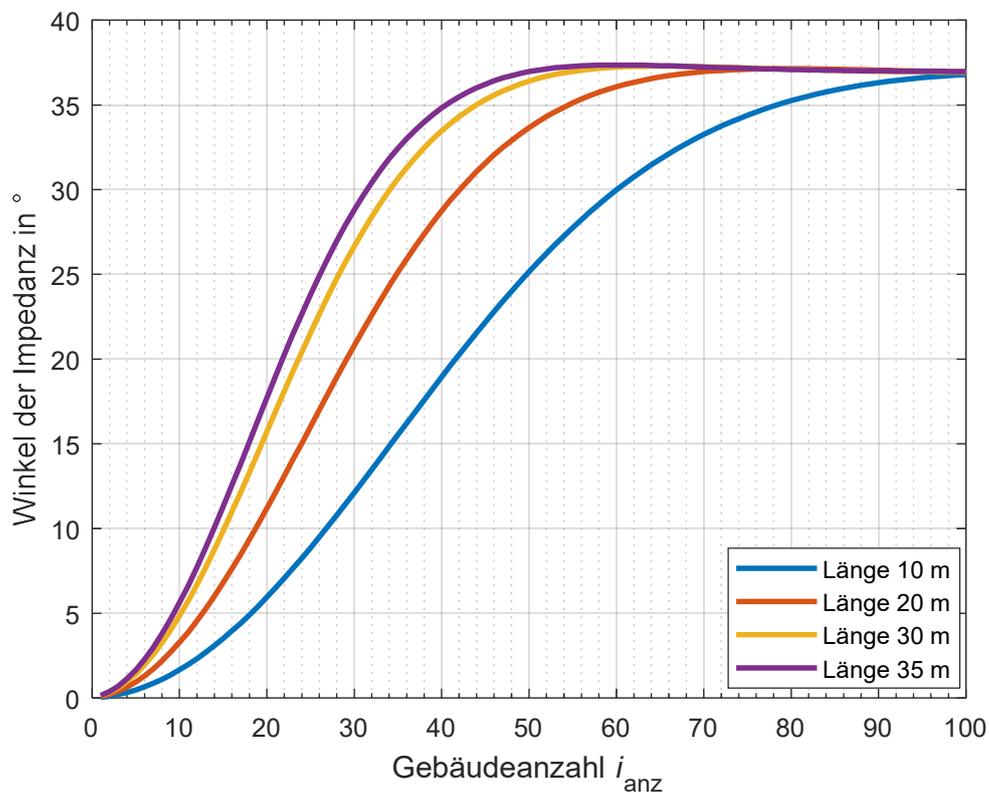


Abbildung 7.32: Winkel der Impedanz Z_{Kette_NS} für variable Länge l , $A = 150 \text{ mm}^2$

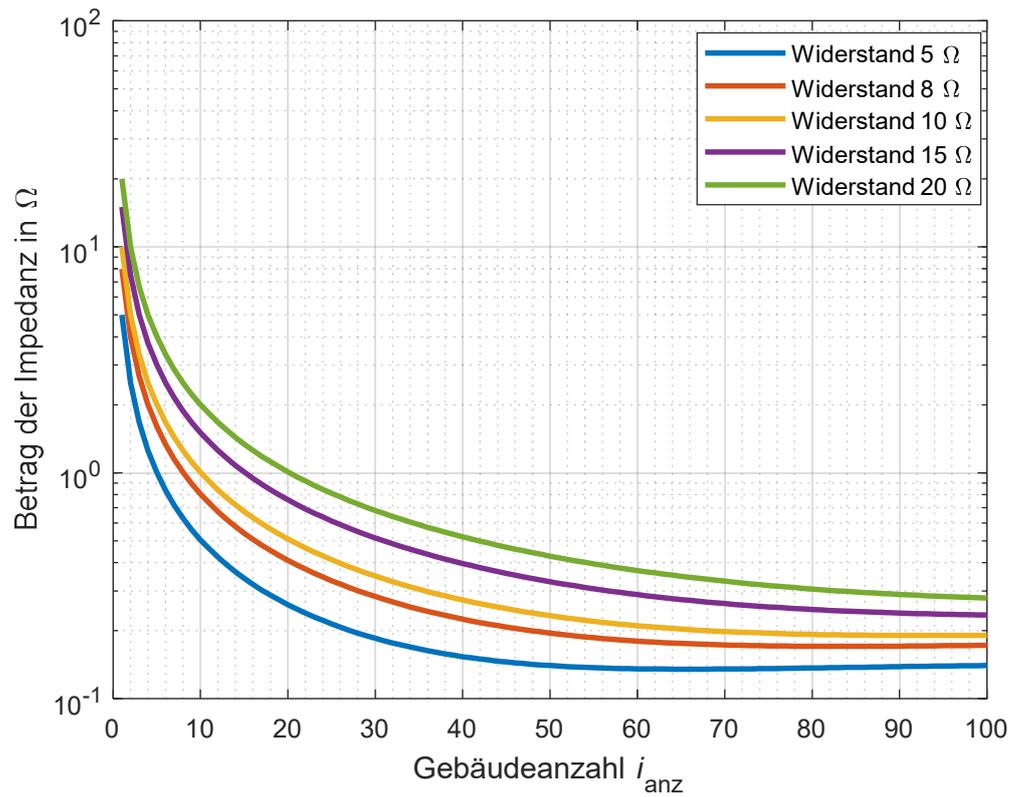


Abbildung 7.33: Impedanzverlauf $Z_{\text{Kette_NS}}$ für variablen Erdungswiderstand R_H , $l = 30$ m

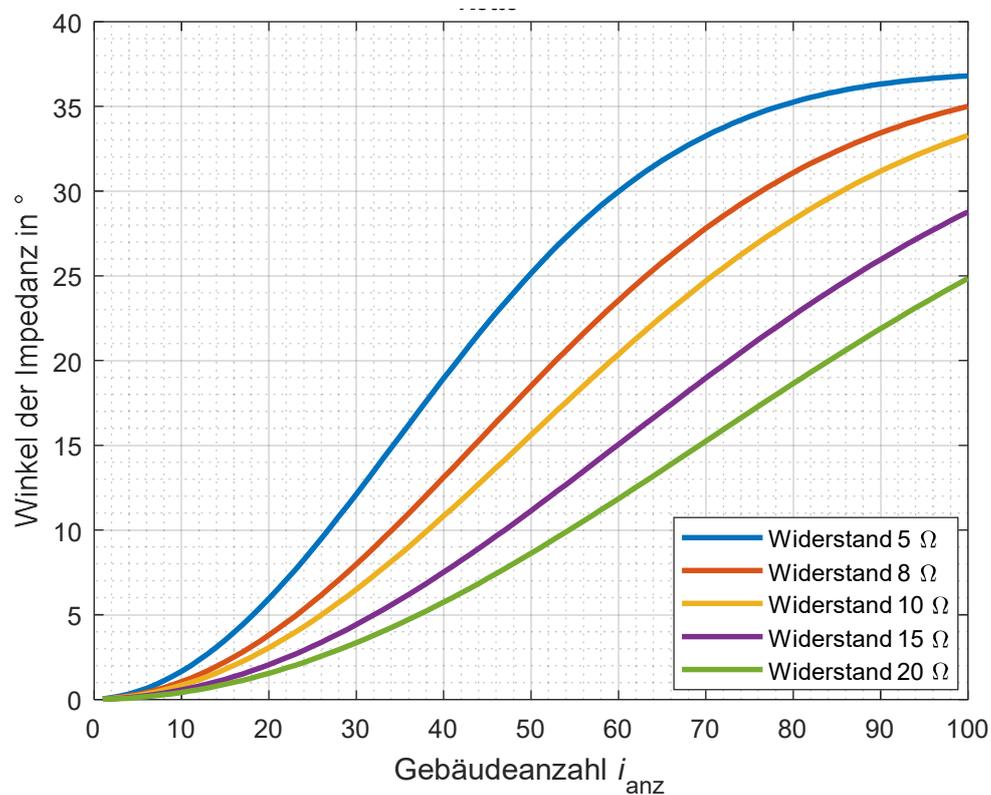


Abbildung 7.34: Winkel der Impedanz $Z_{\text{Kette_NS}}$ für variablen Erdungswiderstand R_H

7.2.6 Impedanz- und Winkelverläufe Mittelspannungsschaltstation

7.2.6.1 1 Abzweig

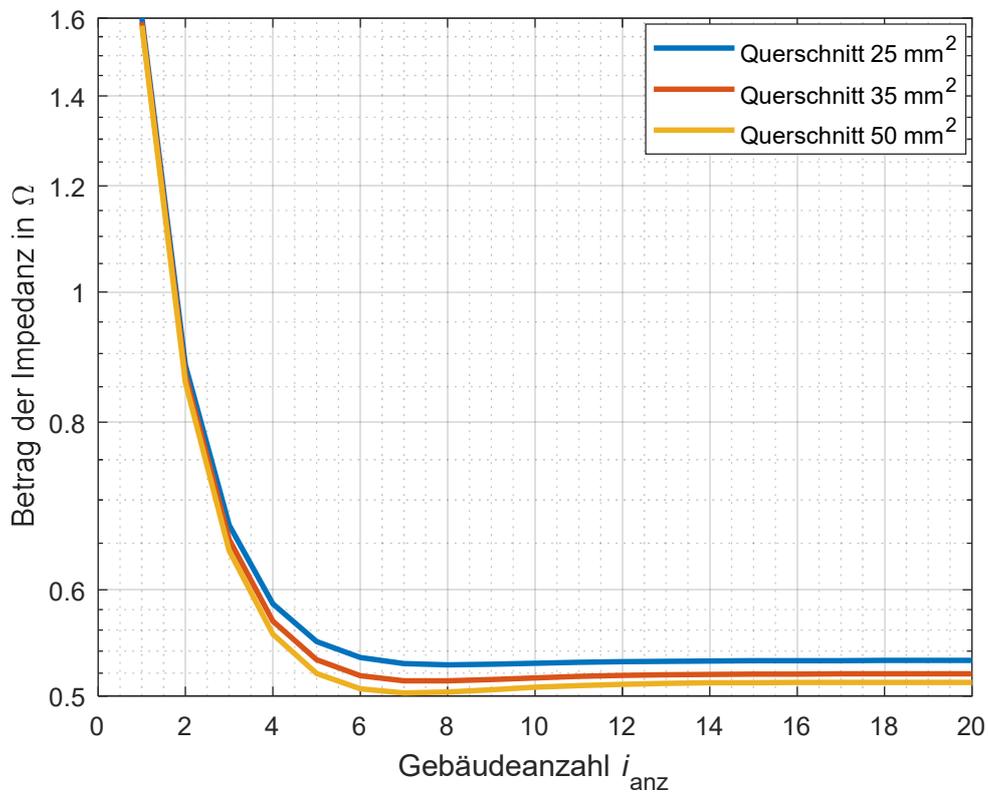


Abbildung 7.35: Impedanzverlauf \underline{Z}_{Kette_MS} für variablen Querschnitt A, $l = 500$ m

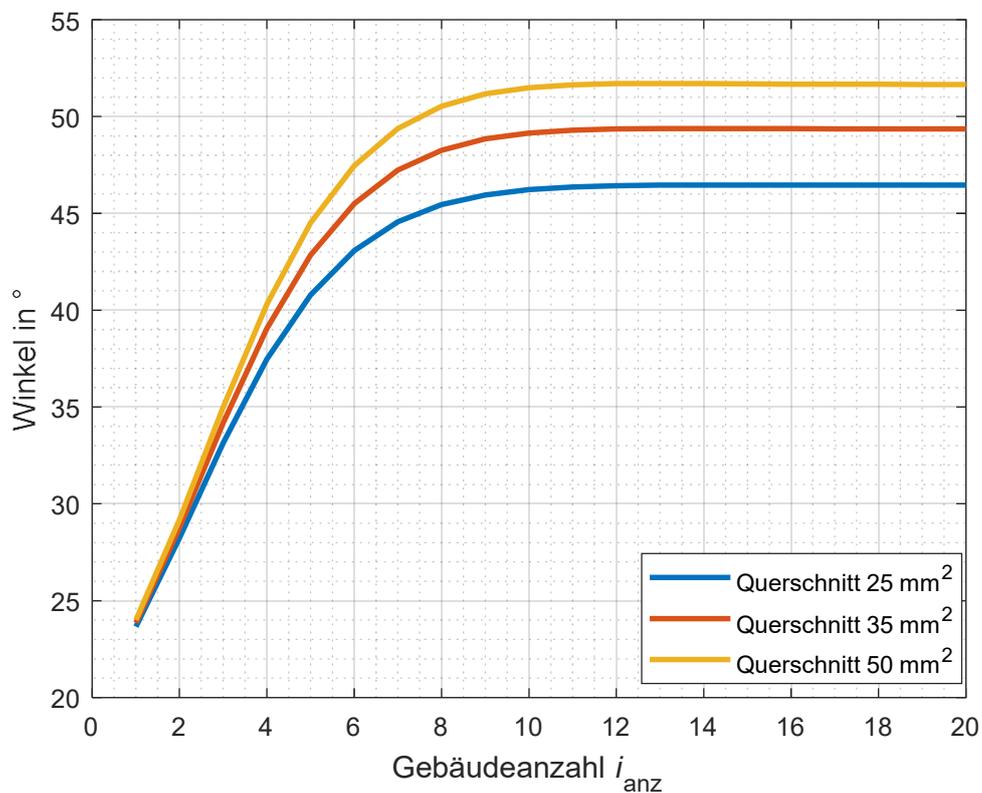


Abbildung 7.36: Winkel der Impedanz \underline{Z}_{Kette_MS} für variablen Querschnitt A, $l = 500$ m

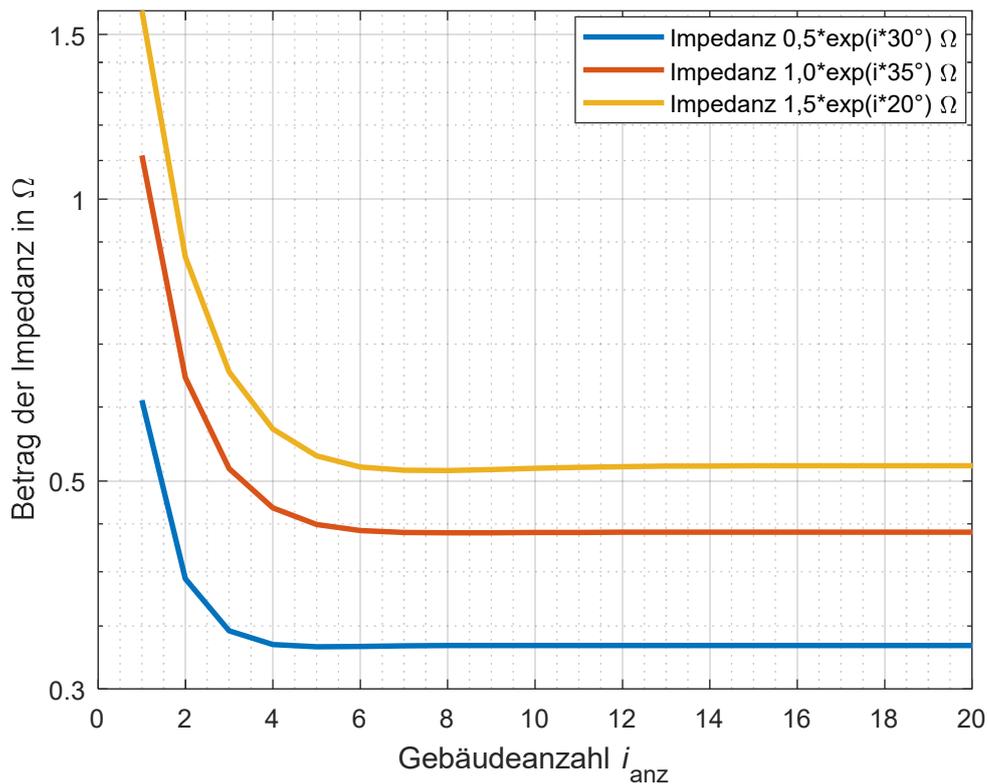


Abbildung 7.37: Impedanzverlauf Z_{Kette_MS} für variable Erdungsimpedanz Z_E , $l = 500$ m

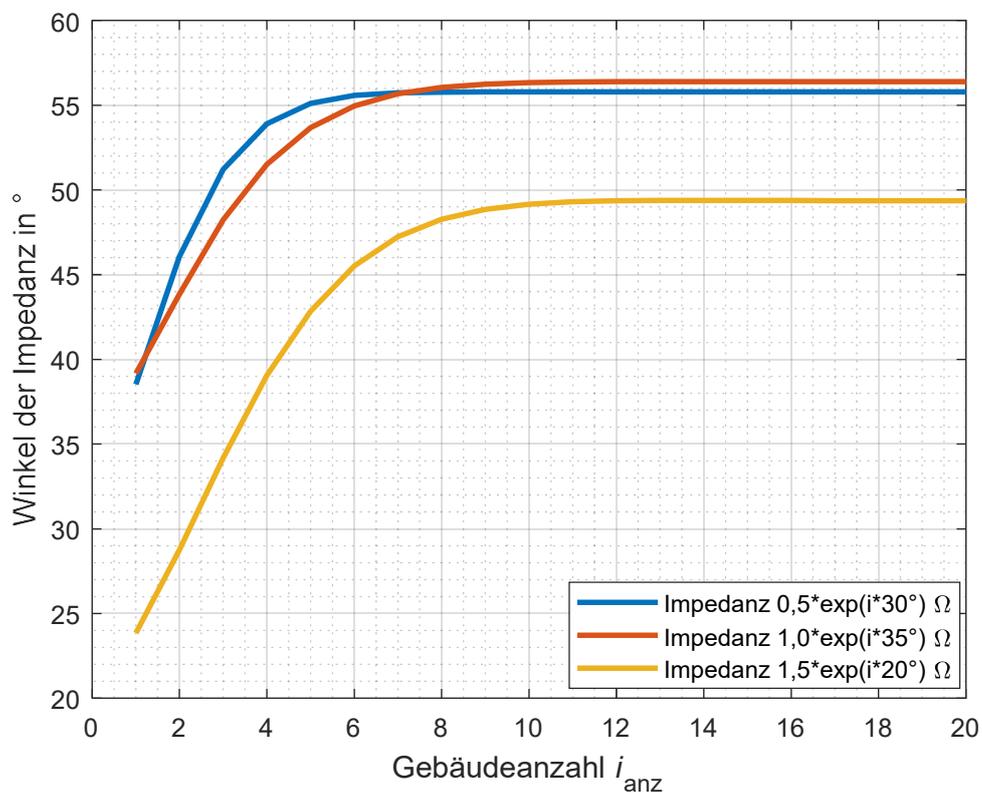


Abbildung 7.38: Winkel der Impedanz Z_{Kette_MS} für variable Erdungsimpedanz Z_E , $l = 500$ m

7.2.6.2 5 Abzweige

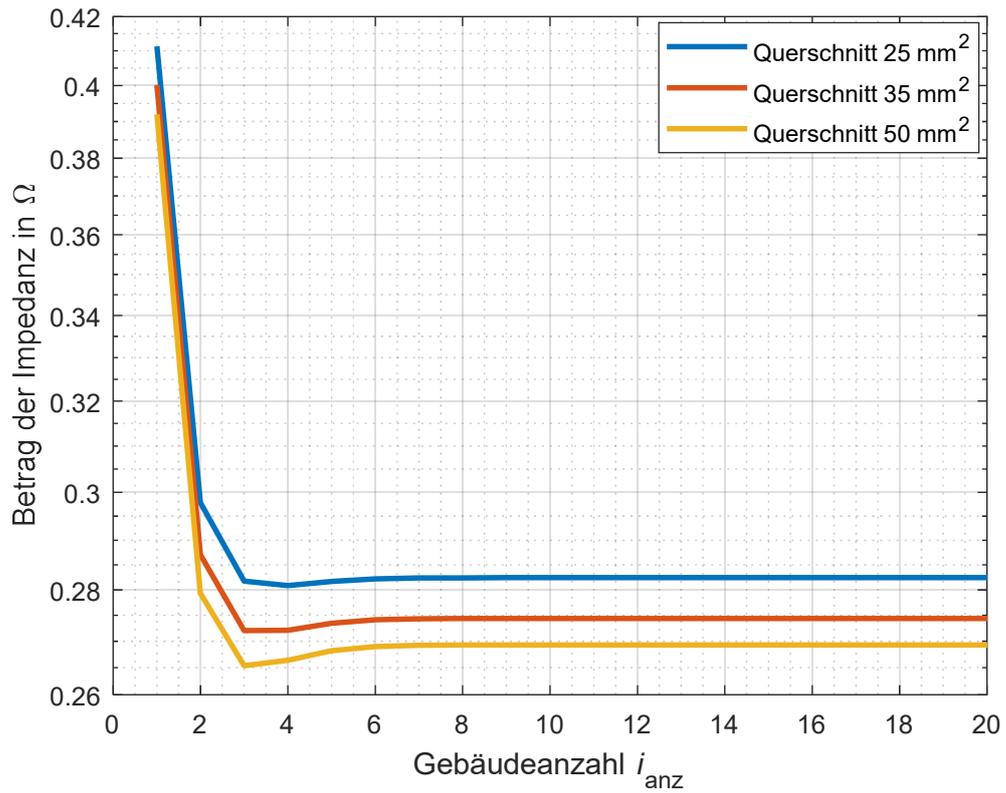


Abbildung 7.39: Impedanzverlauf \underline{Z}_{Kette_MS} für variablen Querschnitt A, $l = 500$ m

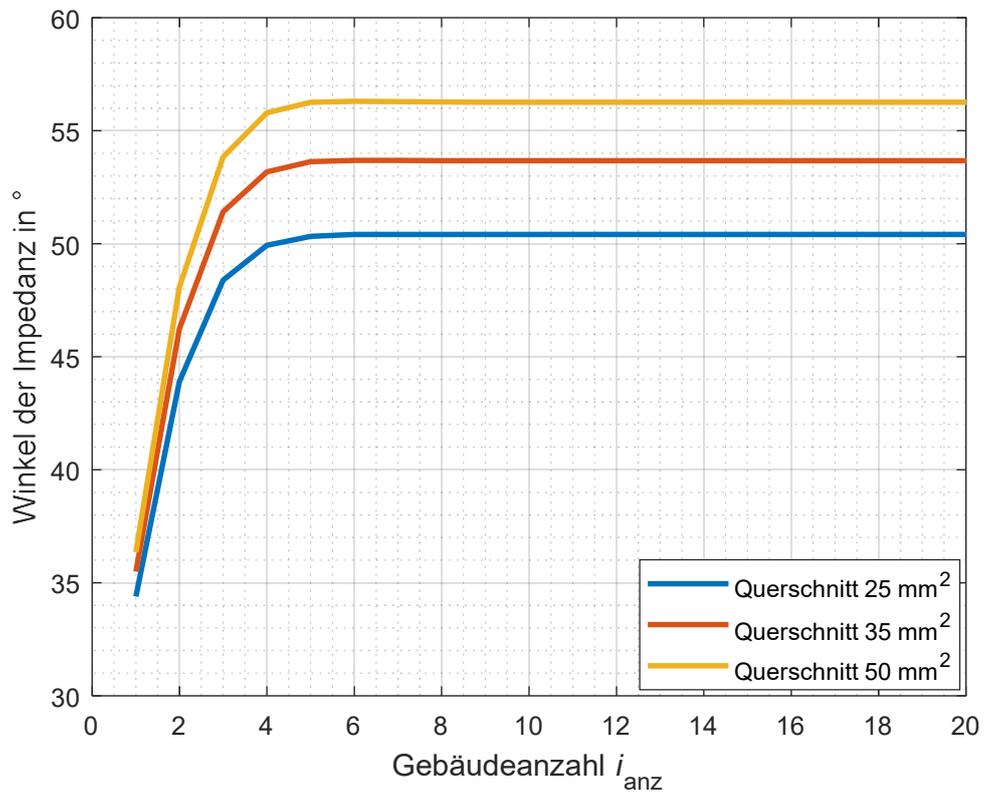


Abbildung 7.40: Winkel der Impedanz \underline{Z}_{Kette_MS} für variablen Querschnitt A, $l = 500$ m

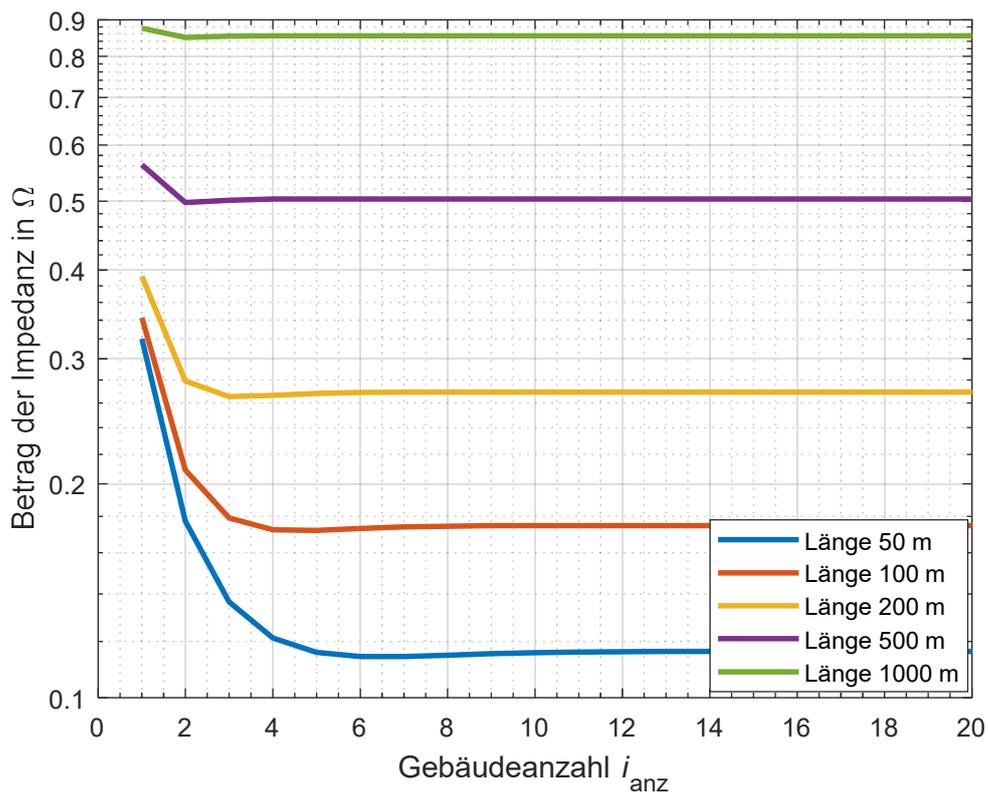


Abbildung 7.41: Impedanzverlauf \underline{Z}_{Kette_MS} für variable Länge l , $A = 50 \text{ mm}^2$

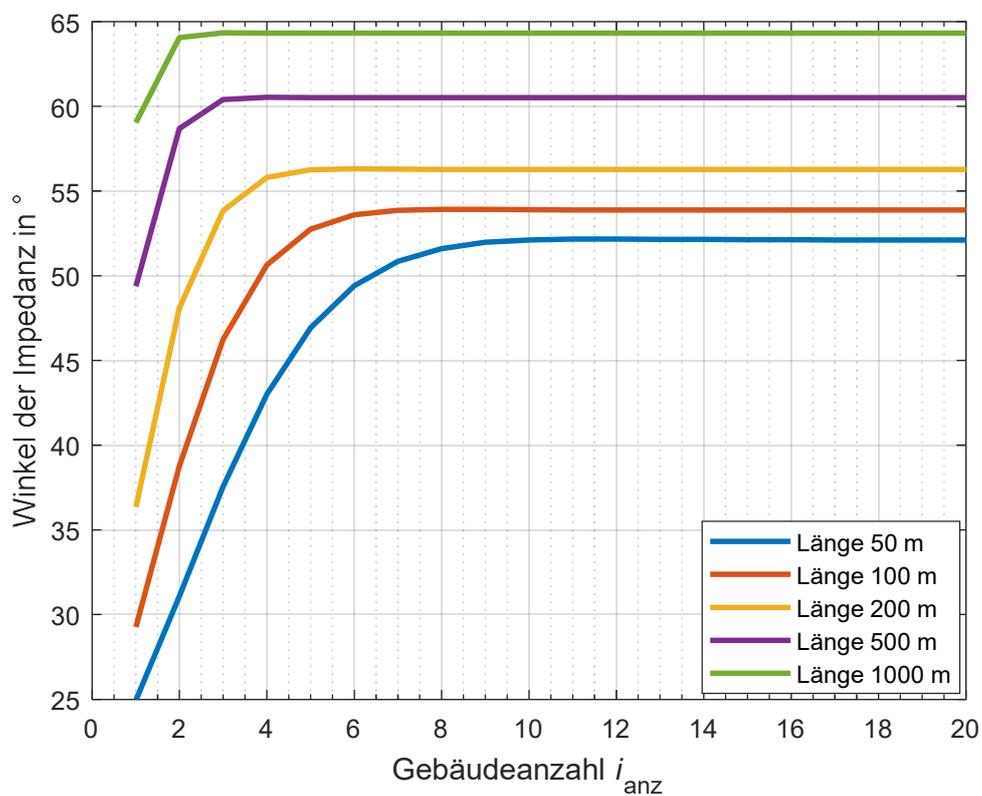


Abbildung 7.42: Winkel der Impedanz \underline{Z}_{Kette_MS} für variable Länge l , $A = 50 \text{ mm}^2$

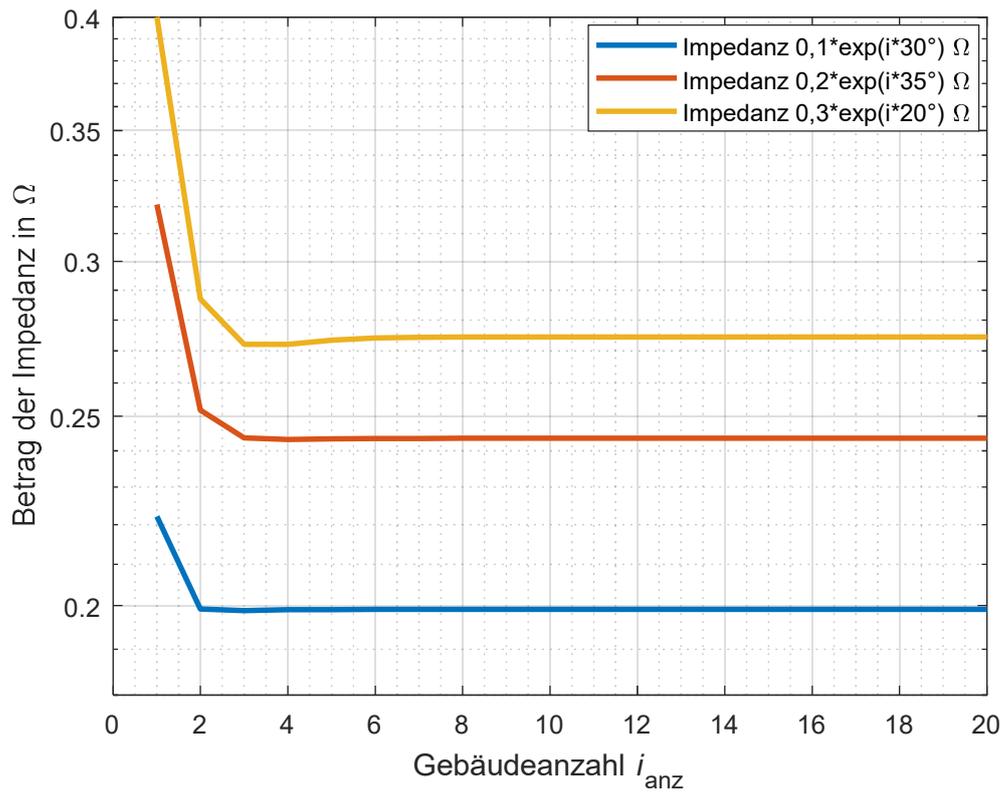


Abbildung 7.43: Impedanzverlauf \underline{Z}_{Kette_MS} für variable Erdungsimpedanz \underline{Z}_E , $l = 500$ m

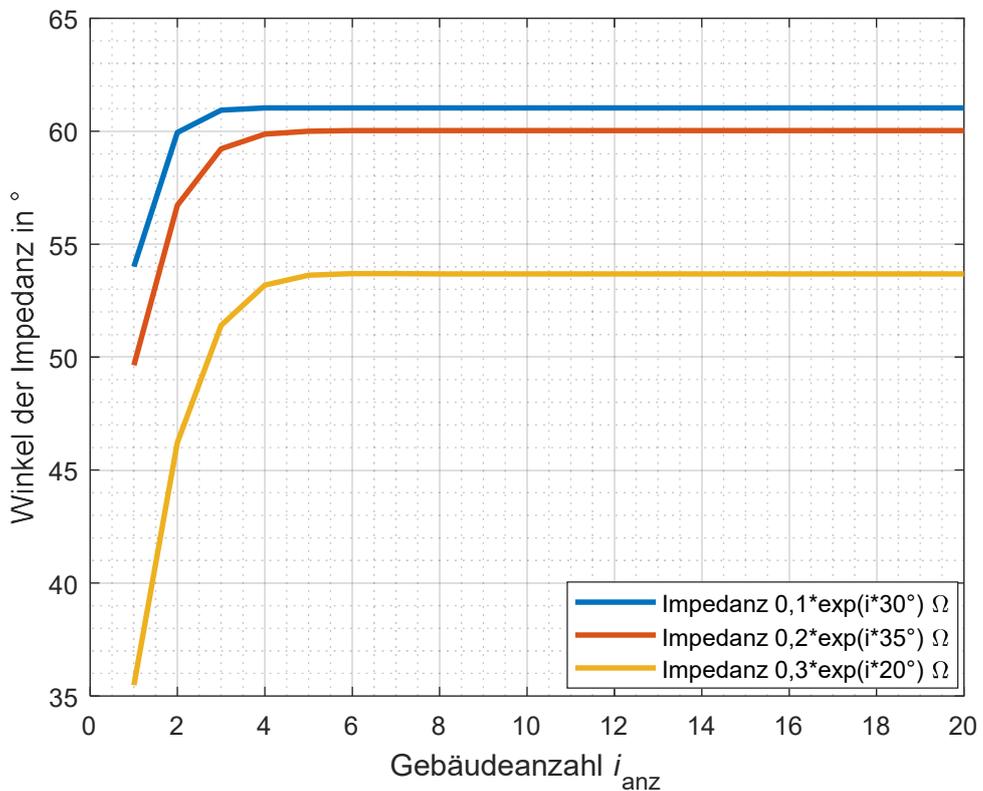


Abbildung 7.44: Winkel der Impedanz \underline{Z}_{Kette_MS} für variable Erdungsimpedanz \underline{Z}_E

7.3 XGSLab™-Simulationen

7.3.1 Erdungswiderstand eines Gebäudes

Tabelle 16: Gebäude 10 m X 10 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	4,09	0,03
1	3,85	0,03
2	3,53	0,03
3	3,31	0,04

Tabelle 17: Gebäude 10 m X 10 m, ohne Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	5,40	0,13
1	5,12	0,14
2	4,79	0,15
3	4,63	0,15

Tabelle 18: Gebäude 10 m X 10 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	8,18	0,02
1	7,70	0,02
2	7,05	0,02
3	6,62	0,02

Tabelle 19: Gebäude 10 m X 10 m, ohne Bewehrung, $\rho_E = 200 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	10,78	0,07
1	10,23	0,07
2	9,58	0,07
3	9,20	0,08

Tabelle 20: Gebäude 20 m X 20 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	2,10	0,07
1	2,01	0,08
2	1,89	0,08
3	1,80	0,08

Tabelle 21: Gebäude 20 m X 20 m, ohne Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	2,63	0,31
1	2,51	0,33
2	2,39	0,34
3	2,31	0,35

Tabelle 22: Gebäude 10 m X 10 m, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 80 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	3,00	0,04
1	2,71	0,03
1,6	2,34	0,05
2	2,24	0,05

3	2,07	0,06
4	1,95	0,06
5	1,87	0,06
6	1,80	0,06

Tabelle 23: Gebäude 10 m X 10, ohne Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 80 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	3,77	0,10
1	3,51	0,11
1,6	2,87	0,14
2	2,72	0,14
3	2,56	0,15
4	2,44	0,16
5	2,36	0,16
6	2,29	0,16

Tabelle 24: Gebäude 20 m X 20, engmaschige Bewehrung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot m / 80 \Omega \cdot m$

Erdertiefe in m	Erdungsimpedanz Z_H in Ω	Winkel der Erdungsimpedanz in $^\circ$
0,5	1,43	0,10
1	1,38	0,11
1,6	1,22	0,12
2	1,18	0,13
3	1,11	0,14
4	1,06	0,14
5	1,02	0,14
6	0,99	0,15

7.3.2 Einzelnes Gebäude mit angeschlossenem PEN-Leiter

Tabelle 25: Messdaten Gebäude mit PEN-Leiter, $l = 10 \text{ m} \dots 20 \text{ m}$

Querschnitt in mm^2	Z in Ω	\angle in $^\circ$	Z in Ω	\angle in $^\circ$
	$l = 10 \text{ m}$	$l = 10 \text{ m}$	$l = 20 \text{ m}$	$l = 20 \text{ m}$
16	3,82	0,12	3,89	0,21
25	3,86	0,12	3,88	0,20
35	3,86	0,12	3,87	0,20
50	3,86	0,12	3,86	0,20
70	3,86	0,12	3,86	0,20
95	3,86	0,12	3,86	0,19
120	3,86	0,11	3,86	0,19
150	3,85	0,11	3,86	0,19
185	3,85	0,11	3,86	0,18
240	3,85	0,11	3,86	0,18
300	3,85	0,11	3,86	0,18

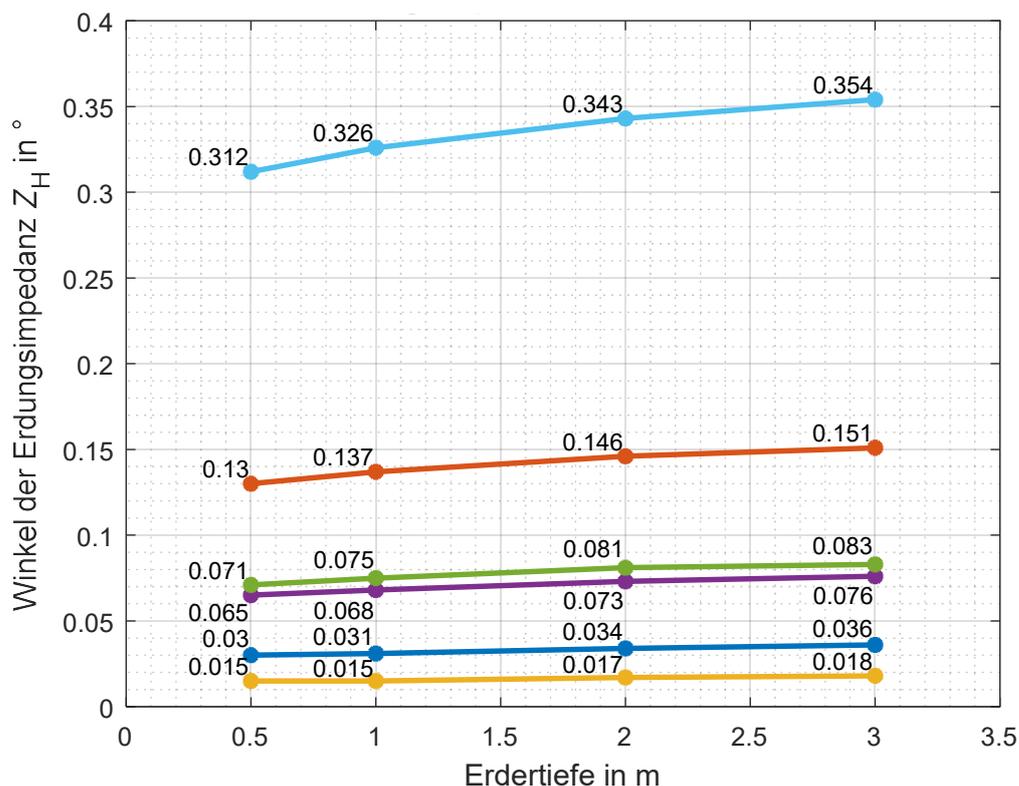
Tabelle 26: Messdaten Gebäude mit PEN-Leiter, $l = 50 \text{ m} \dots 100 \text{ m}$

Querschnitt in mm^2	Z in Ω	\angle in $^\circ$	Z in Ω	\angle in $^\circ$
	$l = 50 \text{ m}$	$l = 50 \text{ m}$	$l = 100 \text{ m}$	$l = 100 \text{ m}$
16	3,94	0,49	4,03	0,97
25	3,91	0,48	3,97	0,97
35	3,90	0,48	3,94	0,96
50	3,88	0,47	3,91	0,95
70	3,88	0,46	3,90	0,94
95	3,87	0,46	3,89	0,93
120	3,87	0,45	3,88	0,92
150	3,86	0,45	3,88	0,91

185	3,86	0,44	3,87	0,90
240	3,86	0,44	3,87	0,89
300	3,86	0,43	3,87	0,88

Tabelle 27: Messdaten Gebäude mit PEN-Leiter, $l = 150 \text{ m} \dots 200 \text{ m}$

Querschnitt in mm^2	Z in Ω		\angle in $^\circ$	
	$l = 150 \text{ m}$	$l = 200 \text{ m}$	$l = 150 \text{ m}$	$l = 200 \text{ m}$
16	4,12	4,21	1,46	1,91
25	4,03	4,09	1,46	1,93
35	4,00	4,02	1,45	1,93
50	3,95	3,98	1,44	1,92
70	3,92	3,95	1,43	1,90
95	3,91	3,92	1,41	1,88
120	4,00	3,91	1,40	1,87
150	4,00	3,90	1,38	1,85
185	3,88	3,90	1,37	1,84
240	3,88	3,90	1,35	1,81
300	3,88	3,88	1,40	1,80

**Legende:**

- Gebäude 10 m X 10 m, ohne Vermaschung, $\rho_E = 200 \Omega \cdot \text{m}$
- Gebäude 10 m X 10 m, mit Vermaschung, $\rho_E = 200 \Omega \cdot \text{m}$
- Gebäude 10 m X 10 m, ohne Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m}$
- Gebäude 10 m X 10 m, mit Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m} / 60 \Omega \cdot \text{m}$
- Gebäude 20 m X 20 m, ohne Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m}$
- Gebäude 20 m X 20 m, mit Vermaschung, $\rho_E = 100 \Omega \cdot \text{m}$

Abbildung 7.45: Winkel der Erdungsimpedanz als Funktion der Erdtiefe

7.3.3 Mehrere Gebäude mit PEN-Leiter

Tabelle 28: Messdaten Gebäude mit verschiedenen PEN-Leiter Längen

Länge l in m	5 Gebäude		10 Gebäude		20 Gebäude	
	Z in Ω	\angle in $^\circ$	Z in Ω	\angle in $^\circ$	Z in Ω	\angle in $^\circ$
0	1,59	0,36	1,01	0,91	0,64	3,65
10	1,37	0,44	0,80	3,34	0,62	3,90
20	1,19	1,21	0,62	6,53	0,45	11,22
30	1,09	2,12	0,59	7,49	0,41	18,36
40	1,00	3,08	0,59	9,44	0,42	23,92
50	0,96	4,06	0,57	12,27	0,44	27,85
80	0,92	7,03	0,58	19,63	0,54	33,62
100	0,92	8,97	0,62	25,11	0,63	35,50
120	0,92	10,85	0,65	26,59	0,66	35,82
150	0,94	13,52	0,71	31,02	0,76	36,56
170	0,95	15,20	0,75	31,84	0,79	36,80
200	0,98	17,56	0,82	33,84	0,86	37,12
250	1,03	21,08	0,93	36,02	0,97	37,59
300	1,09	24,09	1,03	37,36	1,07	38,01
400	1,21	28,87	1,22	38,80	1,25	38,77
500	1,35	32,39	1,39	39,57	1,41	39,43
600	1,49	34,99	1,55	40,09	1,57	40,00

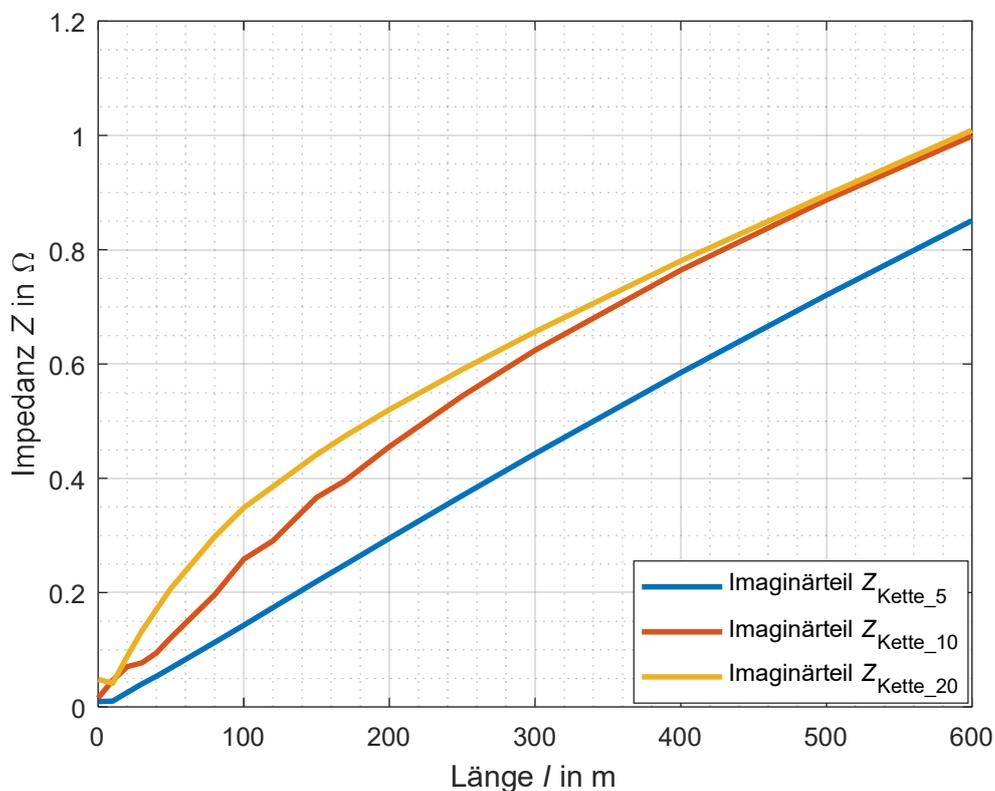


Abbildung 7.46: Impedanz $Z_{\text{Kette}_{NS}}$ für eine unterschiedliche Anzahl von Gebäuden

7.3.4 Abschätzung der Erdungsimpedanz von einfachen Netzstrukturen

Tabelle 29: Vergleich Messdaten XGSLab™ und Halbkugelerder (Distanz $l = 50$ m)

Anzahl von Gebäuden	R_{H_XGS} in Ω	R_{H_HK} in Ω	Fehler Halbkugelerder in %
1	3,12	3,82	22,44
4	1,16	1,56	34,48
6	0,83	1,18	42,17
12	0,52	0,72	50,00

Tabelle 30: Vergleich Messdaten XGSLab™ und Halbkugelerder (Distanz $l = 100$ m)

Anzahl von Gebäuden	R_{H_XGS} in Ω	R_{H_HK} in Ω	Fehler Halbkugelerder in %
1	1,88	2,15	14,36
4	0,31	0,40	29,03
6	0,25	0,34	36,00
12	0,16	0,24	50,00