

Wechselseitige niederfrequente induktive Beeinflussung von Kabelsystemen

Dissertation



Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Technische Universität Graz

Autor

Dipl.-Ing. Redžo Muratović

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert
Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzner

1. Begutachter

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert
Technische Universität Graz

2. Begutachter

Prof. Dr.-Ing. Christian Becker
Technische Universität Hamburg

Institutsleiter: Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber
A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.iean.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz /Dezember– 2019





Danksagung

Ich möchte Herrn Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert meinen größten Dank für die Möglichkeit die vorliegende Arbeit zu verfassen sowie für seine Betreuung dieser Arbeit aussprechen.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmautzer für seine Anregungen und für die unzähligen fachlichen Gespräche, die einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung der vorliegenden Arbeit beigetragen haben, aussprechen.

Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner und Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz möchte ich für ihre konstruktiven Vorschläge meinen besten Dank aussprechen.

Weiters bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker für die Bereitschaft zur Begutachtung der vorliegenden Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes für Elektrische Anlagen und Netze für die fachlichen Gespräche und ihre Hinweise danken, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen herzlichsten Dank möchte ich meinen Eltern und meinen Schwestern für ihre Geduld und ihre stets unterstützenden Worte, mit denen sie einen wesentlichen Beitrag zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben, aussprechen.

Den wichtigsten Menschen in meinem Leben, meiner Frau Vildana und unseren Töchtern Aminah-Hanna, Alina und Medina möchte ich an dieser Stelle für Ihre selbstlose und grenzenlose Geduld, für Ihre liebevolle Unterstützung und für Ihre Bereitschaft mir stets die nötigen Freiräume zu gewähren Danke sagen. Danke, ohne eure Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am 26.09.2019

Redžo Muratović



Kurzfassung

Die wechselseitige induktive Beeinflussung von 400-kV-Kabelleitungen stellt ein wichtiges Thema bei der Projektierung und Errichtung von Kabelleitungen hinsichtlich ihres Betriebes und der Wartungsarbeiten bzw. des Arbeitnehmerschutzes dar. Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Untersuchung der wechselseitigen niederfrequenten induktiven Beeinflussung von Drehstromkabelsystemen. Durch die induktive Kopplung parallelverlegter naheliegender Drehstromkabelsysteme werden in Phasenleitern, Kabelschirmen und Begleiterdern Spannungen induziert. Diese induzierten Spannungen führen in geschlossenen Leiterschleifen zu einem Stromfluss. Für die Berechnung dieser induzierten Spannungen und Ströme wird ein Simulationsmodell entwickelt, mit welchem relevante Parameter berücksichtigt werden können.

Für die Bestimmung der Verteilung der Ströme und Erderspannungen entlang von 400-kV-Kabelleitungen wird die gesamte Kabelleitungslänge in Hauptabschnitte und diese weiter in jeweils drei Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt wird eine Impedanzmatrix erstellt. Wenn zwischen Abschnitten keine Erdung von Kabelschirmen und Begleiterdern stattfindet, können die Impedanzmatrizen summiert werden. Die Hauptabschnitt-Impedanzmatrizen werden anschließend an ein Simulink-Modell übergeben, in welchem in weiterer Folge die einzelnen Hauptabschnitte zu einem mathematischen Abbild der kompletten Kabelleitung zusammengesetzt werden.

Es wird gezeigt, dass bei Nichtberücksichtigung dieser Thematik die induzierten Spannungen und Ströme Werte erreichen können, die zu Störungen der Sekundärtechnik, zu Gefahrensituationen für das Betriebs- oder Wartungspersonal und auch zu erhöhten Zusatzverlusten und dementsprechend erhöhten Leitertemperaturen führen können. Darüber hinaus wird gezeigt, dass bestimmte Eingangsparameter, vernachlässigbar sind.

Weiters wird gezeigt, dass es ohne Berücksichtigung der induktiven Beeinflussung bei der Verlegung von Kabelleitungen zu Summenströmen im Normalbetrieb kommen kann, die zu ungewollten Schutzanregungen und damit zu Fehlabschaltungen von Kabelsystemen führen können.

Schlüsselwörter: wechselseitige induktive Beeinflussung, 400-kV-Kabelleitungen, Kontaktübergangswiderstand, Erdausbreitungswiderstand, elektrische Symmetrie von Kabelleitungen, Selbstimpedanz, Koppelimpedanz



Abstract

The mutual inductive interference of 400 kV cable lines is an important topic during planning and construction of cable lines regarding their operation and maintenance work or employees' protection. Aim of the present thesis is the investigation of mutual low-frequency inductive interference of three-phase AC underground cable systems. Through inductive coupling of nearby parallel three-phase cable systems, voltages are induced in phase conductors, cable shields and earth continuity conductors (ECC). These induced voltages lead to a current flow in closed conductor loops. For the calculation of these induced voltages and currents, a simulation model is developed with which relevant parameters can be considered.

For the determination of the distribution of currents and voltages along 400 kV cable lines, the total cable line length is divided into main sections and these further into three sections each. For each section, an impedance matrix is created. If there is no grounding of cable shields and ECCs between sections, the impedance matrices can be summed up. The main section impedance matrices are then transferred to a Simulink model, in which the individual main sections are subsequently assembled into a mathematical image of the complete cable line.

It is shown that induced voltages and currents can reach values, which, if ignored, can lead to disturbances of electrotechnical equipment, to hazardous situations for the operating or maintenance personnel as well as increased additional losses and correspondingly higher conductor temperatures. In addition, it is shown that certain input parameters are negligible.

Furthermore, it is shown that, without consideration of the mutual inductive interference during installation of cable lines, residual currents can occur in normal operation, which can lead to unwanted protection excitations and thus to false protection system trips of cable systems.

Keywords: Mutual inductive interference, 400 kV underground cable lines, contact resistance, earth propagation resistance, electrical symmetry of underground cable lines, self-impedance, coupling-impedance



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	10
Begriffsdefinitionen	11
1 Kurzfassung	15
1.1 Ziel.....	15
1.2 Methode.....	15
1.3 Ergebnisse.....	15
2 Einleitung	16
2.1 Ziel der Arbeit	18
2.2 Stand der Technik und Wissenschaft.....	19
2.3 Beitrag dieser Arbeit zur Wissenschaft	20
2.4 Überblick über die im Rahmen dieser Dissertation entstandenen Publikationen.....	23
3 Theorie der wechselseitigen induktiven Beeinflussung	24
3.1 Grundlagen zur Berechnung der induktiven Beeinflussung bei ein- oder zweiseitiger Erdung von Kabelschirmen.....	24
3.1.1 Unterteilung einer Kabelleitung in Berechnungsabschnitte	31
3.2 Berechnung der induktiven Beeinflussung bei mehrfach geerdeten Leitungen	31
3.2.1 Einführendes zu Vierpolen und zur Kettenmatrix	31
3.2.2 Mehrfacherdungen von Kabelschirmen und/oder anderen zu berücksichtigenden Leitern.....	33
3.2.2.1 Anwendung der Kettenmatrix für Voruntersuchungen und manuelle Berechnungen unter Berücksichtigung von Mehrfacherdungen von Kabelschirmen.....	34
3.2.2.2 Anwendung eines Simulink-Modells für die Berücksichtigung von Mehrfacherdungen von Kabelschirmen und anderen vorhandenen Leitern	40
3.3 Numerische Berechnung der einzelnen Matrixelemente.....	46
3.3.1 Einführung.....	46
3.3.2 Elektrische Kenngrößen von Kabelleitungen	50
3.3.3 Selbstimpedanzen	51
3.3.4 Koppelimpedanzen	53



3.4	Grenzen des Simulationsmodells.....	54
4	Realtypische Kabelleitungen.....	55
4.1	Überblick.....	55
4.2	Querverlegeprofile.....	56
4.3	Längsverlegeprofile.....	60
4.3.1	Kabelleitung KL 1.....	61
4.3.2	Kabelleitung KL 2 (KL 2-1, KL 2-2).....	62
4.3.3	Kabelleitung KL 3.....	63
4.3.4	Kabelleitung KL 4.....	64
4.4	Variierte Parameter.....	64
4.4.1	Schaltzustände.....	64
4.4.2	Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderstände in Muffenbauwerken.....	65
4.4.3	Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding.....	68
5	Allgemeine Ergebnisse der Beeinflussungsbetrachtungen.....	70
5.1	Ein Drehstromsystem.....	71
5.1.1	Erdausbreitungswiderstände von Muffen-Erdungsanlagen und Kontaktübergangswiderstände von Erdungsboxen.....	72
5.1.2	Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding.....	76
5.1.3	Fehlerfall (1-poliger Erdkurzschluss).....	78
5.2	Zwei Drehstromsysteme.....	82
5.2.1	Beide Drehstromsysteme in Betrieb.....	83
5.2.2	Ein Drehstromsystem in Betrieb, das andere außer Betrieb.....	85
5.3	Vier Drehstromsysteme.....	89
5.3.1	Alle Drehstromsysteme in Betrieb.....	89
5.3.1.1	Summenströme parallelverlegter und parallelbetriebener Kabelleitungen.....	90
5.3.2	Zwei Drehstromsysteme in Betrieb, die anderen beiden außer Betrieb.....	92
5.4	Bedeutung spezieller Aspekte.....	96
5.4.1	Beeinflussung bei Kabelverlegevorgängen bei in Betrieb befindlichen parallelen Systemen.....	96
5.4.2	Spezifischer elektrischer Bodenwiderstand.....	99
5.4.3	Verlegetiefe der Leiter.....	100
5.4.4	Abschnitts- und Systemlänge.....	101



5.4.5	Begleiterder	102
5.4.6	Crossbonding-Fehler	104
5.4.7	Querschnittsfläche der Kabelschirme	106
5.5	Bestimmende und zweitrangige Einflussgrößen auf die induktive Beeinflussung.....	107
5.6	Maßnahmen zur Verhinderung potenzieller Gefahrensituationen.....	108
6	Durchgeführte Messungen zur Modellverifikation	110
6.1	Messaufbau.....	110
6.2	Messergebnisse.....	112
6.2.1	Messergebnisse der Messstation 1.....	113
6.2.2	Messergebnisse der Messstation 2.....	113
6.3	Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen	114
7	Stand der Normung bzgl. Beurteilung induzierter Spannungen	116
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
8.1	Ausblick.....	122
9	Literatur.....	124
10	Abbildungsverzeichnis.....	127
11	Tabellenverzeichnis.....	129
12	Anhang	130
12.1	Weitere Untersuchungsergebnisse.....	130
12.1.1	Ein Drehstromsystem	130
12.1.1.1	Einfluss von Begleiterdern und des Crossbondings beim 1-poligen Erdkurzschluss.....	130
12.1.2	Vier Drehstromsysteme	132
12.1.2.1	Vier Drehstromsysteme in Betrieb.....	132



Abkürzungsverzeichnis

D_e	Äquivalenter Abstand zum Erdrückleiter (Erdstromtiefe)
d_{ik}	Distanz zwischen zwei gekoppelten Leitern i und k
D_{ik}	Komplexe Distanz zwischen einem Leiter i und einem Abbild des Leiters k
$e = 2,7183$	Eulersche Zahl
f	Frequenz
h_i	Höhe des induzierenden Leiters (bei Erdkabel besitzt die Höhe ein negatives Vorzeichen)
h_k	Höhe des induzierten Leiters (bei Erdkabeln besitzt die Höhe ein negatives Vorzeichen)
\underline{p}	Komplexe Erdstromtiefe
r_l'	Spezifischer ohmscher Widerstand eines Leiters je Längeneinheit
r_a	Außenradius des Leiters
r_e'	Spezifischer Erdwiderstand je Längeneinheit
r_i	Innenradius des Leiters
R_i	Wirksamer Halbmesser des Leiters
R_S	Kabelschirm Radius
t	Dicke des Kabelschirmes
$x_{(i)i}'$	Spezifische innere Reaktanz eines Leiters je Längeneinheit
x_{ii}'	Spezifische Selbstreaktanz der Schleife Leiter-Erde je Längeneinheit
x_{ik}	Horizontale Distanz zwischen zwei gekoppelten Leitern
\underline{z}_{ii}'	Spezifische Selbstimpedanz einer Leiterschleife je Längeneinheit
\underline{z}_{ik}'	Spezifische Koppelimpedanz zwischen zwei Leitern i und k je Längeneinheit
$\gamma = 1,7811$	Besselsche Konstante (einheitenlos)
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Vs/Am}$	Permeabilität des Vakuums
μ_r	Relative magnetische Permeabilität eines Leiters (einheitenlos)
ρ	Spezifischer elektrischer Bodenwiderstand
ω	Kreisfrequenz



Begriffsdefinitionen

Nachfolgend, werden Begriffsdefinitionen aus der Studie über die „Wechselseitige induktive Beeinflussung von 400-kV-Kabelsystemen“ [2], die vom Autor der vorliegenden Dissertation im Laufe seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Projektassistent am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz erstellt (ausgenommen Kapitel 3.12 und Kapitel 8.9) und im März 2017 abgeschlossen wurde, zitiert:

*Unter **Beeinflussung** wird die elektrische Einwirkung einer Starkstromanlage auf andere Einrichtungen (Fernmeldeeinrichtungen, Steuerleitungen, Rohrleitungen usw.) oder auf den Menschen durch Kopplung über das elektrische Feld, das magnetische Feld oder das stationäre elektrische Strömungsfeld im Erdreich verstanden; die Ausführungen in dieser Arbeit beschränken sich auf die induktive Beeinflussung durch Kopplung über das magnetische Feld. Hinsichtlich der Dauer der Einwirkung der Beeinflussung ist zwischen Langzeit- und Kurzzeitbeeinflussung zu unterscheiden¹.*

***Niederfrequente Beeinflussung** ist eine elektrische und magnetische Beeinflussung von Anlagen durch Leitungen in einem Frequenzbereich von 16,7 Hz bis 9 kHz².*

***Galvanische Kopplung** tritt auf, wenn zwischen zwei oder mehreren Stromkreisen leitende Verbindungen bestehen, bzw. wenn diese eine Impedanz gemeinsam haben. Man unterscheidet die*

- galvanische Kopplung zwischen Betriebsstromkreisen, beispielsweise am gleichen Netz betriebene Verbraucher, und die*
- galvanische Kopplung zwischen Betriebsstromkreisen und Erdstromkreisen, die sog. Erdschleifenkopplung³.*

***Induktive** bzw. **magnetische Kopplung** tritt auf zwischen zwei oder mehreren stromdurchflossenen Leiterschleifen. Die mit den Strömen verknüpften magnetischen Flüsse durchsetzen die jeweils anderen Leiterschleifen und induzieren dort Störspannungen³.*

*Der **Einflussbereich** einer Hochspannungsanlage ist der Bereich, in dem Beeinflussungen von Fernmeldeanlagen, Rohrleitungen usw. durch Bahn- oder Drehstromanlagen verursacht werden können. Er wird im Allgemeinen durch den Grenzabstand beschränkt und wird dann **Näherungsbereich** genannt⁴.*

***Crossbonding** ist das Auskreuzen der Kabelschirme, sodass jeder Kabelschirm jede der drei Kabelphasen (Innenleiter) eines Drehstromsystems im Zuge eines Hauptabschnittes (bestehend aus drei (Unter-)abschnitten) einmal umgibt⁴.*

¹ Ernst Schmautzer, Die kartografische Aufnahme und Berechnung von induktiven Einfach- und Mehrfachbeeinflussungen durch Hochspannungsfreileitungen und -kabel im Fehlerfall und im Normalbetrieb, Institut für elektrische Anlagen, Graz, Technischer Bericht 1990

² www.electropedia.org: 161-01-26, low frequency

³ Adolf. J. Schwab, W. Kürner: „Elektromagnetische Verträglichkeit“, Springer, Heidelberg, ISBN 978-3-642-16609-9

⁴ www.electropedia.org: 461-14-07, cross-bonding



Gefährdung ist die Möglichkeit einer gesundheitlichen Schädigung von Personen durch elektrische ... Einwirkungen beeinflusster Anlagen (Personengefährdung) oder Betriebsmittel sowie einer Beschädigung der Anlage (Anlagengefährdung) oder eines Betriebsmittels⁵.

Elektromagnetische Störgröße ist jede elektromagnetische Erscheinung, die die Leistung einer Vorrichtung, eines Gerätes oder eines Systems beeinträchtigen oder lebende oder leblose Materie negativ beeinflussen kann⁶.

Normalbetrieb ist der fehlerfreie Betrieb der Starkstromanlage. Der Betriebsstrom ist der im Normalbetrieb eines elektrischen Netzes fließende Strom⁷.

Beeinflussungsspannung ist die von einer Bahn- oder Drehstromanlage an einer beeinflussten elektrischen Anlage durch induktive Kopplung hervorgerufene Spannung⁵.

Berührungsspannung ist eine Spannung zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese gleichzeitig berührt werden. ANMERKUNG Der Wert der Berührungsspannung kann durch die Impedanz des mit diesem leitfähigen Teil im elektrischen Kontakt stehenden Menschen erheblich beeinflusst werden⁸.

Die **Erdungsspannung** ist die zwischen einer Erdungsanlage und Bezugserde (ferne Erde) auftretende Spannung⁹.

Die **Bezugserde (ferne Erde)** ist der Teil der Erde, der als elektrisch leitfähig angesehen wird, außerhalb des Einflussbereiches von relevanten Erdungsanlagen liegt und dessen elektrisches Potential durch Vereinbarung gleich null gesetzt wird⁸.

Erder ist ein leitfähiges Teil, das in ein bestimmtes leitfähiges Medium, zum Beispiel Beton oder Koks, eingebettet sein kann und in elektrischem Kontakt mit Erde steht⁸.

Erdungsanlage ist die Gesamtheit der zum einzelnen oder gemeinsamen Erden eines Betriebsmittels oder einer Anlage erforderlichen Verbindungen und Erder⁸.

Erdungsimpedanz Z_E ist die Impedanz bei einer gegebenen Frequenz zwischen einem Punkt in einem System oder einer Anlage oder einem Betriebsmittel und der Bezugserde⁸.

(Erd-) Ausbreitungswiderstand ist der Realteil der Erdungsimpedanz⁸.

Kontaktübergangswiderstand stellt in der vorliegenden Dissertation den Widerstand zwischen den Kabelschirmleitern und den Potentialausgleichschielen in den Erdungsboxen sowie zwischen den Erdungs- und Crossbondingboxen und den Muffen-Erdungsanlagen dar [eigene Definition].

Starkstromanlage ist eine Anlage zur Erzeugung, Transformierung, Umformung, Fortleitung, Verteilung und zum Gebrauch der Elektrizität, die mit Strömen betrieben werden oder bei denen in voraussehbaren Störfällen Ströme auftreten, die Personen gefährden oder Sachbeschädigungen verursachen

⁵ ÖVE-B1/1976 „Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV“

⁶ www.electropedia.org: 161-01-06 (702-08-04), elektromagnetische Störgröße

⁷ Ernst Schmautzer, Die kartografische Aufnahme und Berechnung von induktiven Einfach- und Mehrfachbeeinflussungen durch Hochspannungsfreileitungen und -kabel im Fehlerfall und im Normalbetrieb, Institut für elektrische Anlagen, Graz, Technischer Bericht 1990

⁸ ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011, Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV

⁹ ÖVE/ÖNORM E 8383, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV



können. In der Praxis sind dies Netze mit Spannungen größer als 50 V und Strömen größer als 2 A. Die verschiedenen Spannungsbereiche unterteilt man in:

- Hochspannungsanlagen: Wechselfspannungen > 1000 V, Gleichspannung > 1500 V,
- Niederspannungsanlagen: Spannungsbereich II > 50 V bis 1000 V und
- Kleinspannungsanlagen: Spannungsbereich I < 50 V.¹⁰

Die **induzierte Spannung** ist die skalare Größe gleich dem Linienintegral einer Vektorgröße längs eines Weges C von Punkt a nach Punkt b, auf dem sich Ladungsträger bewegen können:

$$U_i = \int_{r_a(C)}^{r_b} \left(-\frac{\partial A}{\partial t} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) d\mathbf{r}$$

$$U_i = Z_{ik} \cdot I$$

Dabei ist an einem Punkt des Weges **A** ein magnetisches Vektorpotential und **B** die magnetische Flussdichte; **v** ist die Geschwindigkeit, mit der dieser Punkt sich bewegt; **r** ist der Ortsvektor und **t** die Zeit. (Die induzierte Spannung ist gleich der zeitlichen Ableitung des verketteten Flusses, der dem Weg zugeordnet ist, und hat ein positives oder negatives Vorzeichen gemäß den Vereinbarungen in IEC 60375)¹¹.

Der **induzierte Strom** ist der elektrische Strom, der durch Bewegung von Ladungsträgern aufgrund einer induzierten Spannung entsteht¹².

Der **spezifische Bodenwiderstand** ist die Resistivität (spezifischer elektrischer Widerstand) einer typischen Erdprobe¹³.

Elektrisches Netz ist ein Stromkreis oder Gesamtheit von Stromkreisen, die zusammengeschaltet d.h. absichtlich konduktiv, kapazitiv oder induktiv miteinander gekoppelt sind (Anmerkung: Ein elektrisches Netz kann Teil eines größeren elektrischen Netzes sein)¹⁴.

Die **Verdrillung** ist eine Änderung der gegenseitigen Lage der Phasenleiter (Außenleiter) einer Leitung¹⁵.

Der **Leiter** ist ein leitfähiges Teil, das dazu vorgesehen ist, einen bestimmten elektrischen Strom zu führen¹⁶.

¹⁰ "Niederspannungs-Installations-Norm", Electrosuisse – SEV Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik, Fehrltorf, 2000

¹¹ www.electropedia.com: 121-11-28, induzierte Spannung

¹² www.electropedia.com: 121-11-29, induzierter Strom

¹³ www.electropedia.com: 195-01-19, spezifischer Erdwiderstand

¹⁴ www.electropedia.org: 151-12-02, elektrisches Netz

¹⁵ www.electropedia.org: 466-05-10, Verdrillung

¹⁶ www.electropedia.org: 151-12-05, Leiter



Eine **Leitung** ist eine Anordnung von Leitern, Isolierstoffen und Zubehörteilen zur Übertragung von Elektrizität zwischen zwei Punkten eines **Systems**, das aus der Gesamtheit der zusammengehörigen Außenleiter, Erd- bzw. Kompensationsleiter sowie Masten besteht¹⁷.

Bei der **einseitigen Erdung** sind die Kabelschirme eines Abschnittes nur an einem Punkt leitend miteinander und mit Erde verbunden¹⁷.

Eine **Freileitung** ist eine elektrische Leitung, deren Leiter oberirdisch geführt sind, im Allgemeinen mit Hilfe von Isolatoren und geeigneten Stützpunkten¹⁷.

Der **Kabelschirm** ist eine geerdete metallene Umhüllung zur Begrenzung des elektrischen Feldes auf das Kabelinnere und/oder zum Schutz des Kabels vor äußeren elektrischen Beeinflussungen¹⁷.

Bei der **beidseitigen Erdung** sind die Kabelschirme eines Abschnittes an beiden Enden leitend miteinander und mit Erde verbunden [eigene Definition].

Phase bzw. **Außenleiter** ist ein Leiter, der im üblichen Betrieb unter Spannung steht und in der Lage ist, zur Übertragung oder Verteilung elektrischer Energie beizutragen, aber kein Neutralleiter ist¹⁸.

Kabelanlagen (Kabelsysteme) bestehen aus allen erforderlichen Bauteilen, die den Betrieb einer Kabelleitung ermöglichen. Dazu zählen z.B. Kabelgarnituren (Muffen, Endverschlüsse), Kabel, Crossbonding- und Erdungskästen, Crossbonding-Kabel, Überführungsbauwerke, Überspannungsableiter und alle dazugehörigen Hilfsbauwerke wie Muffenbauwerke, Fundamente von Endverschlussgerüsten und Muffenstellen sowie Stahlkonstruktionen, Schutzeinrichtungen, Erdungsanlagen¹⁹.

¹⁷ Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik-International Electrotechnical Vocabulary

¹⁸ www.electropedia.com: 195-02-88, Außenleiter

¹⁹ Definition: Georg Svejda



1 Kurzfassung

1.1 Ziel

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Untersuchung der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Drehstromkabelsystemen, mit dem Fokus auf 400-kV-Erdkabel. Hierzu werden die, durch Parallelverlegung mehrerer Drehstromsysteme, in Kabelschirmen und Begleiterdern induzierten Spannungen und resultierenden Ströme berechnet und damit die auftretende Strom- und Spannungsverteilung in den einzelnen Leitern entlang einer Kabelleitung (KL) bestimmt. Für die Berechnung der induzierten Spannungen und Ströme wird ein Simulationsmodell entwickelt, mit welchem die relevanten Parameter berücksichtigt werden können.

1.2 Methode

Für die Bestimmung der Verteilung der Ströme und Spannungen entlang von 400-kV-Kabelleitungen wird die nachfolgend beschriebene Methode angewendet. Die gesamte Kabelleitungslänge wird in Hauptabschnitte unterteilt. Die Hauptabschnitte werden jeweils in drei Abschnitte unterteilt. Ein Abschnitt kann bei Bedarf in weitere Unterabschnitte unterteilt werden. Für jeden Unterabschnitt wird eine Impedanzmatrix erstellt. Wenn zwischen Abschnitten keine Erdung von Leitern stattfindet, können die Impedanzmatrizen der einzelnen Unterabschnitte summiert werden. Nach diesem Vorgang existieren für jeden einzelnen Abschnitt Impedanzmatrizen, die zur Impedanzmatrix eines Hauptabschnittes summiert werden. Die Hauptabschnitt-Impedanzmatrizen werden im nächsten Schritt an ein Simulink-Modell übergeben, in welchem in weiterer Folge die einzelnen Hauptabschnitte zu einem mathematischen Abbild der kompletten Kabelleitung zusammengesetzt werden. Mit dieser Vorgangsweise ist es möglich, alle für die Untersuchung der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen relevanten Parameter zu berücksichtigen.

1.3 Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass die wechselseitige induktive Beeinflussung von 400-kV-Kabelleitungen ein sehr wichtiges Thema bei der Projektierung und Errichtung sowie des Betriebes und bei Wartungsarbeiten bzw. hinsichtlich der Sicherstellung des Arbeitnehmerschutzes darstellt. Es wird gezeigt, dass die induzierten Spannungen und Ströme Werte erreichen können, die bei Nichtberücksichtigung dieser Thematik sowohl zu Gefahrensituationen für das Betriebs- und/oder Wartungspersonal als auch zu erhöhten Zusatz- bzw. Kabelschirmverlusten und dementsprechend höheren Leiter- und Umgebungstemperaturen führen können [1]. Darüber hinaus wird gezeigt, dass bestimmte Eingangsparameter, die für die Untersuchung der gegenseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen benötigt werden, einen derart geringen Einfluss auf die induzierten Spannungen und Ströme aufweisen, dass sie vernachlässigbar sind. Daraus wird abgeleitet, dass man bei der Berechnung der induzierten Spannungen und Ströme sogar mit arbiträren Annahmen dieser bestimmten Parameter



sehr geringe Abweichungen der Ergebnisse erhält. Auf die Variation anderer Eingangsparameter reagieren die Berechnungsergebnisse, d.h. die induzierte Spannung und der induzierte Strom wesentlich sensitiver.

Weiters wird gezeigt, dass es bei der Parallelverlegung von Kabelsystemen im Normalbetrieb zu Summenströmen kommen kann, die zu ungewollten Schutzanregungen und damit zu Fehlabschaltungen von Kabelsystemen führen können.

2 Einleitung

Die Freileitung (FL) ist weltweit die wirtschaftlichste und zweifellos die meist verwendete Technologie in elektrischen Energieübertragungsnetzen. Und doch wird in den letzten Jahren der Ruf nach alternativen Übertragungstechnologien, aufgrund sinkender Akzeptanz der Freileitungen bei der Bevölkerung, zum Größten Teil durch die Auswirkungen auf das Landschaftsbild, immer lauter.

Doch nicht nur die sinkende Akzeptanz und die immer strengeren Umweltschutzvorgaben, sondern auch die eingeschränkte Anwendbarkeit der Freileitungstechnologie innerhalb von dicht besiedelten städtischen Gebieten führte zur Entwicklung der Höchstspannungs-Kabeltechnologie. In den letzten Jahrzehnten wurden die vier nachfolgend angeführten Übertragungstechnologien für den Einsatz im elektrischen Energieübertragungsnetz entwickelt:

- Höchstspannungs-Wechselstrom-Kabel
- Höchstspannungs-Gleichstrom-Kabel
- Gasisolierte Leitung
- Supraleitende Kabel

Trotz der, zum Teil seit Jahrzehnten marktreifen Technologien (Höchstspannungs-Wechselstrom-Kabel bereits seit Ende der 1970er Jahre verfügbar) werden alle genannten Kabeltechnologien aktuell, aus unterschiedlichen Gründen im Vergleich zur FL sehr selten bzw. nur für kurze Leitungslängen (bezogen auf übliche Leitungslängen elektrischer Übertragungsnetze) eingesetzt. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die supraleitenden Kabel aktuell noch im Anfangsstadium der Markteinführung befinden und weltweit nur einige wenige Pilotprojekte mit sehr geringen Längen (max. 1 km) realisiert wurden.

Neben dem Einsatz in dicht besiedelten städtischen Gebieten werden Kabel in Zukunft vermehrt (bei Notwendigkeit und technischer sowie wirtschaftlicher Machbarkeit) für Teilverkabelungen einzelner Abschnitte von Freileitungen zum Einsatz kommen. In der nachfolgend dargestellten Abbildung 2-1 ist eine typische Anordnung eines Teilverkabelungsabschnittes schematisch dargestellt.

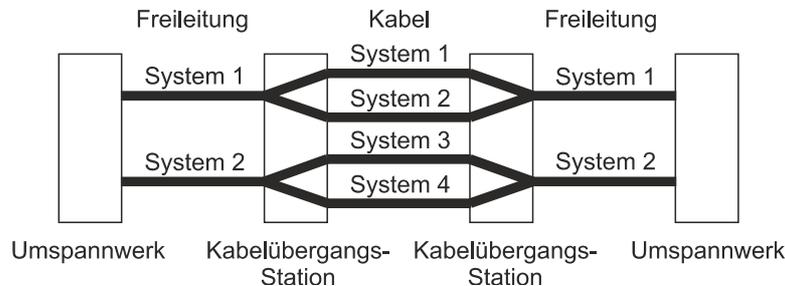


Abbildung 2-1: Teilverkabelung einer zweisystemigen Freileitung, [1]

Wie in [1] ausgeführt ist es im elektrischen Hoch- und Höchstspannungsnetz üblich, aus Gründen der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Versorgungssicherheit zweisystemige Freileitungen einzusetzen. Die Anzahl der Leiter in den Abschnitten typischer Freileitungen entspricht daher 7 bis 8 (2×3 Phasen + 1 bis 2 Erdseile). Beim Einsatz von Erdkabeln in einzelnen Abschnitten ist es meistens notwendig, die doppelte Anzahl an Phasenleitern mit einer wesentlich höheren Querschnittsfläche einzusetzen, um die Übertragungskapazität und die Zuverlässigkeit der Leitung durch die Teilverkabelung nicht zu verringern. Die Anzahl der Leiter im Kabelabschnitt entspricht daher 25 bis 26 (4×3 Phasen + 4×3 Kabelschirme + 1 bis 2 Begleiterder).

Die höhere Leiteranzahl bei Kabelleitungen (verglichen zu Freileitungen) kann im Grunde genommen durch die ungleichen Umgebungsbedingungen der beiden Übertragungstechnologien begründet werden. Bei der Freileitungstechnologie wird die Verlustwärme durch Strahlung und Konvektion an die Umgebungsluft abgeführt und die Leiterseile werden somit gekühlt. Bei der Höchstspannungs-Wechselstrom-Kabeltechnologie, kommt aktuell als elektrischer Isolierstoff vernetztes Polyethylen (VPE) zum Einsatz, das um den Kupfer- oder Aluminiumleiter extrudiert ist. Aktuell beträgt die Isolierstoffdicke bei 230/400 kV-Kabeln ca. 30 mm. Zusätzlich zum umgebenden VPE-Isolierstoff, der wie alle anderen elektrischen Isolatoren auch eine hervorragende thermische Isolierwirkung besitzt, werden Kabel direkt in Erde oder in Rohren verlegt, wodurch die Verlustwärmeabgabe zusätzlich erschwert wird. Allerdings kann die Übertragungskapazität einer Kabelleitung, auch bei einer Verlegung in Luft wie beispielsweise in Tunneln, Kollektorgängen und Kabelschächten, diejenige Übertragungskapazität einer ähnlichen Freileitung (vergleichbare Materialien und Querschnittsflächen) nicht erreichen. Ein weiterer Grund dafür liegt an den Kabelschirmzusatzverlusten, die die Verlustwärmeabfuhr der Phasen zusätzlich erschweren. Die Kabelschirmzusatzverluste werden in den mehrfach geerdeten Kabelschirmen entlang von Kabelleitungen durch die induzierten Ströme, hervorgerufen durch die wechselseitige induktive Beeinflussung, verursacht.

Die Aussagen der vorliegenden Dissertation beziehen sich auf eingeschwungene Zustände und können nicht für transiente Vorgänge und Schaltüberspannungen angewendet werden.



2.1 Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, neue Erkenntnisse über die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung beim Einsatz von Drehstromkabelsystemen im elektrischen Übertragungs- und Verteilnetz zu gewinnen. Es sollen am Ende der Untersuchungen Aussagen gemacht werden, die sowohl für den Betrieb und die Instandhaltung vorhandener als auch für neu geplante Kabelsysteme, bereits während der Planungsphase genutzt werden können. Zum einen sollen qualitative und quantitative Aussagen über die induzierten Spannungen und Ströme unter Berücksichtigung verschiedener Einflussparameter und Betriebszustände der analysierten Kabelsysteme gemacht werden und zum anderen potentielle Gefahrensituationen, verursacht durch die induktive Beeinflussung, für anwesendes Personal analysiert werden. Die theoretisch-wissenschaftlichen Untersuchungen werden mit dem Fokus durchgeführt, Aussagen über die Folgen der induktiven Beeinflussung auf den Betrieb und die Instandhaltung von parallel verlegten und parallel betriebenen Kabelsystemen abzuleiten. Unter anderem sollen Maßnahmen abgeleitet werden, mit deren Berücksichtigung während der Planungsphase neuer Kabelleitungen es möglich wird, eine Minimierung der induzierten Spannungen und damit eine Erhöhung der Sicherheit des Betriebs- und Instandhaltungspersonals sowie eine Verringerung der Zusatzverluste, verursacht durch induzierte Kabelschirmströme, zu erreichen. Die relevanten Beeinflussungsparameter bzgl. niederfrequenter wechselseitiger induktiver Beeinflussung von Kabelleitungen werden mit Hilfe eines entwickelten Simulationsmodells identifiziert und darauffolgend mit Ergebnissen durchgeführter Messungen an 400-kV-Kabelleitungen verglichen werden.

Der Fokus dieser Dissertation liegt auf folgenden Forschungsfragen:

1. Wie hoch sind die Spannungen, die an metallischen Teilen abgeschalteter Kabelsysteme wie Muffen, Schirme, Leiter, Crossbonding Kästen und Erdungsanlagen durch induktive Beeinflussung auftreten können?
2. Wie hoch sind die Ströme, die durch induktive Beeinflussung in Kabelschirmen, Begleiterdern sowie geerdeten Phasenleitern abgeschalteter Kabelsysteme fließen können?
3. Welche Maßnahmen können zur Reduktion der induzierten Größen durchgeführt werden?
4. Welche Auswirkungen hat die Alterung bzw. Korrosion der Erdungsanlage auf die induktive Beeinflussung?
5. Wird die Übertragungskapazität von 400-kV-Kabelleitungen bei Crossbonding-Fehlern (Isolationsverlust) reduziert?
6. Wie hoch sind die Summenströme, die sich im Normalbetrieb aufgrund der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung parallelverlegter und parallelbetriebener Kabelsysteme ergeben?
7. Was sind die wesentlichen Einflussparameter auf die induzierten Spannungen und Ströme?
8. Welche Beeinflussungs-Situationen durch ein Parallelsystem bezüglich der Arbeitnehmersicherheit können während Routineinspektionen, Wartungsarbeiten, Reparaturarbeiten bzw. bei der Installation von Phasen in Reserverohren oder im Falle von Tunneln bei der Installation von Ersatzsystemen auftreten?

Der Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Dissertation liegt somit zum einen in der Identifikation der wesentlichen und - falls vorhanden - zweitrangigen Beeinflussungsparameter auf die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von parallelverlegten und parallelbetriebenen Kabelsystemen und zum anderen in der Bestimmung der Höhe der induzierten Strom- und Spannungsverteilung entlang von parallelverlaufenden Kabelsystemen, mit dem Fokus auf 400-kV-Kabelleitungen.



2.2 Stand der Technik und Wissenschaft

Der Stand der Technik und Wissenschaft auf dem Gebiet der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelleitungen, kann wie folgt zusammengefasst werden:

Die Anzahl der Abschnitte von 400-kV-Kabelleitungen wird von der Gesamtlänge der Kabelleitung und von der maximal möglichen Einzellänge (Lieferung) der Kabel bestimmt. Bei 400-kV-Kabelsystemen ist die Gesamtlänge ohne Kompensation der kapazitiven Ladeströme gemäß [14] auf ca. 15 km begrenzt. Die maximal möglichen Einzellängen von 400-kV-Kabeln sind weniger durch elektrotechnische Effekte als vielmehr durch mechanische und logistische Herausforderungen vorgegeben. Die Länge eines Kabels, das auf eine Trommel gewickelt werden kann, hängt vom jeweiligen Transportweg (Trommeldurchmesser) zwischen Herstellungs- und Installationsort, von der Querschnittsfläche und Herstellungstechnologie des Leiters (minimaler Biegeradius bei Extrusion der Isolation) und letztlich vom Material des Leiters (Gewicht) ab.

Muffen stellen nach wie vor, trotz höchster Anforderungen und aufwendigster Qualitätskontrollen bei der Herstellung und Montage, eine Schwachstelle im Gesamtsystem dar. Daher wird versucht, die Anzahl der Muffen so gering wie möglich zu halten, das heißt die Einzellängen so lang wie möglich zu produzieren. Ende der 70-er, Anfang der 80-er Jahre des vorigen Jahrhunderts wurden 400-kV-Kabelsysteme mit Einzellänge von ca. 300 m hergestellt. Aktuell sind bei 400-kV-Kabelsystemen für die Erdverlegung Einzellängen von bis zu 1300 m möglich. Daraus ergibt sich die Anzahl der Muffen, die für eine Leitung benötigt werden. Die Kabelsysteme werden heute wie damals in der Regel mit einer durch drei teilbaren Anzahl von Abschnitten ausgeführt. Dies ist gemäß Stand der Wissenschaft die richtige Vorgangsweise, um die, durch induktive Beeinflussung eingekoppelten Kabelschirmströme und dadurch verursachten Zusatzverluste auf ein Minimum zu reduzieren. Dies ist jedoch nur erreichbar, wenn in allen Abschnitten alle Einflussparameter wie die geometrischen Abstände, die Verlegeprofile, die Verlegetiefe, der spezifische Bodenwiderstand, die Länge der Abschnitte unverändert bleiben. Da es jedoch vielfach nicht möglich ist, zum einen immer die gleichen Abstände zwischen den Muffen, das heißt gleiche Längen der Abschnitte und zum anderen dieselben geometrischen Abstände, Verlegeprofile und Verlegetiefen und noch weniger den gleichen spezifischen Bodenwiderstand entlang einer Kabelroute zu realisieren bzw. zu gewährleisten, versucht die Wissenschaft Methoden und Tools zu entwickeln, um die Problematik bereits während der Planungsphase adäquat behandeln zu können. Unterschiedlich lange Abschnitte resultieren unter anderem daraus, dass sich häufig entlang einer genehmigten Kabelroute an den idealen, das heißt äquidistanten Standorten für Muffen beispielsweise Straßen, Gewässer oder andere Bauwerke befinden. Die Muffen müssen daher verschoben und dorthin gesetzt werden wo ausreichend Platz vorhanden ist.

Beim Verlegen von Höchstspannungs-Erdkabeln müssen entlang der Kabelroute alle natürlichen und anthropogen Hindernisse wie Gleisanlagen, Straßen (Autobahnen, Bundes-, Landes-, Gemeindestraßen, Güterwege, ...) und Fließgewässern (Flüsse, Bäche, Rinnsal, Kanäle, ...) unterquert werden. Heutzutage wird beim Unterqueren der oben erwähnten Hindernisse i.d.R. das sogenannte Horizontalspülbohrverfahren angewendet. Hierbei werden von einer Bohranlage Leerrohre grabenlos unterirdisch verlegt in die danach die Kabelphasen eingezogen werden können. Dabei ist es jedoch in der Regel nicht üblich denselben geometrischen Abstand zwischen den Phasen, dasselbe Verlegeprofil sowie die gleiche Verlegetiefe der restlichen Kabelroute einzuhalten.

Trotz ständiger Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Leistungsfähigkeit und Taktgeschwindigkeit von Rechnerprozessoren ist es heute nicht möglich, auch nicht mit Supercomputern eine komplette Kabelleitung mit mehreren Kilometern Länge mit der Finite Elemente Methode (FEM) zu berechnen. Für die vorliegende Dissertation wird mit Hilfe des Softwarepakets Matlab-Simulink ein Simulationsmodell entwickelt und in weiterer Folge durch Messungen an 400-kV-Kabelsystemen im Schwachlastbereich verifiziert. Mit dem entwickelten Simulationsmodell ist es möglich alle Beeinflussungsparameter (siehe Abbildung 2-2) auf die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen zu berücksichtigen.



Abbildung 2-2: Zu berücksichtigende Beeinflussungsparameter

2.3 Beitrag dieser Arbeit zur Wissenschaft

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen eines langfristig angelegten Kabelforschungsprogrammes mehrerer Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber sowie mehrerer Universitäten erstellt. Die nachfolgend angeführten Erkenntnisse konnten durch theoretisch wissenschaftliche Untersuchungen sowie messtechnisch erfasste Daten an kombinierten 400-kV-Kabel-Freileitungssystemen und Mittelspannungskabeln gewonnen werden und können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die elektrische Symmetrie der Kabelsysteme stellt den wesentlichsten Einflussfaktor auf die induzierten Spannungen und Ströme dar.
2. Crossbonding-Fehler (Isolationsverlust) führen zu einem Anstieg der induzierten Kabelschirmströme und können damit zu einer Reduktion der Übertragungskapazität einer Kabelleitung führen.
3. Geringe Veränderungen (sowohl Zunahme als auch Abnahme) der Kontaktübergangswiderstände der Kabelschirme und der Erdungs- bzw. Crossbondingboxen sowie der Ausbreitungswiderstände der Muffen-Erdungsanlagen können zu einem wesentlichen Anstieg der induzierten Größen führen.
4. Bei (elektrisch) symmetrischen Kabelsystemen spielt die Anzahl und die Länge der Einzelabschnitte eine untergeordnete Rolle bezüglich der wechselseitig induzierten Spannungen und Ströme parallelverlaufender 400-kV-Kabelsysteme.
5. Die Querschnittsfläche der Kabelschirme spielt bei realen Systemen bezüglich der Höhe der induzierten Kabelschirmströme bei 400-kV-Kabelsystemen eine untergeordnete Rolle.
6. Der spezifische Bodenwiderstand sowie die Verlegetiefe besitzen keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der induzierten Spannungen und Ströme.



7. Zusätzlich zur Verdrillung der Phasen und zum Crossbonding der Kabelschirme innerhalb eines Drehstromsystems wäre ein Positionstausch der Drehstromsysteme innerhalb der Kabelformation notwendig, um auftretende Summenströme zu unterbinden.
8. Bei Erdschlüssen in MS-Kabeln in starr oder niederohmig geerdeten Verteilnetzen spielt die induktive Kopplung bezüglich der Fehlerstromaufteilung neben der Höhe der Erdungswiderstände eine erhebliche Rolle.
9. Nichtberücksichtigung der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von parallelverlegten und parallelbetriebe Kabeln führt unter bestimmten Umständen zu Nullstromanregungen und kann letztlich zu fehlerhaften Schutzauslösungen und damit zu Leitungsausfällen im Verteilnetz führen.

Unter dem eingeführten Begriff der „elektrischen Symmetrie“ einer Kabelleitung wird folgendes verstanden: identische Erdungswiderstände R_E aller Muffenstellen, identische Längen aller Abschnitte, identische Abstände der Leiter innerhalb von Drehstromsystemen sowie der Drehstromsysteme zueinander, identische Verlegeprofile aller Abschnitte, konsequentes Crossbonding der Kabelschirme sowie Verdrillen der Kabelphasen, eine durch drei teilbare Anzahl an Abschnitten sowie gleicher spezifischer Bodenwiderstand entlang der Gesamtleitungslänge. Mit einem möglichst hohen Grad an elektrischer Symmetrie können die induzierten Spannungen und Ströme und dementsprechend die Zusatzverluste auf ein Minimum gesenkt werden.

Betreiber und Hersteller von 400-kV-Kabelsystemen gingen bisher davon aus, dass beim Vorliegen einer Störung des Crossbondings (Isolationsverlust z.B. durch einen leitend gewordenen Überspannungs-Ableiter) eines oder mehrerer Hauptabschnitte von 400-kV-Kabelsystemen der Stromanstieg in den Kabelschirmen derart hohe Zusatzverluste zur Folge hat, dass die Übertragungskapazität des betroffenen Kabelsystems um bis zu 40 % (dieser Wert stammt von 400-kV-Kabelbetreibern bzw. vom Hersteller der betroffenen Kabel) reduziert werden müsste, um keine thermischen Grenzen zu überschreiten. Untersuchungen in der vorliegenden Dissertation zeigen, wie in [1] und detaillierter in [2] erläutert, dass es zwar zu einem erheblichen Kabelschirmstromanstieg kommen kann, dass der auftretende Temperaturanstieg und dadurch die notwendige Reduktion der Übertragungskapazität jedoch nicht ausschließlich vom Ausmaß des Kabelschirmstromanstiegs bestimmt wird. Das Ausmaß des Temperaturanstieges und der dadurch nötigen Reduktion der Übertragungskapazität hängt von den folgenden Faktoren ab: Querschnittsfläche und Material der Kabelschirme, Art (hoch- oder niederohmige Verbindung des Schirmes zur Erdungsanlage oder zu anderen Schirmen) und Ort (zwischen Muffen oder beispielsweise in der Nähe eines Umspannwerkes mit einer niederohmigen Erdungsanlage) des Crossbonding-Fehlers, Umgebungsbedingungen (direkte Erdverlegung, Verlegung im Rohr oder Tunnel, mit oder ohne Zwangskühlung bzw. -belüftung, Verlegung flach oder in Dreieck, spezielles Bettungsmaterial, Feuchtigkeitsgehalt des Erdreichs, Verlegetiefe, Leiter- und Systemabstände).

Der ausgeprägte Einfluss der Kontaktübergangs- und der Ausbreitungswiderstände von Erdungsanlagen der Muffenstellen von Kabelleitungen auf die induzierten Spannungen und Ströme ergibt sich aus ihrer Position bzw. Anordnung im elektrischen Netzwerk (quer zu den i.d.R. kleineren Längsimpedanzen der Leiter) bestehend aus ohmsch und induktiv gekoppelten Serien- und Parallelschaltungen der einzelnen Selbst- und Kopelimpedanzen. Die Untersuchungen zeigen, dass ein Anstieg des R_E einer Muffenstelle zu einem Anstieg des Querstroms (ins Erdreich abfließender Strom) und daraus resultierend zu einer Spannungsanhebung des jeweiligen Leiters in einer, innerhalb der Gesamtleitungslänge, weit entfernten Muffenstelle kommen kann. Weiters wird gezeigt, dass auch eine Reduktion des R_E einer Muffenstelle (beispielsweise nach einer Ertüchtigung



einzelner Muffen-Erdungsanlagen) zu einem Stromanstieg und damit zu einer Spannungsanhebung in anderen Muffenstellen führen kann.

Es wird gezeigt, dass bei vorliegender elektrischer Symmetrie, die Länge der Abschnitte, dementsprechend auch die Gesamtleitungslänge und daraus resultierend die Anzahl der Abschnitte eine vernachlässigbare Rolle spielen, denn die induzierten Spannungen und damit auch die induzierten Ströme heben sich in den Hauptabschnitten wechselseitig auf.

Unter den dieser Dissertation zu Grunde liegenden Voraussetzungen ist die Querschnittsfläche der Kabelschirme bei realen Systemen vernachlässigbar, wenn es um die Bestimmung der Höhe der induzierten Kabelschirmströme spielt. Dies war zwar für die Höhe der induzierten Spannungen zu erwarten, nicht jedoch für die Ströme. Bei der Analyse der Berechnungsformeln und Größenordnungen stellt sich heraus, dass der ohmsche Widerstand (abhängig von der Querschnittsfläche) nur eines von sechs Elementen innerhalb der Formeln für die Berechnung der Selbst- und der Koppelimpedanz darstellt. Weiters ist bei den untersuchten Kabelleitungen durchwegs der induktive Anteil der Impedanzen ein Vielfaches höher als der ohmsche Anteil.

Der spezifische Bodenwiderstand und die Verlegetiefe der einzelnen Leiter besitzen ebenfalls keinen wesentlichen Einfluss bei der Berechnung der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von 400-kV-Kabelsystemen. Die Ursache hierfür liegt bei den relativ geringen Abständen zwischen der Störquelle (beeinflussender Leiter) und der Störsenke (beeinflusster Leiter). Betrachtet man die induktive Beeinflussung beispielsweise einer Freileitung auf eine andere, mehrere 100 m entfernte Anlage wie z.B. eine Pipeline, so spielt der spezifische Bodenwiderstand sehr wohl eine wesentliche Rolle bei der Höhe der induzierten Spannungen und Ströme, wie in [21], [22] oder [23] gezeigt wird. Die Verlegetiefe spielt insofern eine untergeordnete Rolle da bei der Anwendung der Berechnungsformeln nach Carson bzw. Pollaczek der imaginäre Rückstrompfad in einer Tiefe von ca. 700m bis 1300 m liegt und dadurch die Verlegetiefe das Kabel von einigen wenigen Metern vernachlässigbar ist.

Es zeigen ausnahmslos alle untersuchten Kabelleitungen – unabhängig von der Anordnung der Leiter (Dreieck oder flach horizontal bzw. vertikal), von der Verlegetiefe, vom spezifischen Bodenwiderstand, von der Anzahl der Unterabschnitte, von der Nachbildung der Erdungsanlagen von Muffenstellen – dass in den beiden jeweils außen liegenden Systemen höhere Spannungen und Ströme induziert werden. Das liegt daran, dass innen liegende Systeme auf beiden Seiten von anderen Leitern umgeben sind. Zwar trifft dies auch für beeinflussende Leiter (Phasen) zu und man könnte erwarten, dass durch die zusätzlichen Phasen auch die induzierten Spannungen und Ströme ansteigen, jedoch wird gezeigt, dass die Reduktionswirkung der geerdeten Kabelschirme höher ist als die induktive Beeinflussung durch die zusätzlichen Phasenströme.

Bei Vernachlässigung der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen in der Planungs- und Installationsphase kann es zu weitreichenden Konsequenzen im Betrieb kommen. Es wird gezeigt, dass es bei parallelverlegten und parallelbetriebenen Kabelsystemen in den außenliegenden Systemen zu Summenströmen kommt, die als Nullströme bzw. Erdschluss interpretiert werden und somit zu Nullstromanregungen von Schutzgeräten führen können. Trotz gleicher Kabelquerschnittsflächen und gleicher Materialien ergeben sich durch die wechselseitige induktive Beeinflussung unterschiedliche Impedanzen der Drehstromsysteme und der einzelnen Phasen. Dadurch kann es in letzter Konsequenz zu Fehlauslösungen der Schutzgeräte der außen liegenden Kabelsysteme kommen. Ursächlich für die Fehlauslösungen ist letztlich die unterschiedliche Stromaufteilung auf die parallelverlegten und -betriebenen Drehstromsysteme und auf die drei Phasen innerhalb der Drehstromsysteme selbst.



2.4 Überblick über die im Rahmen dieser Dissertation entstandenen Publikationen

R. Muratović, E. Schmutzner, L. Fickert, R. Woschitz, H. Lugschitz, A. Machl, K. Reich, M. Klein, G. Svejda: „Mutual inductive interference of 400 kV cable systems“, e&i - Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 134, Nr. 1, 25.02.2017, S. 37-45. Veröffentlichung: Forschung - Begutachtet › Artikel

R. Muratović, T. Mallits, E. Schmutzner: „Berechnung der wechselseitigen ohmschen und induktiven Beeinflussung durch Höchstspannungs-Kabelsysteme“, e&i - Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 131, Nr. 8, 2014, S. 329-335. Veröffentlichung: Forschung - Begutachtet › Artikel

R. Muratović, E. Schmutzner, L. Fickert, R. Woschitz, H. Lugschitz, A. Machl, K. Reich, M. Klein, G. Svejda: „Mutual Inductive Interference of 400 kV Cable Systems“, CIGRE Session 2016, Paris, Frankreich. Veröffentlichung: Forschung - Begutachtet › Paper

R. Muratović, E. Schmutzner, R. Woschitz, W. Emmer, K. Reich, M. Klein, G. Svejda: „Technische Voraussetzungen für den Einsatz von Hochspannungskabeln in elektrischen Netzen“, Beitrag in 14. Symposium Energieinnovation 2016, Graz, Österreich. Veröffentlichung: Forschung - Begutachtet › Paper

T. Mallits, E. Schmutzner, L. Fickert, T. Höhn, R. Muratović, J. Gether: „Die Rolle von Globalen Erdungssystemen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit elektrischer Netze“, Beitrag in 14. Symposium Energieinnovation 2016, Graz, Österreich. Veröffentlichung: Forschung - Begutachtet › Paper

R. Muratović, E. Schmutzner, R. Woschitz: „Inductive Interference 400 kV Cable Systems“, 380 kV Cable Research Program 2015, Technical University of Delft, NL, Niederlande. Veröffentlichung: Forschung › Vortrag oder Präsentation

R. Muratović, E. Schmutzner, L. Fickert, R. Woschitz, H. Lugschitz, A. Machl, K. Reich, M. Klein, G. Svejda: „Mutual Inductive Interference of 400 kV Cable Systems“, Postersitzung CIGRE Session 2016, Paris, Frankreich. Veröffentlichung: Forschung › Poster

E. Schmutzner, L. Fickert, W. Emmer, R. Muratović, T. Mallits, Ch. Sigl, A. Kesjic: „Strom im Tunnel - Ist alles sicher?“, 2016. Veröffentlichung: Forschung › Vortrag oder Präsentation



3 Theorie der wechselseitigen induktiven Beeinflussung

3.1 Grundlagen zur Berechnung der induktiven Beeinflussung bei ein- oder zweiseitiger Erdung von Kabelschirmen

Bei der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen geht es um die Wechselwirkung sämtlicher Leiter einer Kabelleitung über das magnetische Feld H . Das magnetische Feld H ist omnipräsent. Neben dem natürlichen magnetischen Feld der Erde sind es vor allem die anthropogenen, d.h. magnetischen Felder technischen Ursprungs, die für Beeinflussungen der verschiedensten Systeme untereinander verantwortlich sind.

Bewegte elektrische Ladungsträger bzw. elektrischer Strom verursachen ein den elektrischen Strom umgebendes magnetisches Feld H . Das heißt, jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben, dessen Vorhandensein vom dänischen Wissenschaftler Hans Christian Oersted im Jahre 1820 durch die magnetische Kraftwirkung auf andere Ladungsträger entdeckt wurde.

Dieses physikalische Faktum wird in den unterschiedlichsten Disziplinen wie der Nachrichten-, Medizin-, Mobilfunk-, elektrischen Energietechnik und in vielen anderen Disziplinen bewusst ausgenutzt. Im Bereich der elektrischen Energietechnik wird die Kopplung über das magnetische Feld bzw. die daraus resultierende Kraftwirkung speziell bei den elektrischen Generatoren zur Stromerzeugung und bei den elektrischen Motoren zum Antrieb unterschiedlichster Arbeitsmaschinen genutzt. Im Bereich der Netze für die elektrische Energieübertragung und -verteilung wird die Kopplung über das Magnetfeld innerhalb von Transformatoren genutzt. Der Effekt der Kopplung über das magnetische Feld tritt jedoch auch unerwünschter Weise bei der leitungsgebundenen Übertragung und Verteilung elektrischer Energie auf.

Aus technischen, ökologischen und ökonomischen Gründen werden in der elektrischen Energietechnik beim Bau von Leitungstrassen in der Regel mehrere Leitungen bzw. Drehstromsysteme parallel verlegt. Diese Vorgangsweise hat sich, auf Grund der daraus resultierenden hohen Zuverlässigkeit des elektrischen Netzes bewährt. Damit sind parallelverlaufende Leitungen im elektrischen Netz die Regel.

Der das Magnetfeld verursachende Wechselstrom induziert in benachbarten Leitern eine Längsspannung. Existiert ein geschlossener Stromkreis des Leiters, in dem die Längsspannung induziert wird, entweder über das Erdreich, über andere Leiter wie Kabelschirme, Begleiterder, PEN-Leiter anderer Spannungsebenen oder fremde Konstruktionen wie Gas-, Öl-, Fernwärmeleitungen, so kommt es durch die induzierte Spannung zu einem Stromfluss. Dieser Stromfluss besitzt wiederum selbst ein magnetisches Feld und wirkt damit auf den ursprünglichen beeinflussenden Leiter zurück.

Die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen ist gemäß [15] eine sogenannte *Intrasystem-Beeinflussung*. Hierbei geschieht die Beeinflussung nicht zwischen unterschiedlichen Systemen (*Intersystem-Beeinflussung*), sondern die Störquelle und die Störsenke liegen beide innerhalb eines Systems, in diesem Fall innerhalb einer elektrischen Energieübertragungs-Kabelleitung.

Nachfolgend wird die grundsätzliche Vorgangsweise (siehe auch [23]) bei der Berechnung der Spannungs- und Stromverteilung entlang von, sich wechselseitig induktiv beeinflussenden, parallelverlaufenden Kabelsystemen, anhand eines Drehstromkabelsystems erläutert.

Ausgehend von der nachfolgenden Abbildung 3-1, in der zwei Abschnitte eines Drehstromkabelsystems mit einer bestimmten Abschnittslänge dargestellt sind, wobei in der Muffe zwischen den beiden Abschnitten die Phasen und die Kabelschirme gegenseitig verdreht sind, wird die Vorgangsweise bei der Berechnung der induzierten Längsspannungsabfälle, hervorgerufen durch die Phasenströme, beschrieben.

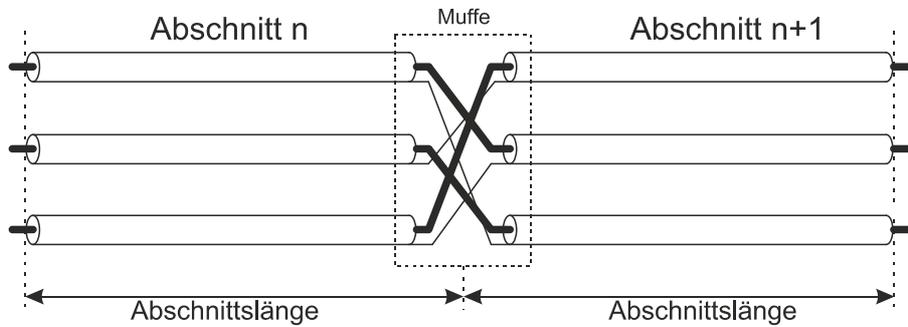


Abbildung 3-1: Zwei Abschnitte eines Drehstromkabelsystems mit Verdrehung der Phasen und Crossbonding der Kabelschirme in der Muffe zwischen den beiden Abschnitten n und n+1 [4]

Für die Berechnung der induktiven Beeinflussung wird für jeden Abschnitt die Impedanzmatrix benötigt. Für ihre Herleitung wird nachfolgendes Ersatzschaltbild für einen Abschnitt herangezogen und nachfolgend als elektrisches Netzwerk unter Berücksichtigung der Längselemente und Vernachlässigung der Querelemente angeführt. Diese Vernachlässigung ist im Verhältnis zur gewinnbaren Genauigkeit durch den deutlich erhöhten Rechenaufwand gerechtfertigt, wenn man die Größenordnung der über die Querelemente je Abschnitt fließenden Ströme ins Verhältnis zu den Normalbetriebs- bzw. Fehlerströmen setzt. Bei einer Betriebskapazität von ca. $0,30 \mu\text{F}/\text{km}$ ergibt sich bei einer Außenleiterspannung von 400 kV ein kapazitiver Ladestrom von 21,8 A/km.

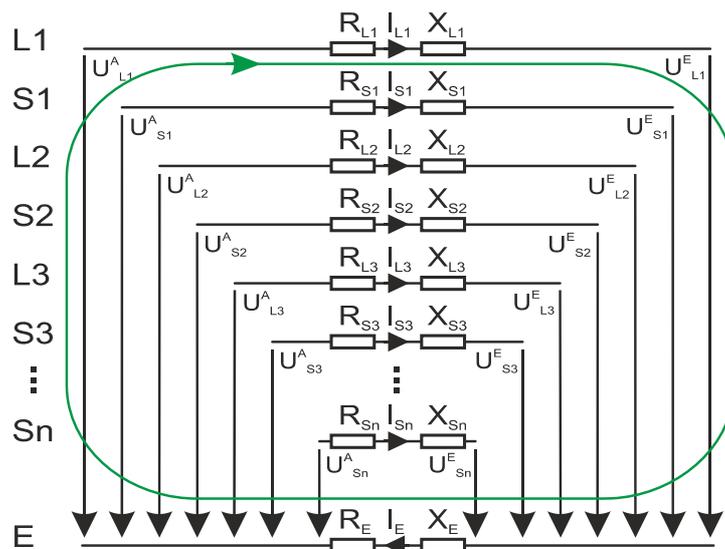


Abbildung 3-2: Ersatzschaltbild eines Abschnittes, dargestellt als elektrisches Netzwerk bei Vernachlässigung der Querelemente (E ... Erde)



Die Maschengleichung für die Phase L1 lautet wie folgt,

$$\underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E = Z_{L1L1}I_{L1} + Z_{L1S1}I_{S1} + Z_{L1L2}I_{L2} + Z_{L1S2}I_{S2} + Z_{L1L3}I_{L3} + Z_{L1S3}I_{S3} \quad (1)$$

wobei die Indizes L für Phasen, S für Kabelschirme sowie Z_{L1Li} für die Selbstimpedanz der Phase i und Z_{L1Sk} bzw. Z_{L1Lk} für die Koppelimpedanz zwischen der Phase i und dem Kabelschirm bzw. der Phase k (inkl. Erdrückleitung) stehen.

Unter Berücksichtigung des Rückstromes über die Erde I_E

$$I_E = \sum_{L=1}^n I_L + \sum_{S=1}^n I_S \quad (2)$$

sowie Auftrennung der Impedanzen in ihre ohmschen und induktiven Anteile, kann Gleichung (1) wie folgt angeschrieben werden

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E &= R_{L1}I_{L1} + jX_{L1}I_{L1} + jX_{L1S1}I_{S1} + jX_{L1L2}I_{L2} + jX_{L1S2}I_{S2} + jX_{L1L3}I_{L3} + jX_{L1S3}I_{S3} + \dots + jX_{L1Sn}I_{Sn} - \dots \\ &\quad - jX_{L1E}(I_{L1} + I_{S1} + I_{L2} + I_{S2} + I_{L3} + I_{S3} + \dots + I_{Sn}) + \dots \\ &\quad + R_E(I_{L1} + I_{S1} + I_{L2} + I_{S2} + I_{L3} + I_{S3} + \dots + I_{Sn}) + \dots \\ &\quad + jX_E(I_{L1} + I_{S1} + I_{L2} + I_{S2} + I_{L3} + I_{S3} + \dots + I_{Sn}) + \dots \\ &\quad - jX_{L1E}I_{L1} - jX_{S1E}I_{S1} - jX_{L2E}I_{L2} - jX_{S2E}I_{S2} - jX_{L3E}I_{L3} - jX_{S3E}I_{S3} - \dots - jX_{SnE}I_{Sn} \end{aligned} \quad (3)$$

Die Berechnung des Längsspannungsabfalles von Phase L1 unter Berücksichtigung der induktiven Einkopplungen der anderen Phasen und Kabelschirme sieht wie folgt aus

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E &= (R_{L1} + R_E)I_{L1} + j(X_{L1} - X_{L1E} + X_E - X_{L1E})I_{L1} + \dots \\ &\quad + R_E I_{S1} + j(X_{L1S1} - X_{L1E} + X_E - X_{S1E})I_{S1} + \dots \\ &\quad + R_E I_{L2} + j(X_{L1L2} - X_{L1E} + X_E - X_{L2E})I_{L2} + \dots \\ &\quad + R_E I_{S2} + j(X_{L1S2} - X_{L1E} + X_E - X_{S2E})I_{S2} + \dots \\ &\quad + R_E I_{L3} + j(X_{L1L3} - X_{L1E} + X_E - X_{L3E})I_{L3} + \dots \\ &\quad + R_E I_{S3} + j(X_{L1S3} - X_{L1E} + X_E - X_{S3E})I_{S3} + \dots \\ &\quad \vdots \\ &\quad + R_E I_{Sn} + j(X_{L1Sn} - X_{L1E} + X_E - X_{SnE})I_{Sn} \end{aligned} \quad (4)$$



Stellt man alle Maschengleichungen der Abbildung 3-2 auf und rechnet die induktiven Reaktanzen in Induktivitäten um, so erhält man Matrixgleichung (5).

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E \\ \underline{U}_{S1}^A - \underline{U}_{S1}^E \\ \underline{U}_{L2}^A - \underline{U}_{L2}^E \\ \underline{U}_{S2}^A - \underline{U}_{S2}^E \\ \underline{U}_{L3}^A - \underline{U}_{L3}^E \\ \underline{U}_{S3}^A - \underline{U}_{S3}^E \\ \vdots \\ \underline{U}_{Sn}^A - \underline{U}_{Sn}^E \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_E & & & & & & & R_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{L1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{S1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_{L2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{S2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{L3} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & & & & & R_{Sn} \end{bmatrix} \\
 + j\omega \begin{bmatrix} L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_E & & & & & & & L_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{L1L1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_{S1S1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & L_{L2L2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{S2S2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{L3L3} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & & & & & L_{SnSn} \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} (-2L_{L1E}) & (L_{L1S1} - L_{L1E} - L_{S1E}) & (L_{L1L2} - L_{L1E} - L_{L2E}) & (L_{L1S2} - L_{L1E} - L_{S2E}) & (L_{L1L3} - L_{L1E} - L_{L3E}) & (L_{L1S3} - L_{L1E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{L1Sn} - L_{L1E} - L_{SnE}) \\ (L_{S1L1} - L_{S1E} - L_{L1E}) & (-2L_{S1E}) & (L_{S1L2} - L_{S1E} - L_{L2E}) & (L_{S1S2} - L_{S1E} - L_{S2E}) & (L_{S1L3} - L_{S1E} - L_{L3E}) & (L_{S1S3} - L_{S1E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{S1Sn} - L_{S1E} - L_{SnE}) \\ (L_{L2L1} - L_{L2E} - L_{L1E}) & (L_{L2S1} - L_{L2E} - L_{S1E}) & (-2L_{L2E}) & (L_{L2S2} - L_{L2E} - L_{S2E}) & (L_{L2L3} - L_{L2E} - L_{L3E}) & (L_{L2S3} - L_{L2E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{L2Sn} - L_{L2E} - L_{SnE}) \\ (L_{S2L1} - L_{S2E} - L_{L1E}) & (L_{S2S1} - L_{S2E} - L_{S1E}) & (L_{S2L2} - L_{S2E} - L_{L2E}) & (-2L_{S2E}) & (L_{S2L3} - L_{S2E} - L_{L3E}) & (L_{S2S3} - L_{S2E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{S2Sn} - L_{S2E} - L_{SnE}) \\ (L_{L3L1} - L_{L3E} - L_{L1E}) & (L_{L3S1} - L_{L3E} - L_{S1E}) & (L_{L3L2} - L_{L3E} - L_{L2E}) & (L_{L3S2} - L_{L3E} - L_{S2E}) & (-2L_{L3E}) & (L_{L3S3} - L_{L3E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{L3Sn} - L_{L3E} - L_{SnE}) \\ (L_{S3L1} - L_{S3E} - L_{L1E}) & (L_{S3S1} - L_{S3E} - L_{S1E}) & (L_{S3L2} - L_{S3E} - L_{L2E}) & (L_{S3S2} - L_{S3E} - L_{S2E}) & (L_{S3L3} - L_{S3E} - L_{L3E}) & (-2L_{S3E}) & \dots & (L_{S3Sn} - L_{S3E} - L_{SnE}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (L_{SnL1} - L_{SnE} - L_{L1E}) & & & & & & & (-2L_{SnE}) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{S1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{S2} \\ \underline{I}_{L3} \\ \underline{I}_{S3} \\ \vdots \\ \underline{I}_{Sn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Im Ergebnisvektor der Matrixgleichung (5) sind die Längsspannungsabfälle aller Leiter angeführt und könnten demnach unter Berücksichtigung der induktiven Beeinflussung prinzipiell berechnet werden. Es sind jedoch im Eingangsvektor \underline{I}_n nur die Ströme, die in den Phasen fließen (Lastströme, abhängig von der aktuellen Übertragungsleistung der Leitung) bekannt, nicht jedoch die induzierten Kabelschirmströme. Somit sind für die numerische Berechnung der Längsspannungsabfälle aller Leiter weitere Schritte nötig.



Im nächsten Schritt wird Matrixgleichung (5) partitioniert. Nach der Partitionierung erhält man die nachfolgende Matrixgleichung (6), bei der die bekannten und unbekannt Ströme im Eingangsvektor \underline{I}_n untereinander angeordnet sind. Man erkennt, dass die linken oberen Teilmatrizen nur Größen der Phasen (Selbst- und Koppelinduktivitäten, Indizes L) und die rechten unteren Teilmatrizen nur Größen der Kabelschirme (Selbst- und Koppelinduktivitäten, Indizes S) enthalten. Ausgenommen hiervon sind die jeweils vollbesetzten Erdwiderstandsmatrix und die Erdinduktivitätsmatrix. Die beiden anderen Teilmatrizen der Koppelinduktivitätsmatrix bestehen aus Koppelinduktivitäten zwischen Phasen und Kabelschirmen.

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{L1}^A - \underline{U}_{L1}^E \\ \underline{U}_{L2}^A - \underline{U}_{L2}^E \\ \underline{U}_{L3}^A - \underline{U}_{L3}^E \\ \vdots \\ \underline{U}_{Ln}^A - \underline{U}_{Ln}^E \\ \underline{U}_{S1}^A - \underline{U}_{S1}^E \\ \underline{U}_{S2}^A - \underline{U}_{S2}^E \\ \underline{U}_{S3}^A - \underline{U}_{S3}^E \\ \vdots \\ \underline{U}_{Sn}^A - \underline{U}_{Sn}^E \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_E & R_E & R_E & \dots & R_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{L1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{L2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_{L3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R_{Ln} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ R_{S1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{S2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_{S3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R_{Sn} \end{bmatrix} \\
 + j\omega \begin{bmatrix} L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_E & L_E & L_E & \dots & L_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{L1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_{L2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & L_{L3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & L_{Ln} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{S1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_{S2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & L_{S3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & L_{Sn} \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} (-2L_{L1E}) & (L_{L1L2} - L_{L1E} - L_{L2E}) & (L_{L1L3} - L_{L1E} - L_{L3E}) & \dots & (L_{L1Ln} - L_{L1E} - L_{LnE}) \\ (L_{L2L1} - L_{L2E} - L_{L1E}) & (-2L_{L2E}) & (L_{L2L3} - L_{L2E} - L_{L3E}) & \dots & \vdots \\ (L_{L3L1} - L_{L3E} - L_{L1E}) & (L_{L3L2} - L_{L3E} - L_{L2E}) & (-2L_{L3E}) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (L_{LnL1} - L_{LnE} - L_{L1E}) & \vdots & \vdots & \dots & (-2L_{LnE}) \\ (L_{S1L1} - L_{S1E} - L_{L1E}) & (L_{S1L2} - L_{S1E} - L_{L2E}) & (L_{S1L3} - L_{S1E} - L_{L3E}) & \dots & (L_{S1Ln} - L_{S1E} - L_{LnE}) \\ (L_{S2L1} - L_{S2E} - L_{L1E}) & (L_{S2L2} - L_{S2E} - L_{L2E}) & (L_{S2L3} - L_{S2E} - L_{L3E}) & \dots & \vdots \\ (L_{S3L1} - L_{S3E} - L_{L1E}) & (L_{S3L2} - L_{S3E} - L_{L2E}) & (L_{S3L3} - L_{S3E} - L_{L3E}) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (L_{SnL1} - L_{SnE} - L_{L1E}) & \vdots & \vdots & \dots & (L_{SnLn} - L_{SnE} - L_{LnE}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_{L1S1} - L_{L1E} - L_{S1E}) & (L_{L1S2} - L_{L1E} - L_{S2E}) & (L_{L1S3} - L_{L1E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{L1Sn} - L_{L1E} - L_{SnE}) \\ (L_{L2S1} - L_{L2E} - L_{S1E}) & (L_{L2S2} - L_{L2E} - L_{S2E}) & (L_{L2S3} - L_{L2E} - L_{S3E}) & \dots & \vdots \\ (L_{L3S1} - L_{L3E} - L_{S1E}) & (L_{L3S2} - L_{L3E} - L_{S2E}) & (L_{L3S3} - L_{L3E} - L_{S3E}) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (L_{LnS1} - L_{LnE} - L_{S1E}) & (-2L_{LnE}) & (L_{LnS2} - L_{LnE} - L_{S2E}) & \dots & (L_{LnSn} - L_{LnE} - L_{SnE}) \\ (-2L_{S1E}) & (L_{S1S2} - L_{S1E} - L_{S2E}) & (L_{S1S3} - L_{S1E} - L_{S3E}) & \dots & (L_{S1Sn} - L_{S1E} - L_{SnE}) \\ (L_{S2S1} - L_{S2E} - L_{S1E}) & (-2L_{S2E}) & (L_{S2S3} - L_{S2E} - L_{S3E}) & \dots & \vdots \\ (L_{S3S1} - L_{S3E} - L_{S1E}) & (L_{S3S2} - L_{S3E} - L_{S2E}) & (-2L_{S3E}) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (L_{SnS1} - L_{SnE} - L_{S1E}) & \vdots & \vdots & \dots & (-2L_{SnE}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{L1} \\ L_{L2} \\ L_{L3} \\ \vdots \\ L_{Ln} \\ L_{S1} \\ L_{S2} \\ L_{S3} \\ \vdots \\ L_{Sn} \end{bmatrix} \quad (6)$$



Matrixgleichung (6) kann nach der Partitionierung und unter Berücksichtigung der Gleichung (7)

$$\Delta \underline{U}_{L,S} = \underline{U}_{L,S}^A - \underline{U}_{L,S}^E \quad (7)$$

vereinfacht wie folgt angeschrieben werden

$$\begin{pmatrix} \Delta \underline{U}_L \\ \Delta \underline{U}_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [R_E] & [R_E] \\ [R_E] & [R_E] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [R_L] & [0] \\ [0] & [R_S] \end{bmatrix} + j\omega \left(\begin{bmatrix} [L_E] & [L_E] \\ [L_E] & [L_E] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_L] & [0] \\ [0] & [L_S] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{LL}] & [L_{LS}] \\ [L_{SL}] & [L_{SS}] \end{bmatrix} \right) \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_S \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \underline{U}_L \\ \Delta \underline{U}_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_{LL}] & [\underline{Z}_{LS}] \\ [\underline{Z}_{SL}] & [\underline{Z}_{SS}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_S \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\Delta \underline{U}_{L,S} = \begin{pmatrix} \Delta \underline{U}_L \\ \Delta \underline{U}_S \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_{LL}] & [\underline{Z}_{LS}] \\ [\underline{Z}_{SL}] & [\underline{Z}_{SS}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\underline{I}_{L,S} = \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_S \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\Delta \underline{U}_{L,S} = \underline{Z} \underline{I}_{L,S} \quad (13)$$

Gemäß oben angeführter Herleitung besteht die Impedanzmatrix Z für einen Abschnitt des in Abbildung 3-1 dargestellten Drehstromkabelsystems aus der vollbesetzten Erdwiderstandsmatrix, der Diagonalmatrix der Gleichstromwiderstandsmatrix aller Leiter, der vollbesetzten Erdinduktivitätsmatrix, der Diagonalmatrix der Leiterinduktivitäten und der vollbesetzten Koppelinduktivitätsmatrix.

$$[\underline{Z}_{LL}] = [R_E] + [R_L] + j\omega([L_E] + [L_L] + [L_{LL}]) \quad (14)$$

$$[\underline{Z}_{SS}] = [R_E] + [R_S] + j\omega([L_E] + [L_S] + [L_{SS}]) \quad (15)$$

$$[\underline{Z}_{LS}] = [R_E] + j\omega([L_E] + [L_{LS}]) \quad (16)$$

$$[\underline{Z}_{SL}] = [R_E] + j\omega([L_E] + [L_{SL}]) = [\underline{Z}_{LS}] \quad (17)$$



Sind die Kabelschirme an beiden Enden geerdet, so ist sowohl \underline{U}_S^A als auch \underline{U}_S^E gleich Null und dementsprechend der Längsspannungsabfall $\Delta \underline{U}_S$ gleich Null. Damit können mit der zweiten Zeile der Matrixgleichung (9) die Kabelschirmströme \underline{I}_S , die durch die induktive Kopplung aller Leiter unter Berücksichtigung der Verlegeanordnung, als Funktion der Phasenströme \underline{I}_L , mit der nachfolgenden Beziehung berechnet werden.

$$(\underline{I}_S) = -[\underline{Z}_{SS}]^{-1}[\underline{Z}_{SL}](\underline{I}_L) \quad (18)$$

Die Berücksichtigung der Verlegeanordnung, der Leitereigenschaften, der Bodenbeschaffung findet in der Berechnung der Selbst- und der Koppelimpedanzen ihren Niederschlag. Durch das Einsetzen der Matrixgleichung (18) in die Matrixgleichung (9) kann man das 6-Leitersystem faktisch zu einem 3-Leitersystem reduzieren. Die Fachliteratur bezeichnet diesen Schritt als Modifikation der Leitungsparameter.

$$(\Delta \underline{U}_L) = ([\underline{Z}_{LL}] - [\underline{Z}_{LS}][\underline{Z}_{SS}]^{-1}[\underline{Z}_{SL}])(\underline{I}_L) \quad (19)$$

$$(\Delta \underline{U}_L) = [\underline{Z}^*](\underline{I}_L) \quad (20)$$

Entsprechend können die Längsspannungsabfälle mit der modifizierten Leitungsparametermatrix \underline{Z}^* gemäß Matrixgleichung (20) berechnet werden. Es handelt sich hierbei um die Längsspannungsabfälle eines Abschnittes der Abbildung 3-1, mit einer bestimmten Länge. Auf die üblicherweise verwendete Nomenklatur eines Hochkommata für die Kennzeichnung von Belägen (längenbezogenen Größen) wurde hier aufgrund der Lesbarkeit verzichtet.

Die Berechnung der induzierten Spannungen einseitig geerdeter Leiter bzw. der induzierten Ströme zweiseitig geerdeter Leiter für eine komplette, das heißt aus mehreren Abschnitten bestehende Leitung erfolgt analog zur oben dargestellten Vorgangsweise, wobei für jeden Abschnitt eine eigene Impedanzmatrix zu berechnen ist. Die Gesamtimpedanzmatrix der Leitung wird durch Summation der Einzel-Impedanzmatrizen gebildet.

$$\underline{Z}_G = \sum_{i=1}^n i \underline{Z} \quad (21)$$



3.1.1 Unterteilung einer Kabelleitung in Berechnungsabschnitte

Wie oben gezeigt, ist für die Berechnung der resultierenden Spannungs- und Stromverteilung aufgrund der wechselseitigen ohmsch-induktiven Beeinflussung von parallel verlaufenden Kabelleitungen die Beschreibung der Leitungskonfiguration durch die Impedanzmatrix notwendig.

Somit stellt das nachfolgend dargestellte ohmsche Gesetz und die darin enthaltene Impedanzmatrix das grundlegendste Element dieser Arbeit dar.

$$\begin{pmatrix} \Delta \underline{U}_L \\ \Delta \underline{U}_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{Z}_{LL}] & [\underline{Z}_{LS}] \\ [\underline{Z}_{SL}] & [\underline{Z}_{SS}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{I}_L \\ \underline{I}_S \end{pmatrix} \quad (22)$$

Die Hauptdiagonale der Impedanzmatrix ist mit den Selbstimpedanzen der Leiter-Erde-Schleifen und die Nebenelemente mit den Koppelimpedanzen der jeweiligen Leiter-Erde-Schleifen besetzt. Im nachfolgenden Kapitel 3.2.2.2 sind die angewandten Berechnungsvorschriften für die Bestimmung der einzelnen Selbst- und Koppelimpedanzen angeführt. Hierfür ist die Kenntnis über sämtliche relevanten Parameter der Leitung nötig. Diese Parameter ändern sich entlang einer Kabelleitung in der Realität immer wieder. Daher wird ein neuer Berechnungs-Unterabschnitt immer dann definiert, sobald sich einer der nachfolgend angeführten Parameter entlang einer Leitung ändert.

- Kabeltype,
- Kabelanordnung,
- Verlegetiefe,
- Verdrillung der Phasen,
- Crossbonding der Kabelschirme,
- Erdung der Kabelschirme,
- Spezifischer (elektrischer) Bodenwiderstand,
- zusätzliche Begleiterder.

Nicht nur die beeinflussende Leitung, sondern auch die beeinflusste Leitung muss bei Änderungen von relevanten Parametern unterteilt werden. Für die Durchführung von Beeinflussungsrechnungen einer konkreten Kabelleitung kann die Anzahl der Berechnungs-Unterabschnitte ein Vielfaches höher sein als die Anzahl der Hauptabschnitte. Abbildung 4-8 zeigt das Längs-Verlegeprofil einer Kabelleitung mit vier Hauptabschnitten, jedoch mit 36 Berechnungsabschnitten.

3.2 Berechnung der induktiven Beeinflussung bei mehrfach geerdeten Leitungen

3.2.1 Einführendes zu Vierpolen und zur Kettenmatrix

Bevor die entwickelte Methode für das Berechnen der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen unter Berücksichtigung von Crossbonding und mehrfacher Erdung der Kabelschirme und/oder anderer zu berücksichtigender Leiter unter Anwendung der Kettenmatrizen beschrieben wird, wird in diesem Unterkapitel eine kurze Einführung zu Vierpolen und Kettenmatrizen gegeben.

Symmetrisch aufgebaute und symmetrisch betriebene Drehstromnetze lassen sich, unabhängig von der Verschaltung und Verkopplung der Leiter, durch Vierpole beschreiben, was unter anderem in [16] nachgelesen

werden kann. Daher ist es sinnvoll, die Vierpoltheorie bzw. allgemeiner ausgedrückt die Netzwerktheorie für die Beschreibung und Analyse der elektroenergie-technischen Übertragungsglieder (Kabel, Freileitungen, Transformatoren) heranzuziehen.



Abbildung 3-3: Vierpol

Bei grundsätzlichen Analysen eines alleinstehenden Vierpols wird im Allgemeinen ein symmetrisches Zählpfeilsystem verwendet. Hierbei sind sowohl das Erzeuger- (EVS) als auch das Verbraucher-Zählpfeilsystem (VVS) möglich, wobei das VVS üblicherweise verwendet wird. Symmetrisch heißt in diesem Fall, dass die Zählpfeile auf beiden Seiten des Vierpols spiegelgleich sind. In der Abbildung 3-3 ist ein Vierpol mit einem gemischten Pfeilsystem mit Kettenpfeilrichtung [17] dargestellt. Beim Zusammenschalten aller Längs- und Querabschnitte einer Kabelleitung entspricht das Ende (Index E) eines Mehrpoles dem Anfang (Index A) des nächsten Mehrpoles. Daher ist es zielführend und ratsam, das in der Abbildung 3-3 dargestellte Pfeilsystem, für die Berechnung der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen unter Berücksichtigung mehrfacher Erdungen von Kabelschirmen, zu verwenden.

Die allgemeine Kettenmatrix-Lösung für den in Abbildung 3-3 dargestellten Vierpol mit dem angeführten Zählpfeilsystem lautet

$$\begin{pmatrix} \underline{U}^A \\ \underline{I}^A \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}^E \\ -\underline{I}^E \end{pmatrix} \quad (23)$$

wobei die Kettenmatrix-Elemente mit den nachfolgenden Formeln aus den Impedanzmatrix-Elementen berechnet werden können.

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} \quad (24)$$

$$\underline{A}_{12} = \frac{\det Z}{\underline{Z}_{21}} \quad (25)$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_{21}} \quad (26)$$

$$\underline{A}_{22} = \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} \quad (27)$$

Für eine weiterführende Einführung in die Thematik der Vierpole kann u. a. [17] empfohlen werden.



3.2.2 Mehrfacherdungen von Kabelschirmen und/oder anderen zu berücksichtigenden Leitern

Durch die Notwendigkeit, die Zusatzverluste von Kabelsystemen im Normalbetrieb so gering wie möglich zu halten, ist es beim Einsatz der AC Kabeltechnologie in der Hoch- und Höchstspannungsebene üblich, ein sogenanntes Crossbonding der Kabelschirme durchzuführen. Das bedeutet, dass die Kabelschirme in den Muffenstellen verdreht (siehe Abbildung 3-4) und entweder über Überspannungsableiter oder an ausgewählten Stellen, unter Berücksichtigung der Symmetrie, direkt mit der Erdungsanlage der Muffenstelle verbunden werden. Im Normalbetrieb ist der Überspannungsableiter hochohmig und der Kabelschirm de facto von der Erdungsanlage isoliert. Im Fehlerfall können die induzierten Spannungen aufgrund der sehr hohen beeinflussenden Kurzschlussströme (bis zu einigen 10 kA) sehr hohe Werte erreichen. Die eingesetzten Überspannungsableiter begrenzen diese Spannungen auf das zulässige Niveau der Isolierfähigkeit der äußeren Kabelschirmsolation. Die im Kapitel 3.1 dargestellte Vorgangsweise für die Berechnung der induktiven Beeinflussung setzt voraus, dass zu berücksichtigende Leiter (Kabelschirme, Begleiterder, ...) nicht zusätzlich zur Erdung am Anfang und am Ende des jeweiligen Leiters an einer anderen Stelle geerdet sind (Abbildung 3-4, siehe rot strichlierte Kabelschirmerdungen).

Für die Berechnung der induzierten Spannungs- bzw. Stromverteilungen entlang von Kabelsystemen, bei denen Kabelschirme entlang der Kabelleitung mehrfach geerdet sind, wird das im Kapitel 3.2.2.2 beschriebene Simulationsmodell mit Hilfe der Matlab-Simulink Toolbox „SimPowerSystems“ entwickelt. Mit diesem Simulationsmodell ist es möglich, die bei Erdungen von Kabelschirmen und eventuell vorhandenen Begleiterdern auftretenden Alterungseffekte wie Korrosion, gelöste Verbindungsschrauben, durch chemische Reaktionen gebildete Schmierfilme an den Auflageflächen von Erdungsverbindungen bei den Berechnungen zu berücksichtigen. Prinzipiell ist jedoch eine Berücksichtigung der Querelemente, d.h. der Erdungen von Leitern auch mit der nachfolgend angeführten und in [4] veröffentlichten Methode möglich. Sie stellt eine Erweiterung der im Kapitel 3.1 vorgestellten Vorgangsweise dar und wurde für Voruntersuchungen und manuelle Berechnungen sowie für die Strukturierung der analysierten Kabelleitungen entwickelt.

3.2.2.1 Anwendung der Kettenmatrix für Voruntersuchungen und manuelle Berechnungen unter Berücksichtigung von Mehrfacherdungen von Kabelschirmen

Wie im Kapitel 3.1 beschrieben, wird für jeden einzelnen Längsabschnitt eine Impedanzmatrix Z aufgestellt. Diese wird in weiterer Folge zu einer Kettenmatrix erweitert. Die Impedanzmatrix eines, in Abbildung 3-1 dargestellten Drehstromsystems mit drei Phasen und drei Kabelschirmen besitzt eine Größe von 6×6 (siehe Matrixgleichung 1 oder 2 in [4]) wohingegen dessen Kettenmatrix eine Größe von $(6+6) \times (6+6)$ besitzt (siehe z.B. Matrixgleichung (28)), was einer Vervielfachung der Anzahl der Elemente entspricht. Wo eine Erdung der Kabelschirme stattfindet werden im nächsten Schritt Querabschnitte, wie in Abbildung 3-4 dargestellt, eingeführt.

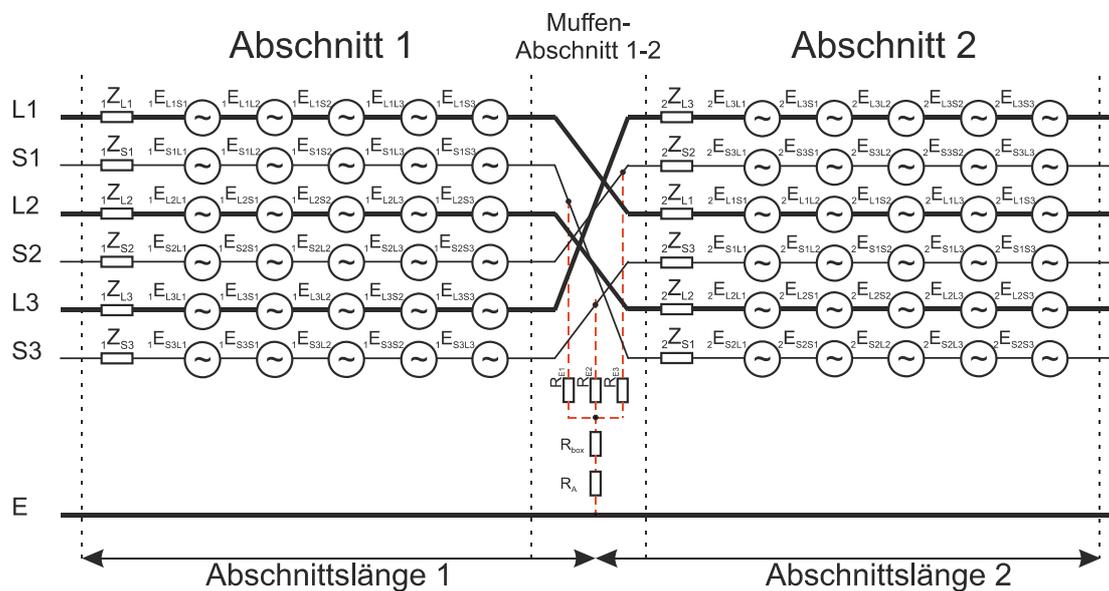


Abbildung 3-4: Ersatzschaltbild des in Abbildung 3-1 dargestellten Drehstromkabelsystems mit gegenseitig verdrehten Phasen und ausgekreuzten und geerdeten Kabelschirmen in einer Muffe [4]

In Abbildung 3-5 ist das Muffenbauwerk bzw. ein Querabschnitt einer Kabelleitung schematisch dargestellt.

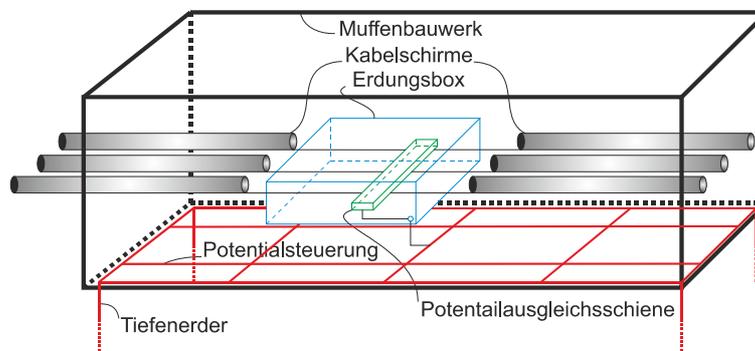


Abbildung 3-5: Muffenbauwerk bzw. Muffen-Abschnitt inkl. Kabelschirmerdungsbox und Erdungsanlage

Die in Abbildung 3-5 in blau gezeichnete „Erdungsbox“ enthält eine Schiene für die Erdung der Kabelschirme und den gleichzeitigen Potentialausgleich zwischen den Kabelschirmen und ist in Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 als PAS gekennzeichnet.



Abbildung 3-6: Erdungsbox einer Muffenstelle eines 400-kV-Kabelsystems, 3 Kabelschirme direkt geerdet, Messung eines Kontaktübergangswiderstandes

Nachfolgend ist eine Modellierungsvariante des Muffen-Abschnittes 1-2 aus der Abbildung 3-4 detailliert dargestellt und vergrößert abgebildet.

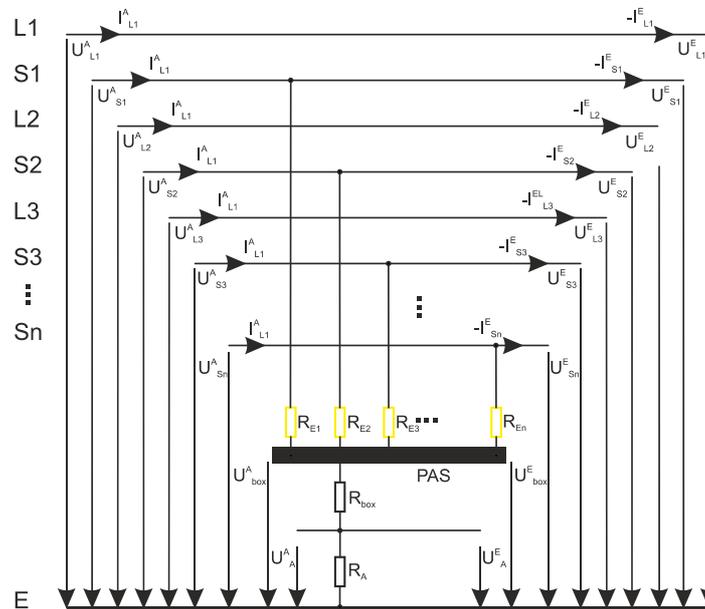


Abbildung 3-7: Modellierungsvariante 1 der Erdung von Kabelschirmen in Muffen (Muffen-Abschnitt 1-2 der Abbildung 3-4) [4]

Alternativ zur Modellierung eines Muffen-Abschnittes gemäß Abbildung 3-7 wird – entsprechend der realen physikalischen Situation (siehe Abbildung 3-6) – eine zweite Modellierungsvariante betrachtet.

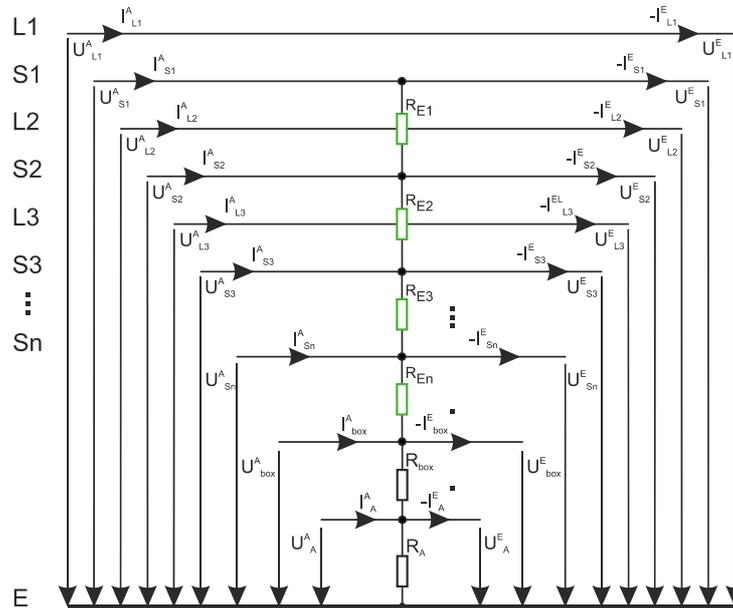


Abbildung 3-8: Modellierungsvariante 2 der Erdung von Kabelschirmen in Muffen (Muffen-Abschnitt 1-2 der Abbildung 3-4) [4]

Für die in Abbildung 3-8 dargestellte Modellierungsvariante 2 sieht die Teilmatrix A_n wie folgt aus:

$$A_n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{E1}} & 0 & -\frac{1}{R_{E1}} & 0 & 0 & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \\ 0 & -\frac{1}{R_{E1}} & 0 & \frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} & 0 & -\frac{1}{R_{E2}} & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_{E2}} & 0 & \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} & -\frac{1}{R_{E3}} & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & & & \\ & & & & & & -\frac{1}{R_{E3}} & \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{R_{box}} & -\frac{1}{R_{E3}} \\ 0 & & & & & & -\frac{1}{R_{box}} & \frac{1}{R_{box}} + \frac{1}{R_A} \end{pmatrix} \quad (31)$$

Geht man davon aus, dass die, in beiden Modellierungsvarianten vorkommenden Kontaktübergangswiderstände als gleich angenommen werden, so unterscheiden sich die beiden Varianten in ihren Berechnungsergebnissen insbesondere dort, wo es durch einen Parallelbetrieb mehrerer Kabelsysteme zu Summenströmen kommt. Beim Vergleich der beiden Varianten (siehe Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8) erkennt man, dass die Kabelschirme bei der Modellierungsvariante 2 direkt über eine Impedanz, die in der Praxis sehr gering ist (idealerweise ein- bis zweistelliger mΩ-Bereich), miteinander verbunden sind. Es handelt sich bei den, in den Abbildung 3-8 dargestellten Widerständen um Kontaktübergangswiderstände zwischen den Kabelschirmleitern und den Kabelschuhen sowie zwischen den Kabelschuhen und der Erdungs- bzw. Potentialausgleichschiene, die sich bei Höchstspannungs-Kabelsystemen üblicherweise in einer Crossbonding- oder Erdungsbox befindet und in der Abbildung 3-6 dargestellt ist.



Bei Höchstspannungs-Kabelanlagen werden diese Übergangswiderstände in regelmäßigen Abständen bei Wartungsarbeiten, wie in Abbildung 3-6 ersichtlich, messtechnisch erfasst und bei Bedarf durch geeignete Maßnahmen, wie reinigen bzw. anschleifen der Kontaktflächen und nachziehen der Schraubverbindungen verringert. Bei der Modellierungsvariante 1 sind die Kabelschirme über zwei Erdungsimpedanzen miteinander verbunden. Für theoretisch-wissenschaftliche Untersuchungen besitzen beide Modellierungsvarianten ihre Daseinsberechtigung, da man mit der Modellierungsvariante 1 beispielsweise die Auswirkungen des Anstieges der Erdungsimpedanz eines einzigen Kabelschirmes untersuchen kann. In weiterer Folge wird die Modellierungsvariante 1 (siehe Abbildung 3-7) wegen der plausibleren Nachbildung der realen Situation von Muffen-Abschnitten angewendet.

Betrachtet man die Längsverlegeprofile der untersuchten Kabelleitungen (Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-8), so erkennt man, dass die Kabelschirme zusammen mit den Erdungsimpedanzen der Muffenstellen sogenannte Kettenleiter bilden. Bei der Modellierung von Leitungssystemen (Freileitungen und Kabel), die immer wieder entlang ihres Verlaufes geerdet werden, spricht man in der Fachliteratur daher von Eingangs- oder Kettenleiterimpedanzen. In Ersatzschaltbildern für stationäre Zustände sind Kettenleiter von einer betrachteten Stelle aus (Fehlerstelle entlang einer Leitung oder Umspannwerk) mit der jeweiligen Eingangs- bzw. Kettenleiterimpedanz darstellbar. Die Bestimmung der sogenannten Eingangs- bzw. Kettenleiterimpedanz von Kettenleitern stellt heutzutage eine lösbare messtechnische Herausforderung dar. Wechselstrom-Höchstspannungs-Kabelsysteme werden vor allem in urbanen und innerstädtischen Gebieten eingesetzt, um beispielsweise Umspannwerke, die sich im städtischen Bereich befinden an die Höchstspannungs-Netzebene anzubinden. Die messtechnische Bestimmung der Erdungsimpedanzen von einzelnen Muffenstellen in dicht besiedelten Gebieten, stellt eine praktisch nicht lösbare Herausforderung dar, da man im urbanen und städtischen Bereich de facto keine unbeeinflussten Erdungsanlagen mehr vorfindet, die jedoch für die Durchführung von Messungen notwendig sind. Wie in [18] ausführlich dargestellt, werden üblicherweise, aufgrund fehlender oder unzureichender Angaben bzw. Messwerten anstatt der eigentlich komplexen Eingangs- oder Kettenleiterimpedanz ohmsche Widerstände verwendet. Für die vorliegende Dissertation wurde dieser Ansatz ebenfalls gewählt. Gemäß [18] bringt dies nur eine unwesentliche Ungenauigkeit mit sich und führt auf der anderen Seite zu einer erhöhten Sicherheit bzgl. Erdspannungen im Bereich der Muffen mit sich. Der Einfluss der Widerstände (Kontaktübergangswiderstände, Widerstände der Erdungsboxen und Ausbreitungswiderstände der Muffen-Erdungsanlagen) auf die Thematik der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen wurde ausführlich analysiert und ist in den entsprechenden Abbildungen des Kapitels 5 sowie im Anhang grafisch dargestellt.



Nachdem alle Längs- und Querabschnitte eines Kabelsystems mathematisch beschrieben sind, d.h. nachdem die Kettenmatrizen aller Abschnitte aufgestellt sind, kann die Gesamtkettenmatrix A_G mit der nachfolgenden Gleichung berechnet werden

$$\underline{A}_G = \prod_{i=1}^k \underline{A}_i \quad (32)$$

Gemäß Gleichung (32) wird die elektrische Zusammenschaltung aller Abschnitte eines elektrischen Energieübertragungssystems, die elektrisch kurze Leitungen darstellen, durch eine Multiplikation aller k Abschnittskettenmatrizen durchgeführt.

Mit Hilfe der in diesem Kapitel vorgestellten Vorgangsweise, das heißt, durch Zerlegung einer Kabelleitung in einzelne Abschnitte, Erstellung von Impedanzmatrizen für jeden Längsabschnitt, Erweiterung der Impedanz- zu Kettenmatrizen und Aufstellung der Kettenmatrizen für alle Querabschnitte sowie der Multiplikation aller Kettenmatrizen, ist es möglich, die nachfolgend angeführten Einflussfaktoren der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelleitungen zu berücksichtigen:

- Erdungsverhältnisse von in Wartung befindlichen (außer Betrieb) Kabelsystemen (Phasen und Kabelschirme),
- Verdrillung der Phasen,
- Crossbonding der Kabelschirme,
- Längs- und Querverlegeanordnungen,
- Spezifischer elektrischer Erdbodenwiderstand ρ ,
- Optional vorhandene Begleit- und Kompensationsleiter.

3.2.2.2 Anwendung eines Simulink-Modells für die Berücksichtigung von Mehrfacherdungen von Kabelschirmen und anderen vorhandenen Leitern

In der nachfolgenden Abbildung 3-9 ist der Kerninhalt des Blockes „Kabelsystem“, des in der Abbildung 3-11 dargestellten Simulationsmodells angegeben. Es handelt sich hierbei um eine beispielhafte 400-kV-Kabelleitung, die aus vier Drehstromsystemen (DS 1 bis DS 4) und 12 Abschnitten mit einer Gesamtlänge von 12 km besteht.

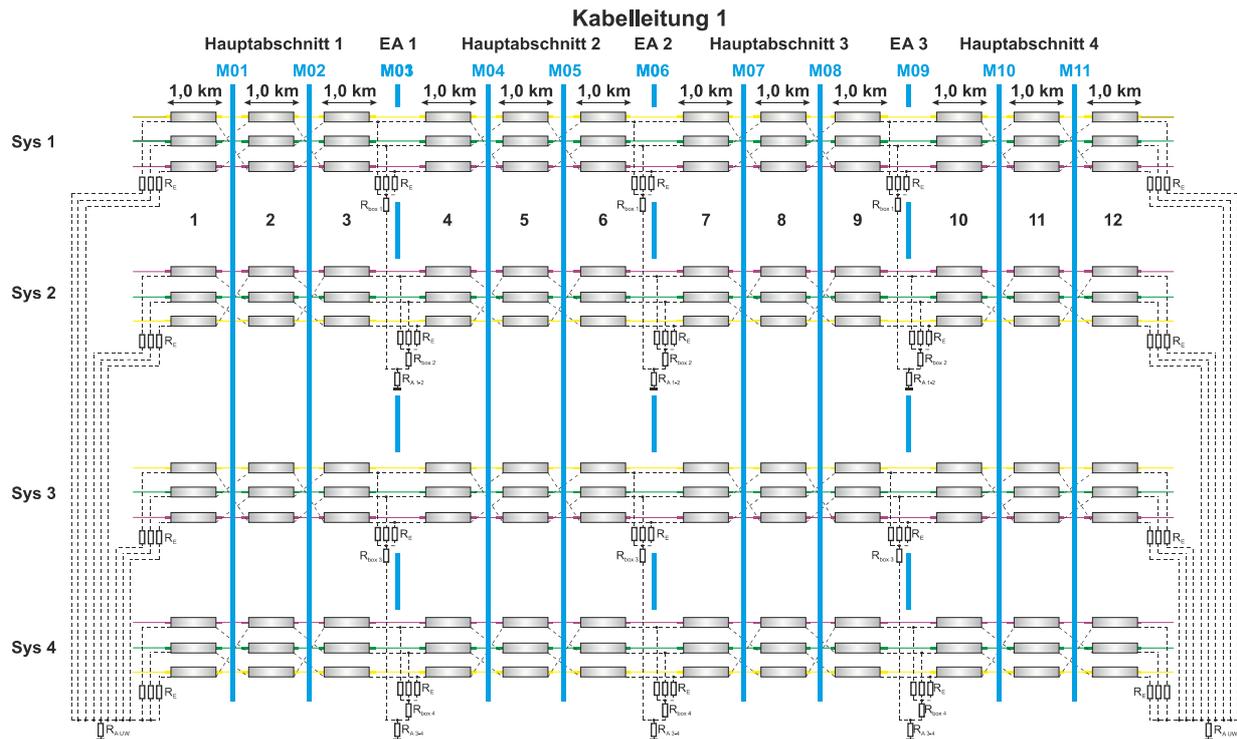


Abbildung 3-9: Beispielhafte 400-kV-Kabelleitung als Inhalt des Simulationsmodells

Die Realisierung der oben dargestellten 400-kV-Kabelleitung in Matlab-Simulink ist in Abbildung 3-10 dargestellt, wobei im unteren Teil der Abbildung eines der vier oben dargestellten Drehstromsysteme als Legende zur einfacheren Interpretation angefügt ist. Das Simulationsmodell wird mit Hilfe von Elementen aus der Simulink Bibliothek „SimPowerSystems“ erstellt. Der nachfolgend abgebildete Inhalt des Blockes „Kabelsystem“ (siehe Abbildung 3-11) besteht, entsprechend der oben abgebildeten 400-kV-Kabelleitung aus vier Hauptabschnitten, wobei sich jeder Hauptabschnitt aus drei Abschnitten zusammensetzt. Die Phasen sind in abgebildeten Fall nicht verdreht. Für die Kabelschirme wird das Crossbonding durchgeführt. Die Kabelschirme sind in den drei Erdungsabschnitten über Kontaktübergangs-, Boxen und Ausbreitungswiderstände der Muffen-Erdungsanlagen geerdet.

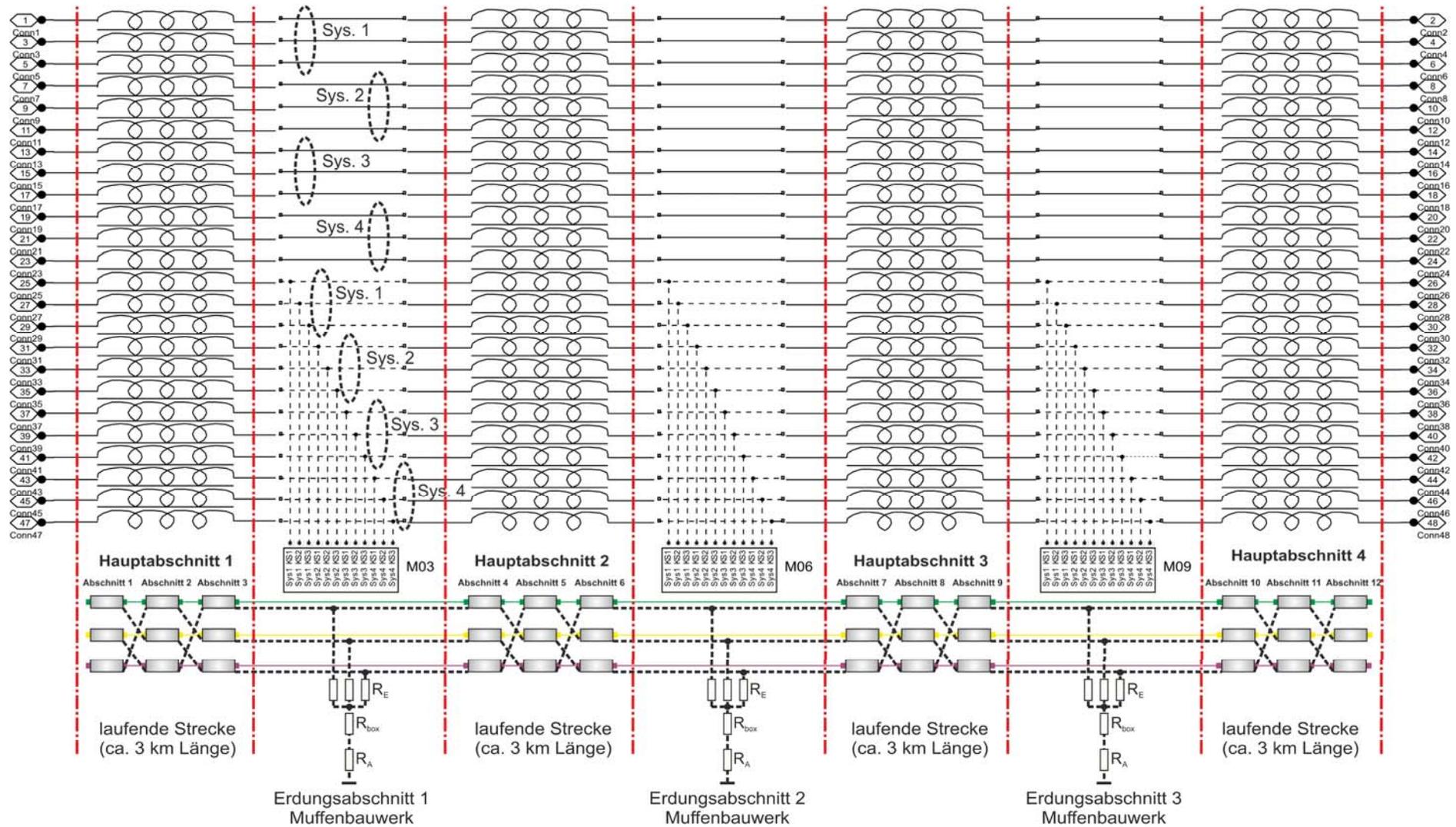


Abbildung 3-10: Simulink-Modell Kabelsystem

Wenn man das oben angeführte bzw. beschriebene Modell mit den Quellen und Leitungsabschlüssen (Lasten/Erdungen) ergänzt, erhält man das, in der nachfolgenden Abbildung 3-11 gezeigte vollständige Simulationsmodell.

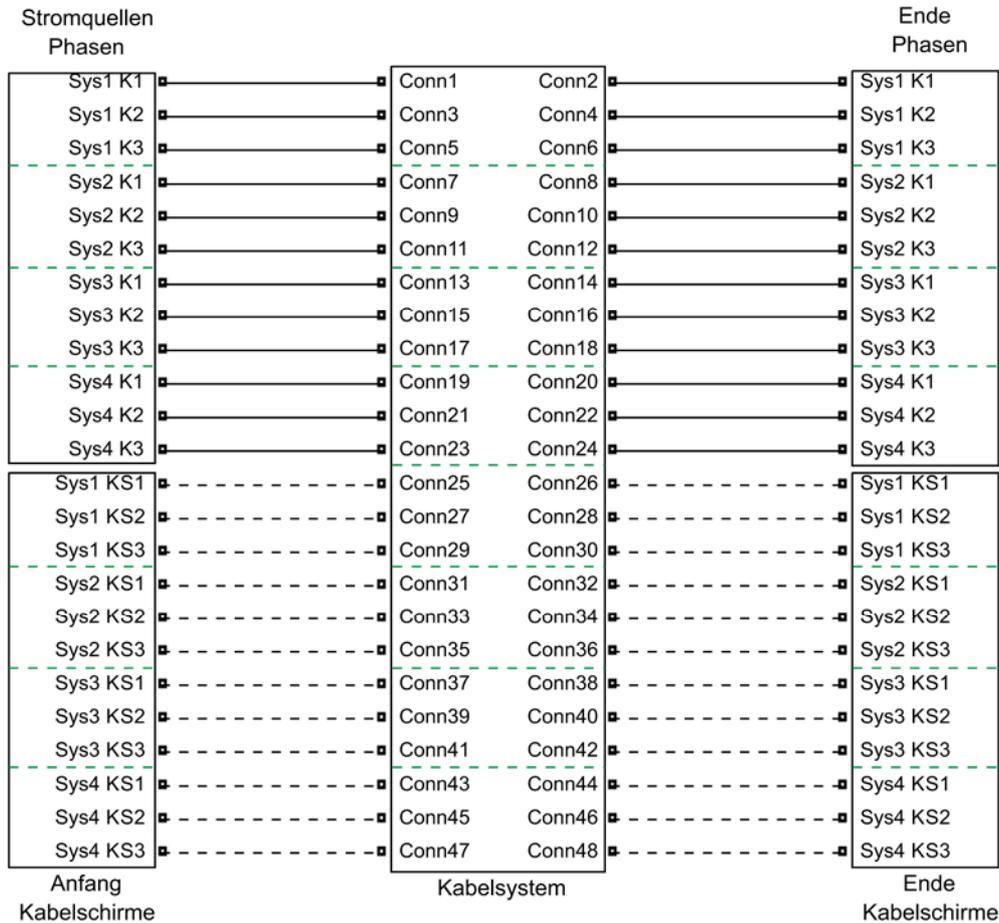


Abbildung 3-11: Blockschaltbild Simulink-Modell

Phasen sind mit durchgezogenen und Kabelschirme mit strichlierten Linien dargestellt. Der Block bzw. das Subsystem *Quellen Phasen* beinhaltet die, für die Anspeisung der Phasen benötigten Quellen. Die Phasen können sowohl mit Strom- als auch mit Spannungsquellen gespeist werden. Bei der Anwendung von Stromquellen werden die Phasen an den Leitungsenden im Block *Ende Phasen* geerdet und es kann eine bestimmte Stromamplitude eingepreßt werden. Das heißt, wenn der Fokus auf der Bestimmung von induzierten Kabelschirm-Spannungen und -Strömen liegt, so bietet die Anwendung von Stromquellen den Vorteil, dass die berechneten induzierten Kabelschirm-Spannungen und -Ströme auf konstante beeinflussende Ströme bezogen werden können. Wenn man jedoch, wie in der vorliegenden Arbeit auch die Summenströme ermitteln möchte, die sich bei parallel verlegten und parallel betriebenen Kabelsystemen aufgrund der wechselseitigen induktiven Beeinflussung ergeben (siehe Kapitel 5.3.1.1), so ist es notwendig Spannungsquellen im Simulationsmodell einzusetzen. Hierbei müssen die Phasen an den Leitungsenden mit, entsprechend den gewünschten beeinflussenden Strömen, ausgelegten Lasten abgeschlossen werden (siehe Abbildung 3-14).

Die Subsysteme, die in ihrer Bezeichnung entweder *Anfang* oder *Ende* beinhalten, beinhalten die notwendigen Schalt-, Widerstands-, Erdungs-, Last- und Messelemente. Im Block *Kabelsystem* ist, wie oben ausgeführt die gesamte Kabelleitung nachgebildet.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, werden für alle Berechnungsabschnitte einer Kabelleitung die Widerstands- und Induktivitätsmatrizen erstellt. Die jeweiligen, einen Hauptabschnitt bildenden Abschnitte bzw. die entsprechenden Widerstands- und Induktivitätsmatrizen werden durch Summation zu einer Widerstands- bzw. Induktivitätsmatrix addiert und von einer entsprechenden Matlab Funktion an das Simulink-Modell als Block-Parameter übergeben. Simulink (Simscape - SimPowerSystems) konstruiert gemäß [39], nach einer Validierung des Modells aus dem physikalischen System, welches vom Benutzer grafisch eingegeben wird im ersten Schritt ein elektrisches Netzwerk um es im nächsten Schritt durch gewöhnliche Differentialgleichungen abzubilden und schlussendlich im letzten Schritt das System zu lösen bzw. die gesuchten Variablen zu berechnen.

In der nachfolgenden Abbildung 3-12 sind im Detail die ersten drei Abschnitte eines Drehstromsystems der in Abbildung 3-9 abgebildeten viersystemigen Kabelleitung mit einem zusätzlichen Begleiterder, inklusive der induktiven und galvanischen Kopplungen der Leiter dargestellt. Man erkennt, dass ein Kabelschirmstrom bei dieser relativ einfachen Konfiguration bereits vier mögliche Pfade besitzt, um seinen Stromkreis zu schließen. Bei einer viersystemigen Kabelleitung ist es daher umso wichtiger die Erdungsanlagen exakt zu modellieren, um die Stromaufteilung möglichst genau berechnen zu können. Wie in Kapitel 5.4.5 beschrieben, sind die Begleiterder als isolierte Leiter modelliert und in den Erdungsabschnitten geerdet.

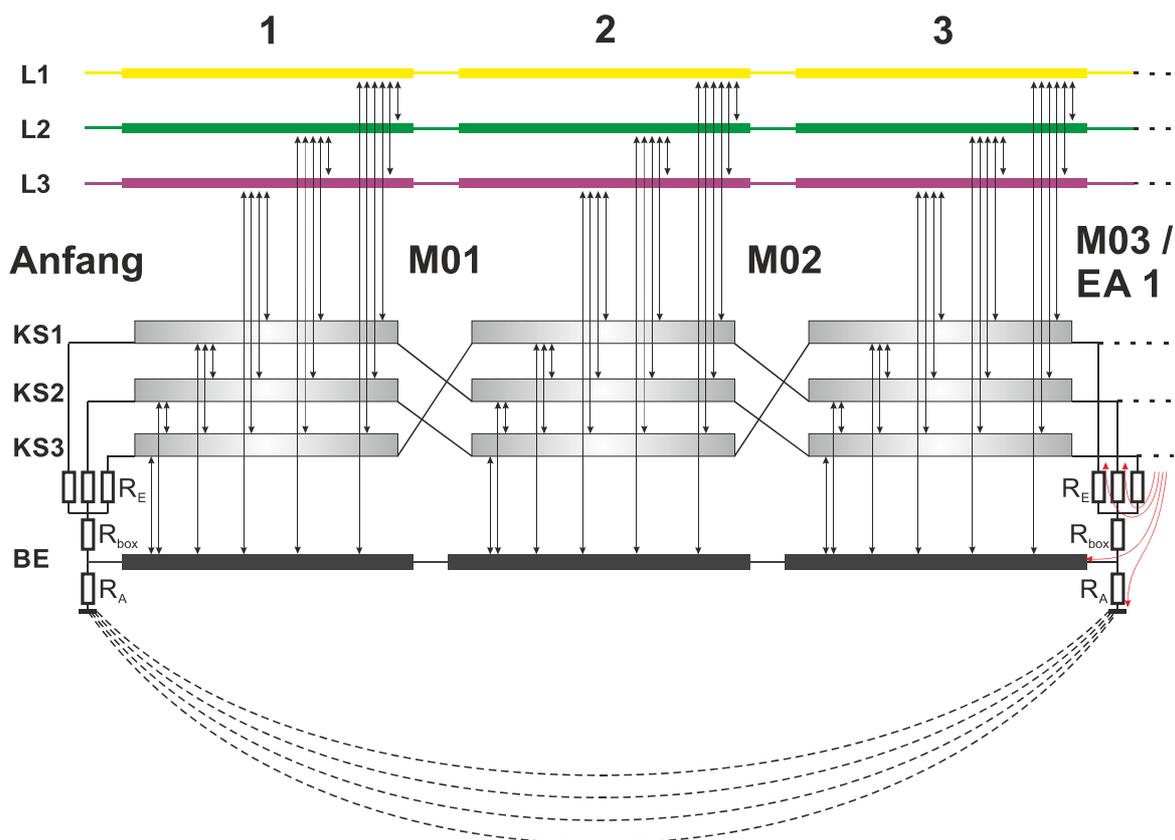


Abbildung 3-12: Detaillierte Darstellung der ersten drei Abschnitte eines Drehstromsystems inkl. induktiver und galvanischer Kopplungen

Das Crossbonding der Kabelschirme wird bei der Berechnung der Widerstands- und Induktivitätsmatrizen bereits mathematisch berücksichtigt und ist somit im Simulink-Modell nicht abgebildet. Nach dem Durchlauf einer Simulation werden die eingeschwungenen Zustände der Ergebnisse aller Phasen und Kabelschirme der Drehstromsysteme zurück an Matlab zur weiteren Bearbeitung übertragen.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen das, für die Bestimmung von resultierenden Summenströmen, die sich bei parallel verlegten und parallel betriebenen Mittelspannungs-Kabelleitungen ergeben, wenn keinerlei Maßnahmen zur Reduktion der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen getroffen werden, eingesetzte Simulationsmodell. Der in Abbildung 3-14 dargestellte Block „Subsystem“ beinhaltet die vier Drehstromkabelsysteme und sieht im Detail wie folgt aus.

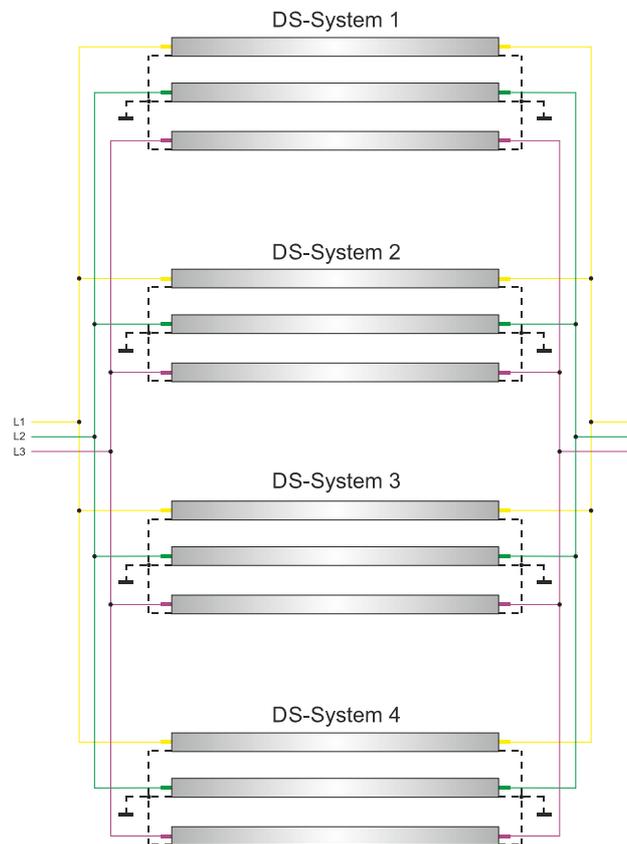


Abbildung 3-13: Detaillierte Darstellung des Blocks „Subsystem“ aus Abbildung 3-14

Die nachfolgende Abbildung 3-14 zeigt das oben vorgestellte Simulink-Modell mit allen weiteren benötigten Elementen.

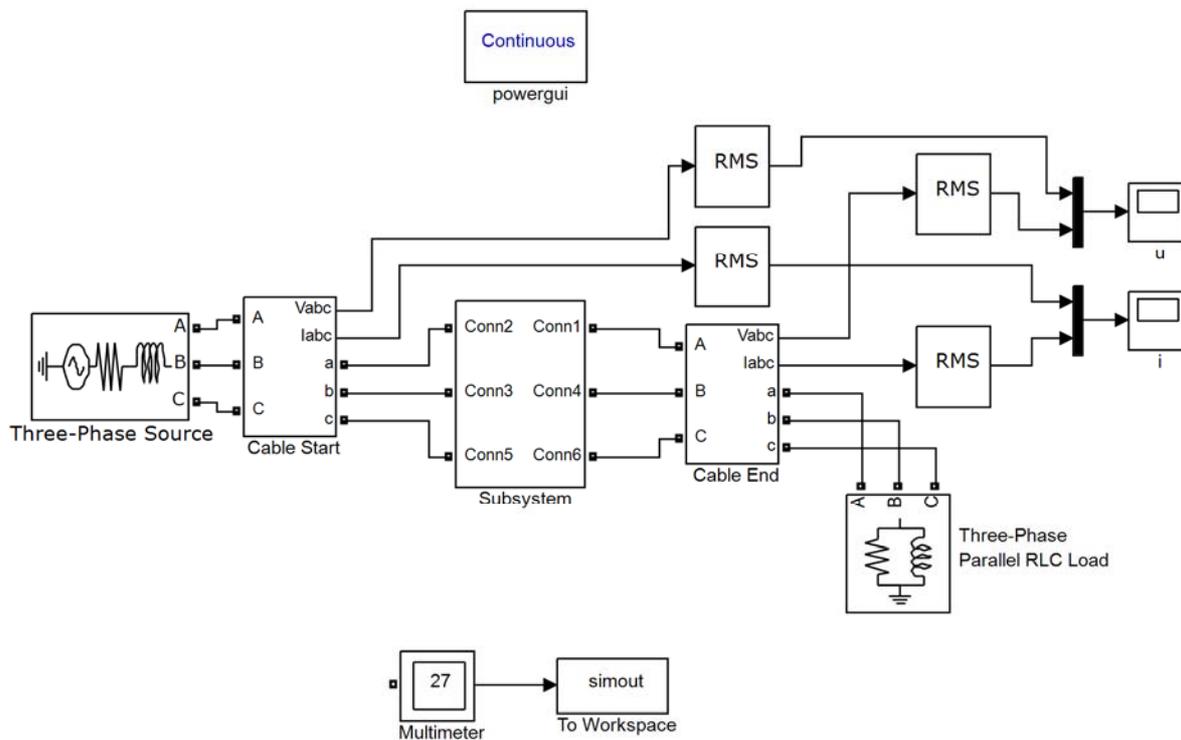


Abbildung 3-14: Simulink-Modell zur Berechnung von Summenströmen [3]

In den Auswerte-Diagrammen des Kapitels 5 sind nur die, pro Drehstromsystem, jeweils höchsten Amplituden-Werte dargestellt (worst-case Betrachtung). Diese Vorgangsweise wird zum einen aufgrund der Vielzahl an Daten pro Muffenstelle zum Zwecke der Übersichtlichkeit bzw. Darstellbarkeit und zum anderen aufgrund der Tatsache, dass für die normative Bewertung der induzierten Spannungen und Ströme bzgl. der Personen- und Anlagensicherheit die Maximalwerte von größtem Interesse sind, gewählt.

3.3 Numerische Berechnung der einzelnen Matrixelemente

3.3.1 Einführung

In der nachfolgenden Abbildung 3-15 ist die klassische Beeinflussungsanordnung zweier Leitungen dargestellt. Für die vollständige mathematische Beschreibung der induktiven Beeinflussung der beiden dargestellten Leitungen spielen die Selbst- und die Koppelimpedanzen eine wesentliche Rolle. Um die Berechnung der Imaginärteile der Impedanzen bzw. der Reaktanzen durchführen zu können, ist die Bestimmung der Induktivitäten der Leitungen notwendig. Die Induktivität einer Leitung ohne Rückleiter ist per Definition nicht bestimmbar. Daher wird bei der dargestellten Beeinflussungsanordnung sowohl für die beeinflussende als auch für die beeinflusste Leitung eine Rückleitung über das Erdreich angenommen.

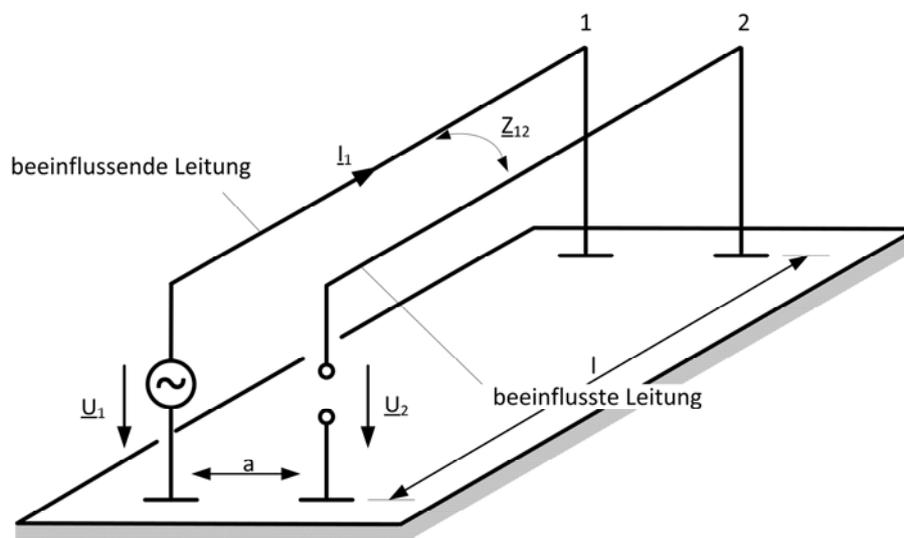


Abbildung 3-15: Beeinflussungsanordnung zweier Leitungen (eigene Darstellung nach [33])

Der beeinflussende Strom I_1 , der in der Leitung 1 fließt, induziert in der offenen Leiterschleife der beeinflussten Leitung 2 die Spannung U_2 . Bei dieser einfachen Anordnung lässt sich die induzierte Spannung aus dem Produkt des Koppelimpedanzbelags, der Länge des Parallellaufs sowie des beeinflussenden Stromes berechnen. Dementsprechend stellt die Koppelimpedanz, neben der Höhe des beeinflussenden Stromes, der die Quelle des Magnetfeldes darstellt, über das die beiden Leitungen, neben der galvanischen Kopplung über die gemeinsamen Erdrückleitung gekoppelt sind, eine bestimmende Größe dar. Die Koppelimpedanz ist im Wesentlichen von der Geometrie der Anordnung, d.h. von der Lage der gekoppelten Leiter zueinander und vom spezifischen elektrischen Bodenwiderstand sowie der Frequenz des beeinflussenden Stromes abhängig.

Sobald sich bei beeinflussten Leitungen ein geschlossener Stromkreis, wie beispielsweise bei geerdeten Kabelschirmen entweder über Erde oder über andere metallische bzw. leitfähige parallele Strompfade, wie Induktionsschleifen, Begleit- bzw. Rückleiter, Erdseile, andere geerdete Kabelschirme, PEN Leiter, Pipelines (Gas-, Wasser-, Fernwärmeleitungen) ausbildet, kommt es durch die induzierte Spannung zu einem Stromfluss. Die Höhe der induzierten Ströme ist, wie auch die induzierte Spannung maßgeblich vom beeinflussenden Strom und von der Koppelimpedanz abhängig, wobei in diesem Fall auch die Selbstimpedanzen der Leiter-schleifen als Beeinflussungsfaktor hinzukommen.

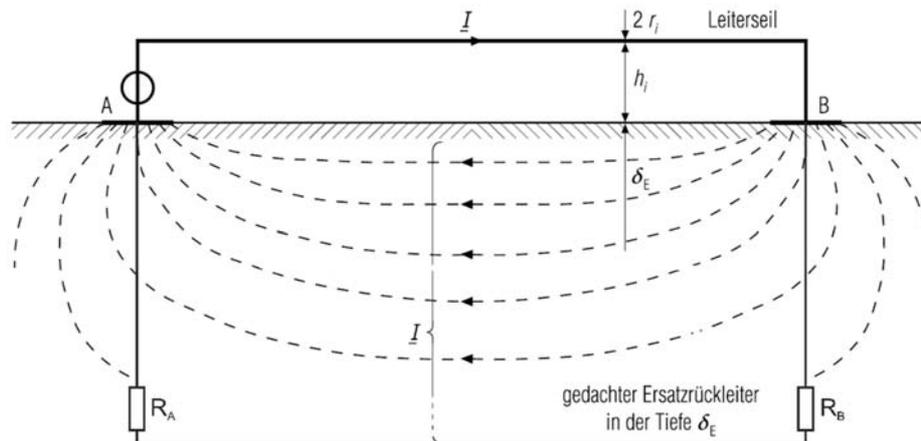


Abbildung 3-16: Seitenansicht der beeinflussenden Leitung aus Abbildung 3-15 (eigene Darstellung nach [19])

Bei ausgedehnten, komplexen Leitungssystemen, wie sie 400-kV-Kabelsysteme darstellen, spielen weitere Faktoren wie eine eventuell vorhandene Phasenverdrillung, ein Crossbonding der Kabelschirme, Erdungswiderstände der Muffenstellen, Abschnittslängen, Sternpunktbehandlung des beeinflussten Netzes (wenn es sich um beeinflusste Leitungen anderer Spannungsebenen handelt) eine Rolle. Ein unsymmetrischer Aufbau von Leitungssystemen wirkt sich jedenfalls nachteilig bzw. erhöhend auf die Amplituden der induzierten Spannungen und Ströme aus. Mit dem Begriff „unsymmetrischer Aufbau“ ist hier folgendes gemeint: unterschiedliche Abstände zwischen einzelnen Leitern und einzelnen Drehstromsystemen zueinander in den Abschnitten, unterschiedliche Abschnittslängen, unterschiedliche Erdungswiderstände von Muffenstellen, unterschiedliche spezifische Bodenwiderstände entlang der Kabelleitungen.

Für die numerische Berechnung der wechselseitigen induktiven Beeinflussung, das heißt, der induzierten Spannungen und Ströme von konkreten Kabelsystemen, ist neben der oben ausführlich dargestellten Vorgangsweise die Bestimmung der Selbst- und Koppelimpedanzen noch ausständig. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die angewendeten Formeln für die Bestimmung der Elemente der Matrizen beschrieben, wobei an dieser Stelle auf die, im Laufe der letzten Jahrzehnte zum Thema der induktiven Beeinflussung am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz durchgeführten Untersuchungen wie zum Beispiel [2], [3], [4], [32], [33], [34] verwiesen wird.

Bevor die Formeln angeführt werden, sind nachfolgend, für das Verständnis der dargestellten Vorgangsweise hilfreiche Informationen angeführt. In der einschlägigen Fachliteratur (zum Beispiel in [16]) kann nachgelesen werden, dass in der elektrischen Energietechnik Freileitungslängen bis zu 250 km und Kabellängen bis zu 50 km als elektrisch kurz angesehen werden können. Der Begriff elektrische Energietechnik impliziert hier, dass diese Ausführungen bzw. die angegebenen Werte für eine Frequenz von 50 Hz gelten. Wie in [16] weiters



angegeben, gilt eine Freileitung für Frequenzen von 5 kHz (Schaltvorgänge) schon ab einer Länge von größer 2,5 km nicht mehr als elektrisch kurz. Physikalisch ausgedrückt ist eine Leitung elektrisch kurz, wenn die Spannungsamplitude über die gesamte Länge der Leitung nahezu konstant ist, das heißt, wenn die Spannung ortsunabhängig ist.

Für Untersuchungen stationärer Zustände können in der Nieder- und Mittelspannungsebene, resultierend durch die vorkommenden Netzformen alle elektrischen Leitungen de facto als elektrisch kurz betrachtet werden. Gemäß [16] gilt dies aufgrund der engen Vermaschung des europäischen Verbundsystems auch für die meisten Leitungen der Hoch- und Höchstspannungsebene. Theoretisch wäre es also zulässig, bei Untersuchungen von Kabelsystemen, wie sie hier vorliegen, Abschnittslängen von bis zu 50 Kilometern anzuwenden, um beispielsweise mit einer Kettenschaltung dieser elektrisch kurzen Leitungen (π - oder T-Ersatzschaltbild einzelner Abschnitte mit konzentrierten Leitungselementen) eine elektrisch lange Leitung zu analysieren. Bei konkreten Berechnungen werden jedoch üblicherweise Abschnittslängen zwischen 300 m und 1300 m gewählt, da in der Regel bei Erdkabeln im Höchstspannungsbereich nach diesen Längen Muffen gesetzt werden müssen. Dies ergibt sich hauptsächlich durch die maximal zulässigen Abmessungen der Kabeltrommeln (Einhaltung des minimalen Biegeradius der Kabel, dadurch entsprechende Kabeltrommeldurchmesser, der durch den Transportweg begrenzt ist).

Bei Hoch- und Höchstspannungs-Kabelsystemen wird in den Muffen das Crossbonding der Kabelschirme und bei technischer Notwendigkeit auch die Verdrillung von Phasen durchgeführt. In der einschlägigen Fachliteratur (zum Beispiel in [16], [18] oder [19]) kann nachgelesen werden, dass bei elektrisch kurzen Leitungen, wie sie in der vorliegenden Dissertation untersucht werden der Winkel zwischen der Eingangs- und der Ausgangsspannung (im vorliegenden Fall eines Abschnittes) sehr gering ist.

Bei der Berechnung von Schleifenimpedanzen geht man in der Niederspannungsebene immer von einem elektrischen Hin- und einem elektrischen Rückleiter aus, da für die Rückleitung üblicherweise ein Null- oder Neutralleiter zur Verfügung steht. Die Höchstspannungsebene wird als Drehstrom-Dreileiternetz betrieben und besitzt somit keinen vierten elektrischen Rückleiter. Im Jahr 1926 haben J.R. Carson und F.E. Pollaczek unabhängig voneinander ihre wissenschaftlichen Untersuchungen über die Berechnung von Kopplungen elektrischer Leiter über das magnetische Feld veröffentlicht und damit die Grundlagen für weitere Untersuchungen bezüglich der induktiven Beeinflussung elektrischer Anlagen gelegt. Dabei gingen beide von unendlich langen und geraden Leitern aus. Weiters gingen sie davon aus, dass der, das magnetische Feld, über das die Anlagen induktiv gekoppelt sind, verursachende Strom über das Erdreich zur Quelle zurückfließt.

Bei Erd(kurz-)schlüssen in Kabelnetzen fließt der beeinflussende Fehlerstrom über die, hier im Fokus des Interesses stehenden Kabelschirme und nur zu einem geringen Teil über das Erdreich zurück.

Durch die Annahme einer gemeinsamen Stromrückleitung über das Erdreich handelt es sich bei der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von elektrischen Anlagen um keine rein induktive Beeinflussung, sondern aufgrund von Carsons, Pollaczeks und anderen, auf ihren Arbeiten aufbauenden Ansätzen auch um eine galvanische Kopplung der Leitungen. Diese galvanische Kopplung über die gemeinsame Erdrückleitung der induktiv gekoppelten Leiterschleifen wird gemäß [38] im Realteil der Koppelimpedanz berücksichtigt.



Der nachfolgende, kursiv dargestellte Absatz ist ein sinngemäßes Zitat aus [19], mit welchem dem Leser ein kompakter Überblick zur Thematik der Formeln von Carson und Pollaczek gegeben wird. Die zitierte Thematik ist in der angeführten Quelle im Detail behandelt.

Die von Carson und Pollaczek hergeleiteten mathematischen Formeln liefern unter der Bedingung, dass der Abstand zwischen den, sich gegenseitig beeinflussenden elektrischen Leitungen bzw. Leiterschleifen gering ist, sehr ähnliche Resultate. Wie der Abbildung 9.15a in [19] entnommen werden kann steigen mit steigender Frequenz sowohl die Selbst- als auch die Koppelresistenzbeläge wohingegen sowohl die Selbst- als auch die Koppelinduktivitätsbeläge mit steigender Frequenz fallen. D.h., dass bei Rückleitungen über Erde im Gegensatz zu Rückleitungen über einen vierten Leiter (in der Spannungsebene) sowohl die Widerstände als auch die Induktivitäten frequenzabhängig sind. Carsons Gleichungen berücksichtigen die endliche Leitfähigkeit sowie die Stromverdrängung ($R' & L' = f(f)$) in der Erde mittels unendlicher Reihen, wobei es bei der Betriebsfrequenz von $f = 50$ Hz ausreichend ist nur die ersten Glieder der sogenannten Carson-Reihen zu berücksichtigen. Bei der Betriebsfrequenz von $f = 50$ Hz, das heißt bei Abbruch der unendlichen Reihen nach den ersten Gliedern bei Carson und bei Pollaczek, gleichen die resultierenden Gleichungen einander. Eine einfachere Gleichung, dessen Abweichung der Real- und Imaginärteile der Selbst- und Koppelimpedanzen, bezogen auf Carson bei einer Betriebsfrequenz von $f = 50$ Hz bei $< 0,5$ % liegt, hat Dubanton angegeben, wobei die endliche Leitfähigkeit der Erde und die Stromverdrängung in der Erde nicht durch unendliche Reihen wie bei Carson, sondern durch einen geschlossenen Ausdruck Berücksichtigung finden. Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse der Selbst- und Koppelimpedanz (Real- und Imaginärteil) nach der Näherung von Dubanton bezogen auf Carson bleiben über einen großen Frequenzbereich bei einer bestimmten geometrischen Anordnung der gekoppelten Leiterschleifen relativ gering (bei $100 \text{ kHz} < 2$ %, siehe Bild 9.17b in [19]). Bei einer Variation des spezifischen elektrischen Bodenwiderstandes in einem Bereich von $100 \Omega\text{m} < \rho < 5 \text{ k}\Omega\text{m}$ und bis zu einem Abstand zwischen den gekoppelten Leiterschleifen von $x_{ij} = 50 \text{ m}$ hält sich die Abweichung in engen Grenzen.

In [37] wird angeführt, dass es durch die Anwendung von Carsons und Pollaczeks Ansatz der unendlich langen und geraden Leiter bzw. durch die Anwendung ihrer mathematischen Gleichungen bei der theoretischen Bestimmung von Nullimpedanzen von Leitungen, für Berechnungen von Kurzschlussströmen mit Erdberührung, bei Leitungslängen wie sie in der Hochspannungsebene üblich sind, zu keinen wesentlichen Abweichungen im Vergleich zu gemessenen Nullimpedanzen kommt.

Bei der Berechnung des Selbstimpedanzbelags von sehr kurzen Leitungen bzw. bei sehr großen Erdstromtiefen (abhängig von der Frequenz und vom spezifischen elektrischen Bodenwiderstand) mit Carsons und Pollaczeks Gleichungen sind gemäß [37] wesentliche Abweichungen zum Selbstimpedanzbelag eines unendlich langen Leiters feststellbar. Damit sind die nachfolgenden mathematischen Gleichungen so, wie sie unten angeführt sind nur unter der Voraussetzung anwendbar, dass die Leitungslänge größer ist als die Erdstromtiefe δ_E von unendlich langen Leitern. Diese liegt bei der Netzfrequenz (50 Hz) und einer spezifischen elektrischen Bodenleitfähigkeit von $0,01 \text{ S/m}$ bei 932 m. Ist die Länge der betrachteten Leiter kürzer als die in [36] angeführte Grenzlänge von $1,36 \cdot \delta_E$ so sind gemäß [37] eine verminderte Erdstromtiefe und ein vermindertes Widerstandsbelag des Erdreichs einzuführen bzw. anzuwenden.

3.3.2 Elektrische Kenngrößen von Kabelleitungen

Bei der induktiven Beeinflussungsrechnung, die für eine numerischen Bestimmung von Amplituden induzierter Spannungen und Ströme und der daraus möglichen Ableitung qualitativer Aussagen durchgeführt wird, steht das im Kapitel 3.1 hergeleitete und auf Seite 31 angeführte Gleichungssystem (22) im Fokus. Bei der Lösung dieses Gleichungssystems für mehrere parallele Drehstromkabelsysteme stellt die Aufstellung der Impedanz- bzw. bei mehrfach geerdeten Kabelschirmen und/oder eventuell vorhandenen Begleiterdern, die Aufstellung der Kettenmatrix respektive die Berechnung der einzelnen Matrixelemente mit den unten angeführten Gleichungen einen wesentlichen Aufwand dar.

Die quantitative Bestimmung aller Elemente der Impedanzmatrizen aller Abschnitte einer Kabelleitung (Selbst- und Koppelimpedanzen, die aus Erdwiderständen, ohmschen Leiterwiderstandsbelägen, inneren und äußeren Induktivitäten bzw. Reaktanzen für kreiszylindrische Voll- und Rohrleitungen bestehen) benötigt neben geometrischen Daten der Leiteranordnungen diverse elektrische Kenngrößen der Kabelleitungen. Im Wesentlichen sind dies der Aufbau sowie die eingesetzten Materialien der einzelnen Kabelleiter.

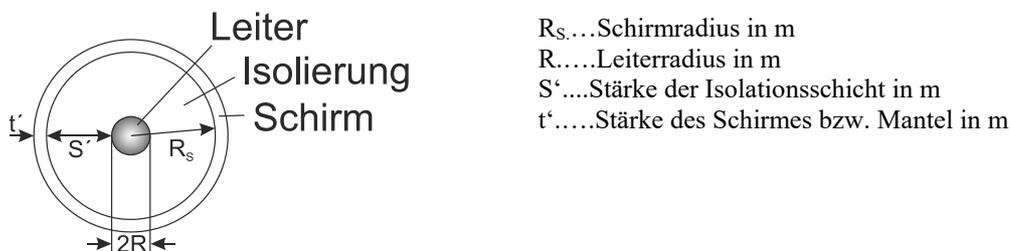


Abbildung 3-17 Vereinfacht dargestellter Kabelspiegel [2]

In der Höchstspannungsebene werden bei Erdkabeln im Allgemeinen nur Einleiterkabel eingesetzt. In anderen Spannungsebenen der Energietechnik werden unter anderem auch Gürtelkabel und Dreimantelkabel mit oder ohne Bewehrung eingesetzt. Wie den Abbildungen des Kapitels 4.2 entnommen werden kann, werden in der Höchstspannungsebene sowohl die flache (horizontal direkt im Erdreich oder vertikal im Tunnel [an den Seitenwänden montiert]) als auch die Dreiecksanordnung der Einzelleiter (direkt im Erdreich oder in der Luft [Kollektorgänge, Kabelschächte, Tunnel]) angewendet. Bei der im Fokus der vorliegenden Arbeit stehenden Höchstspannungsebene wird aufgrund besserer Wärmeabfuhr in der Regel ein Abstand zwischen den Einzelleitern realisiert.

Die Erdungsstrategie der elektrisch leitfähigen Kabelschirme (einseitige, beidseitige oder mehrfache Erdung mit oder ohne den Einsatz von Überspannungsableitern) besitzt eine fundamentale Rolle für die Höhe der wirksamen Reduktionsfaktoren der Kabelschirme bei der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen. Bei einem Stromfluss in Phasenleitern von Drehstromkabelsystemen kommt es in den parallelverlaufenden Kabelschirmen immer zu induzierten Spannungen. Diese Spannungen sind bei einseitiger Erdung an den nicht geerdeten oder über Überspannungsableiter geerdeten Kabelschirmen abgreifbar. Bei zweiseitiger oder mehrfacher, niederohmiger Erdung der Kabelschirme kommt es durch die induzierten Spannungen und die geschlossenen Kabelschirm-Erde-Schleifen zu Stromflüssen.

Wie im Kapitel 3.1 gezeigt, werden die induzierten Spannungen und Ströme in Leitern mit Erdrückleitung ausgehend von den Selbst- und Koppelimpedanzen bestimmt. Hierbei ist die, in der Regel reduzierende Wirkung auf die Höhe der Amplituden der induzierten Spannungen und Ströme von Kabelschirmen, Begleit- oder Rückleitern bereits impliziert.



Ungeachtet der Existenz von Vollleiterkabeln, werden zumindest die Phasenleiter von Höchstspannungs-Kabelsystemen als sogenannte Millikenleiter, das heißt aus mehreren gegeneinander isolierten Segmenten ausgeführt. Die Segmente ihrerseits werden aus Einzeldrähten gepresst. Die Abweichung, die sich durch die Anwendung der in den beiden nachfolgenden Kapiteln angeführten Gleichungen durch die Vernachlässigung der exakten Millikenleiterstruktur ergeben, werden in der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht.

3.3.3 Selbstimpedanzen

Die Selbstimpedanz von isolierten Leitern im Boden mit Erdrückleitung, das heißt im vorliegenden Fall von Phasenleitern und Kabelschirmen wird in der vorliegenden Dissertation gemäß [33] mit der nachfolgend angeführten Formel (33) berechnet:

$$\underline{Z}_{ii} = \underline{z}'_{ii} * l \quad (33)$$

wobei die spezifische Selbstimpedanz je Längeneinheit \underline{z}'_{ii} mit (34) berechnet wird

$$\underline{z}'_{ii} = (r'_e + r'_l) + j(x'_{ii} + x'_{(i)i}) \quad (34)$$

Die vier, in der Formel (34) beinhalteten Komponenten, aus denen sich die Selbstimpedanz zusammensetzt, können mit den nachfolgend angeführten Formeln (35) bis (39) berechnet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass bei der Berechnung der Selbstimpedanzen von Freileitungsseilen in beiden Teilen der Selbstimpedanz, das heißt, sowohl im Real- als auch im Imaginärteil ein Höhenkorrekturfaktor einzusetzen ist.

Der spezifische Erdwiderstand je Längeneinheit r'_e wird in der Formel durch r_e dargestellt und ist, wie der Formel (35) entnommen werden kann, ein konstanter Faktor, der nur von der Frequenz f abhängt.

$$r'_e = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} * \frac{\pi}{4} \quad (35)$$

Der spezifische ohmsche Widerstand je Längeneinheit r'_l eines Leiters wird mit der bekannten und in Formel (36) angeführten Gleichung berechnet.

$$r'_l = \frac{1}{\gamma * A} = \frac{\rho}{A} \quad (36)$$

Die spezifische Selbstreaktanz x'_{ii} der Leiter-Erde-Schleife für Vollleiter, wie sie Phasen darstellen, wird mit der Formel (37) berechnet, wobei D_e dem äquivalenten Abstand zum Erdrückleiter (siehe Formel (40)) und R_i dem Leiterradius entsprechen.

$$x'_{ii} = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} * \ln \frac{D_e}{R_i} \quad (37)$$



Formel (38) wird für die Berechnung der spezifischen x'_{ii} Selbstreaktanz der Leiter-Erde-Schleife von Hohl- bzw. Rohrleitern, d.h. von Kabelschirmen angewendet, wobei der Nenner des Logarithmus den mittleren geometrischen Abstand eines Rohr- bzw. Hohlleiters entspricht und aus [35] entnommen wurde:

$$x'_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} * \ln \frac{D_e}{(R_S+t) \cdot e^{\frac{4}{3} \left(\frac{R_S(R_S+t-R_S)}{(2R_S+R_S+t-R_S)^2} \right)}} \quad (38)$$

Die spezifische innere Reaktanz $x'_{(i)i}$ eines kreiszylindrischen Vollleiters wird gemäß [33] mit der nachfolgend angeführten Formel (39) berechnet und ergibt bei einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 1$ und einer Frequenz von $f = 50$ Hz den Wert von $0,0157 \Omega/\text{km}$.

$$x'_{(i)i} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} * \frac{\mu_r}{4} \quad (39)$$

Für die Berechnung der spezifischen inneren Reaktanz eines kreiszylindrischen Rohr- bzw. Hohlleiters ist gemäß [33] die Formel (39) zu erweitern.

$$x'_{(i)i} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} * \frac{\mu_r}{4} * \left[1 - \frac{2R_S^2}{(R_S+t)^2 - R_S^2} + \left(\frac{2R_S^2}{(R_S+t)^2 - R_S^2} \right)^2 * \ln \frac{R_S+t}{R_S} \right] \quad (40)$$

Der äquivalente Abstand des Leiters zu seinem Erdrückleiter bzw. die Erdstromtiefe wird mit der nachfolgend angegebenen Formel (41) berechnet.

$$D_e = \frac{\sqrt{2e}}{\gamma} * \delta_E = \frac{\sqrt{2e}}{\gamma} * \sqrt{\frac{2 * \rho}{\omega * \mu_0}} \quad (41)$$

Setzt man für die Eulersche Zahl e , die Besselsche Konstante γ , die Permeabilität des Vakuums μ_0 und die Kreisfrequenz ω bei einer Frequenz von 50 Hz ihre numerischen Werte ein, so ergibt sich für die Erdstromtiefe in Metern die nachfolgende Maßzahlengleichung, wobei der spezifische elektrische Bodenwiderstand ρ in Ωm einzusetzen ist.

$$D_e = 93,2 * \sqrt{\rho} \quad (42)$$

Die physikalische Interpretation bzw. die Bedeutung des Begriffes Selbstimpedanz lässt sich am einfachsten anhand der in Abbildung 3-16 dargestellten Leitungskonfiguration erklären. Die Selbstimpedanz ist die mathematische Beschreibung bzw. die quantitative Festlegung der Höhe aller Widerstände (ohmsche Leitungs- und Erdwiderstände sowie der induktive Blindwiderstand) einer einzelnen Leitung mit der Rückleitung über das schlecht leitende Erdreich (bezogen auf die Leitfähigkeit von üblichen Leitermaterialien wie Kupfer oder Aluminium), die sich dem Stromfluss bei seinem Weg von einem zum anderen Pol der Spannungsquelle entgegenstellen.

3.3.4 Koppelimpedanzen

Die Wahl der geeigneten Formel für die Berechnung von Koppelimpedanzen zwischen unterschiedlichen elektrotechnischen Anlagen spielt eine wichtige Rolle bei der induktiven Kopplung. So spielt es gemäß [21] eine Rolle, ob zwischen den gekoppelten Leitern eine Distanz von einigen Metern, wie bei der Verlegung von Erdkabeln oder von einigen 100 Metern, wie bei der Beeinflussung von zum Beispiel Freileitungen auf Pipelines oder auf Bahnstromanlagen besteht. Die Koppelimpedanz zwischen den Phasenleitern, Kabelschirmen, Begleiterdern wird in der vorliegenden Dissertation mit der nachfolgend angeführten Formel (43) berechnet, die in der Fachliteratur als die „Näherung von Dubanton“ bzw. auch als „Complex Image Formula“ bezeichnet wird. Die Näherung nach Dubanton ist zum Beispiel in [19] angeführt und lautet wie folgt:

$$\underline{z}'_{ik} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\bar{D}_{ik}}{d_{ik}} \quad (43)$$

$$\bar{D}_{ik} = \sqrt{(h_i + h_k + 2\underline{p})^2 + x_{ik}^2} \quad (44)$$

$$d_{ik} = \sqrt{(h_i - h_k)^2 + x_{ik}^2} \quad (45)$$

$$\underline{p} = \frac{1}{\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho}}} = e^{j\frac{\pi}{4}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}} = (1 - j) \frac{\delta_E/\sqrt{2}}{1,85137} \quad (46)$$

Bei den oben angeführten Formeln für die Berechnung der spezifischen Selbst- und Koppelimpedanzen steht im Nenner des Logarithmus, entweder der mittlere geometrische Abstand zwischen zwei gekoppelten Leitern oder der entsprechende Leiterradius. Der mittlere geometrische Abstand einer beliebigen Fläche von einem, diese Fläche umgebenden Kreisring (entspricht im vorliegenden Fall einem kreiszylindrischen Phasenleiter, der von einem rohrlieferförmigen Kabelschirm umgeben ist) kann gemäß [35] mit der nachfolgend angeführten Formel (47) berechnet werden. D.h., der mittlere geometrische Abstand für die in Abbildung 3-17 dargestellte Anordnung wird mit Formel (47) berechnet.

$$d_{ik} = (R_S + t) \cdot e^{\left(\frac{(R_S + t) - R_S}{2R_S + (R_S + t) - R_S}\right)} \quad (47)$$

Die physikalische Interpretation bzw. die Bedeutung des Begriffes Koppelimpedanz lässt sich am einfachsten anhand der in Abbildung 3-15 dargestellten Leitungskonfiguration erklären. Die Koppelimpedanz Z_{12} beschreibt die ohmsche Kopplung über die gemeinsame Erdrückleitung und die induktive Kopplung über das magnetische Feld zweier, paralleler Leiterschleifen.



3.4 Grenzen des Simulationsmodells

Bedingt durch die Vielzahl an zu berücksichtigenden Parametern und der Anzahl der parallelverlaufenden und parallelbetriebenen Drehstrom-Höchstspannungs-Kabeln, stellen diese elektrotechnisch sehr komplexen Systeme dar. Entsprechend des Themengebietes der vorliegenden Arbeit, nämlich der „niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen“ konnten die notwendigen Analysen einzig mittels entsprechender Abstraktion respektive Simplifikationen methodisch bewerkstelligt werden.

Bei der, in dieser Arbeit vorgestellten Vorgangsweise für die Berechnung der induzierten Spannungs- und Stromverteilung entlang von Kabelsystemen wurden die nachfolgend angeführten Vereinfachungen getroffen:

- Bodenschichtung: es wird von einem homogenen Erdreich ausgegangen
- Kabelkonstruktion: Millikenleiteraufbau sowie halbleitende (Graphit-)Schichten werden nicht berücksichtigt
- Skin- und Proximity-Effekt werden nicht berücksichtigt
- Isolationsverluste und die kapazitiven Ladeströme werden nicht berücksichtigt
- Ausgedehnte Erdungsanlagen von Muffenstellen werden durch konzentrierte Widerstände modelliert
- Annahme konstanter Abstände zwischen Phasen und Drehstromsystemen entlang eines Abschnittes
- Fremde, zu den untersuchten Kabelsystemen nicht zugehörige leitfähige Installationen, die im Nahbereich, parallel zu den Kabelsystemen liegen sind bei den Berechnungsergebnissen nicht berücksichtigt.

Diese Vereinfachungen besitzen unterschiedliche Auswirkungen auf die Höhe der induzierten Spannungs- und Stromverteilung der Kabelleitung (erhöhend/verringend). Daher bedarf die Interpretation der Berechnungsergebnisse einer Berücksichtigung der Simplifikationen. Beispielhaft kann hier die Vernachlässigung fremder leitfähiger Installationen im Nahbereich der Kabelsysteme angeführt werden, dessen in der Realität vorhandene und im Simulationsmodell nicht berücksichtigte Reduktionswirkung in der Regel zu höheren berechneten Spannungen und Kabelschirmströmen führt als sie in der Realität tatsächlich auftreten würden. Damit liegen die Berechnungsergebnisse bezüglich Aussagen zum Arbeitnehmer bzw. zum Personenschutz auf der sicheren Seite. Man spricht in diesem Kontext von fremden leitfähigen Installationen im Nahbereich der Kabelsysteme, wenn zum Beispiel im selben Energiekorridor oder auf der gegenüberliegenden Straßenseite über eine bestimmte Länge parallelverlaufende *elektrischen Leitungen anderer Spannungsebenen (PEN Leiter, Kabelschirme, Begleiterder, Erdungsanlagen anderer Anlagen, ...)*, *Gas-, Wasser-, Fernwärmeleitungen, Pipelines usw.* [2] vorhanden sind.

Als weiteres Beispiel kann hier die Annahme der konstanten Abstände angeführt werden. Je nachdem, ob die tatsächlich vorliegenden Abstände zwischen den einzelnen Phasen größer oder kleiner sind als die, im Simulationsmodell angenommenen (eine cm-genaue Installation der Kabelphasen über mehrere Kilometer ist praktisch nicht realisierbar), liegen die Berechnungsergebnisse der Spannungen und Kabelschirmströme unter oder über den, in der Realität tatsächlich auftretenden Werten.

In der Regel existieren auch bei Systemabständen (Abstände zwischen einzelnen Drehstromsystemen) sowohl Unter- als auch Überschreitungen der, in der Dokumentation von vor einigen 10 Jahren installierten (ohne GPS Vermessung des Trassenverlaufes) Kabelsystemen dokumentierten Abständen. Ausschlaggebend hierbei ist die Länge der Abweichungen der Abstände von den im Modell angenommenen.



Das Ausmaß der Annahme eines simplifizierten Kabelaufbaus (Millikenleiteraufbau und halbleitende Graphitschicht nicht berücksichtigt) sind derzeit noch Forschungsgegenstand. Diese Vereinfachungen ebenso wie die Nichtberücksichtigung des Skin- und des Proximityeffektes stellen eine zulässige Maßnahme bei der Reduktion der Komplexität der Simulationsmodelle dar, da aktuell davon ausgegangen wird, dass diese Parameter einen geringen Effekt auf induktive Beeinflussungsrechnung besitzen.

Die Vernachlässigung der kapazitiven Kopplung zwischen den Phasen und den jeweilig zugehörigen Kabelschirmen, spielt eine bedeutend relevantere Rolle, insbesondere bei Hoch- und Höchstspannungskabeln. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation auf der niederfrequenten induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen liegt, wurde bewusst darauf verzichtet, um die Aussagen der durchgeführten Untersuchungen rein auf die induktive Beeinflussung zu fokussieren.

4 Realtypische Kabelleitungen

4.1 Überblick

Die in diesem Kapitel behandelten realtypischen Kabelleitungen beruhen auf Daten, die im Laufe der in [2] angeführten und vom Autor der vorliegenden Dissertation erstellten wissenschaftlichen Studie verwendet wurden. Um möglichst praxisnahe Aussagen zu erhalten wurden die Daten mit mehreren Übertragungsnetzbetreibern koordiniert. Insgesamt wurden vier unterschiedliche Kabelleitungen untersucht, die sich in den nachfolgend aufgelisteten wesentlichen Attributen unterscheiden:

- Anzahl der Drehstromkabelsysteme,
- Gesamtlänge der Kabelleitungen,
- Einzellängen der jeweiligen (Haupt-) Abschnitte,
- Anzahl der Abschnitte der Kabelleitungen,
- Querverlegeprofile,
- Längsverlegeprofile,
- Querschnittsflächen der Phasen und der Kabelschirme,
- Betriebs- bzw. Grenzlastströme pro Phase.



Für jede dieser Leitungen, die sich wie oben dargestellt zum Teil wesentlich voneinander unterscheiden, wurden weitere wesentliche Einflussparameter auf die Höhe der induzierten Spannungen und Ströme, die nachfolgend aufgelistet sind, untersucht:

- Verdrillungstypen,
- Erdungskonfiguration,
- Erdungswiderstände,
- Spezifischer (elektrischer) Bodenwiderstand,
- Verlegetiefe.

Nachfolgend ist eine Übersichtstabelle angeführt, der die Kabel- und Schirmquerschnittsflächen, die Verlegearten und die Phasenströme bei Normalbetrieb sowie bei Grenzlast der untersuchten Leitungen entnommen werden können.

Kabelleitung	Querschnittsfläche Phase / Kabelschirm	Strom pro Phase Normalbetrieb	Strom pro Phase Grenzlast
KL 1	2500 (Cu) / 155 (Cu) mm ²	1000 A	1700 A
KL 2-1	1200 (Cu) / 410 (Cu) mm ²	750 A (ungekühlt) 1125 A (gekühlt)	1000 A (ungekühlt) 1500 A (gekühlt)
KL 2-2	1200 (Cu) / 1120 (Al) mm ²	750 A 1125 A	1000 A 1500 A
KL 3	2500 (Cu) / 155 (Cu) mm ²	1500 A	2000 A
KL 4	400 (Cu) / 35 (Cu) mm ²	80 A	--

Tabelle 4-1: Übersichtstabelle der untersuchten Kabelleitungen

4.2 Querverlegeprofile

In diesem Absatz sind die Querverlegeprofile der untersuchten Kabelleitungen dargestellt. Den Abbildungen kann die Anzahl der Drehstromsysteme, die Abstände zwischen den Phasen sowie zwischen den Drehstromsystemen, die Verlegetiefe und der spezifische elektrische Bodenwiderstand, der für die jeweilige Kabelleitung als Standardwert angenommen wird, entnommen werden. Für die Kabelleitungen KL 1 und KL 2 ist jeweils nur ein Querverlegeprofil angeführt, d.h., dass die Leiter entlang der gesamten Leitungslängen entsprechend der jeweiligen Abbildung verlegt sind. Für die Kabelleitung KL 3 sind fünf Querverlegeprofile angeführt. Das heißt, dass die Position der einzelnen Leiter und damit auch der einzelnen Drehstromsysteme mehrere Male entlang der Kabelleitung verändert wird. Die exakte Anordnung der in diesem Kapitel dargestellten Querverlegeprofile der Kabelleitung KL 3 kann der Abbildung 4-8 entnommen werden. Für die Kabelleitung KL 4 sind zwei Querverlegeprofile angeführt, d.h., dass eine Änderung der Position der Phasen entlang der Kabelleitung ein Mal stattfindet.

Die verschiedenen Querverlegeprofile werden im Folgenden näher beschrieben und im Anschluss untersucht. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Kabelleitung KL 1 gelegt, da an diesem Beispiel die Bedeutung von Begleiterdern (BE) für die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen erarbeitet wird.

Die Abbildung des Querverlegeprofils der Kabelleitung KL 1 beinhaltet neben den Phasen und den Kabelschirmen zusätzliche, rot dargestellte Leiter. Hierbei handelt es sich um sogenannte Begleiterder (BE) bzw. earth continuity conductors (ECC). Die vorliegende Arbeit berücksichtigt Begleiterder, um Aussagen darüber zu erhalten, ob und in welchem Ausmaß ihre Mitverlegung auf die induzierten Ströme und Spannungen sich auswirkt, insbesondere im Vergleich auf den Fall ohne Begleiterder. Bei dieser Kabelleitung handelt es sich bei den Begleiterdern um Kupferleiter mit einer Querschnittsfläche von entweder 95 mm² oder 300 mm². Die Begleiterder sind entlang der gesamten Kabelleitung parallel zu den Leitern der Drehstromsysteme mitverlegt und verbinden, zusätzlich zu den Kabelschirmen, die Erdungsanlagen der Muffenstellen miteinander. Gründe für die Verlegung von Begleiterdern sind vielschichtig. Zum einen bieten sie einen weiteren Parallelpfad zu den Kabelschirmen und entlasten somit im Fehlerfall die Kabelschirme. Zum andere verbessern sie die Erdungsverhältnisse der Erdungsanlagen der einzelnen Muffenstellen. Darüber hinaus haben sie in der Regel eine reduzierende Wirkung bzgl. der induzierten Spannungen bzw. Ströme. Weiters beeinflussen sie die oberirdisch resultierenden magnetischen Felder, hervorgerufen durch die Phasenströme der Erdkabel.

Es sind im Querverlegeprofil der Kabelleitung KL 1 vier Positionen der Begleiterder (BE 1_{innen}, BE 1_{außen}, BE 2_{innen}, BE 2_{außen},) eingezeichnet. Es werden zusätzlich zur ersten Analyse der Kabelleitung KL 1 ohne Berücksichtigung von Begleiterdern vier weitere Analysen mit Berücksichtigung von Begleiterdern durchgeführt.

Bei der zweiten Analyse sind die Begleiterder auf gleicher Verlegetiefe, jeweils 0,45 m links und rechts von den äußersten Phasen parallel mitverlegt (siehe Abbildung 4-1, KL 1-1, BE 1_{außen} und BE 2_{außen}). Bei der dritten Analyse sind die Begleiterder auf gleicher Verlegetiefe, jeweils in der Mitte zwischen System 1 und 2 sowie zwischen System 3 und 4 parallel mitverlegt (siehe Abbildung 4-1, KL 1-1, BE 1_{innen} und BE 2_{innen}). Bei den beiden letzten Analysen wird für beide Lagen der Begleiterder (außen bzw. innen) der Einfluss der Querschnittsflächen (95 mm² und 300 mm²) untersucht.

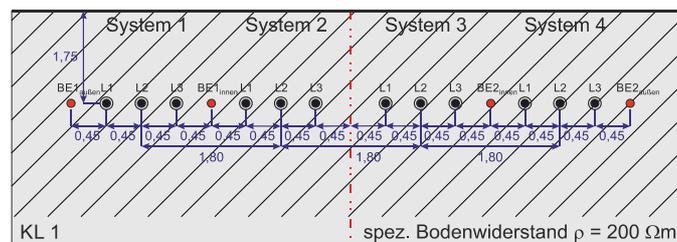


Abbildung 4-1: Querverlegeprofil der Kabelleitung KL 1

Wie der Abbildung 4-1 entnommen werden kann handelt es sich bei der Anordnung der 4 Drehstromsysteme der Kabelleitung KL 1 um eine flache, direkt in Erde Verlegung der einzelnen Leiter.

Im Unterschied zur Kabelleitung KL 1 besitzen die beiden nachfolgenden Kabelleitungen KL 2-1 und KL 2-2 jeweils nur zwei Drehstromsysteme. KL 2-1 und KL 2-2 besitzen denselben Systemabstand von 5 m (mittlere Phase zu mittlerer Phase) haben jedoch eine unterschiedliche Anordnung (Dreieck versus flach) und eine unterschiedliche Verlegetiefe. Weiters unterscheiden sich die beiden Kabelleitungen dadurch, dass es sich bei der KL 2-1 um eine reine Kabelleitung zwischen zwei Umspannwerken handelt und bei der KL 2-2 um eine Teilverkabelung einer zweisystemigen Freileitung handelt. Kabelleitung KL 2-2 startet in einem Umspannwerk und wird an einem KÜ-Portal in eine Freileitung übergeführt (1 DS-System der Kabelleitung entspricht 1 DS-System der Freileitung).

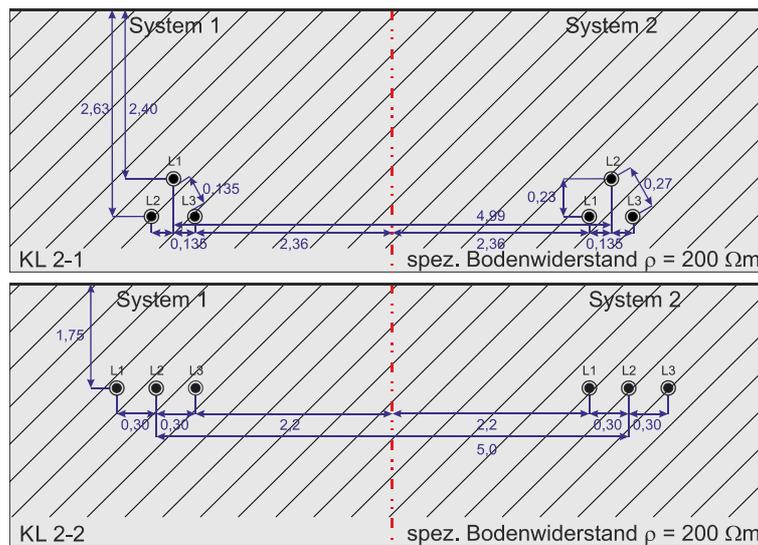


Abbildung 4-2: Querverlegeprofile der Kabelleitungen KL 2-1 und KL 2-2

Bei der folgenden Kabelleitung KL 3 handelt es sich trotz der Vielzahl an angeführten Querverlegeprofilen um eine einzelne Kabelleitung. Es handelt sich um ein reales Beispiel einer 400-kV-Kabelleitung eines europäischen Übertragungsnetzbetreibers. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten der Leitungstrasse war es notwendig die Verlegung von flach, direkt in Erde (mit unterschiedlichen Phasen und Systemabständen) mit unterschiedlichen Verlegetiefen (bei landwirtschaftlicher Nutzung der oberirdischen Flächen) zur Verlegung in Rohren mit 3 m Phasenabstand (ähnlicher Abstand wie bei Freileitungsseilen) bzw. zur Verlegung in Rohren mit annähernd keinem Phasenabstand mehrere Male entlang der Gesamtleitungslänge gemäß dem in Abbildung 4-8 dargestellten Längsverlegeprofil zu verändern.

Die nachfolgende Abbildung 4-3 zeigt die unterschiedlichen Querverlegeprofile der Kabellleitung 3.

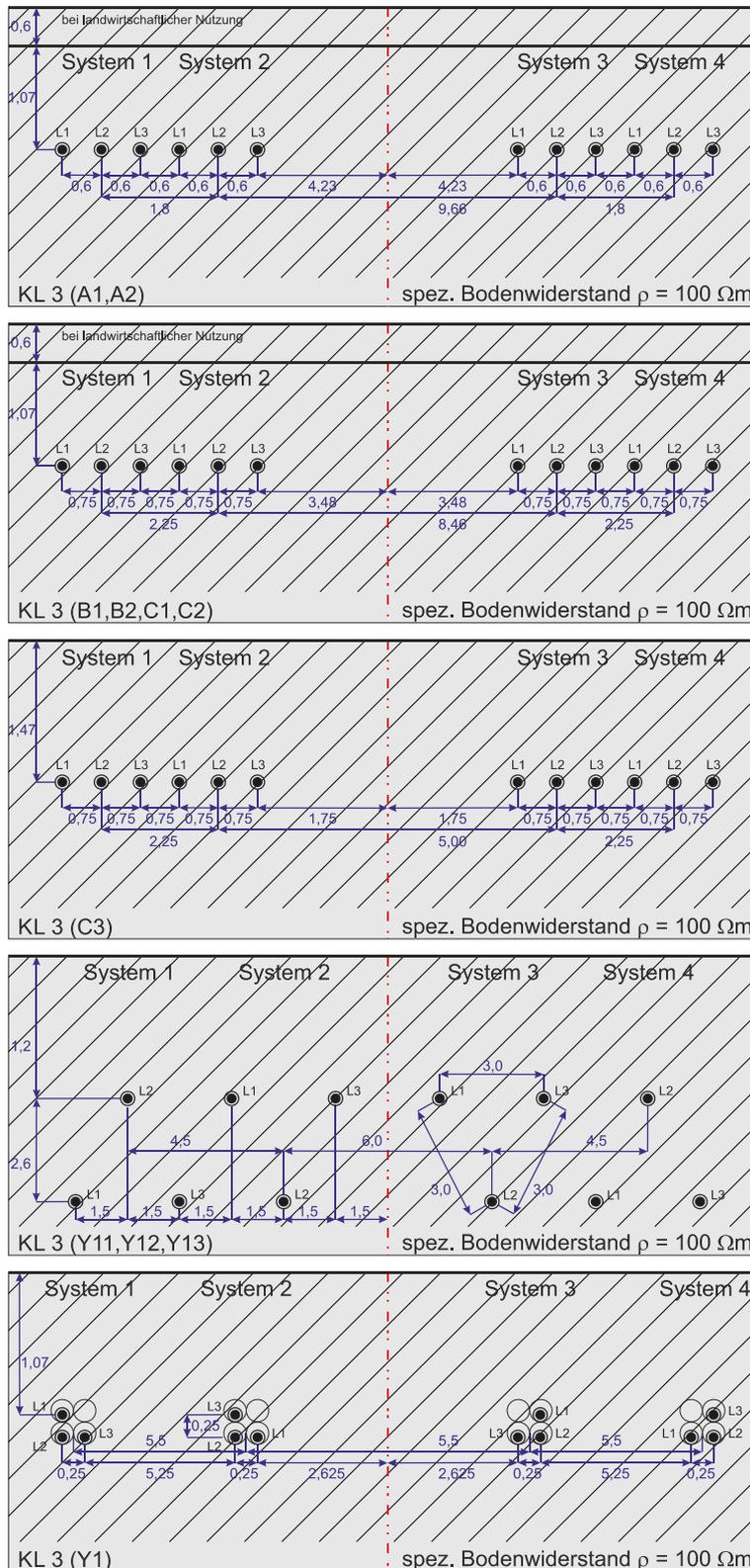


Abbildung 4-3: Querverlegeprofile der Kabellleitung KL 3

Bei der letzten untersuchten Kabellleitung KL 4 handelt es sich um eine Mittelspannungs-Kabellleitung mit einer vergleichsweise kurzen Gesamtleitungslänge von 0,9 km. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu den

anderen analysierten Kabelleitungen liegt darin, dass dies die einzige Leitung ist, bei der alle 4 Drehstromsysteme parallel betrieben werden. Entlang der ersten 150 m der Leitungslänge sind jeweils zwei Drehstromsysteme übereinander verlegt. Entlang der restlichen 650 m sind alle 4 Drehstromsysteme flach, direkt nebeneinander (0,1 m Systemabstand) verlegt. Bei der Verlegung dieser real existierenden Leitungen in einem Industrieverteilstromnetz wurde die induktive Beeinflussung nicht berücksichtigt.

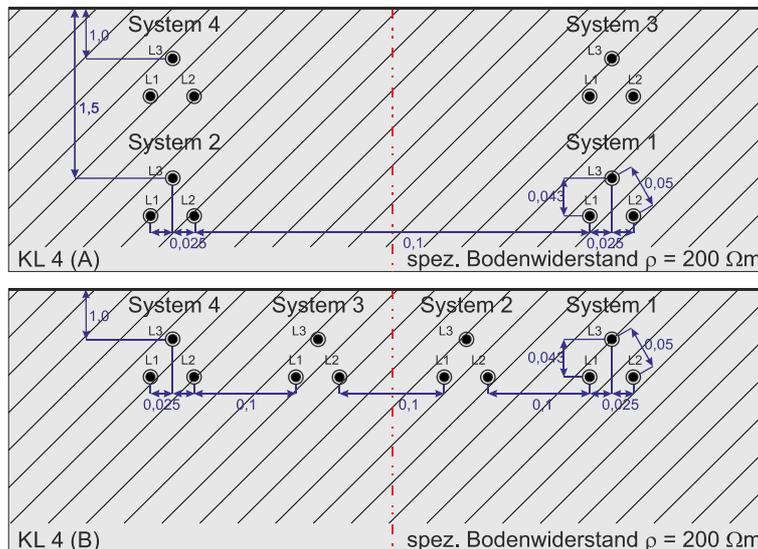


Abbildung 4-4: Querverlegeprofile der Kabelleitung KL 4

4.3 Längsverlegeprofile

Die Längsverlegeprofile der analysierten Kabelleitungen sind in den Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-8 dargestellt. Zur Vereinfachung werden in der vorliegenden Arbeit die Kabelenden mit Anfang (links) bzw. Ende (rechts) bezeichnet, obwohl Kabelsysteme im elektrischen Energieübertragungsnetz bidirektional betrieben werden. Am Kabelanfang, Kabelende sowie in ausgewählten Muffen, die als Erdungsabschnitte (EA) bezeichnet werden, falls Kabelschirme dort geerdet werden, sind die Kabelschirme über die im Kapitel 4.4.2 angeführten Erdungswiderstände geerdet. Die dazwischenliegenden Muffen weisen im Normalbetriebszustand der Kabelsysteme keine direkten Kabelschirmerdungen auf. Die Kabelschirme in diesen Muffen sind über Überspannungsableiter mit der jeweiligen Erdungsanlage verbunden.

Zugunsten der besseren Lesbarkeit der folgenden Abbildungen sind einzelne Informationen, wie zum Beispiel die Abschnittslängen jeweils nur für ein Kabel dargestellt, besitzen jedoch für alle dargestellten Kabel Gültigkeit.

4.3.1 Kabelleitung KL 1

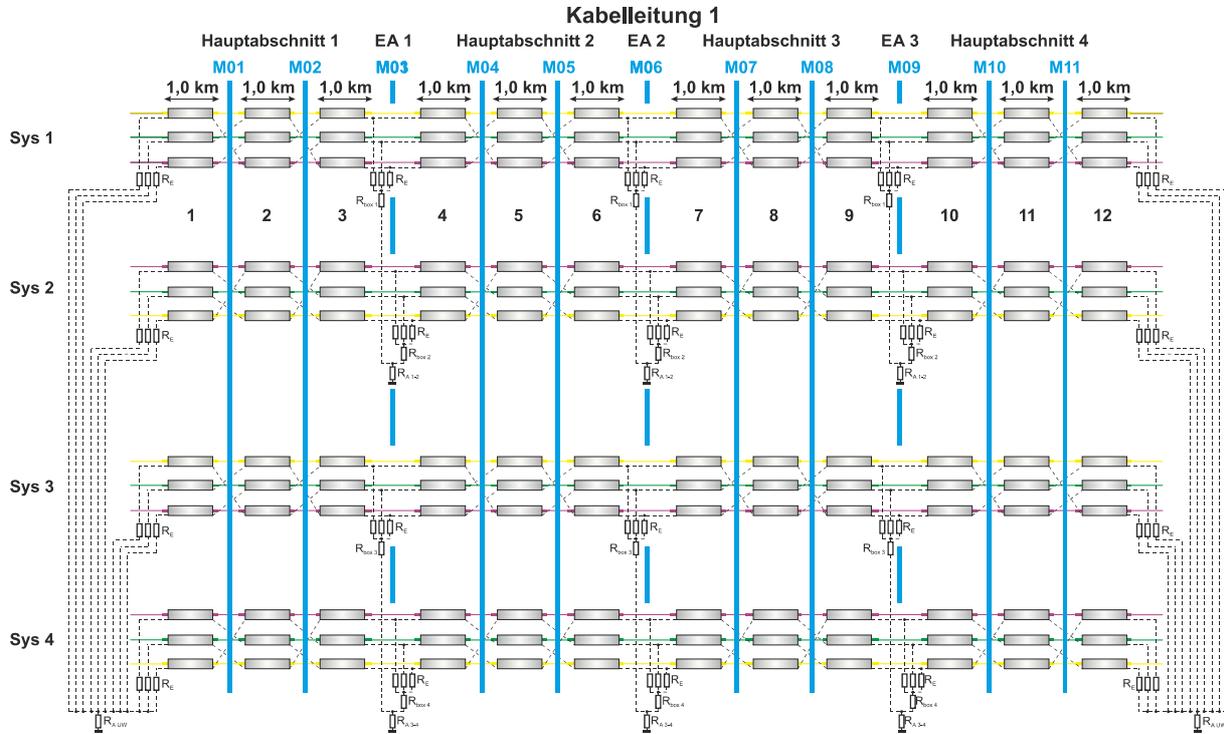


Abbildung 4-5: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 1

4.3.2 Kabelleitung KL 2 (KL 2-1, KL 2-2)

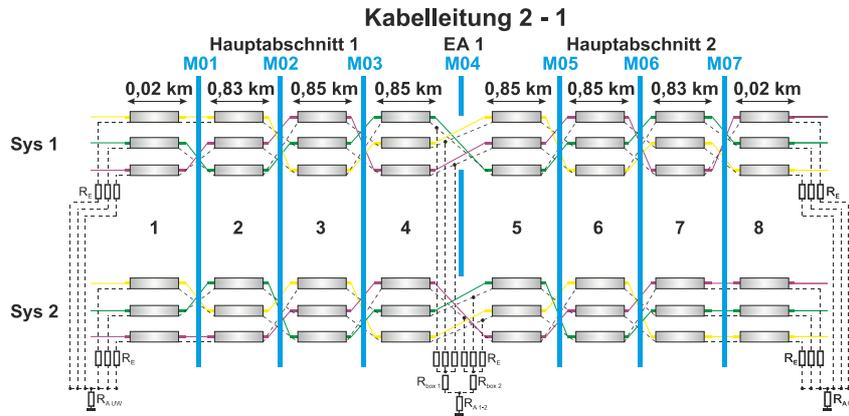


Abbildung 4-6: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 2-1

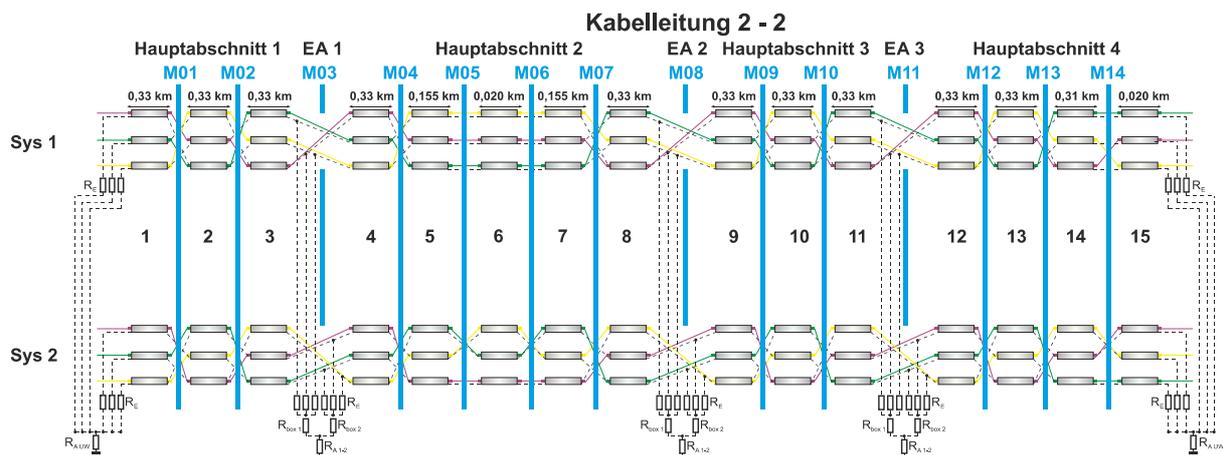


Abbildung 4-7: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 2-2

4.3.3 Kabelleitung KL 3

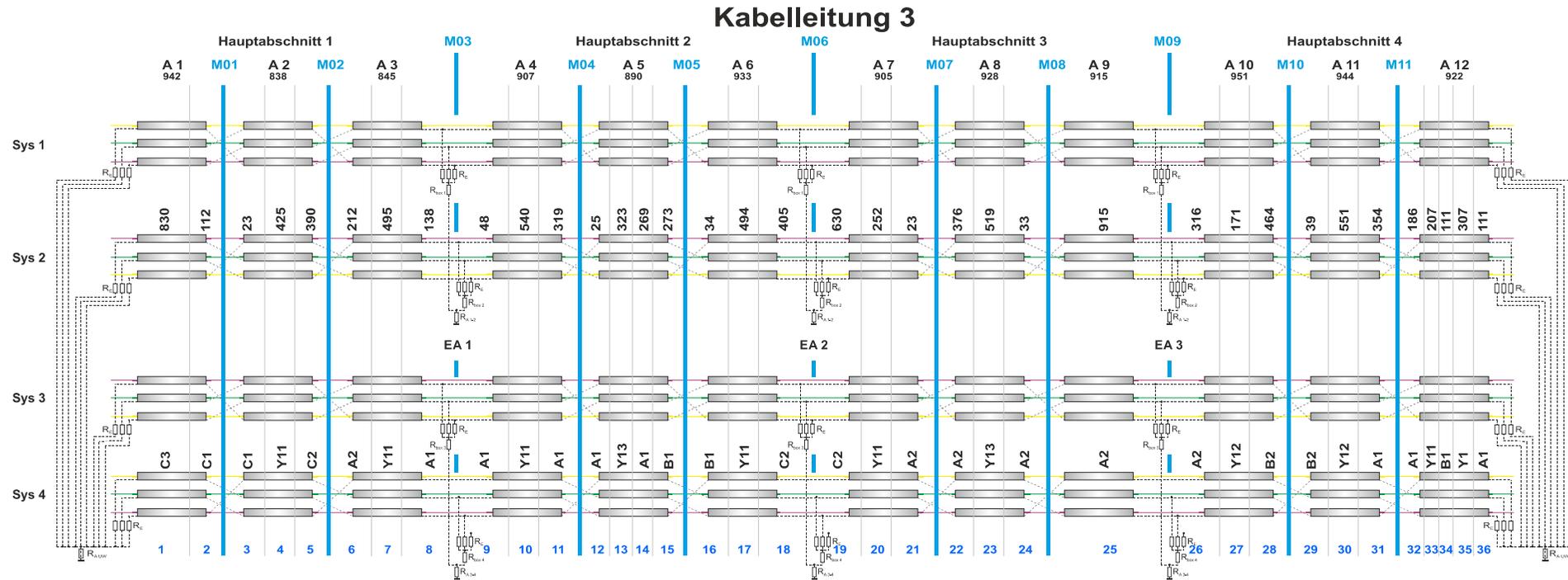


Abbildung 4-8: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 3

Hinweis: Die vertikal angeführte Feinunterteilung (C3, C1, Y11, ...) entspricht den in der Abbildung 4-3 dargestellten Querverlegeprofilen. Die vertikal angeführten Zahlenwerte entsprechen den Längen der Unterabschnitte wohingegen die horizontal angeführten Zahlenwerte den Längen der Abschnitte A1 bis A12 entsprechen. M01 bis M11 ist die Bezeichnung der Muffenstellen.

4.3.4 Kabelleitung KL 4

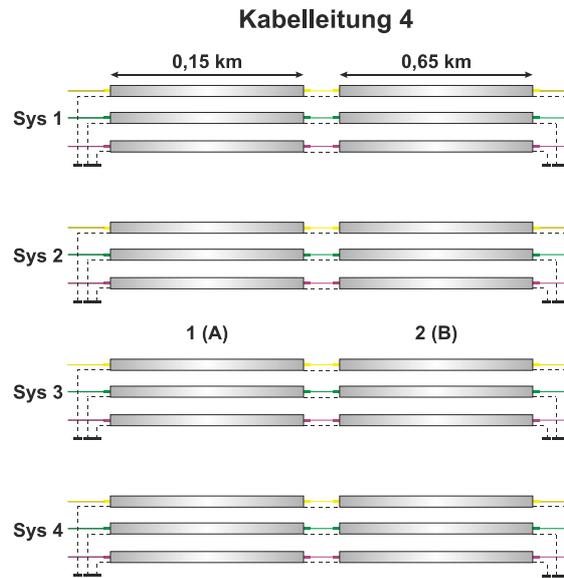


Abbildung 4-9: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 4

4.4 Variierte Parameter

4.4.1 Schaltzustände

In der nachfolgenden Tabelle 4-2 sind die untersuchten Schaltzustände bzw. Erdungskonfigurationen dargestellt. Sie wurden, wie die restlichen Annahmen ebenfalls, in engster Kooperation mit Netzbetreibern festgelegt, um auch hierbei möglichst praxisrelevante Szenarien zu analysieren bzw. möglichst praxisrelevante Erkenntnisse zu generieren.

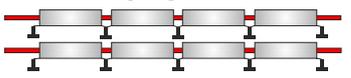
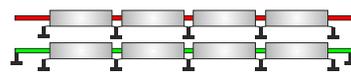
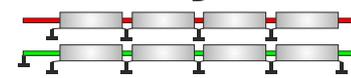
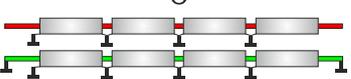
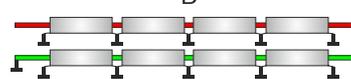
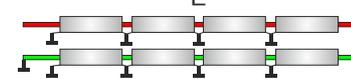
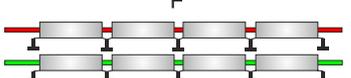
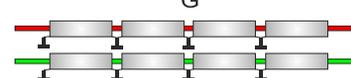
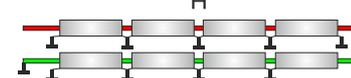
Ausgangszustand 	A 	B 
C 	D 	E 
F 	G 	H 

Tabelle 4-2: Schaltzustände (Rot: System(e) in Betrieb, Grün: System(e) außer Betrieb)

Ein in der Tabelle 4-2 abgebildetes Kabel repräsentiert, je nach Kabelleitung, entweder ein (Leitung zwei) oder zwei (Leitungen eins, drei und vier) Drehstromkabelsysteme. Zieht man die Kabelleitung KL 1 als Beispiel heran, so heißt das, dass sich bei den durchgeführten Berechnungen und Analysen im Schaltzustand A jeweils zwei Drehstromsysteme in Betrieb (rot dargestellt) und zwei außer Betrieb (grün dargestellt) befinden. Die vier, in der Tabelle 4-2 abgebildeten Kabelschirmabschnitte pro Kabel, repräsentieren jeweils einen Hauptabschnitt (siehe Abbildung 3-10). Bei sämtlichen Schaltzuständen sind alle, jeweils vorhandenen Kabelschirme,



in den Erdungsabschnitten eins bis drei (bei Kabelleitung KL 2-1 ist nur ein Erdungsabschnitt vorhanden) über die im Kapitel 4.4.2 angeführten Erdungswiderstände geerdet. Unterschiede zwischen den einzelnen Schaltzuständen finden sich zum einen bei den Erdungszuständen (geerdet oder nicht geerdet) der, sich außer Betrieb befindlichen Phasen und zum anderen bei den Erdungszuständen der sich entweder in Betrieb oder außer Betrieb befindlichen Kabelschirme, am Anfang bzw. am Ende der Kabelsysteme. Die Schaltzustände Ausgangszustand, A und H sind von höchster Relevanz, das heißt, diese Schaltzustände kommen im ungestörten Betrieb bzw. während Wartungsarbeiten von Kabelsystemen regelmäßig vor. Die restlichen Schaltzustände (C bis G) sind als ergänzende Untersuchungen zu verstehen, die dem besseren Verständnis von potentiell kritischen Schaltzuständen (bezogen auf die Höhe der induzierten Spannungen und Ströme bzw. bezogen auf die Personensicherheit) dienen sollen.

Im Ausgangszustand befinden sich alle, jeweils vorhandenen Drehstromkabelsysteme im Normalbetrieb. Das heißt, dass pro Phase der in der Tabelle 4-1 angeführte Strom fließt und dass die Kabelschirme sowohl am Anfang und Ende als auch in den Erdungsabschnitten geerdet sind. Dieser Schaltzustand liefert Aussagen über die Höhe der induzierten Kabelschirmströme, die im Normalbetrieb, d.h. dauernd fließen. Die, durch diese Ströme verursachten Spannungsabfälle über die Erdungswiderstände und damit die Spannungsverteilung entlang der gesamten Kabelleitung im Normalbetrieb werden ebenfalls mit diesem Schaltzustand bestimmt.

Bei allen anderen untersuchten Schaltzuständen befindet sich eine Hälfte der vorhandenen Drehstromkabelsysteme außer Betrieb. Dies ist bei Wartungsarbeiten in regelmäßigen Abständen der Fall.

4.4.2 Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderstände in Muffenbauwerken

Die Anfangs- und Endpunkte von 400-kV-Kabelsystemen sind entweder Kraftwerke und Umspannwerke oder, wie bei Teilverkabelungen von Freileitungen, sogenannte Kabelübergangsportale (KÜ-Portal). Alle, im vorangegangenen Satz genannten Anlagen des elektrischen Energieübertragungsnetzes besitzen in der Regel ausgedehnte Erdungsanlagen. Daher wird für die vorliegende Arbeit der Erdausbreitungswiderstand von Kraftwerken und Umspannwerken mit $R = 0,1 \Omega$ angenommen. Für Muffenstellen bzw. Muffenbauwerke (Erdungsabschnitte) wird, aufgrund der wesentlich geringeren räumlichen Ausdehnung der Erdungsanlagen und entsprechend ausgeführten Erdungen ein Erdausbreitungswiderstand von $R = 1 \Omega$ als Standardwert festgelegt. Die Erdausbreitungswiderstände von KÜ-Portalen werden mit $R = 0,5 \Omega$ angenommen. Ein KÜ-Portal kommt nur bei der Kabelleitung KL 2-2 als Endpunkt des Kabelsystems vor. Alle anderen Kabelleitungen besitzen am Kabelanfang und am Kabelende Ausbreitungswiderstände von $R = 0,1 \Omega$. Nachfolgend sind in der Abbildung 4-10 zur Verdeutlichung der Größenverhältnisse ein Kabel auf Freileitung Übergangportal und eine schematische Darstellung eines Muffenbauwerks dargestellt.

Die getroffenen Annahmen zur Höhe der Erdausbreitungswiderstände basieren, neben den oben beschriebenen Annahmen zur Ausdehnung von Erdungsanlagen auch auf Einschätzungen von Experten, die 400-kV-Kabelsysteme in ihren jeweiligen Übertragungsnetzen betreiben sowie darüber hinaus auf jahrzehntelange Erfahrung der Betreiber der vorliegenden Dissertation auf dem Gebiet der Erdungsanlagen von Hochspannungsanlagen.



Abbildung 4-10: Ansicht eines Kabel auf Freileitung Übergangportals (KÜ-Portals) mit Größenvergleich eines Muffenbauwerks

Ferner wurde durch eine Vielzahl durchgeführter Messungen von Erdungsanlagen durch das Institut für Elektrische Anlagen und Netze nachgewiesen, dass abhängig von den jeweiligen Witterungs- und den lokalen Umgebungsbedingungen starke Streuungen von Erdausbreitungswiderständen von kleinen Muffenbauwerken existieren können. Aus diesem Grund werden zum einen Variationen der Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderstandswerte und zum anderen Variationen der Position, an der eine Veränderung der Widerstandswerte stattfindet für alle Kabelleitungen und alle Schaltzustände durchgeführt.

In der Tabelle 4-3 sind die analysierten Erdungswiderstandswerte angeführt.

Position	Anfang		Erdungsabschnitt 1			Erdungsabschnitt 2			Erdungsabschnitt 3			KÜ-Portal		Ende	
	R_E (Ω)	R_A (Ω)	R_E (Ω)	R_{box} (Ω)	R_A (Ω)	R_E (Ω)	R_{box} (Ω)	R_A (Ω)	R_E (Ω)	R_{box} (Ω)	R_A (Ω)	R_E (Ω)	R_A (Ω)	R_E (Ω)	R_A (Ω)
Standard-Wert	0,01	0,1	0,01	0,01	1	0,01	0,01	1	0,01	0,01	1	0,01	0,5	0,01	0,1

Tabelle 4-3: Standardwerte der Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderstände

In den jeweiligen tabellarischen bzw. grafischen Berechnungsergebnissen sind die jeweils angenommenen Widerstandswerte angeführt.

Die Notwendigkeit einer Variation der Kontaktübergangswiderstände zwischen den einzelnen Kabelschirmen und den Potentialausgleichsschienen zum einen und zwischen den Erdungsboxen und den jeweiligen Muffen-Erdungsanlagen zum anderen ist den nachfolgenden beiden Abbildungen ableitbar.

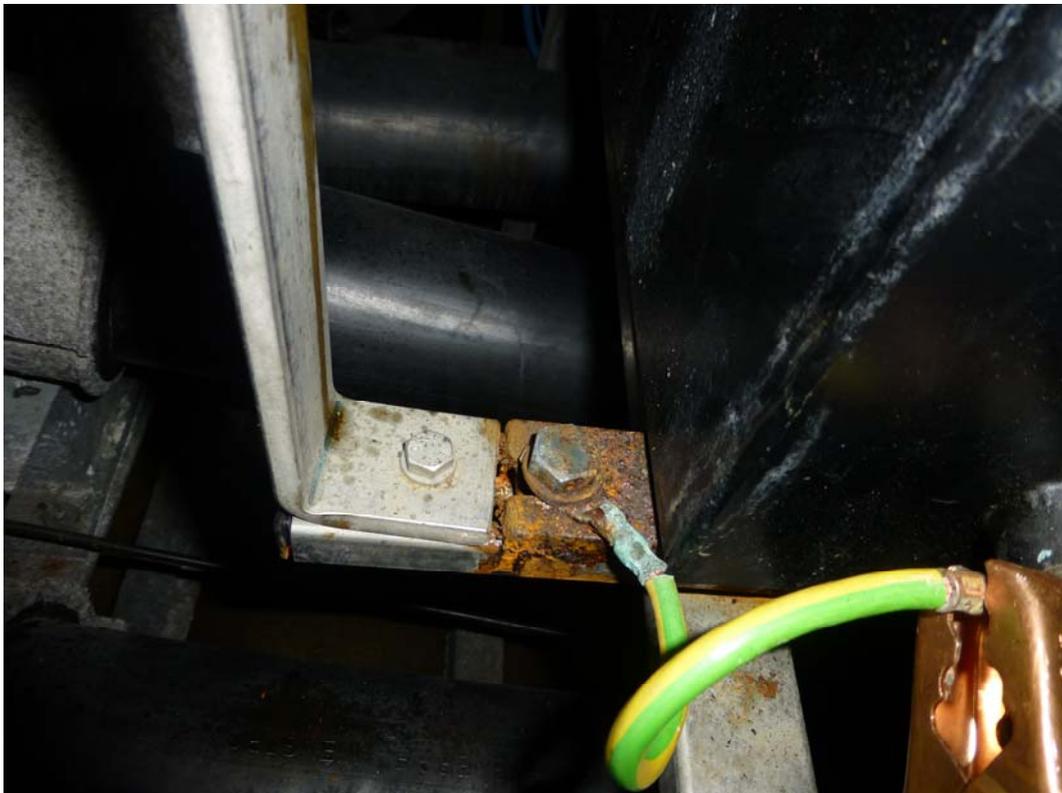


Abbildung 4-11. Widerstandsanstieg R_{box} durch Korrosion der Anschlussstelle einer Erdungs- oder Crossbondingbox

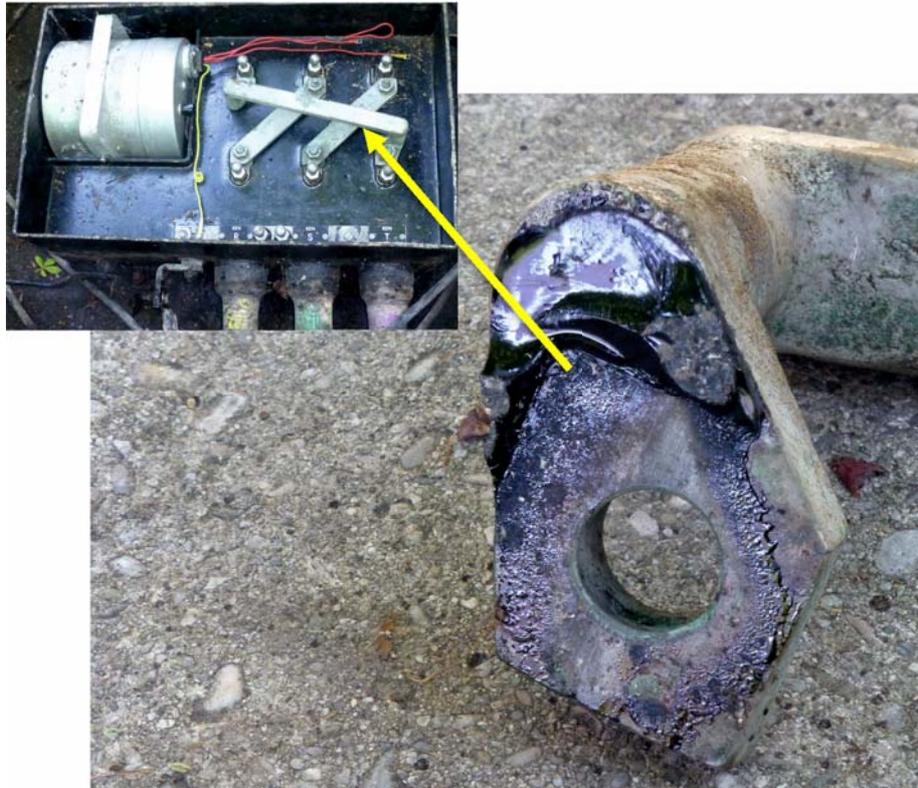


Abbildung 4-12: Ansicht einer Crossbondingbox (links oben) sowie eines Kontaktübergangswiderstand-Anstieges durch Schmierfilmbildung, verursacht durch induzierte Kabelschirmströme in Kombination mit Wassereintritt in eine Crossbondingbox

Die Kontaktübergangswiderstände zwischen den Erdungsboxen und den jeweiligen Muffen-Erdungsanlagen sind als R_{box} bezeichnet und werden im folgenden Bereich variiert:

$$R_{\text{box}} = (0,01 - 0,1 - 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20) \Omega$$

Die Ausbreitungswiderstände der Muffen-Erdungsanlagen (Erdungsabschnitte) sind als R_A bezeichnet und werden im folgenden Bereich variiert:

$$R_A = (0,1 - 1 - 10) \Omega$$

4.4.3 Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding

Da bei jeder der untersuchten Kabelleitung eine Verdrillungsvariante impliziert ist, beinhalten alle Berechnungsergebnisse den Einfluss der jeweiligen Kombination aus Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding. Um jedoch den Einfluss der, in der nachfolgenden Tabelle 4-4 dargestellten Kombinationen aus Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding unabhängig von allen anderen Parametern zu ermitteln, wird die Kabelleitung KL 1 als Basis herangezogen, wobei alle anderen Einflussparameter unverändert bleiben. Abgebildet sind jeweils zwei Abschnitte mit dem dazwischenliegenden Muffenbauwerk, in dem die Verdrillung der Phasen und/oder das Crossbonding der Kabelschirme sowie eine eventuell durchgeführte niederohmige Erdung der Kabelschirme stattfinden.

Die gepunktet dargestellten Widerstände der Kabelschirme weisen darauf hin, dass die Kabelschirme nicht in jedem Muffenbauwerk entlang einer Kabelleitung niederohmig bzw. über die, in der Tabelle 4-3 angeführten Widerstände geerdet sind.

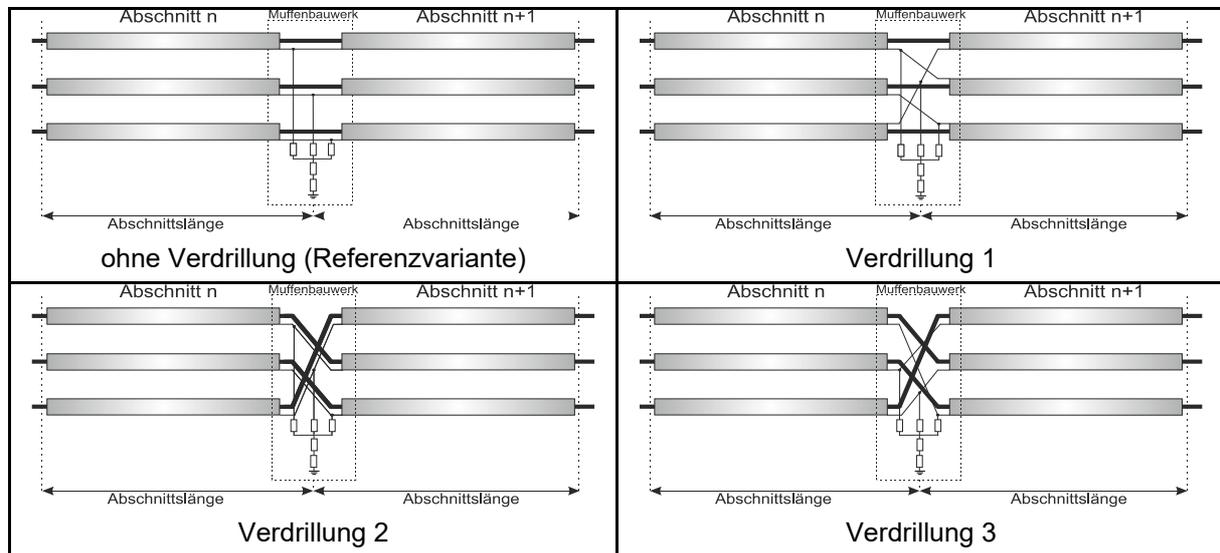


Tabelle 4-4: Analyzierte Verdrillungsvarianten

Als Referenz wird eine Variante definiert, bei der keine Verdrillung der Phasen und kein Crossbonding der Kabelschirme stattfinden. In Tabelle 4-4 ist die Referenzvariante links oben angeführt. Rechts oben ist die Verdrillungsvariante 1 angeführt, bei der nur die Kabelschirme ihre jeweilige Position in jeder Muffe wechseln. Die Phasen behalten ihre Positionen entlang der gesamten Kabelleitung bei. Links unten ist die Verdrillungsvariante 2 angeführt, bei der die jeweilige Position der Phasen und der Kabelschirme in jeder Muffe gleichsinnig gewechselt werden. Rechts unten ist die Verdrillungsvariante 3 angeführt, bei der die jeweilige Position der Phasen und der Kabelschirme in jeder Muffe gegensinnig gewechselt werden.



5 Allgemeine Ergebnisse der Beeinflussungsbetrachtungen

In diesem Kapitel sind ausgewählte Ergebnisse der, mit dem zuvor beschriebenen Simulationsmodell durchgeführten Berechnungen grafisch bzw. tabellarisch dargestellt. Eine weitere Auswahl an Ergebnissen ist aus Platzgründen im Anhang angeführt.

Infolgedessen, dass, die im Verlauf des Dissertationsvorhabens vorgegebenen Kabelleitungen in enger Kooperation mit Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern auf Basis real existierender 400-kV- und MS-Kabelsystemen definiert wurden, unterscheiden sie sich bei wesentlichen Einflussparametern der wechselseitigen induktiven Beeinflussung voneinander.

Daher wird nunmehr für die vorliegende Dissertation der Ansatz gewählt, dass zum Zwecke der Vergleichbarkeit, zusätzlich zu den oben angeführten Kabelleitungen auf Basis der Kabelleitung KL 1 (Materialien, Querschnittsflächen, Verlegeanordnung, Abschnittslängen, ...) folgende Konfigurationen berechnet bzw. analysiert werden:

- Ein Drehstromsystem
- Zwei Drehstromsysteme
 - Beide Drehstromsysteme in Betrieb
 - Ein Drehstromsystem in Betrieb, ein Drehstromsystem außer Betrieb
- Vier Drehstromsysteme
 - Vier Drehstromsysteme in Betrieb
 - Zwei Drehstromsysteme in Betrieb, zwei Drehstromsysteme außer Betrieb

Als Folge der durchgeführten worst-case Betrachtungen, beinhalten sowohl die im aktuellen Kapitel als auch die im Anhang angeführten Diagramme und Tabellen nur die jeweils maximalen Spannungen bzw. die maximalen Ströme eines betrachteten Drehstromsystems. Davon ausgenommen sind die Tabellen des Kapitels 6.3 und die Tabelle 12-2 bis Tabelle 12-4.

Die folgenden Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-27 stellen die Ergebnisse der modellbasierten Untersuchungen über die Höhe der auftretenden Spannungen und der fließenden Ströme dar, die sich im Zuge des Dissertationsvorhabens –auch aufgrund von durchgeführten Lokalaugenscheinen – in Zusammenarbeit mit 400-kV-Kabelbetreibern hinsichtlich der Berührungssituation (Spannungen) als auch der Korrosionssituation (Ströme) als relevant erwiesen haben.

Die Interpretation der Berechnungsergebnisse bedarf in jedem Fall eine Berücksichtigung des Schaltzustandes bzw. der Erdungskonfiguration der betroffenen Leitungen inklusive einer Beachtung der Lokalität entlang der Kabelleitung.

5.1 Ein Drehstromsystem

Nachfolgend sind die, aufgrund niederfrequenter wechselseitiger induktiver Beeinflussung von Kabelleitungen resultierende Querspannungs-, Querstrom- und Längsstromverteilungen angeführt. Zur einfacheren Interpretation der Diagramme für den Leser wird an dieser Stelle die in Abbildung 3-7 dargestellte Modellierungsvariante 1 der Erdung von Kabelschirmen in Muffen in vereinfachter Form erneut angeführt.

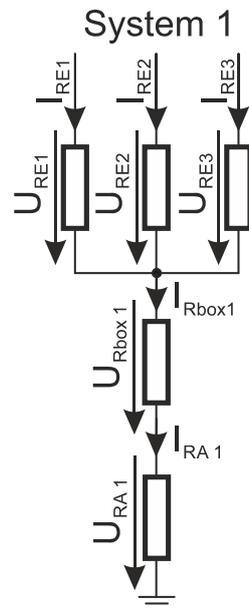


Abbildung 5-1: Model von Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit einem Drehstromsystem

Bei den nachfolgend angeführten Abbildungen sind keine Begleiter der berücksichtigt. Wenn in den Ergebnissen induzierte Spannungen angeführt sind, so handelt es sich bei geerdeten Leitern immer um Spannungen, die an den jeweiligen Kontaktübergangswiderständen der betrachteten Leiter bzw. an den Erdausbreitungswiderständen der betrachteten Muffen-Erdungsanlagen abfallen.

5.1.1 Erdausbreitungswiderstände von Muffen-Erdungsanlagen und Kontaktübergangswiderstände von Erdungsboxen

In den beiden nachfolgenden Diagrammen ist zum einen die Querspannungsverteilung und zum anderen die Querstromverteilung der Kabelleitung KL 1 abgebildet. Untersucht wurde der Einfluss des Kontaktübergangswiderstandes der Erdungsboxen R_{boxen} , wobei alle anderen Widerstände entsprechend den Legenden (siehe rechts oben in den Diagrammen) konstant beibehalten wurden. Am Anfang sowie am Ende der Kabelleitung sind keine Erdungsboxen vorhanden und dementsprechend sind dort nur die Spannungsabfälle über die Kontaktübergangswiderstände der Kabelschirme und über den Erdausbreitungswiderstand der Erdungsanlagen angeführt. In den Erdungsabschnitten, d.h. in den Muffen sind jeweils die Spannungsabfälle und drei Ströme angeführt.

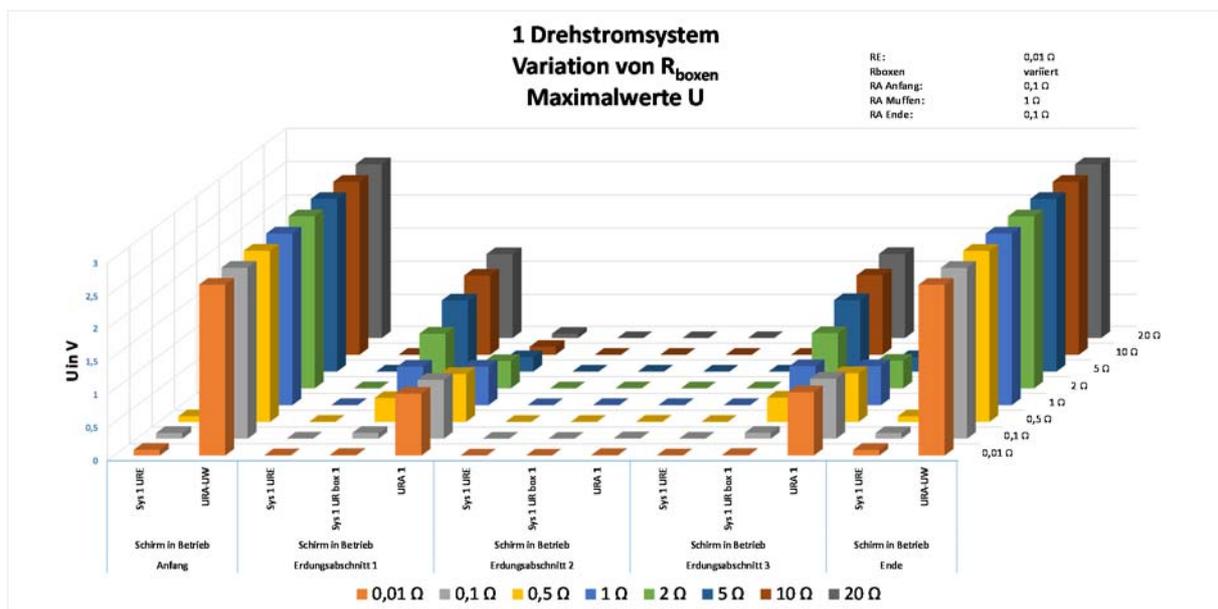


Abbildung 5-2: Spannungsverteilung bei Variation von R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem

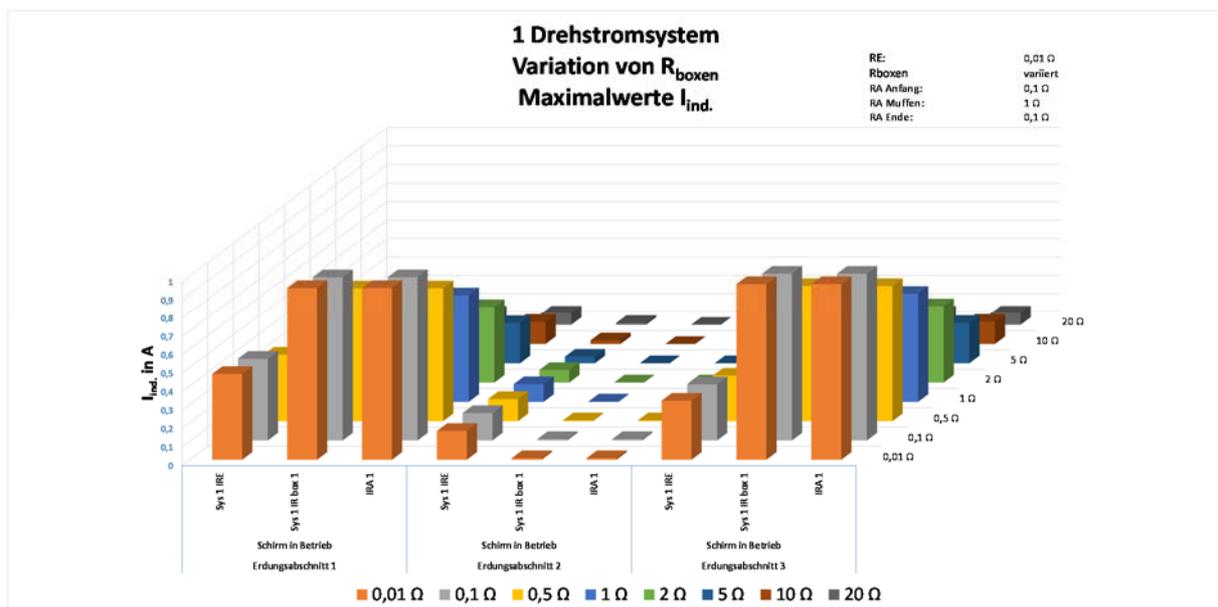


Abbildung 5-3: Querstromverteilung bei Variation von R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem

Der Effekt des Widerstandsanstieges, zu dem es beispielsweise durch Korrosion oder gelockerte Schraubverbindungen kommen kann, ist am Spannungsanstieg (siehe Abbildung 5-2 Sys1 $U_{R_{boxen1}}$) bzw. an der Stromreduktion in den Erdungsabschnitten (siehe Abbildung 5-3, Sys1 $I_{R_{boxen1}}$ bzw. I_{RA1}) ersichtlich. Die Absolutwerte der Amplituden der Spannungsabfälle und Ströme sind sehr niedrig, so dass es zu keinen Gefährdungen von Personal oder Anlagen kommt. Die Ursache dafür liegt an der sehr symmetrisch aufgebauten Kabelleitung KL 1.

Nachfolgend ist die Verteilung der induzierten Kabelschirmströme entlang der gesamten Kabelleitung, d.h. die Längsstromverteilung angeführt. Als Zusatzinformation sind in den Diagrammen der Längsstromverteilungen jeweils auch die Ströme, die am Anfang bzw. am Ende einer Kabelleitung in die entsprechenden Erdungsanlagen abfließen.

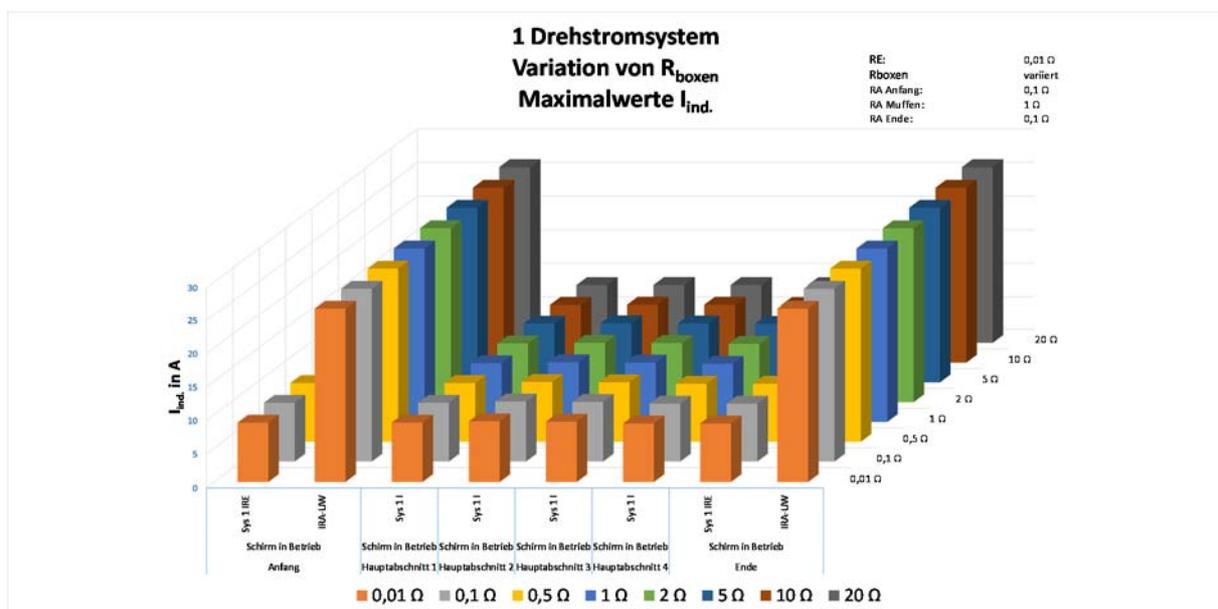


Abbildung 5-4: Längsstromverteilung bei Variation von R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem

Man erkennt, dass die induzierten Kabelschirmströme, die in den Hauptabschnitten, d.h. entlang der Kabelleitungslänge fließen vom Anstieg des Kontaktübergangswiderstandes R_{boxen} unbeeinflusst sind. Weiters ist ersichtlich, dass die Ströme in allen vier vorhandenen Hauptabschnitten dieselbe Amplitudenhöhe aufweisen. Dies ist gleichzeitig die Erklärung dafür, dass der Anstieg der R_{boxen} keine Auswirkung auf die Längs-Kabelschirmströme besitzt, da die Ströme in den Erdungsabschnitten bzw. in den Muffen nicht in die Erdungsanlagen abfließen.

Nachdem mit den beiden oben dargestellten Diagrammen gezeigt wurde, dass eine Erhöhung des Kontaktübergangswiderstandes der Erdungsboxen R_{boxen} in Kombination mit konstanten Erdausbreitungswiderständen von Muffen-Erdungsanlagen R_A zu keinen unzulässigen Berührungssituationen führt, liegt der nachfolgend angeführten Abbildung 5-5 die Fragestellung zu Grunde, wie sich eine zusätzliche Verschlechterung, d.h. Erhöhung des Erdausbreitungswiderstandes der Muffen-Erdungsanlagen R_A auswirkt.

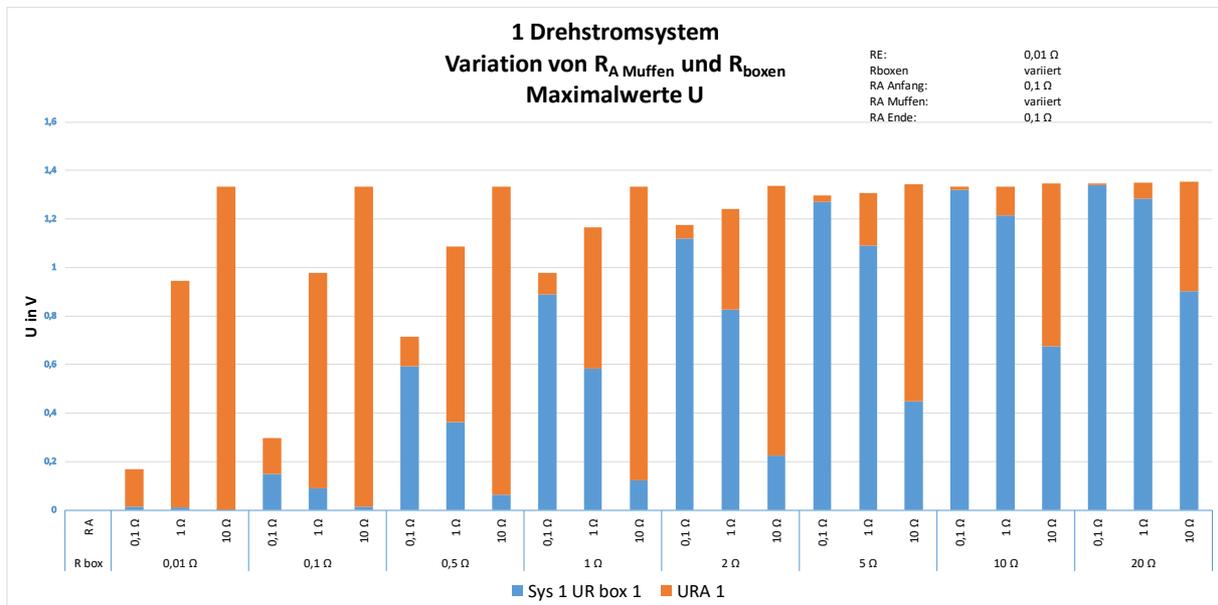


Abbildung 5-5: Spannungsaufteilung im Erdungsabschnitt 1 bei Variation von R_{boxen} und $R_{A \text{ Muffen}}$ - 1 Drehstromsystem

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich der auftretende Spannungsabfall erwartungsgemäß entsprechend den vorherrschenden Widerstandsverhältnissen aufteilt. Man erkennt, dass ein Anstieg von Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderständen deutlichen Einfluss auf die Höhe der induzierten Ströme und der daraus resultierenden Erdungsspannungen (Spannungsabfälle) besitzt. Der Abbildung 5-5 kann entnommen werden, dass im Normalbetrieb eines Drehstromsystems die in einer Muffenstelle auftretenden Spannungen sehr niedrig sind und somit keinerlei Gefahr für das Betriebs- oder Wartungspersonal besteht. Weiters kann der Abbildung 5-5 entnommen werden, dass bei niedrigen Kontaktübergangswiderständen der Erdungsboxen R_{box} der größte Anteil der Spannung, verursacht durch Querableitströme, am Erdausbreitungswiderstand der Muffen-Erdungsanlage R_A abfällt (siehe Länge der orangenen Balken in der linken Hälfte der Abbildung 5-5). Physikalisch bedeutet dies, dass es zwar zu einer Potentialanhebung der Muffen-Erdungsanlage bezogen auf die ferne Erde kommt, nicht jedoch zu einer erhöhten abgreifbaren Berührungsspannung innerhalb eines Muffenbauwerks.

Mit steigendem Kontaktübergangswiderstand von Erdungs- und Crossbondingboxen R_{box} verlagert sich der Spannungsabfall in das innere der Muffenbauwerke (siehe Länge der blauen Balken in der rechten Hälfte der Abbildung 5-5). Aufgrund der beengten Platzverhältnisse in Muffenbauwerken (siehe Abbildung 5-28) ist es denkbar, dass dieser Spannungsabfall von einer Person abgegriffen werden kann.



Ferner ist in der nachfolgenden Abbildung 5-6 der Spannungsabfall im Erdungsabschnitt 1 am Kontaktübergangswiderstand R_{box} bei dessen Anstieg dargestellt.

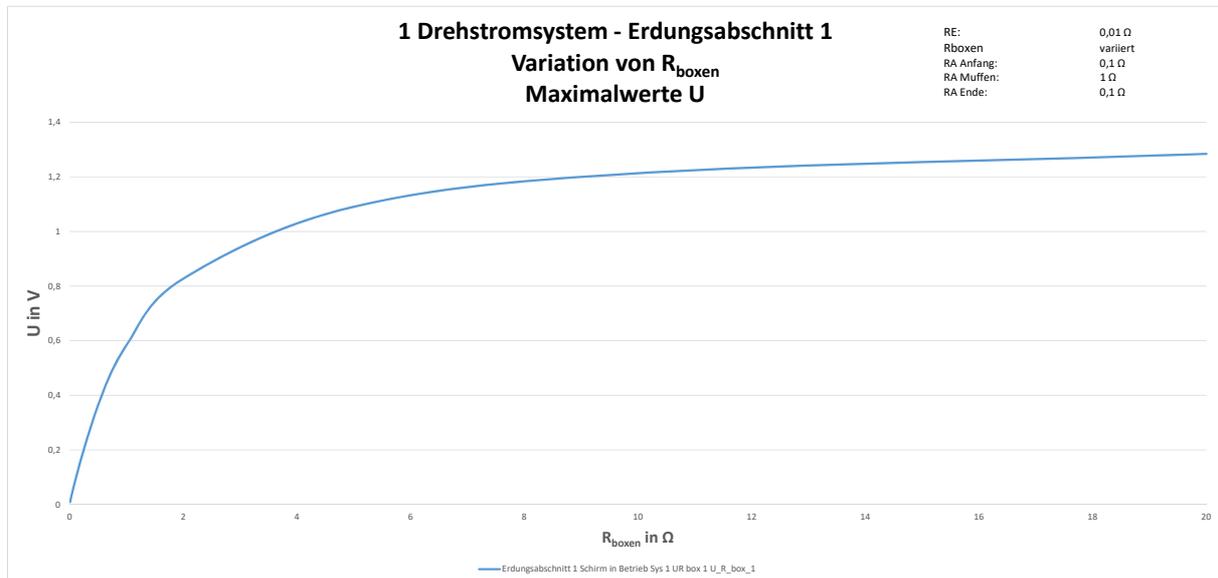


Abbildung 5-6: Spannung im Erdungsabschnitt 1 als Funktion des R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem

Welche Auswirkung der Anstieg des Kontaktübergangswiderstandes R_{box} auf den Querableitstrom im Erdungsabschnitt 1 hat, wird in Abbildung 5-7 gezeigt.

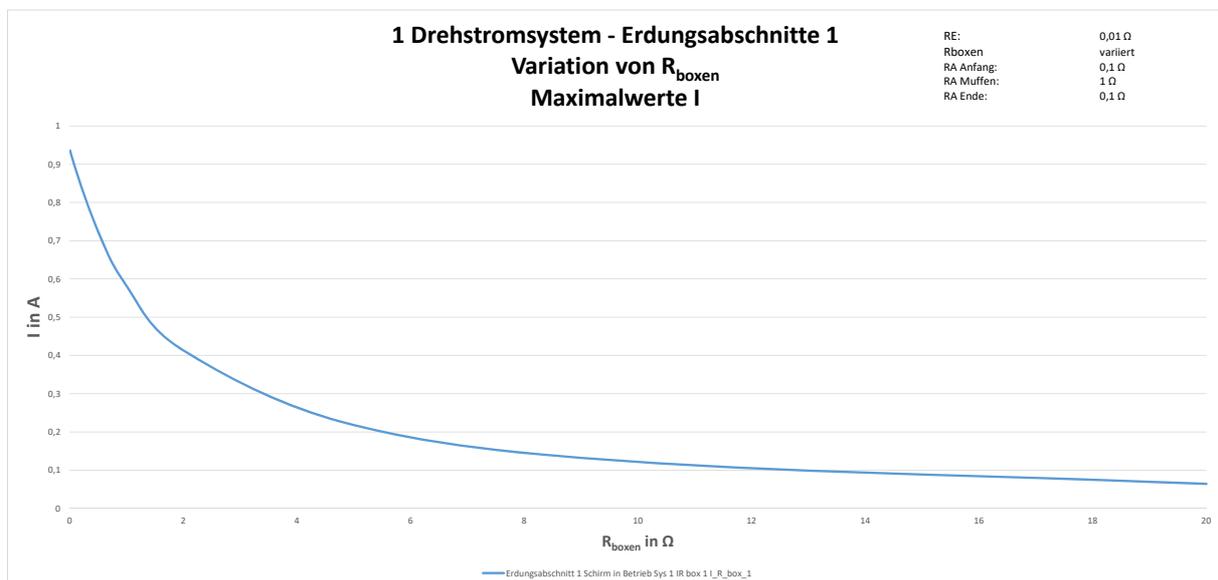


Abbildung 5-7: Strom im Erdungsabschnitt 1 als Funktion des R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem

Wie bereits oben bei der Interpretation der, in Abbildung 5-4 dargestellten Längsstromverteilung beschrieben, sieht man auch hier, dass trotz sehr niedriger Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderstände (R_{box} und $R_{\text{A Muffen}}$) der maximale Querableitstrom im Erdungsabschnitt 1 unter 1 A liegt.

Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 zeigen, dass der Zusammenhang zwischen dem Kontaktübergangswiderstand der Crossbonding- oder Erdungsboxen und den induzierten Strömen und daraus resultierenden Span-



nungsabfälle nicht linear ist. Dementsprechend können geringe Änderungen der Kontaktübergangswiderstände zu nicht linearen Änderungen der Spannungen und Ströme führen. Es ist daher erforderlich, Muffen-Erdungsanlagen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren, um im Erdkurzschlussfall einen Anstieg der auftretenden Erdungsspannungen in den Muffenbauwerken, durch bereits leichte Verschlechterung der Erdungsanlagen vorzubeugen.

5.1.2 Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding

Um Aussagen, die man möglichst direkt bei der Planung, beim Betrieb und bei der Wartung von Höchst- und Mittelspannungs-Kabelleitungen anwenden kann, zu erhalten, wurden die untersuchten Kabelleitungen, sowie auch die Verdrillungsvarianten gemeinsam mit mehreren europäischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern definiert. Den Abbildungen des Kapitels 4.3 kann entnommen werden, dass es im Höchstspannungsnetz üblich ist Kabelleitungen sowohl mit Verdrillung (Lagetausch) der Phasen als auch ohne Verdrillung der Phasen zu realisieren. Eine Verdrillung wird in der Regel durchgeführt, um einen möglichst hohen elektrischen Systemsymmetriegrad der Kabelleitung zu erhalten. Handelt es sich bei einer Kabelleitung um eine Teilverkabelung einer Freileitung, so kann die Verdrillung der Phasen im Freileitungsabschnitt realisiert werden, womit die Kabelleitung bei isolierter Betrachtung (Außerachtlassen der Freileitung), als nicht verdrillt gilt. Bei einer reinen Kabelleitung (z. B. Verbindung zwischen zwei Umspannwerken) findet die Verdrillung im Kabelabschnitt statt.

Das Crossbonding (Lagetausch) der Kabelschirme stellt eine technische Notwendigkeit dar, um die induzierten Kabelschirmströme und damit die Zusatzverluste gering zu halten. Den Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-8 kann entnommen werden, dass bei den Kabelleitungen KL 1, KL 2 und KL 3 ein Crossbonding angenommen wurde bzw., dass bei den in der Realität existierenden 400-kV-Kabelleitungen ein Crossbonding der Kabelschirme existiert. Eine weitere (theoretische) Möglichkeit der Unterdrückung von induzierten Kabelschirmströmen und den daraus resultierenden Zusatzverlusten stellt die einseitige oder gar keine Erdung von Kabelschirmen dar, wobei es dabei zu hohen induzierten Spannungen am nicht geerdeten Ende der Kabelschirme kommt.

Sämtliche Untersuchungsergebnisse der jeweiligen Kabelleitungen beinhalten auch den Einfluss der jeweiligen Verdrillung und des jeweiligen Crossbondings. Da sich die Kabelleitungen neben diesen beiden Einflussfaktoren durch weitere Faktoren (Anzahl der Systeme, Kabeltypen [Materialien, Geometrie, Querschnittsflächen], spez. Bodenwiderstand, Verlegetiefe, unterschiedliche beeinflussende Ströme) unterscheiden, lassen sich keine Aussagen über die Auswirkungen der unterschiedlichen Verdrillungsvarianten ableiten. Daher wird Kabelleitung KL 1 herangezogen, um die vier, in der Tabelle 4-4 dargestellten Kombinationen aus Phasenverdrillung und Kabelschirm-Crossbonding hinsichtlich ihres Einflusses auf die Höhe der induzierten Kabelschirmströme und Spannungen zu untersuchen.

Abbildung 5-8 zeigt, wie sich die Verdrillungsvariante 3 (siehe Tabelle 4-4), d.h. wie sich der gegenseitige Positionstausch der Phasenleiter und der Kabelschirme in jeder dritten Muffe im Vergleich zur Verlegung ohne Verdrillung auf die Längsstromverteilung eines Drehstromsystems der Kabelleitung KL 1 auswirkt.

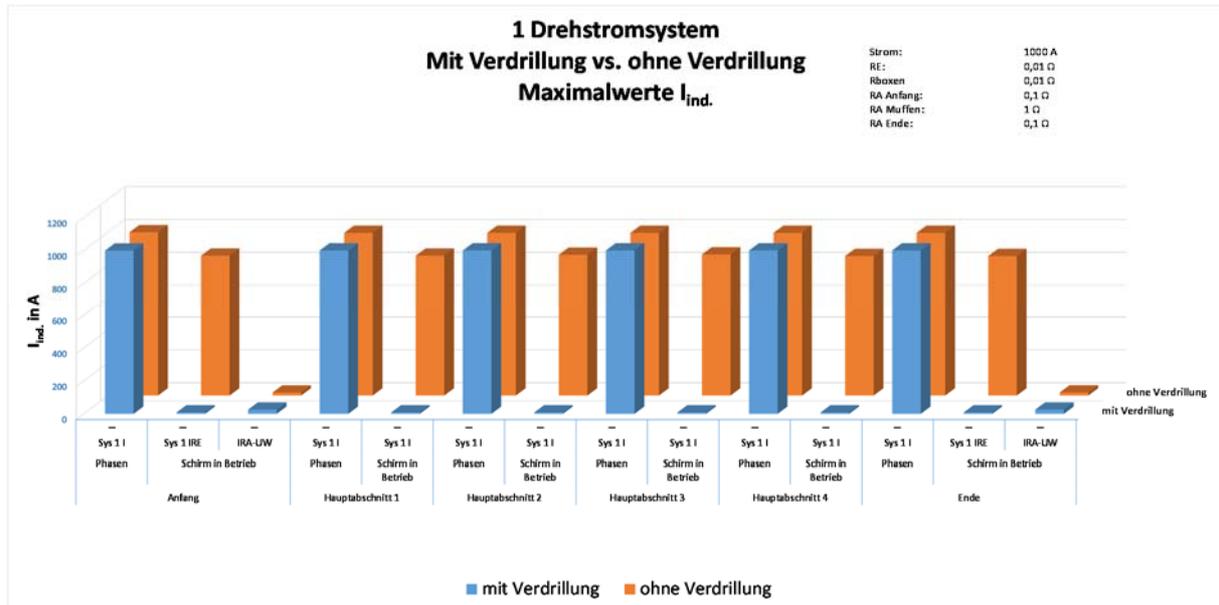


Abbildung 5-8: Längsstromverteilung - Vergleich zw. Verdrillung und keine Verdrillung - 1 Drehstromsystem

Der Abbildung 5-8 kann entnommen werden, dass ein gegenseitiger Positionstausch, der Phasen- und der Kabelschirmleiter zu einer deutlichen Reduktion der induzierten Kabelschirmströme führt.

Die Auswirkung die Verdrillungsvariante 3 (siehe Tabelle 4-4, gegenseitiger Positionstausch von Phasen- und Kabelschirmleitern in jeder dritten Muffe) auf die Querableitströme in den Erdungsabschnitten 1 bis 3 haben ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

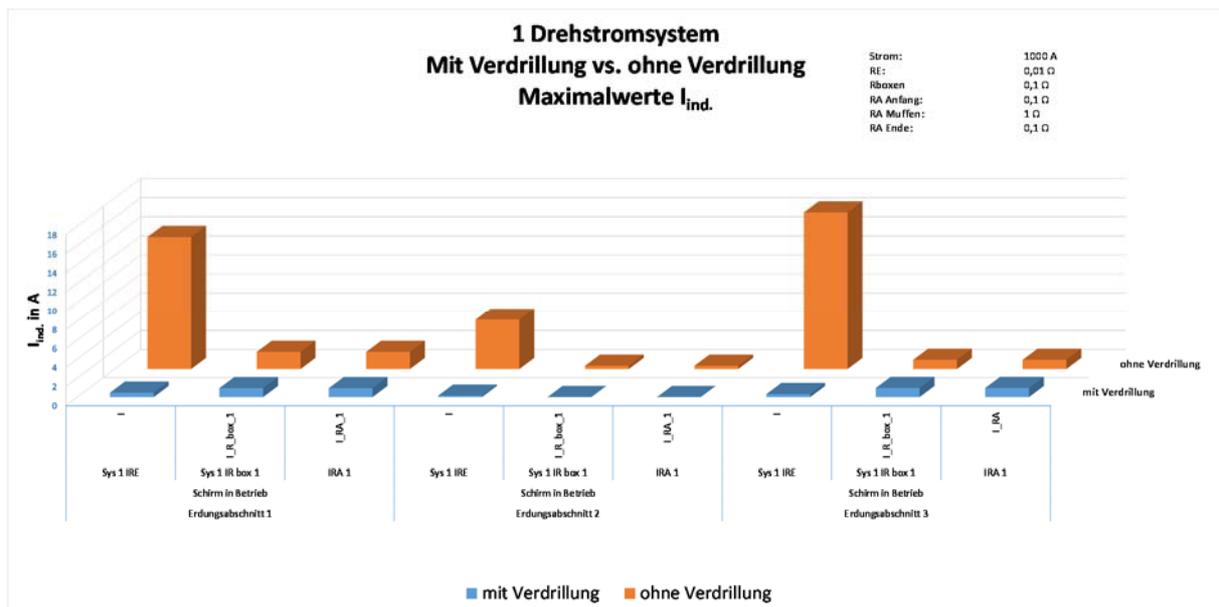


Abbildung 5-9: Querstromverteilung - Vergleich zw. Verdrillung und keine Verdrillung - 1 Drehstromsystem

Weiters kann der Abbildung 5-9 entnommen werden, dass ein gegensinniger Positionstausch der Phasen- und der Kabelschirmleiter auch hier, in Bezug auf die Querableitströme, wie auch auf die Längsstromverteilung zu einer deutlichen Reduktion führt.

Ferner wurde der Einfluss des gegensinnigen Positionstausches der Phasen- und der Kabelschirmleiter auf die Spannungsverteilung in den Erdungsabschnitten sowie am Anfang und am Ende der Kabelleitung untersucht und ist in der Abbildung 5-10 dargestellt.

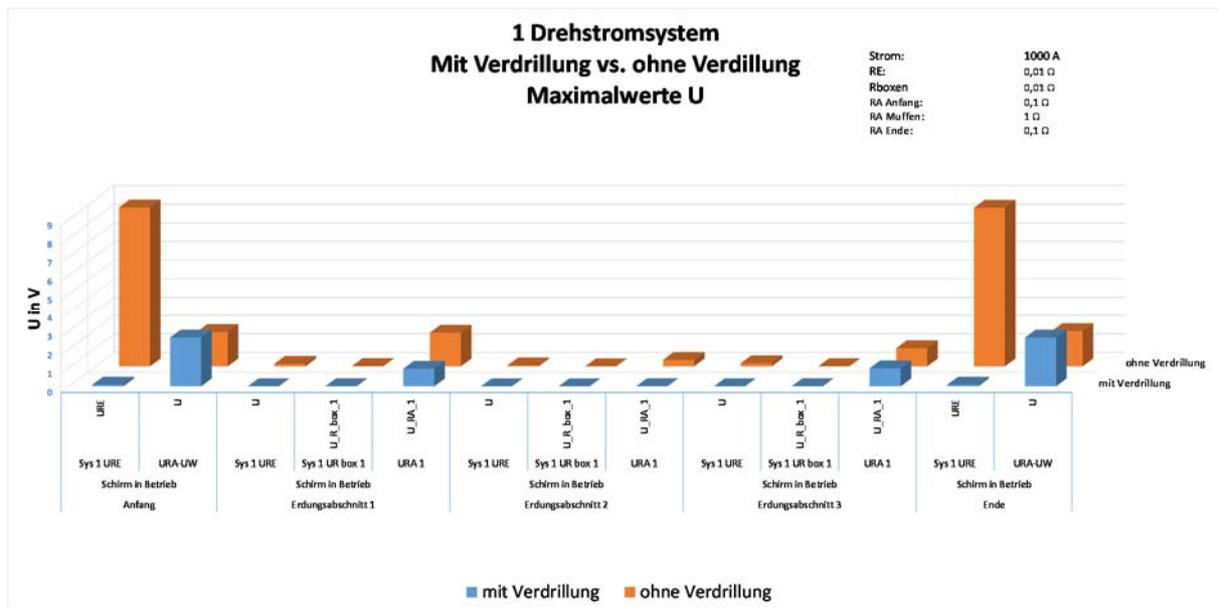


Abbildung 5-10: Spannungsverteilung - Vergleich zw. Verdrillung und keine Verdrillung - Ein Drehstromsystem

Die Berechnungsergebnisse (es ist nur eine Auswahl angeführt) haben gezeigt, dass nur ein gegensinniger Lagetausch der Phasen und der Kabelschirme zu einer Reduktion der Höhe der induzierten Kabelschirmströme führt. Ein gleichsinniger Lagetausch der Phasen und der Kabelschirme führt zu tendenziell gleichen Untersuchungsergebnissen wie gar kein Lagetausch der Leiter bzgl. der induzierten Kabelschirmspannungen und -ströme.

5.1.3 Fehlerfall (1-poliger Erdkurzschluss)

Beim Durchführen von worst-case-Betrachtungen der ohmsch-induktiven Beeinflussung von Kabelleitungen mit dem Ziel maximale Fehler- und Erdungsspannungen zu ermitteln, ist es entscheidend die entsprechende Fehlerart und den entsprechenden Fehlerort zu wählen. Hinsichtlich der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen stellt der 1-polige Erdkurzschluss den ungünstigsten Fehlerfall dar. Um die größtmögliche Ausbildung der induktiven Beeinflussung zu ermöglichen, wird ein Fehler am Ende einer einseitig gespeisten Kabelleitung angenommen. In diesem Fall durchfließt der beeinflussende Fehlerstrom (Annahme für die Berechnungen: 20 kA) die größtmögliche Länge des Parallellaufs der Leitungen. Um den ungünstigsten Leiter, bei dem der 1-polige Erdkurzschluss die größte Erdungsspannung hervorruft zu eruieren, werden in der vorliegenden Dissertation Variantenrechnungen durchgeführt. Hierbei werden jeweils alle vorhandenen Phasen (3, 6 oder 12, je nach Kabelleitung) sequenziell als fehlerbehaftet betrachtet. Startpunkt ist der Ausgangszustand, bei dem alle Phasen vom jeweiligen Normalbetriebsstrom durchflossen sind und alle Kabelschirme über die in der Tabelle 4-3 angegebenen Standardwiderstandswerte geerdet sind, wobei letztlich

parallel zum Normalbetriebsstrom der fehlerfreien Phasen der Fehlerstrom von 20 kA in der fehlerbehafteten Phase fließt. Währenddessen werden die, in allen anderen Leitern (Phasen und Kabelschirme) induzierten Ströme berechnet.

Für ein Drehstromsystem der Kabelleitung 1-1 (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-5) sind in den Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-13 die fließenden Kabelschirmströme, die Querableitströme in den Muffen-Erdungsanlagen und die daraus resultierende Spannungsverteilung grafisch dargestellt. Zusätzlich zu den induzierten Größen ist in den Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-13 die Information enthalten, wie sich das Crossbonding der Kabelschirme (Verdrillungsvariante 1, siehe Tabelle 4-4) im Fehlerfall auf die induzierten Spannungen und Ströme auswirkt.

Abbildung 5-11 zeigt die resultierende Kabelschirm-Längsstromverteilung entlang eines Drehstromsystems der Kabelleitung KL 1 bei Auftreten eines 1-poligen Erdkurzschlusses mit einem Strom der fehlerbehafteten Phase von 20 kA.

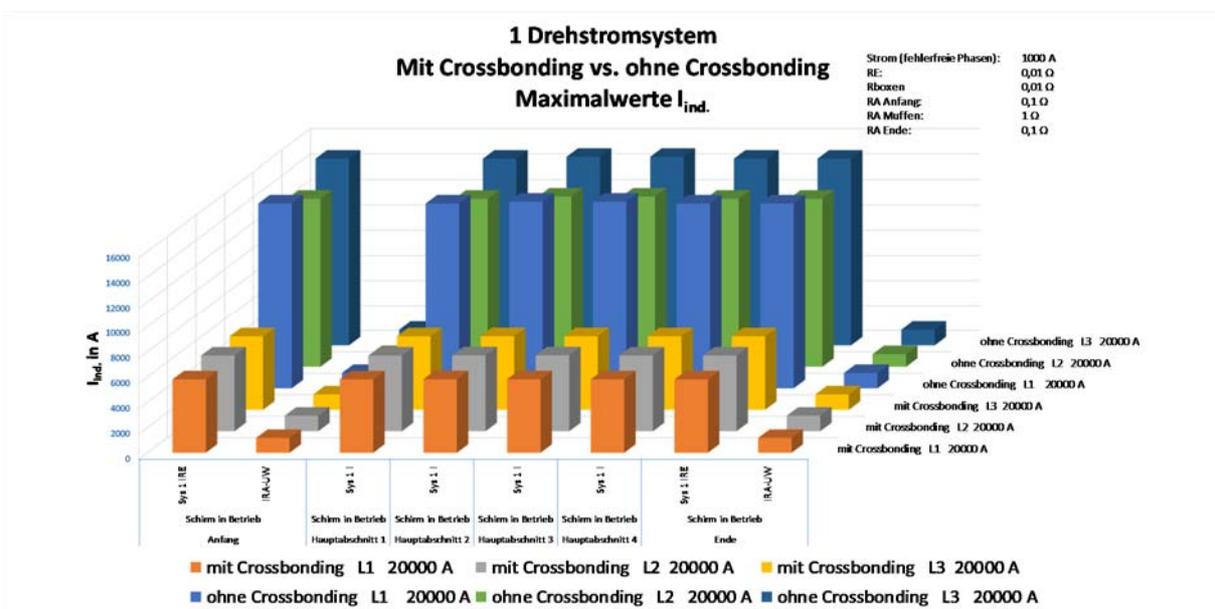


Abbildung 5-11: Längsstromverteilung im Fehlerfall - Vergleich zw. Crossbonding und kein Crossbonding - 1 Drehstromsystem

Der Abbildung 5-11 kann entnommen werden, dass bei 400-kV-Kabelleitungen, die ohne Crossbonding ausgeführt sind im Fehlerfall (1-poliger-Erdkurzschluss), bei einem Fehlerstrom von 20 kA im Kabelschirm der fehlerbehafteten Phase bis zu ca. 15 kA bzw. 75% des Fehlerstroms fließen. Berücksichtigt man die Tatsache, dass dem Strom im vorliegenden Fall zwei weitere Kabelschirme mit derselben Querschnittsfläche, d.h. mit demselben ohmschen Widerstand und mit derselben Selbstimpedanz als mögliche Rückleiter zur Verfügung stehen, so kann daraus die Bedeutung der Koppelimpedanz und damit gleichbedeutend die Bedeutung der niederfrequenten induktiven Beeinflussung von Kabelleitungen abgeleitet werden. Dies ist insbesondere auch für Kabelleitungen der Mittelspannungsebene relevant, wenn man Berücksichtigt, dass dort üblicherweise kein Crossbonding der Kabelschirme durchgeführt wird. Weiters kann aus den in Abbildung 5-11 dargestellten Berechnungsergebnissen abgeleitet werden, dass ein durchgeführtes Crossbonding für eine deutliche Entlastung der Kabelschirme sorgt. Darüber hinaus sieht man in der Abbildung 5-11, dass bei einem Fehler in der Phase L2 der Kabelschirm einen geringeren Fehlerstrom führt als die beiden äußeren Kabelschirme. Dies liegt daran, dass die Phase L2 der untersuchten Kabelleitung KL 1 in der Mitte des Drehstromsystems (siehe ein

Drehstromsystem der Abbildung 4-1) liegt. Durch ihre Mittellage besitzt sie im Gegensatz zu den Phasen L1 und L3 auf beiden Seiten Kabelschirme, die sich reduzierend auswirken.

In Abbildung 5-12 ist die resultierende Querstromverteilung der drei Erdungsabschnitte der Kabelleitung KL 1, bei Auftreten eines 1-poligen Erdkurzschlusses mit einem Strom der fehlerbehafteten Phase von 20 kA auswirkt. Wie bei der vorangehenden Abbildung ist auch hier der Einfluss des Crossbondings im Fehlerfall dargestellt.

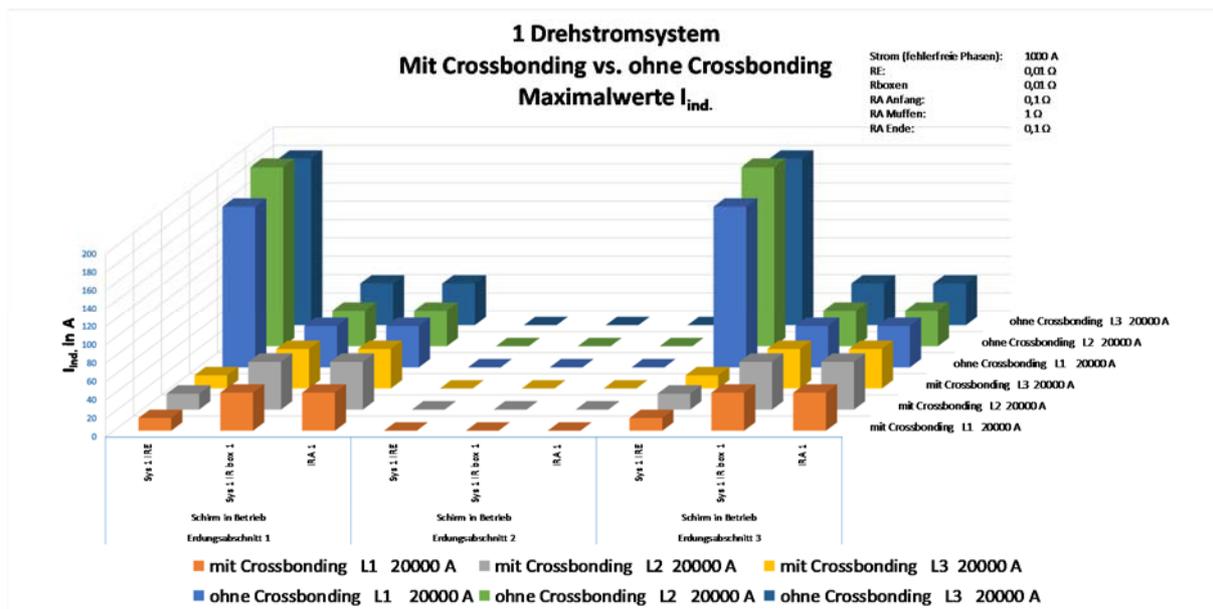


Abbildung 5-12: Querstromverteilung im Fehlerfall - Vergleich zw. Crossbonding und kein Crossbonding - Ein Drehstromsystem

Beim Vergleich der Querstrom- mit der Längsstromverteilung sieht man, dass der in das Erdreich abfließende Strom nur einen Bruchteil des in den Kabelschirmen fließenden Längsstromes entspricht. Das bedeutet, dass die resultierenden Ströme, verursacht durch die abschnittsweise induzierten Spannungen, an den Enden der Abschnitte, d.h. in den Erdungsabschnitten (Muffen) über die Potentialausgleichsschiene weitergeführt werden und nicht in die Erdungsanlage der Muffen abgeleitet werden. Dies trifft nicht nur auf den, an dieser Stelle diskutierten Fehlerfall, sondern auch für den fehlerfreien Fall von 400-kV-Kabelleitungen.

In [20] wird angeführt, dass bei durchgeführten Erdschlussmessungen in einem Verteilnetz an 10-kV-Kabelleitungen dasselbe Verhalten festgestellt wurde. D.h., dass im Erdschlussfall ein Großteil des Stromes über die Kabelschirme zurückfließt und nicht in die lokale Erdungsanlage der Ortsnetzstation. Das trifft auch dann zu, wenn Begleiter vorhanden sind. Diese Erkenntnis muss bei der Auslegung von Kabelschirmen bzgl. ihrer Stromtragfähigkeit, bei Schutzgeräteeinstellungen bzgl. der Abschaltzeiten sowie bei der Zustandsbewertung von Kabelleitungen zukünftig besondere Berücksichtigung finden. Denn ein hoher Kabelschirmlängsstrom in Kombination mit einer geringen Querschnittsfläche führt zur thermischen Überlastung der Kabelschirme und letztlich zur vorzeitigen thermischen Alterung der Isolierstoffe.

Die resultierende Spannungsverteilung in den Erdungsabschnitten sowie am Anfang und Ende eines Drehstromsystems der Kabelleitung KL 1 während eines 1-poligen Erdkurzschlusses mit einem Fehlerstrom von 20 kA ist in der nachfolgenden Abbildung 5-13 dargestellt. Wie bei den beiden vorangegangenen Abbildungen ist auch in der nachfolgenden Abbildung der Einfluss des Crossbondings auf die Spannungsverteilung ersichtlich.

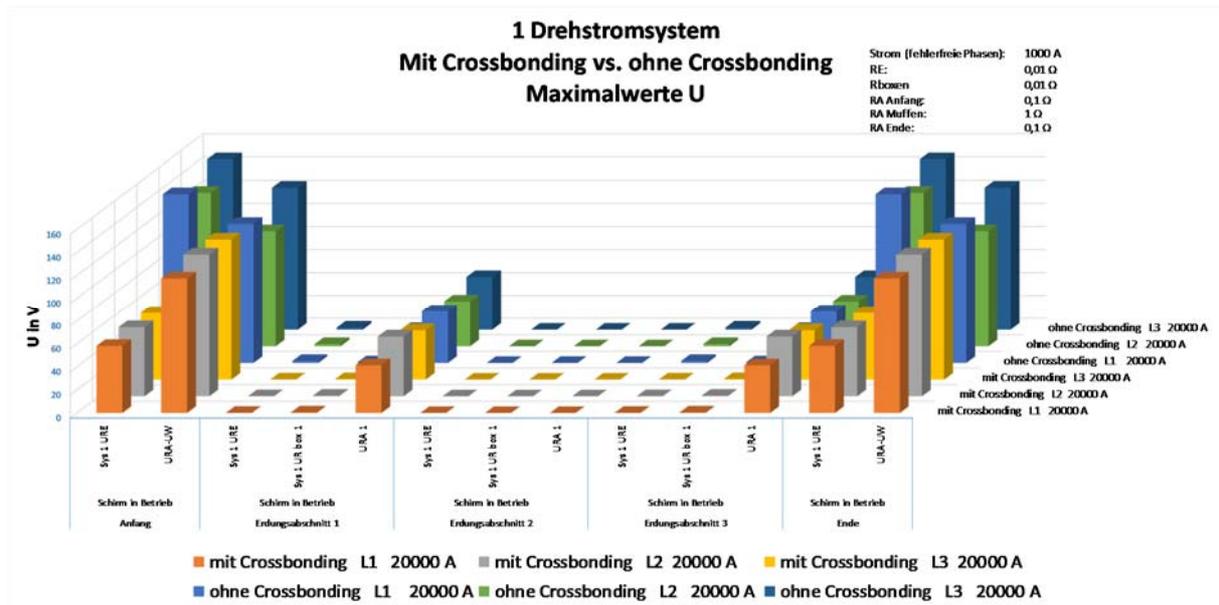


Abbildung 5-13: Spannungsverteilung im Fehlerfall - Vergleich zw. Crossbonding und kein Crossbonding - 1 Drehstromsystem

Bei den, in der Abbildung 5-13 dargestellten Spannungen handelt es sich, aufgrund des angenommenen Schaltzustandes (Ausgangszustand) um die, an den Kontaktübergangswiderständen auftretenden Spannungsabfälle. Darüber hinaus sind in der Abbildung 5-13 die Potentialunterschiede zwischen den jeweiligen Erdungsanlagen und der Bezugs Erde (bzw. der fernen Erde im Sinne der ÖVE/ÖNORM EN 50522 bzw. der ÖVE/ÖNORM E 8383) abgebildet. Die in der Abbildung 5-13 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, dass im Fehlerfall am Anfang und am Ende der Kabelleitung, wo die Ströme gezwungenermaßen über die dort vorhandenen Widerstände in das Erdreich abfließen müssen, Spannungen von bis zu 150 V bei 20 kA Fehlerstrom auftreten können. Zieht man die Berührungsspannungskurve zur Beurteilung heran (siehe grüne Markierung in Abbildung 7-2), so sieht man, dass die dauerhaft zulässige Berührungsspannung U_{TP} bei 85 V liegt und somit überschritten ist und dass der Fehlerstrom innerhalb von 700 ms abgeschaltet werden muss. Wenn man berücksichtigt, dass das Höchstspannungsnetz in Österreich und Europa starr geerdet ist und dass in starr geerdeten Netzen Fehler mit Erdverbindung, wie der in der vorliegenden Dissertation angenommene 1-polige Erdkurzschluss i.d.R. sehr schnell abgeschaltet werden, so kann an dieser Stelle die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es im vorliegenden Fall zu keiner unzulässigen Gefährdungssituation kommt. Zu beachten ist jedoch die Tatsache, dass, wie in Kapitel 7 ausgeführt, aktuell in Österreich keine auf 400-kV-Kabelleitungen anwendbaren Normen bzgl. Beurteilung induzierter Spannungen existieren.



In diesem Kapitel sind die Auswirkungen von Erdausbreitungs- und Kontaktübergangswiderständen in Muffen-Erdungsanlagen von Kabelleitungen bei einem 1-poligen Erdkurzschluss untersucht worden.

Bei einem 1-poligen-Erdkurzschluss von Freileitungen wird der Strom, der über die Erdungsanlage eines fehlerbehafteten Mastes in das Erdreich fließt, laut Fachliteratur durch das Erdseil wesentlich reduziert. Dies wird mit dem sogenannten Reduktionsfaktor angegeben. Dieser kann für eine Vielzahl der üblichen Mastanordnungen und Erdseile (im Wesentlichen von der Geometrie der Seilanordnung abhängig) aus Tabellenbüchern und Normen entnommen werden und liegt beispielsweise gemäß [19], Bild 16.13 je nach Mastgeometrie und Abstand zwischen Phasen und Erdseil(en) in einem Bereich zwischen ca. 0,4 und ca. 0,98. Größenordnungen von Reduktionsfaktoren gängiger Erdseile bei Freileitungen und gängiger Schirme bei Kabeln sind auch im Anhang I in [25] angeführt. Die Vielzahl der Verbindungen der Erdseile über die Masten und ihre Erdungsanlagen mit dem Erdreich (bei jedem Mast, d.h. alle einige hundert Meter) führt gemäß [18] zu einer Entlastung der fehlerbehafteten Erdungsanlage (ausgenommen bei einem 2-poligen Erdkurzschluss). Aufgrund der strukturellen Unterschiede zwischen Freileitungen und Kabelleitungen ist es daher umso wichtiger die Erdungsanlagen der Muffenstellen von Kabelsystemen niederohmig auszuführen. Denn bei Einzellängen von Höchstspannungs-Kabelleitungen bis zu 1,3 km können sich Abstände zwischen den Kabelschirmerdungspunkten von bis zu 3,9 km ergeben. Zusätzlich ist die Anzahl der Erdungspunkte von Kabelschirmen, bedingt durch die deutlich kürzere Leitungslänge der HS-Kabelleitungen, bezogen auf HS-Freileitungen deutlich kleiner.

Wie oben ausgeführt, wird bei Freileitungen die Erdfehler-Stromaufteilung mit Hilfe des sogenannten Reduktionsfaktors für das Erdseil durchgeführt. Hierbei genügt es üblicherweise, wenn alle bestehenden Widerstände zwischen dem Anschlusspunkt eines Freileitungs-Erdseiles und der Bezugs Erde (fernen Erde) zu einem Mast-Erdungswiderstand zusammengefasst werden. Bei HS-Kabelleitungen ist ein Zusammenfassen der Widerstände einer Muffen-Erdungsanlage zu einem Gesamtwiderstand nicht möglich, da sich ansonsten Kabelschirmkreisströme nicht ausbilden können. Hier ist eine möglichst genaue Modellierung der Erdungsanlagen von Muffen nötig. In Abbildung 5-14 ist die Modellierungsvariante der Erdungsanlagen von 400-kV-Kabelleitungen mit zwei Drehstromsystemen, wie sie in der vorliegenden Dissertation angewendet wurde, abgebildet. Darin sind die Widerstände von allen, in der jeweils betrachteten Erdungsanlage vorkommenden Erdungsleitungen, Kontaktübergangswiderstände von Anschlusspunkten und der Erdausbreitungswiderstand der jeweiligen Muffen-Erdungsanlage enthalten.

5.2 Zwei Drehstromsysteme

Die Ausführungen des vorigen Kapitels 5.1 beziehen sich auf die induktive Beeinflussung einer Kabelleitung, die aus einem einzigen Drehstromsystem besteht. Reale 400-kV-Kabelleitungen bestehen jedoch fast immer aus zwei oder vier Drehstromsystemen. In diesem Kapitel sind für zwei Drehstromsysteme der Kabelleitung 1-1 (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-5) die berechneten Kabelschirmströme, die Querableitströme in den Muffen-Erdungsanlagen und die daraus resultierende Spannungsverteilung grafisch dargestellt.

Zur einfacheren Interpretation der Diagramme für den Leser ist in Abbildung 5-14 das Modell der Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit zwei Drehstromsystemen angeführt.

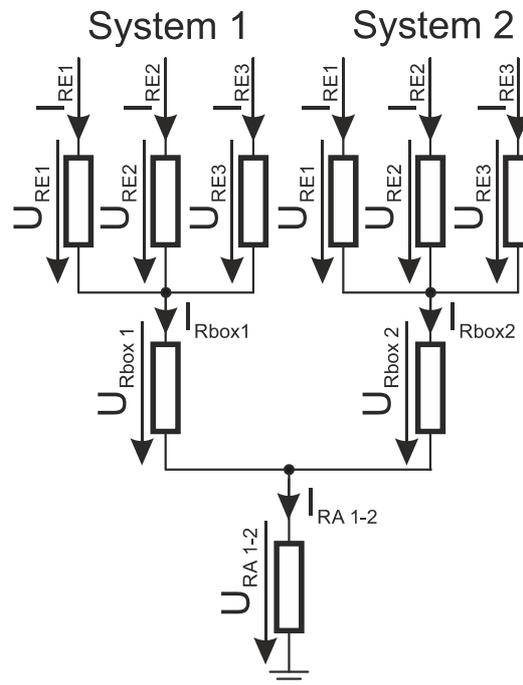


Abbildung 5-14: Model der Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit zwei Drehstromsystemen

5.2.1 Beide Drehstromsysteme in Betrieb

In der folgenden Abbildung 5-15 ist die Kabelschirm-Längsstromverteilung von zwei, sich in Normalbetrieb befindlichen Drehstromsystemen, d.h. mit einem Strom pro Phasenleiter von 1 kA dargestellt. Im Gegensatz zu den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17) ist die Variation der Kontaktübergangswiderstände der beiden Erdungsboxen R_{boxen} in Abbildung 5-15 nicht dargestellt, da keinerlei Einfluss auf die Kabelschirm-Längsströme vorhanden ist.

Abbildung 5-15 zeigt, dass der maximale Längsstrom in den Kabelschirmen beider Drehstromsysteme der untersuchten Kabelleitung 1-1, d.h. bei flacher Verlegung (siehe Abbildung 4-1) im Normalbetrieb, trotz Kabelschirm-Crossbonding bei ca. 80 A liegt.

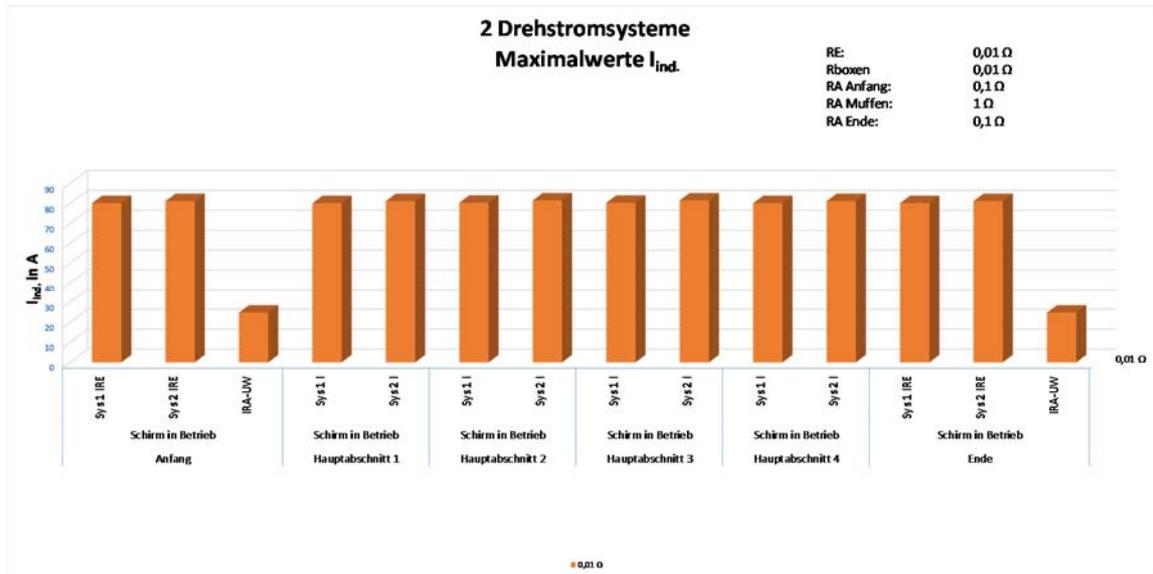


Abbildung 5-15: Längsstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - beide DS-Systeme in Betrieb

Die Querstromverteilung der drei Erdungsabschnitte zweier Drehstromsysteme der Kabelleitung KL 1 im Normalbetrieb, d.h. mit einem Strom pro Phasenleiter von 1 kA ist in Abbildung 5-16 dargestellt. Zusätzlich ist in der nachfolgenden Abbildung der Einfluss eines Anstieges der Kontaktübergangswiderstände der beiden Erdungsboxen R_{boxen} dargestellt. Wie bereits im Kapitel 5.1, in dem nur ein Drehstromsystem untersucht wurde gezeigt, fließen auch bei zwei vorhandenen Drehstromsystemen nur sehr kleine Querableitströme in den Muffen-Erdungsanlagen. Aufgrund der Längssymmetrie der untersuchten Kabelleitung 1-1 (siehe Abbildung 4-5) betragen die Querableitströme im mittleren Erdungsabschnitt (Muffe) Null Ampere.

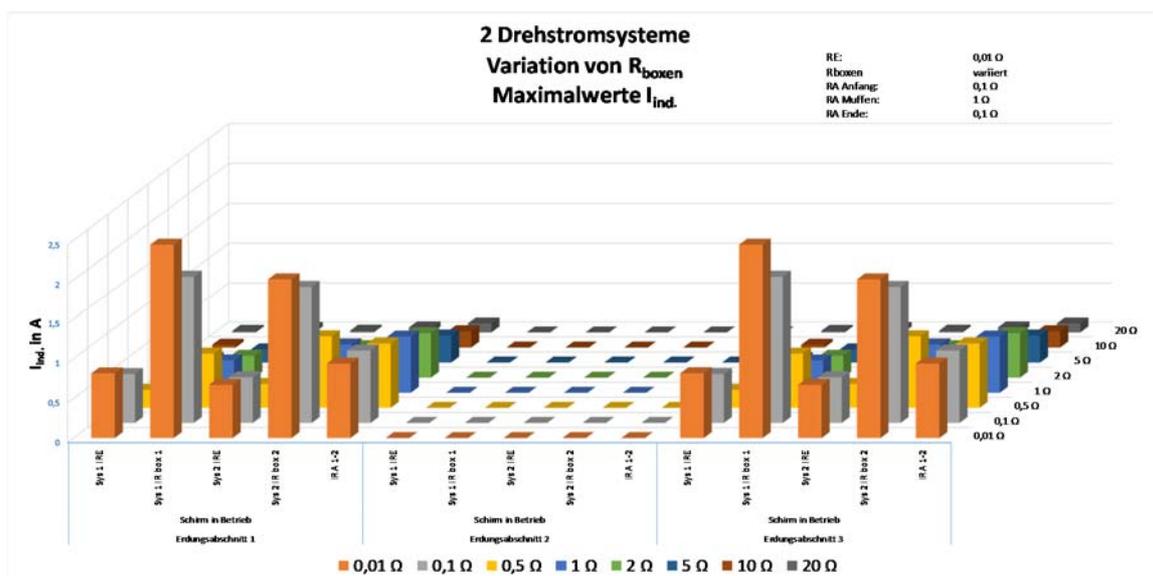


Abbildung 5-16: Querstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - beide DS-Systeme in Betrieb

Die resultierende Spannungsverteilung in den Erdungsabschnitten sowie am Anfang und Ende der beiden Drehstromsysteme der Kabelleitung KL 1 im Normalbetrieb, d.h. mit einem Strom pro Phasenleiter von 1 kA ist in der nachfolgenden Abbildung 5-17 dargestellt. Auch hier ist der Einfluss eines Anstieges der Kontaktübergangswiderstände der beiden Erdungsboxen R_{boxen} dargestellt.

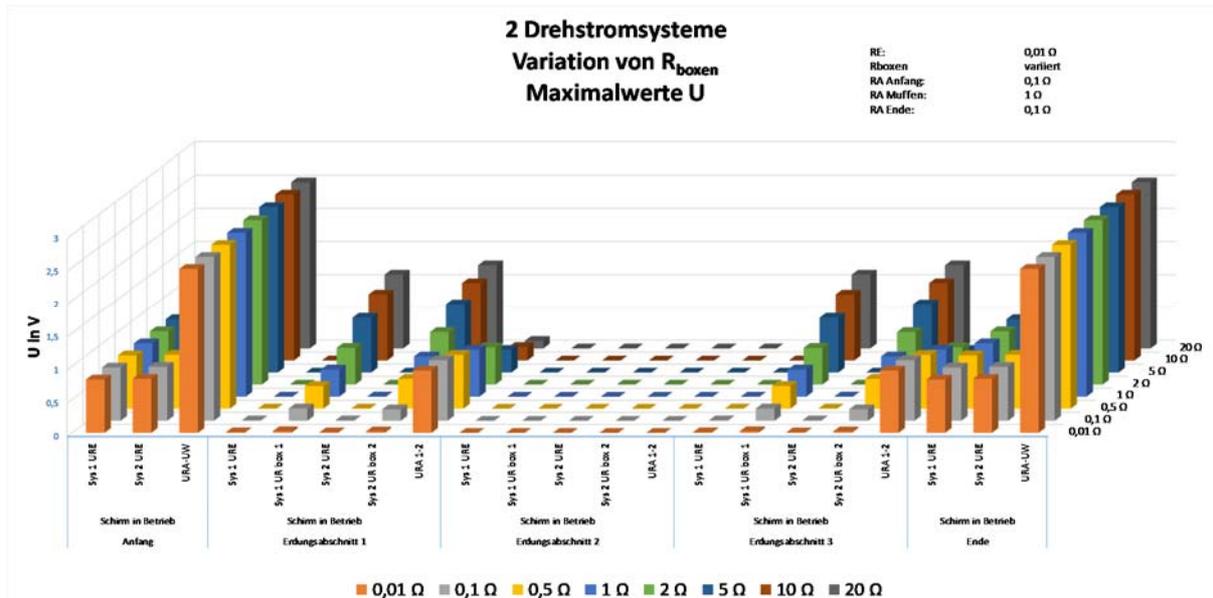


Abbildung 5-17: Spannungsverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - beide DS-Systeme in Betrieb

Abbildung 5-17 zeigt, dass im Normalbetrieb einer symmetrisch aufgebauten Kabelleitung (KL 1-1) mit zwei Drehstromsystemen, trotz der Phasenströme von 1 kA nur sehr kleine Spannungsabfälle in den Muffenbauwerken sowie am Anfang und Ende, d.h. im Bereich der Kabelendverschlüsse auftreten.

5.2.2 Ein Drehstromsystem in Betrieb, das andere außer Betrieb

Wenn eine Kabelleitung aus zwei Drehstromsystemen besteht, so finden Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten üblicherweise abwechselnd statt. Das heißt, dass ein Drehstromsystem gewartet wird, während das andere im Normalbetrieb oder im Grenzlastbetrieb weiterbetrieben wird. Dies entspricht dem, in der Tabelle 4-2 definierten Schaltzustand A. Außenleiter und Kabelschirme sind beim außer Betrieb befindlichen Kabelsystem geerdet.

Für diesen Fall ist in der nachfolgenden Abbildung 5-18 die Kabelschirm-Längsstromverteilung dargestellt. Der beeinflussende Strom beträgt 1 kA.

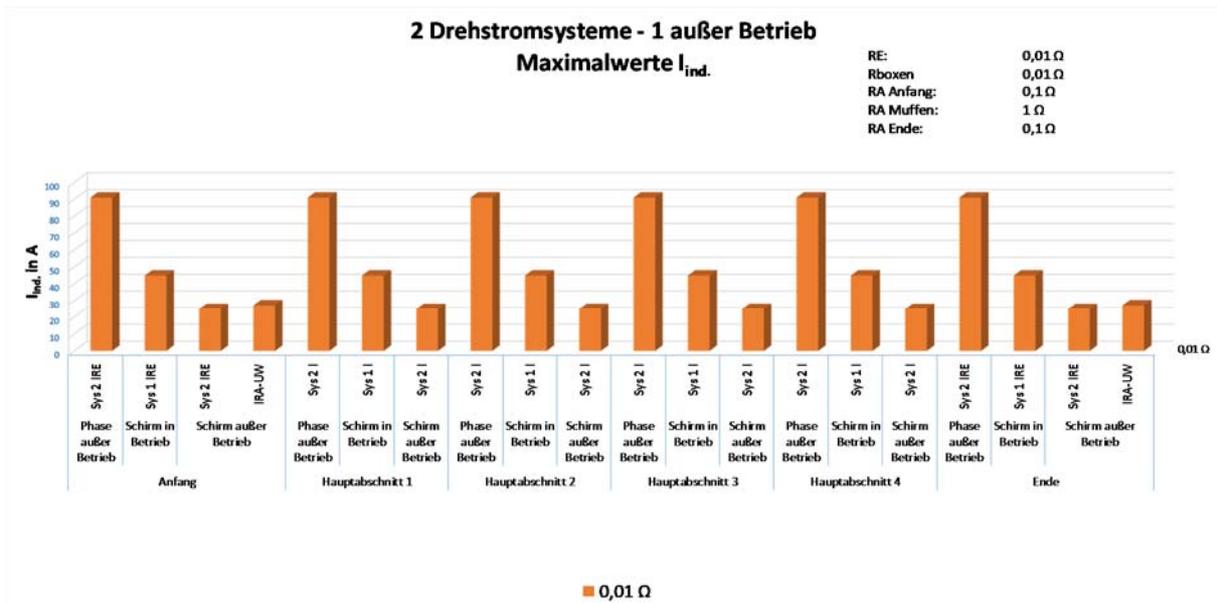


Abbildung 5-18: Längsstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{AMuffen} = konst. = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - 1 DS-System außer Betrieb

Im Gegensatz zum Normalbetriebszustand beider Drehstromsysteme, wo die maximalen Kabelschirm-Längsströme bei ca. 80 A liegen (siehe Abbildung 5-15), liegen die maximalen Kabelschirm-Längsströme, des sich im Betrieb befindlichen Drehstromsystems bei ca. 45 A. Die maximalen Kabelschirm-Längsströme, des sich außer Betrieb befindlichen Drehstromsystems liegen bei ca. 25 A. In den beidseitig geerdeten Phasenleiter, des sich außer Betrieb befindlichen Drehstromsystems, der sich am nächsten zum weiter betriebenen Drehstromsystem befindet wird ein Strom von ca. 90 A induziert.

Die Querstromverteilung der drei Erdungsabschnitte im Schaltzustand A der Kabelleitung KL 1 mit zwei Drehstromsystemen ist in Abbildung 5-19 dargestellt. Zudem ist auch der Einfluss eines Anstieges der Kontaktübergangswiderstände der beiden Erdungsboxen R_{boxen} abgebildet.

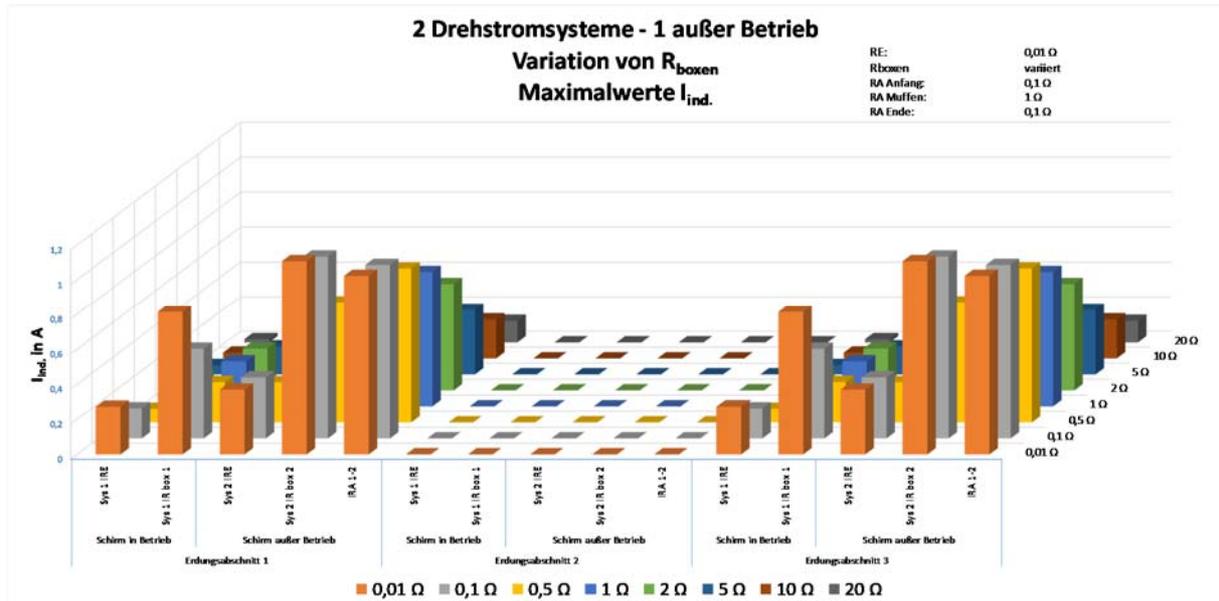


Abbildung 5-19: Querstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - 1 DS-System außer Betrieb

Wie bei allen oben angeführten bzw. diskutierten Untersuchungsergebnissen sind die Querableitströme in den Erdungsabschnitten respektive in die Muffen-Erdungsanlagen in Relation zu den Kabelschirm- und Phasenleiter-Längsströmen sehr gering.

Die Spannungsabfälle an den vorhandenen Kontaktübergangswiderständen der Kabelschirme und der Erdungsboxen sowie an den Erdausbreitungswiderständen in den Erdungsabschnitten (Muffen) sowie am Anfang und Ende der Kabelleitung (im Bereich der Kabelendverschlüsse), hervorgerufen durch die induzierten Ströme, sind in der nachfolgend angeführten Abbildung 5-20 dargestellt. Entsprechend zur letzten Abbildung ist der Einfluss eines Anstieges der Kontaktübergangswiderstände der beiden Erdungsboxen R_{boxen} aus der aktuellen Abbildung ersichtlich.

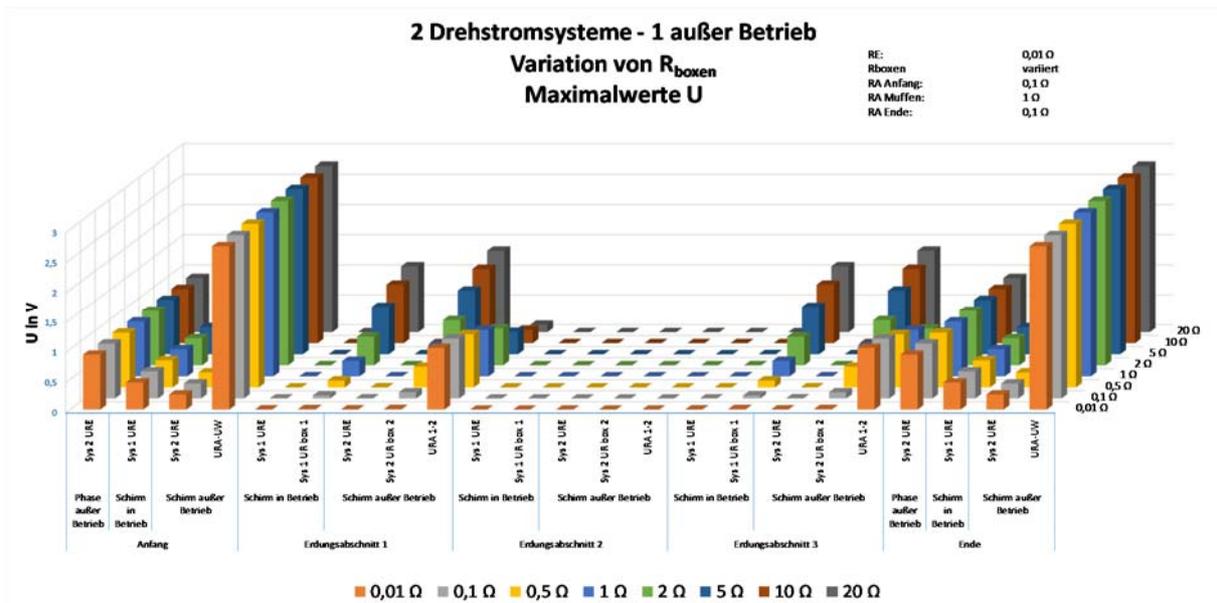


Abbildung 5-20: Spannungsverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - 1 DS-System außer Betrieb

Es ist ersichtlich, dass die Variation der Kontaktübergangswiderstände der beiden Erdungsboxen R_{boxen} , die sich in den Muffen befinden, keinerlei Einfluss auf die Spannungsabfälle in den Bereichen der Kabelendverschlüsse (Anfang und Ende) besitzen.



5.3 Vier Drehstromsysteme

400-kV-Kabelleitungen bestehen, wie bereits im vorigen Kapitel geschrieben, aus zwei oder vier Drehstromsystemen. Wenn vier Drehstromsysteme vorhanden sind, so werden sie im Höchstspannungsnetz üblicherweise wie in der Abbildung 2-1 dargestellt betrieben, d.h. jeweils zwei Drehstromsysteme sind parallelgeschaltet. In Mittelspannungsnetzen kommt es darüber hinaus vor, dass alle vier Drehstromsysteme parallelgeschaltet sind. In der vorliegenden Dissertation wurden beide Fälle hinsichtlich der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung untersucht.

5.3.1 Alle Drehstromsysteme in Betrieb

Die, in diesem Kapitel angeführten Berechnungsergebnisse, basieren auf einer real existierenden Mittelspannungs-Kabelleitung, die in der vorliegenden Dissertation als Kabelleitung KL 4 bezeichnet wird. In Abbildung 4-4 ist das entsprechende Querverlegeprofil und in Abbildung 4-9 das Längsverlegeprofil dargestellt.

Aus Abbildung 4-4 und den Abbildung 3-13 bzw. Abbildung 4-9 kann entnommen werden, dass die vier Drehstromsysteme einen Parallellauf von ca. 0,8 km besitzen und im Normalbetriebszustand parallel betrieben werden. Weiters ist aus den Abbildung 3-13 und Abbildung 4-9 zu entnehmen, dass die Kabelschirme beidseitig als ideal geerdet angenommen wurden (keine Kontaktübergangswiderstände) und dass keine Phasenverdrillung und kein Crossbonding der Kabelschirme realisiert wurden. Das heißt, die wechselseitige induktive Beeinflussung der parallelverlegten und parallelbetriebenen Kabelsysteme wurde bei der Planung und Installation der Drehstromsysteme nicht berücksichtigt.

Hintergrund für die Durchführung der wissenschaftlichen Analyse der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von parallelverlegten und parallelbetriebenen Mittelspannungs-Kabelleitungen waren Fehlauflösungen von Schutzgeräten durch eine Nullstromanregung im fehlerfreien Normalbetrieb der Drehstromkabelsysteme [3]. Dies zeigt, dass die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelleitungen nicht nur bezüglich Arbeitnehmersicherheit bei Wartungsarbeiten und Anlagenschutz im Normalbetrieb sondern auch bzgl. Versorgungssicherheit in elektrischen Übertragungs- und Verteilnetzen betriebliche Relevanz besitzt.



5.3.1.1 Summenströme parallelverlegter und parallelbetriebener Kabelleitungen

Den Spannungen und Strömen der Tabelle 5-2 liegen die nachfolgend angeführten Eingangsdaten des Simulationsmodells zugrunde. Für die Last wurde eine Scheinleistung von ca. 5,54 MVA angenommen. Bei einem angenommenen $\cos(\varphi) = 0,95$ ergibt das eine Wirkleistungsaufnahme von 5,26 MW und eine Blindleistungsaufnahme von 1,73 MVar.

Spannungen und Ströme	Betrag	Winkel
Spannung der Phase L1 gegen Potential Erde (PE) am Kabelanfang	5772,46 V	-0,02 °
Spannung der Phase L2 gegen PE am Kabelanfang	5772,46 V	-120,02 °
Spannung der Phase L3 gegen PE am Kabelanfang	5772,46 V	119,98 °
Stromaufnahme der Last in der Phase L1	319,69 A	-18,31 °
Stromaufnahme der Last in der Phase L2	319,32 A	-138,33 °
Stromaufnahme der Last in der Phase L3	319,43 A	101,74 °
Spannung der Phase L1 gegen PE an den Anschlussklemmen der Last	5768,21 V	-0,11 °
Spannung der Phase L2 gegen PE an den Anschlussklemmen der Last	5761,53 V	-120,13 °
Spannung der Phase L3 gegen PE an den Anschlussklemmen der Last	5763,63 V	119,94 °

Tabelle 5-1: Spannungen und Ströme der Quelle und der Last

Bei einer verketteten Spannung von 10 kV ergibt dies eine Laststromaufnahme von 320 A pro Phase, die sich auf die vier zur Verfügung stehenden Kabelphasen aufteilen. Dementsprechend sollte, ohne Berücksichtigung der induktiven Beeinflussung, pro Kabelphase ein Strom von 80 A fließen [3]. Der nachfolgend angeführten Tabelle 5-2, kann entnommen werden, dass es bei Berücksichtigung der wechselseitigen induktiven Beeinflussung zu einer unsymmetrischen Stromaufteilung zwischen den Phasenleitern kommt.



Die resultierenden Summenströme sind im rechten Teil der Tabelle 5-2 angeführt.

Resultierende Phasenleiter- und Kabelschrim-Ströme			Summenströme	
Bezeichnung	Betrag	Winkel	Betrag	Winkel
Strom in der Phase L1 des Drehstrom (DS)-Kabelsystems 1	77,14 A	-12,70 °	15,22 A	131,44 °
Strom in der Phase L2 des DS-Kabelsystems 1	83,68 A	-141,13 °		
Strom in der Phase L3 des DS-Kabelsystems 1	83,36 A	104,01 °		
Strom in der Phase L1 des DS-Kabelsystems 2	80,01 A	-20,70 °	4,34 A	-110,33 °
Strom in der Phase L2 des DS-Kabelsystems 2	77,75 A	-137,48 °		
Strom in der Phase L3 des DS-Kabelsystems 2	79,09 A	103,94 °		
Strom in der Phase L1 des DS -Kabelsystems 3	79,51 A	-18,29 °	3,92 A	93,68 °
Strom in der Phase L2 des DS -Kabelsystems 3	75,24 A	-138,15 °		
Strom in der Phase L3 des DS -Kabelsystems 3	81,47 A	103,99 °		
Strom in der Phase L1 des DS -Kabelsystems 4	83,57 A	-21,22 °	16,31 A	-43,60 °
Strom in der Phase L2 des DS -Kabelsystems 4	82,80 A	-136,45 °		
Strom in der Phase L3 des DS -Kabelsystems 4	76,29 A	94,57 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 1 des DS-Kabelsystems 1	19,36 A	-99,78 °	2,67 A	-175,38 °
Induzierter Strom im Kabelschirm 2 des DS-Kabelsystems 1	30,77 A	110,66 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 3 des DS-Kabelsystems 1	15,18 A	-40,82 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 1 des DS-Kabelsystems 2	20,26 A	-97,12 °	1,25 A	-129,70 °
Induzierter Strom im Kabelschirm 2 des DS-Kabelsystems 2	31,06 A	109,10 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 3 des DS-Kabelsystems 2	15,66 A	-40,66 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 1 des DS-Kabelsystems 3	19,95 A	-97,77 °	1,27 A	-172,38 °
Induzierter Strom im Kabelschirm 2 des DS-Kabelsystems 3	31,36 A	109,03 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 3 des DS-Kabelsystems 3	15,39 A	-40,76 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 1 des DS-Kabelsystems 4	20,17 A	-95,99 °	1,09 A	-35,48 °
Induzierter Strom im Kabelschirm 2 des DS-Kabelsystems 4	30,47 A	109,31 °		
Induzierter Strom im Kabelschirm 3 des DS-Kabelsystems 4	16,06 A	-35,54 °		

Tabelle 5-2: Resultierende Phasenleiter- und Kabelschirm-Ströme bei Parallelschaltung und Parallelbetrieb von vier Drehstromkabelsystemen

Die berechneten Summenströme der beiden außen liegenden Drehstromsysteme liegen laut Tabelle 5-2 bei ca. 16 A und damit um das ca. 4-fache höher als die Summenströme der beiden innen liegenden Drehstromsysteme (siehe Tabelle 5-2). Laut Industriepartner der wissenschaftlichen Analyse [3] betragen die gemessenen Erdströme I_E der beiden außen liegenden Drehstromsysteme, die zur Nullstromanregung der Schutzgeräte und damit zu Fehlauflösungen der Kabelleitungen geführt haben zwischen 11 A und 14 A. Ein Vergleich der berechneten (ca. 16A) mit den gemessenen (11 A und 14 A) Strömen der außen liegenden Drehstromsysteme zeigt, dass die Berechnungsergebnisse des entwickelten Simulationsmodells in derselben Größenordnung wie die real gemessenen Ströme liegen.

Dass die berechneten Werte etwas höher sind als die tatsächlich gemessenen liegt daran, dass im Simulationsmodell sämtliche stromreduzierenden metallischen Einbauten in der Nähe der Kabelleitungen vernachlässigt wurden. Die beiden innenliegenden Drehstromsysteme sind auf beiden Seiten von Leitungen umgeben. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Koppelimpedanzen eine gleichmäßigere Stromverteilung auf die einzelnen Phasenleiter.

Um die oben beschriebenen Summenströme zu unterbinden und in allen Kabelschirmen die induzierten Ströme auf gleiches Niveau zu reduzieren, müsste bei der Parallelverlegung von mehreren Kabelsystemen zusätzlich

zur Verdrillung der Phasen und zum Crossbonding der Kabelschirme ein Positionstausch der Drehstromsysteme innerhalb der Gesamtkabelformation stattfinden um die Kabelleitung zu symmetrieren.

5.3.2 Zwei Drehstromsysteme in Betrieb, die anderen beiden außer Betrieb

Dieses Kapitel beinhaltet die Kabelschirm-Längsstromverteilung, die Querableitströme und die daraus resultierende Spannungsverteilung in den Muffen-Erdungsanlagen der Kabelleitung KL 1, bei Berücksichtigung aller vier, in den Abbildung 4-1 und Abbildung 4-5 abgebildeten Drehstromsysteme. Alle nachfolgenden Abbildungen dieses Kapitels beruhen auf Schaltzustand A (siehe Tabelle 4-2) der Kabelleitung KL 1. Das heißt, dass sich zwei Drehstromsysteme im Normalbetrieb befinden und zwei Drehstromsysteme abgeschaltet und beidseitig geerdet sind. Der beeinflussende Strom beträgt im vorliegenden Fall beträgt 1 kA.

Zur einfacheren Interpretation der Diagramme für den Leser ist in Abbildung 5-21 das Modell der Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit vier Drehstromsystemen angeführt.

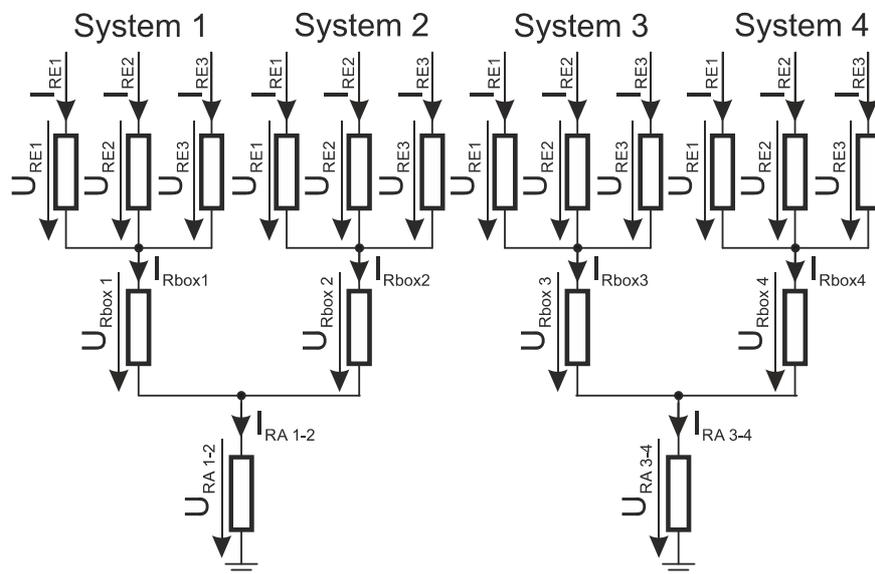


Abbildung 5-21: Modell der Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit vier Drehstromsystemen

Abbildung 5-22 repräsentiert die Kabelschirm-Längsstromverteilung der Kabelleitung KL 1 im Schaltzustand A (siehe Tabelle 4-2).

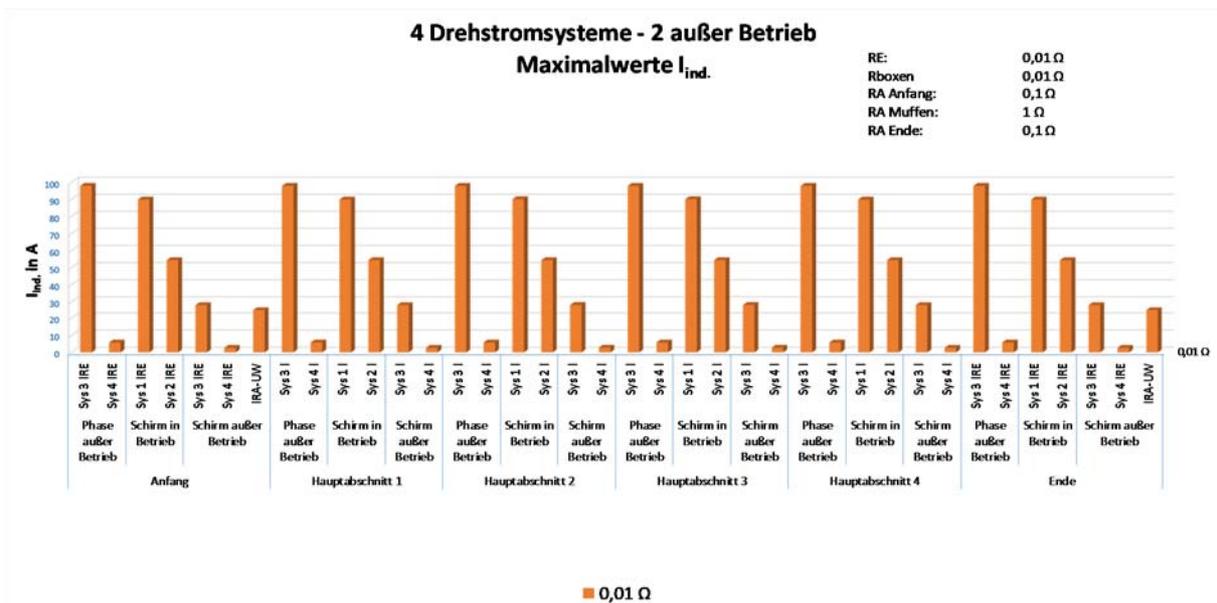


Abbildung 5-22: Längsstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A\ Muffen} = konst. = 1\ \Omega$ - 4 Drehstromsysteme - 2 DS-Systeme außer Betrieb

Der Abbildung 5-22 kann entnommen werden, dass in den beidseitig geerdeten Phasenleitern, die neben den weiter betriebenen Drehstromsystemen liegen, ein Strom von ca. 100 A induziert wird. Im Vergleich dazu wird in den ebenfalls beidseitig geerdeten Phasenleitern des Drehstromsystems 4 ein maximaler Strom von ca. 6 A induziert. Weiters fällt auf, dass sich die maximalen Kabelschirm-Längsströme der beiden, sich in Betrieb befindlichen Drehstromsysteme, wesentlich unterscheiden (Schirm in Betrieb, Sys 1: 90 A vs. Schirm in Betrieb, Sys 2: 54 A). Hier ist die Reduktionswirkung der benachbarten, geerdeten Phasen- und Kabelschirmleiter erkennbar. Ohne die benachbarten und geerdeten Leiter wären die maximalen Kabelschirm-Längsströme der beiden, sich in Betrieb befindlichen Drehstromsysteme identisch (siehe dazu Abbildung 5-15). Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die maximalen induzierten Kabelschirm-Längsströme mit steigendem Abstand (vergleiche Schirm außer Betrieb, Sys 3 vs. Schirm außer Betrieb, Sys 4) stark abnehmen.

Die Querstromverteilung der drei Erdungsabschnitte im Schaltzustand A der Kabelleitung KL 1 mit vier Drehstromsystemen im Normalbetrieb, d.h. mit einem Strom pro Phasenleiter von 1 kA ist in Abbildung 5-23 dargestellt. Außerdem ist der Einfluss einer Verschlechterung der Kontaktübergangswiderstände (Anstieg) der vier Erdungsboxen R_{boxen} dargestellt.

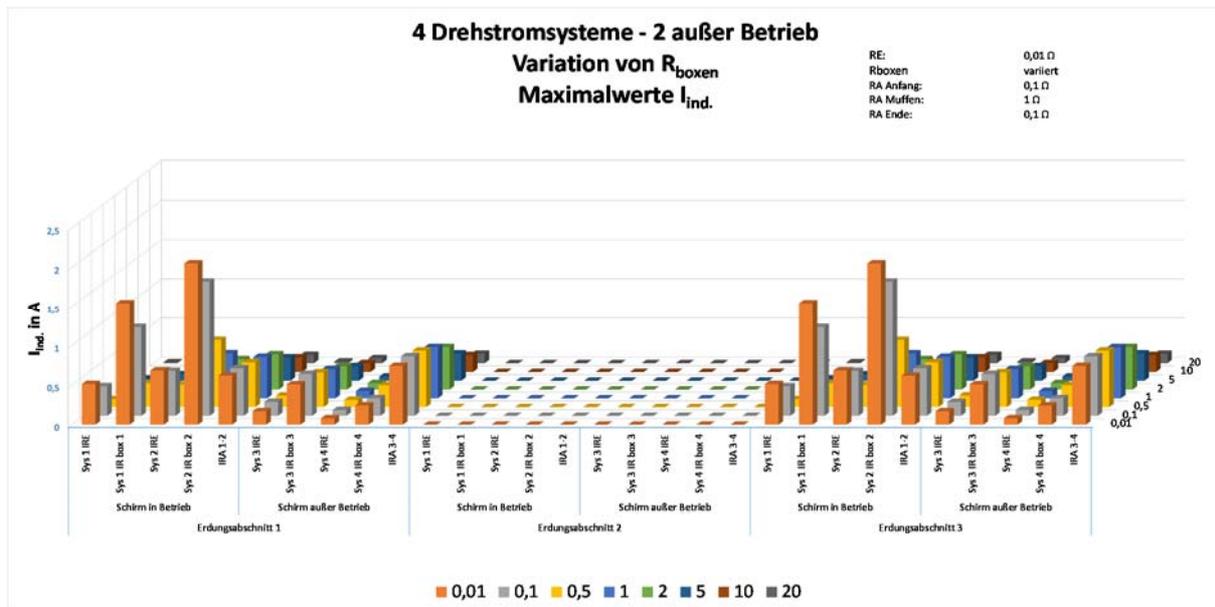


Abbildung 5-23: Querstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 4 Drehstromsysteme 2 DS-Systeme außer Betrieb

Wie bereits im Kapitel 5.1, in dem ein Drehstromsystem und im Kapitel 5.2, in dem zwei Drehstromsysteme untersucht wurden, beschrieben wurde, fließen auch bei vier vorhandenen Drehstromsystemen nur sehr kleine Querableitströme in den Muffen-Erdungsanlagen. Aufgrund der Längssymmetrie der untersuchten Kabelleitung KL 1 (siehe Abbildung 4-5) betragen die Querableitströme im mittleren Erdungsabschnitt (Muffe) auch in diesem Fall Null Ampere.

Die resultierende Spannungsverteilung in den Erdungsabschnitten sowie am Anfang und Ende der vier Drehstromsysteme der Kabelleitung KL 1 im Schaltzustand A, d.h. mit einem Strom pro Phasenleiter von 1 kA in zwei Drehstromsystemen, während sich die anderen beiden außer Betrieb befinden und geerdet sind, ist in der nachfolgenden Abbildung 5-24 dargestellt. Auch hier ist der Einfluss eines Anstieges der Kontaktübergangswiderstände der vier Erdungsboxen R_{boxen} dargestellt.

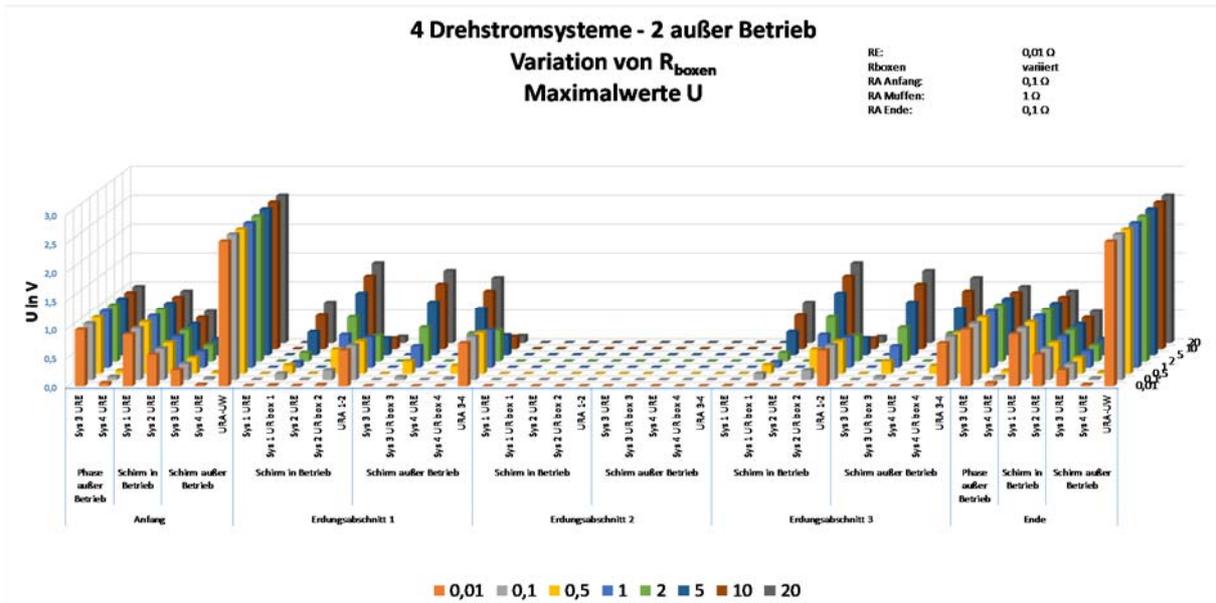


Abbildung 5-24: Spannungsverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{\text{A Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 4 Drehstromsysteme - 2 DS-Systeme außer Betrieb

Die Variation der Kontaktübergangswiderstände der vier Erdungsboxen R_{boxen} , die sich in den Muffen befinden, zeigt keinerlei Einfluss auf die Spannungsabfälle in den Bereichen der Kabelendverschlüsse (Anfang und Ende) der Leitung.

Abbildung 5-24 zeigt, dass im Schaltzustand A (siehe Tabelle 4-2) einer symmetrisch aufgebauten Kabelleitung KL 1 mit vier Drehstromsystemen, die Erdungsspannungen der Kontaktübergangswiderstände der Erdungsboxen R_{boxen} der beiden, sich außer Betrieb befindlichen Drehstromsysteme (System 3 und 4) in den Erdungsabschnitten (Muffen) 1 und 3 annähernd gleich der Erdungsspannung, des sich in Betrieb befindlichen System 2 ist.



5.4 Bedeutung spezieller Aspekte

In Tabelle 4-2 ist der als Ausgangszustand bezeichnete Schaltzustand grafisch dargestellt. Er repräsentiert den Normalbetriebsschaltzustand von parallelverlegten 400-kV-Kabelleitungen. Hierbei sind die betrachteten Drehstromsysteme unter Spannung und alle Phasen stromführend. Je nach betrachteter Kabelleitung steht ein, in Tabelle 4-2 dargestelltes Kabel, entweder für ein (KL 2) oder für zwei (KL 1, KL 3 und KL 4) parallelbetriebene Drehstromsysteme. Die in den Phasen fließenden Ströme sind in Tabelle 4-1 angegeben.

5.4.1 Beeinflussung bei Kabelverlegevorgängen bei in Betrieb befindlichen parallelen Systemen

Um die Thematik der induktiven Beeinflussung während eines Kabelverlegevorganges (z.B. Ein- oder Ausziehen einer Kabelphase bei Rohr- oder Tunnelverlegung) zu untersuchen, wird die Konfiguration der Kabelleitung KL 1 eingesetzt. Wie der Abbildung 4-1 bzw. der Abbildung 4-5 entnommen werden kann, handelt es sich bei KL 1-1 um eine Kabelleitung mit 4 Drehstromkabelsystemen, die sehr symmetrisch aufgebaut ist, da alle 12 Abschnitte dieselbe Länge und dieselben Querverlegeprofile besitzen. Die Abschnittslänge beträgt 1 km, womit die Gesamt-Kabelleitungslänge bei 12 km liegt. Die Abstände zwischen den horizontal, flach im Erdreich verlegten Drehstromsystemen beträgt laut Annahme 1,8 m (mittlere Phase – mittlere Phase) mit einem Phasenabstand von 0,45 m.

Die Notwendigkeit der Verlegung einer Kabelphase während benachbarte, parallelverlaufende Drehstromsysteme in Betrieb verbleiben, kann durch externe Beschädigungen einzelner Leiter oder durch Muffen- und Kabelfehler hervorgerufen werden.

Die Untersuchung der induktiven Beeinflussung in solch einem Fall wird anhand des folgenden Szenarios durchgeführt:

Das vom fehlerbehafteten Leiter betroffene Drehstromsystem wird außer Betrieb genommen. Die restlichen Drehstromsysteme verbleiben im Normalbetrieb, d.h. im, als Ausgangszustand bezeichneten Schaltzustand, wobei ein Phasenstrom von 1000 A fließt (Annahme zur leichteren Vergleichbarkeit: gleicher Strom). Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem Zugseil, mit dem die Kabelphase eingezogen wird, um ein metallisches, d.h. elektrisch leitfähiges Seil handelt. Das Zugseil, mit dem sowohl die Phase als auch der Kabelschirm verbunden sind, wird auf eine geerdete Seilwinde aufgewickelt. Das andere Ende des Kabels ist nicht geerdet und nicht isoliert und somit für das ausführende Personal, gemäß einer worst-case-Betrachtung, berührbar.

Mit diesem Szenario ist es möglich, potenzielle Gefährdungen für das, die Arbeiten ausführende Personal zu identifizieren und die Höhe der, durch die Normalbetriebsströme induzierten Spannungen und Ströme im außer Betrieb befindlichen System zu ermitteln. Die Anwendbarkeit der in diesem Kapitel abgebildeten Untersuchungsergebnisse ist prinzipiell für alle Abschnitte der Kabelleitung KL 1 gegeben, da es sich hierbei um eine symmetrische Konfiguration einer Kabelleitung handelt und die Länge der Phase, an der gearbeitet wird die größte Relevanz besitzt, wenngleich für die Simulation der sechste Abschnitt von links (Abbildung 4-5) herangezogen wird. Dieses Szenario wird auf alle vorhandenen Leiter aller Drehstromsysteme angewendet.

Mit dieser Vorgangsweise und den getroffenen Annahmen wird ein Beitrag zu Klärung der nachfolgend aufgezählten Fragen geliefert:

- Höhe der induzierten Spannung während eines Kabelverlegevorganges?
- Ist es notwendig alle benachbarten, parallelverlaufenden Drehstromsysteme außer Betrieb zu nehmen?
- Welche Rolle spielt der Erdungswiderstand der Seilwinde bei der Ermittlung der Höhe der induzierten Spannung?
- Abgeleitet aus der letzten Frage: Muss die Erdung einer Kabelzugmaschine (Seilwinde) einer ausgedehnten, niederohmigen Erdungsanlage entsprechen oder reicht zum Beispiel ein einfacher Erdungsspieß?

Die nachfolgend angeführte Abbildung 5-25 zeigt die, in den Phasen und Kabelschirmen induzierten Spannungen bei Variation des eingezogenen Leiters.

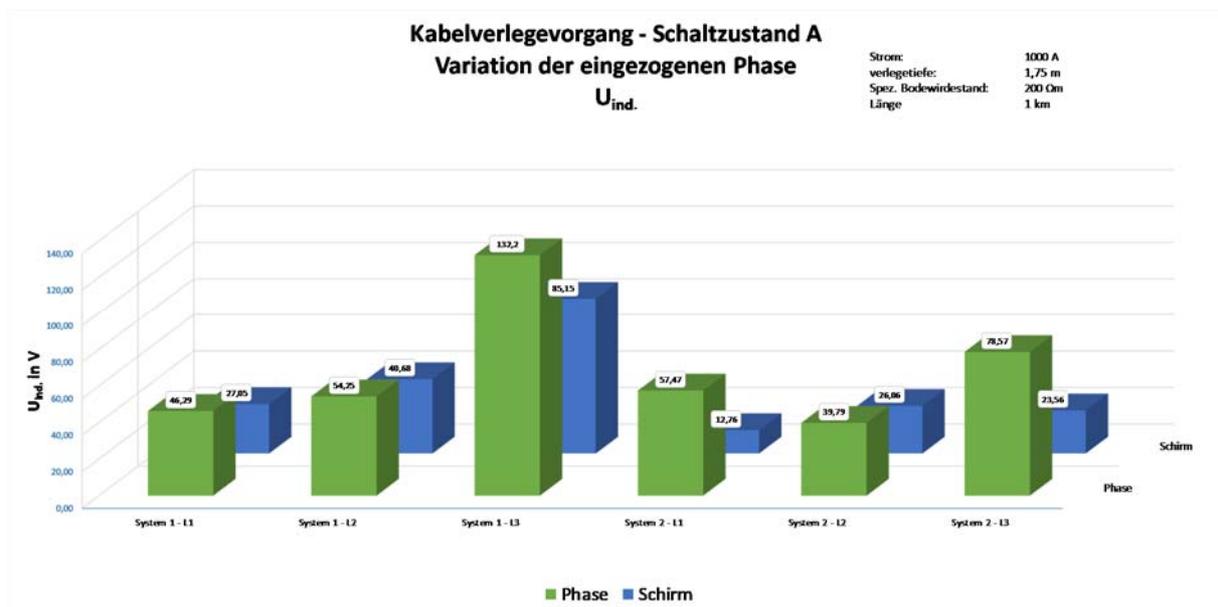


Abbildung 5-25: Induzierte Spannungen bei einem Kabelverlegevorgang der Kabelleitung KL 1 im Schaltzustand A - Variation der verlegten Phase

Im Zuge der durchgeführten Variantenrechnungen der Kabelleitung KL 1 ist die höchste induzierte Spannung während des Einziehvorgangs der Phase L3 des Systems 1 aufgetreten und liegt bei 132,2 V im Phasenleiter und bei 85,1 V im Kabelschirm (Abbildung 5-25). Im oben beschriebenen Szenario, bei dem sowohl die Phase als auch der Kabelschirm über den metallischen Kabelziehkopf und das metallische Zugseil geerdet sind, tritt diese Spannung am offenen, nicht geerdeten und nicht isolierten Ende des Kabels auf.

Die nachfolgend angeführte Abbildung 5-26 zeigt die, in der Phase L1 und im zugehörigen Kabelschirm induzierten Spannungen bei Variation des Erdungswiderstandes der Seilwinde.

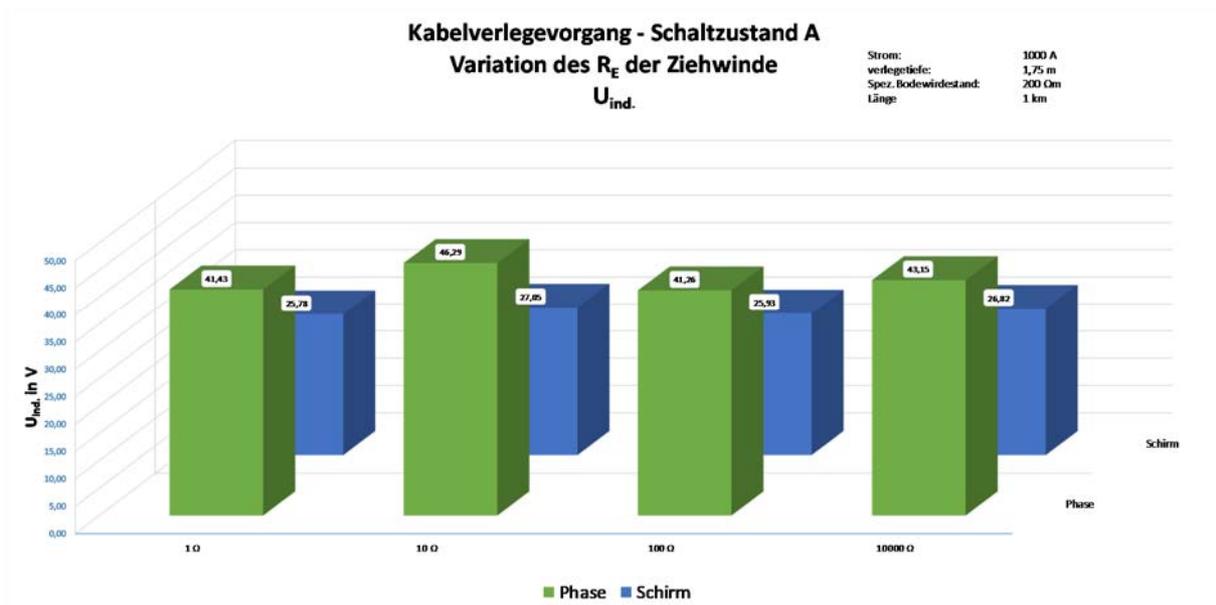


Abbildung 5-26: Induzierte Spannungen bei einem Kabelverlegevorgang der Kabelleitung KL 1 im Schaltzustand A - Variation des Erdungswiderstandes der Ziehwinde

Die, in Abbildung 5-26 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, dass der Einfluss des Erdungswiderstandes der Seilwinde, unter den getroffenen Annahmen vernachlässigbar ist.

Die wesentlichsten Beeinflussungsparameter auf die Höhe der induzierten Spannung im einzuziehenden Leiter sind:

- Lage des einzuziehenden Kabels innerhalb der Kabelleitung
- Anzahl der benachbarten, parallelverlaufenden Drehstromsysteme (in oder außer Betrieb)
- Aktueller Betriebs- und Schaltzustand der Systeme (Normalbetrieb, Fehlerfall, nicht, einseitig oder beidseitig geerdet)
- Erdungsbehandlung bereits verlegter Kabelschirme und/oder Begleiterder (nicht, einseitig oder beidseitig geerdet)
- Länge des einzuziehenden Leiters
- Erdungsbehandlung des einzuziehenden Leiters (nicht, einseitig oder beidseitig geerdet)

5.4.2 Spezifischer elektrischer Bodenwiderstand

Im Gegensatz zu den Kabelleitungen KL 1, KL 2 und KL 4, wo ein Standardwert des spezifischen elektrischen Bodenwiderstandes von $200 \Omega\text{m}$ angenommen wird, wird für die Kabelleitung KL 3, aufgrund regionaler Gegebenheiten, ein Standardwert von $100 \Omega\text{m}$ angenommen. Die jeweiligen Standardwerte sind in den Abbildungen des Kapitels 4.2 jeweils rechts unten angeführt. Um den Einfluss dieses Parameters auf die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelleitungen zu untersuchen wird eine Variation des Standardwertes des spez. Bodenwiderstandes um einen Faktor 20 nach unten bzw. um einen Faktor 5 nach oben durchgeführt.

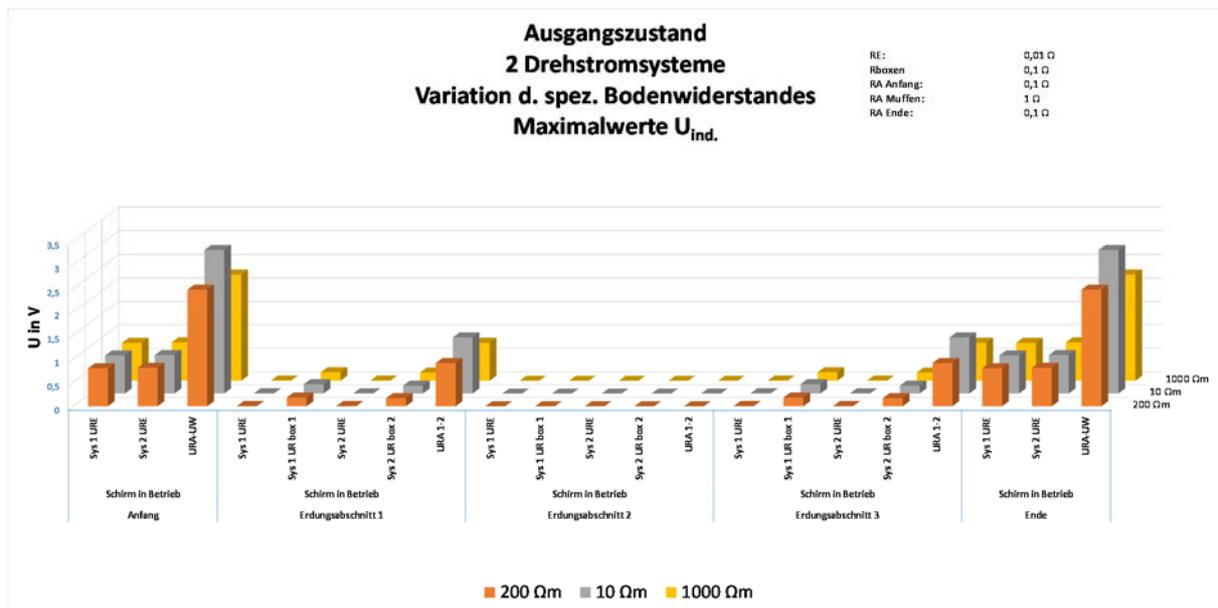


Abbildung 5-27: Spannungsverteilung entlang der Kabelleitung KL 1 Schaltzustand A bei Variation des spezifischen elektrischen Bodenwiderstand - 2 Drehstromsysteme

Gemäß den im Kapitel 3.3 angeführten Formeln ist der Parameter „spezifischer elektrischer Bodenwiderstand“ ρ in den Selbst- und Koppelimpedanzen sämtlicher Leiter enthalten. Die Analyse aller Berechnungen zeigt jedoch, dass der spezifische elektrische Bodenwiderstand nur einen Einfluss auf den unmittelbar mit dem Erdreich geschlossenen Stromkreis besitzt. Trotz der Tatsache, dass das Hauptaugenmerk der vorliegenden Dissertation die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen ist, lässt sich die galvanische bzw. ohmsche Kopplung der einzelnen Leiter untereinander nicht vermeiden. Berücksichtigt man dies bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse, so wird klar, dass der Einfluss des spezifischen elektrischen Bodenwiderstandes dort vernachlässigt werden kann, wo sich durch die elektrische Verschaltung der einzelnen Leiter Kreisströme, die nicht über das Erdreich fließen, ausbilden können.

Hinsichtlich des Arbeitnehmerschutzes bzw. der Sicherheit von Personen, die sich i.d.R. für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten in Muffenbauwerken aufhalten müssen, kann gesagt werden, dass der spezifische elektrische Bodenwiderstand nur dann eine Rolle spielt, wenn in das betretene Muffenbauwerk durch andere, isolierte elektrische Leiter ein fremdes Potential eingeschleppt wird. Ansonsten kann das Potential der Muffen-Erdungsanlage durch den spezifischen elektrischen Bodenwiderstand zwar angehoben werden, aber es entstehen dadurch im Muffenbauwerk keine höheren Potentialunterschiede, die man nur auf den Einfluss des spezifischen elektrischen Bodenwiderstandes zurückführen kann.



Die in der vorliegenden Dissertation abgeleitete Erkenntnis, aufgrund der durchgeführten Berechnungen, dass der Einfluss des spezifischen Bodenwiderstandes auf induzierte Spannungen und Ströme vernachlässigt werden kann wird auch in [31] durch die Aussage, dass die Selbst- und Koppelimpedanzen von Kabelschirmen nur sehr leicht mit einer Variation des spezifischen Bodenwiderstandes variieren, bestätigt.

5.4.3 Verlegetiefe der Leiter

Die Standard-Verlegetiefe der Leiter aller Kabelleitungen sind in den Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-4 angeführt. Die Berechnungsergebnisse bei einer Verlegung der Leiter um weitere 2 m, weitere 5 m bzw. weitere 10 m tiefer, als die in den Abbildungen des Kapitels 4.2 angeführten Verlegetiefen ist in den nachfolgenden Tabelle 5-3 bis Tabelle 5-6 angeführt. Die nachfolgenden Tabellen gehören zeilenweise zusammen, wobei in der ersten Tabelle die Eingangsdaten angeführt sind.

2 DS-Systeme vorhanden, beide im Betrieb, Daten aus KL 1				Anfang		RE			Ende		Systeme 1&2					
Betriebsstrom	spez. Bodenwid.	Verlegetiefe	Abschnittslänge	R _e	R _s UW	Erdungsabschnitt 1	Erdungsabschnitt 2	Erdungsabschnitt 3	R _e	R _s UW	R _{box1}	R _{box2}	RA Muffen	Aussenleiter	Verlegetiefe	
1000 A	200 Ωm	Standard	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	-1,75 m
1000 A	200 Ωm	-2 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	-3,75 m
1000 A	200 Ωm	-5 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	-8,75 m
1000 A	200 Ωm	-10 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	-18,75 m

Tabelle 5-3: Eingangsdaten, Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe

Anfang				Hauptabschnitt 1		Erdungsabschnitt 1											
Schirm in Betrieb				Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb											
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}	Sys 1 I	Sys 2 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{Rbox1}	Sys 1 I _{Rbox1}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	Sys 2 U _{Rbox2}	Sys 2 I _{Rbox2}	U _{RA 1-2}	I _{RA 1-2}
0,801	80,106	0,811	81,138	2,482	24,816	80,106	81,138	0,006	0,617	0,185	1,850	0,006	0,574	0,172	1,723	0,911	0,911
0,804	80,427	0,814	81,409	2,476	24,763	80,427	81,409	0,009	0,931	0,182	1,824	0,009	0,905	0,171	1,710	0,912	0,912
0,813	81,255	0,820	82,013	2,434	24,344	81,255	82,013	0,017	1,737	0,176	1,760	0,017	1,743	0,168	1,679	0,914	0,914
0,829	82,870	0,835	83,485	2,467	24,668	82,870	83,485	0,034	3,374	0,163	1,634	0,034	3,438	0,162	1,623	0,919	0,919

Tabelle 5-4: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe, U_{ind.} und I_{ind.}, Teil 1

Hauptabschnitt 2		Erdungsabschnitt 2										Hauptabschnitt 3	
Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb										Schirm in Betrieb	
Sys 1 I	Sys 2 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{Rbox1}	Sys 1 I _{Rbox1}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	Sys 2 U _{Rbox2}	Sys 2 I _{Rbox2}	U _{RA 1-2}	I _{RA 1-2}	Sys 1 I	Sys 2 I
80,437	81,607	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	80,437	81,607
80,433	81,613	0,000	0,008	0,001	0,007	0,000	0,009	0,001	0,007	0,001	0,001	80,431	81,608
80,456	81,536	0,000	0,029	0,002	0,023	0,000	0,031	0,002	0,024	0,002	0,002	80,449	81,520
80,452	81,641	0,001	0,070	0,006	0,057	0,001	0,075	0,006	0,058	0,005	0,005	80,435	81,603

Tabelle 5-5: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe, U_{ind.} und I_{ind.}, Teil 2

Erdungsabschnitt 3										Hauptabschnitt 4		Ende					
Schirm in Betrieb										Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb					
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{Rbox1}	Sys 1 I _{Rbox1}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	Sys 2 U _{Rbox2}	Sys 2 I _{Rbox2}	U _{RA 1-2}	I _{RA 1-2}	Sys 1 I	Sys 2 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}
0,006	0,617	0,185	1,850	0,006	0,574	0,172	1,723	0,911	0,911	80,106	81,138	0,801	80,106	0,811	81,138	2,482	24,816
0,006	0,616	0,185	1,849	0,006	0,574	0,172	1,722	0,911	0,911	80,106	81,136	0,801	80,106	0,811	81,136	2,476	24,762
0,006	0,616	0,185	1,847	0,006	0,573	0,172	1,718	0,912	0,912	80,126	81,049	0,801	80,126	0,810	81,049	2,434	24,343
0,006	0,615	0,184	1,843	0,006	0,571	0,171	1,711	0,912	0,912	80,118	81,138	0,801	80,118	0,811	81,138	2,466	24,664

Tabelle 5-6: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe, U_{ind.} und I_{ind.}, Teil 3

Die durchgeführten Untersuchungen haben bei allen Kabelleitungen und allen Schaltzuständen keinen nennenswerten Einfluss der Verlegetiefe der Leiter hinsichtlich Höhe der induzierten Ströme und Spannungen gezeigt.

Somit wird festgehalten, dass der spezifische elektrische Bodenwiderstand und die Verlegetiefe der Leiter, unter den oben angeführten Voraussetzungen, einen derart geringen Einfluss (im Vergleich zu den anderen untersuchten Parameter) auf die Höhe der wechselseitig induzierten Ströme und Spannungen aufweisen, dass diese als vernachlässigbar bezeichnet werden können.



5.4.4 Abschnitts- und Systemlänge

Die Länge des Parallellaufs sich wechselseitig beeinflussender Leiter, d.h. die Abschnitts- und folglich auch die Systemlängen spielen eine wesentliche Rolle bei der Berechnung der Absolutwerte der Selbst- und der Koppelimpedanzen der Leiter. Dennoch kann der Einfluss der Abschnitts- und der Systemlängen auf die finale Strom- und Spannungsverteilung einer Kabelleitung, durch geeignete Maßnahmen auf ein sehr geringes Ausmaß reduziert werden. Um dies zu erreichen, müssen bereits während der Planung von Kabelleitungen die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Durch drei teilbare Anzahl der Abschnitte
- Verdrillung der Phasen (gegensinnig zum Lagetausch der Kabelschirme)
- Symmetrisches Crossbonding, d.h. Lagetausch der Kabelschirme und Erdung in jeder dritten Muffe
- Äquidistante Muffenstellen
- Identische Querverlegeprofile der Abschnitte
- Homogenes Erdreich entlang der gesamten Kabelleitung
- Identische Erdausbreitungswiderstände aller Muffen-Erdungsanlagen einer Kabelleitung

Die Berücksichtigung der oben angeführten Punkte führt zu einer elektrischen Symmetrierung der Kabelleitung.

Die Standard-Länge der Abschnitte aller Kabelleitungen sind in den Abbildung 4-5 bis Abbildung 4-9 angeführt. Die Berechnungsergebnisse bei einer Halbierung bzw. bei einer Verdoppelung der Abschnittslänge der Kabelleitung KL 1, wobei 2 Drehstromsysteme berücksichtigt werden, ist in der nachfolgenden Tabelle 5-8 angeführt. Die beiden nachfolgenden Tabellen gehören zeilenweise zusammen, wobei in der ersten Tabelle die Eingangsdaten angeführt sind.

2 DS-Systeme vorhanden, beide im Betrieb, Daten aus KL 1				Anfang		RE			Ende		Systeme 1&2				
Betriebsstrom	spez. Bodenwid.	Verlegetiefe	Abschnittslänge	R _E	R _A UW	Erdungsabschnitt 1	Erdungsabschnitt 2	Erdungsabschnitt 3	R _E	R _A UW	R _{box1}	R _{box2}	RA Muffen	Aussenleiter	Abschnittslänge
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	1 km
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	0,5 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	0,5 km
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	2 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	max	2 km

Tabelle 5-7: Eingangsdaten, Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Abschnitts- und Systemlänge

Anfang				Hauptabschnitt 1		Hauptabschnitt 2		Hauptabschnitt 3		Hauptabschnitt 4		Ende							
Schirm in Betrieb				Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb		Schirm in Betrieb							
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}	Sys 1 I	Sys 2 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}						
U _{RE} (V)	I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	U (V)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	U (V)	I (A)
0,801	80,106	0,811	81,138	2,482	24,816	80,106	81,138	80,437	81,607	80,437	81,607	80,106	81,138	0,801	80,106	0,811	81,138	2,482	24,816
0,802	80,178	0,810	81,001	2,467	24,671	80,178	81,001	80,857	81,775	80,857	81,775	80,178	81,001	0,802	80,178	0,810	81,001	2,467	24,671
0,797	79,720	0,809	80,854	2,478	24,778	79,720	80,854	79,831	81,112	79,831	81,112	79,720	80,854	0,797	79,720	0,809	80,854	2,478	24,778

Tabelle 5-8: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Abschnitts- und Systemlänge, U_{ind.} und I_{ind.}

Der Tabelle 5-8 kann entnommen werden, dass sowohl eine Halbierung als auch eine Verdoppelung der Abschnitts- und damit der Gesamt-Kabelleitungslänge einen sehr geringen Einfluss auf die in den Hauptabschnitten fließenden Längsströme besitzen.

Bei einer vollkommen elektrisch symmetrischen Kabelleitung ist die Abschnitts- und dem zu Folge die Systemlänge vernachlässigbar. Relevanz kann dieser Faktor erlangen, wenn die Abschnittslänge derart groß wird, dass sich die Größenverhältnisse innerhalb der Kettenschaltung von Selbst-, Koppelimpedanz und Querwiderstände (R_E, R_{boxen}, R_A UW, R_A Muffen) derart verändert, dass sich durch die induktive Kopplung die Kreisströme auf anderen Leitern ausbilden.



5.4.5 Begleiterder

Nachfolgend sind auszugsweise Berechnungsergebnisse angeführt, in denen der Einfluss von Begleiterdern ersichtlich ist. In der Tabelle 5-9 sind die Eingangsdaten der Simulationen angegeben. In den beiden nachfolgenden Tabelle 5-10 und Tabelle 5-11 sind die Werte der Längs- und Querströme sowie der dazugehörigen Spannungsabfälle angeführt. Zu beachten ist, dass sich die Spannungen und Ströme entlang der kompletten Leitungslänge, aufgrund der elektrisch symmetrischen Kabelleitung wie nachfolgend beschrieben aufteilen. Die Spannungen und Ströme am Anfang und am Ende der Kabelleitung sind gleich. Die Längsströme in allen Hauptabschnitten (1 bis 4), genauso wie die Werte in den Erdungsabschnitten 1 und 3 sind ebenfalls gleich. Aufgrund der elektrischen Symmetrie der Kabelleitung sind die Werte im mittleren Erdungsabschnitt 2 null, d.h. es fließen in der mittleren Muffe keine Ströme in die Erdungsanlage.

Bei allen Berechnungen wird davon ausgegangen dass der Begleiterderwiderstand sehr niederohmig ist, d.h. $R_{BE1} = R_{BE2} = 0,01 \text{ Ohm}$ (an allen Orten)																					
4 Drehstromsysteme, 2 außer Betrieb, Daten aus KL 1				Anfang		RE				Ende				Systeme 1&2		Systeme 3&4					
Betriebsstrom	spez. Bodenwid.	Verlegetiefe	Abschnittslänge	R_e	$R_{e, UW}$	Erdungsabschnitt 1		Erdungsabschnitt 2		Erdungsabschnitt 3		R_e	$R_{e, UW}$	R_{BE1}	R_{BE2}	R_{BE3}	R_{BE4}	RA Muffen	RA Muffen	Aussenleiter	Begleiterder
1000 A	200 Qm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	1 Ω	max	ohne BE
1000 A	200 Qm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	1 Ω	max	2 X 95 mm ² aussen
1000 A	200 Qm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	1 Ω	max	2 X 300 mm ² aussen
1000 A	200 Qm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	1 Ω	max	2 X 95 mm ² innen
1000 A	200 Qm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	1 Ω	max	2 X 300 mm ² innen

Tabelle 5-9: Eingangsdaten, Ausgangszustand, KL 1-1, 4 DS-Systeme vorhanden, 2 davon außer Betrieb, Variation der Querschnittsfläche und der Lage der Begleiterder

Anfang														Hauptabschnitt 1													
Phase außer Betrieb				Schirm in Betrieb				Schirm außer Betrieb				Begleiterder				Phase a. B.		Schirm a. B.				Begleiterder					
Sys 3 U _{le}	Sys 3 I _{le}	Sys 4 U _{le}	Sys 4 I _{le}	Sys 1 U _{le}	Sys 1 I _{le}	Sys 2 U _{le}	Sys 2 I _{le}	Sys 3 U _{le}	Sys 3 I _{le}	Sys 4 U _{le}	Sys 4 I _{le}	U _{BE1}	I _{BE1}	U _{BE2}	I _{BE2}	U _{BE3}	I _{BE3}	Sys 3 I	Sys 4 I	Sys 1 I	Sys 2 I	Sys 3 I	Sys 4 I	BE1	BE2		
U _{le} (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)										
0,979	97,863	0,057	5,736	0,899	89,864	0,544	54,426	0,281	28,128	0,027	2,654					2,517	25,169	97,863	5,736	89,864	54,426	28,128	2,654				
1,003	100,311	0,072	7,194	0,671	67,092	0,588	58,799	0,293	29,318	0,029	2,905	1,474	147,424	0,021	2,111	1,311	13,114	100,311	7,194	67,092	58,799	29,318	2,905	147,424	2,111		
1,009	100,868	0,079	7,924	0,544	54,428	0,586	58,637	0,297	29,693	0,033	3,314	1,792	179,211	0,035	3,484	1,052	10,517	100,868	7,924	54,428	58,637	29,693	3,314	179,211	3,484		
0,990	99,017	0,046	4,557	0,957	95,707	0,562	56,152	0,281	28,090	0,021	2,118	0,692	69,214	0,046	4,617	2,439	24,392	99,017	4,557	95,707	56,152	28,090	2,118	69,214	4,617		
0,998	99,786	0,043	4,272	0,939	93,940	0,603	60,333	0,283	28,293	0,020	2,000	0,871	87,052	0,059	5,932	2,353	23,526	99,786	4,272	93,940	60,333	28,293	2,000	87,052	5,932		

Tabelle 5-10: Ausgangszustand, KL 1-1, 4 DS-Systeme vorhanden, 2 davon außer Betrieb, Variation der Querschnittsfläche und der Lage der Begleiterder, I_{ind.}, Teil 1

Erdungsabschnitt 1														Begleiterder													
Phase außer Betrieb				Schirm in Betrieb				Schirm außer Betrieb				Begleiterder				Phase a. B.		Schirm a. B.				Begleiterder					
Sys 3 U	Sys 3 I	Sys 4 U	Sys 4 I	Sys 1 U _{ind.}	Sys 1 I _{ind.}	Sys 2 U _{ind.}	Sys 2 I _{ind.}	Sys 3 U _{ind.}	Sys 3 I _{ind.}	Sys 4 U _{ind.}	Sys 4 I _{ind.}	U _{BE1}	I _{BE1}	U _{BE2}	I _{BE2}	U _{BE3}	I _{BE3}	Sys 3 U	Sys 4 U	Sys 1 U	Sys 2 U	Sys 3 U	Sys 4 U	U _{BE1}	I _{BE1}	U _{BE2}	I _{BE2}
U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
1,194	0,000	0,760	0,000	0,005	0,515	0,015	1,544	0,007	0,684	0,021	2,052			0,619	0,619	0,002	0,170	0,005	0,510	0,001	0,081	0,002	0,000	0,000	0,243	0,743	0,743
0,868	0,000	0,412	0,000	0,004	0,408	0,012	1,224	0,006	0,603	0,018	1,808	0,009	0,886	0,294	0,294	0,001	0,122	0,004	0,365	0,000	0,002	0,000	0,005	0,000	0,035	0,393	0,393
0,760	0,000	0,323	0,000	0,002	0,180	0,005	0,540	0,006	0,577	0,017	1,730	0,014	1,387	0,236	0,236	0,001	0,111	0,003	0,334	0,000	0,021	0,001	0,063	0,000	0,021	0,317	0,317
1,202	0,000	0,742	0,000	0,006	0,621	0,019	1,862	0,006	0,614	0,018	1,842	0,009	0,908	0,570	0,570	0,002	0,180	0,005	0,541	0,001	0,082	0,002	0,000	0,246	0,001	0,073	0,727
1,190	0,000	0,723	0,000	0,006	0,593	0,018	1,780	0,007	0,703	0,021	2,109	0,013	1,313	0,534	0,534	0,002	0,185	0,006	0,554	0,001	0,087	0,003	0,260	0,001	0,114	0,707	0,707

Tabelle 5-11: Ausgangszustand, KL 1-1, 4 DS-Systeme vorhanden, 2 davon außer Betrieb, Variation der Querschnittsfläche und der Lage der Begleiterder, I_{ind.}, Querstromverteilung, Teil 2

In elektrischen Energieübertragungs- und Energieverteilungsnetzen werden bei der Verlegung von Erdkabeln häufig nichtisolierte Begleiterder mitverlegt. Die Intention dahinter kann unterschiedlich sein, da je nach Betriebszustand der Kabelleitungen die Begleiterder unterschiedliche Funktionen besitzen. Im Normalbetrieb werden die Erdungsverhältnisse der Muffenstellen von Kabelleitungen verbessert, d.h. die Erdungswiderstände der Muffenstellen verringert. Im Erdschlussfall sollen die Begleiterder im Idealfall einen Großteil des Fehlerstromes übernehmen und somit die Kabelschirme vor Überlastung schützen. In der einschlägigen Fachliteratur wie z.B. in [33] werden bzgl. der induzierten Spannung am offenen Ende eines Leiters Reduktionsfaktoren für Erdseile von Freileitungen, Kabelmäntel, Schienen, benachbarte metallische Einbauten und für Begleiterder angeführt und mit Werten zwischen 0,6 und 0,9 angegeben.

In der vorliegenden Dissertation wird der Begleiterdereinfluss anhand von zwei parallel zu den 400-kV-Kabeln verlegten isolierten Leitern untersucht. Es werden zwei unterschiedlichen Positionen (Abbildung 4-1) und zwei unterschiedliche Querschnittsflächen der Begleiterder untersucht. Die Begleiterder werden in den Erdungsabschnitten als geerdet angenommen. Als Querschnittsfläche sind Kupferleiter mit 95 mm² und 300 mm² gewählt



worden. Die Positionen der beiden BE werden zum einen von den äußersten Leitern jeweils links und rechts einen halben Meter und zum anderen mittig zwischen System 1 und 2 sowie zwischen System 3 und 4 angenommen (siehe Abbildung 4-1).

Mit dem entwickelten Simulationsmodell konnte gezeigt werden, dass mitverlegte, parallelverlaufende Begleiterder zwar einen Teil des induzierten Stromes in Normalbetrieb übernehmen und dadurch Kabelschirme entlasten. Es wurde jedoch auch gezeigt, dass die Verlegung von parallelverlaufenden Begleiterdern im fehlerfreien Normalbetrieb von 400-kV-Kabelleitungen eine Erhöhung der induzierten Spannungen bei bestimmten Leitern an bestimmten Orten entlang der Leitungstrasse zur Folge haben kann.

Im 1-poligen Erdschlussfall (häufigster Fehlerfall) einer Mittelspannungs-Kabelleitung ging man davon aus, dass ein Großteil des Fehlerstromes über die Erdungsanlage und falls vorhanden über Begleiterder zurück zur speisenden Quelle fließen und somit in diesem Fall die Kabelschirme entlastet bzw. vor einem zu hohen Strom geschützt werden. Die Erdstromaufteilung im 1-poligen Erdschlussfall von Mittelspannungs-Kabelleitungen wurde in [20] im Detail untersucht. Hier wurde gezeigt, dass bei MS –Kabelleitungen, bei denen kein Crossbonding der Kabelschirme erfolgt, ein Großteil des Fehlerstromes, trotz vorhandenem Begleiterder nach wie vor über den Kabelschirm zurückfließt.

Für Hoch- und Höchstspannungs-Kabelleitungen, wo Kabel immer als Einleiterkabel ausgeführt werden, d.h. jede Phase einen eigenen Kabelschirm besitzt, wird in der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass im Fehlerfall ohne Begleiterder und ohne Crossbonding der Kabelschirm je nach fehlerbehafteter Phase der entsprechende Kabelschirm zwischen 66 % und 74% des Fehlerstroms führt. Die restlichen 26 % bis 34 % des Stromes teilen sich auf die restlichen Kabelschirme und auf die Rückleitung über Erde auf. Wird das Kabelschirm-Crossbonding ausgeführt, so verteilt sich der Fehlerstrom auf die Kabelschirme gleichmäßig und jeder der drei Kabelschirme führt ca. 28 % des Fehlerstromes (Rest fließt im Erdreich). Obwohl die BE galvanisch bzw. ohmsch mit den Kabelschirmen und den Erdungsanlagen gekoppelt sind, überwiegt die induktive Kopplung zwischen den Kabelschirmen mit den jeweiligen, fehlerbehafteten Phasen.



5.4.6 Crossbonding-Fehler

Das in der Höchstspannungsebene übliche zyklische Auskreuzen von Kabelschirmen in Kombination mit der Erdungsbehandlung der Kabelschirme wird als Crossbonding bezeichnet. In der Regel werden die Kabelschirme elektrisch derart verschalten, sodass innerhalb eines Hauptabschnittes einer Kabelleitung, jeder der drei Kabelschirme jeden der drei Phasenleitern einmal umschließt (Abbildung 3-10). Die Kabelschirme werden am Anfang und Ende eines jeden Hauptabschnittes direkt geerdet. In den beiden dazwischenliegenden Muffenstellen werden die Kabelschirme für gewöhnlich über Überspannungsableiter an die Erdungsanlage der Muffenstellen angebunden. Diese Vorgangsweise führt im symmetrischen Normalbetriebszustand von Kabelleitungen dazu, dass sich die, in die Kabelschirme induktiv eingekoppelten Längsspannungen kompensieren. Dies führt im Endeffekt zu einer Reduktion der Zusatzverluste, ungeachtet der beidseitig geerdeten Kabelschirme.

Ein Crossbonding-Fehler ist ein Fehler, bei dem eine, im Normalfall nicht vorhandene direkte Erdungsverbindung eines Kabelschirmes stattfindet. Dazu kann es beispielsweise durch eine Zündung eines Überspannungsableiters, eine Beschädigung der äußeren Kabelschirmisolation oder der Isolation des Crossbonding-Kabels oder durch einen Wassereintritt in eine Crossbonding Box kommen. Ein Crossbonding-Fehler hat zur Folge, dass die vektorielle Addition der Längsspannungen der drei Abschnitte zu einer resultierenden Längsspannung und somit zu einem erhöhten Stromfluss in den Kabelschirmen führt.

Simulation		1		2		3	
Crossbonding-Fehler		Nein		Zwischen A1 und A2 im System 1 Kabelschirm 3		Zwischen A1 und A2 im System 2 Kabelschirm 1	
Abschnitt		A1	A2	A1	A2	A1	A2
		I (A)		I (A)		I (A)	
System 1	L1	130,24	130,24	86,40	86,40	89,77	89,77
	L2	126,48	126,48	88,32	88,32	66,12	66,12
	L3	77,10	77,10	54,11	118,39	84,99	84,99
System 2	L1	12,90	12,90	4,54	4,54	35,34	29,56
	L2	9,67	9,67	6,62	6,62	8,95	8,95
	L3	42,86	42,86	9,26	9,26	9,20	9,20
System 3	L1	11,63	11,63	11,40	11,40	10,01	10,01
	L2	14,54	14,54	9,72	9,72	11,99	11,99
	L3	25,31	25,31	8,56	8,56	22,22	22,22
System 4	L1	86,42	86,42	88,18	88,18	150,41	150,41
	L2	93,72	93,72	88,52	88,52	54,32	54,32
	L3	83,60	83,60	88,75	88,75	115,10	115,10

Tabelle 5-12: Induzierte Kabelschirmströme in Kabelleitung KL 1 bei einem Crossbonding-Fehler zwischen Abschnitt 1 und Abschnitt 2, bei einem beeinflussenden Strom $I = 1000$ A pro Phase

Ein Crossbonding-Fehler bewirkt durch die gestörte elektrische Symmetrie, abhängig vom fehlerbehafteten Kabelschirm nicht nur eine Erhöhung des Stromes im betroffenen Kabelschirm, sondern auch eine Änderung der Ströme in den restlichen Leitern. Bei der Kabelleitung KL 1 führt ein Crossbonding-Fehler zwischen Abschnitt A1 und A2 in Kabelschirm 3 des Systems 1 zu einem Strom im Abschnitt A2 in der Höhe von 154%, bezogen auf den fehlerfreien Crossbonding-Zustand (Tabelle 5-12, grüne Markierung). Gleichzeitig führt derselbe Fehler im Abschnitt 1 zu einer Reduktion des Stromes auf 70%, bezogen auf den fehlerfreien Crossbonding-Zustand. Derselbe Fehler im Kabelschirm 1 des Systems 2 führt im Abschnitt A1 zu einem Strom von 274 % und im A2 zu einem Strom von 229 %, bezogen auf den fehlerfreien Crossbonding-Zustand (Tabelle 5-12, blaue Markierung).



In [2] wurden durch FEM-Simulationen die thermischen Auswirkungen von Crossbonding-Fehlern untersucht und es wurde gezeigt, dass es nötig sein kann, während der Zeitspanne bis zur Lokalisierung und Behebung des Crossbonding-Fehlers die Übertragungskapazität der Kabelleitung zu reduzieren, um eine Überschreitung der maximal zulässigen Temperatur bzw. in Endeffekt um eine vorzeitige Alterung der Isolation zu verhindern.

Das Ausmaß der notwendigen Reduktion der Übertragungskapazität der Kabelleitung hängt von der max. zulässigen Leiter- und Isolierstofftemperatur, von den aktuellen Temperaturen inkl. Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt des Fehlereintrittes, von der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Erdreichs, von der Kabelschirmauslegung, vom aktuellen Belastungszustand der Kabelleitung zum Zeitpunkt des Fehlereintrittes, vom betroffenen Drehstromsystem und vom betroffenen Kabelschirm, vom Widerstand der fehlerhaften Berührung des Kabelschirmes mit der Erde und von der Anzahl der Drehstromsysteme der Kabelleitung ab.

Eine kontinuierliche Überwachung der Kabelschirmströme findet heute bei Höchstspannung-Kabelleitungen üblicherweise nicht statt. Aufgrund der möglichen Lebensdauerverkürzung durch vorzeitige Alterung des Isolierstoffes, hervorgerufen durch erhöhte Temperaturen als Ursache von Crossbonding-Fehlern wird, in Anbetracht der Einstufung von Höchstspannungs-Übertragungsleitungen gemäß [40] als kritische Infrastruktur, an dieser Stelle empfohlen bei allen zukünftigen Höchstspannungs-Kabelleitungen eine kontinuierliche Temperaturüberwachung aller Kabelschirme entlang der kompletten Leitungstrasse zu realisieren.



5.4.7 Querschnittsfläche der Kabelschirme

Die Kabelleitung KL 1 mit ihrem Standard-Kabelschirm (Kupfer, 155 mm²) wurde herangezogen, um den Einfluss der Querschnittsfläche der Kabelschirme auf die Höhe der induzierten Spannungen und Ströme zu analysieren. In der Tabelle 5-13 sind untersuchten Querschnittsflächen der Kupfer-Kabelschirme angeführt. Die Standard-Querschnittsfläche wurde um den Faktor 2 nach unten und um die Faktoren 2 und 10 nach oben variiert.

1 Drehstromsystem, Daten aus KL 1				Anfang		RE			Ende				
Betriebsstrom	spez. Bodenwid.	Verlegetiefe	Abschnittslänge	R _E	R _A UW	Erdungsabschnitt 1	Erdungsabschnitt 2	Erdungsabschnitt 3	R _E	R _A UW	R _{box1}	RA Muffen	KS-Querschnittsfläche
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	77,5 mm ²
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	155 mm ²
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	310 mm ²
1000 A	200 Ωm	-1,75 m	1 km	0,01 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	1 Ω	1550 mm ²

Tabelle 5-13: Eingangsdaten, Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme

Anfang				Hauptabschnitt 1	Erdungsabschnitt 1					
Schirm in Betrieb				Schirm in Betrieb	Schirm in Betrieb					
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}	Sys 1 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{Rbox1}	Sys 1 I _{Rbox1}	U _{RA1}	I _{RA1}
U _{RE} (V)	I (A)	U (V)	I (A)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
0,086	8,618	2,550	25,498	8,618	0,004	0,416	0,084	0,836	0,836	0,836
0,088	8,791	2,600	26,000	8,791	0,004	0,442	0,089	0,890	0,890	0,890
0,089	8,867	2,622	26,222	8,867	0,005	0,456	0,092	0,917	0,917	0,917
0,089	8,927	2,639	26,394	8,927	0,005	0,469	0,094	0,940	0,940	0,940

Tabelle 5-14: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme, U_{ind.} und I_{ind.}, Teil 1

Hauptabschnitt 2	Erdungsabschnitt 2						Hauptabschnitt 3
Schirm in Betrieb	Schirm in Betrieb						Schirm in Betrieb
Sys 1 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{Rbox1}	Sys 1 I _{Rbox1}	U _{RA1}	I _{RA1}	Sys 1 I
I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	I (A)
8,797	0,001	0,141	0,001	0,010	0,010	0,010	8,741
8,979	0,001	0,148	0,001	0,008	0,008	0,008	8,919
9,058	0,002	0,152	0,001	0,007	0,007	0,007	8,996
9,121	0,002	0,157	0,001	0,007	0,007	0,007	9,059

Tabelle 5-15: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme, U_{ind.} und I_{ind.}, Teil 2

Erdungsabschnitt 3						Hauptabschnitt 4	Ende			
Schirm in Betrieb						Schirm in Betrieb	Schirm in Betrieb			
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{Rbox1}	Sys 1 I _{Rbox1}	U _{RA1}	I _{RA1}	Sys 1 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}
U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)	I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	U (V)	I (A)
0,003	0,289	0,086	0,863	0,863	0,863	8,495	0,085	8,495	2,548	25,484
0,003	0,304	0,091	0,909	0,909	0,909	8,663	0,087	8,663	2,599	25,987
0,003	0,311	0,093	0,932	0,932	0,932	8,737	0,087	8,737	2,621	26,210
0,003	0,317	0,095	0,950	0,950	0,950	8,794	0,088	8,794	2,638	26,382

Tabelle 5-16: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme, U_{ind.} und I_{ind.}, Teil 3

Die Berechnungsergebnisse (Tabelle 5-14 bis Tabelle 5-16) zeigen, dass der Einfluss des, aus der Querschnittsfläche resultierenden Gleichstromwiderstandes der Kabelschirme auf die induzierten Ströme sehr gering ist. Trotz einer 20-fach größeren zur Verfügung stehenden Kabelschirm-Querschnittsfläche steigt der längsfließende Strom in den Hauptabschnitten um max. 3,6 % an. Gemäß Formel (34) stellt der Gleichstromwiderstand eines Leiters R nur einen von vier Anteilen dar, aus denen sich die Selbstimpedanz eines Leiters zusammensetzt. Zusätzlich wird hier angeführt, dass bei Höchstspannungsleitungen sowohl bei der Selbst- als auch bei der Koppelimpedanz die Imaginärteile der Impedanzen ein Mehrfaches der Realteile betragen. Dementsprechend wird die Schlussfolgerung gezogen, dass für die Thematik der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelsystemen die geometrische Anordnung der Leiter eine wesentlich größere Relevanz besitzt als die Querschnittsfläche der Leiter. Aus dieser Erkenntnis kann abgeleitet werden, dass das Leitermaterial der Ka-



belschirme ebenfalls keine Relevanz bezüglich der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Höchstspannungs-Kabelleitungen besitzt, denn die spezifische elektrische Leitfähigkeit bzw. ihr Kehrwert, der spezifische elektrische Widerstand von Kupfer und Aluminium (übliche Leitermaterialien) beeinflussen nur den Gleichstromwiderstand.

5.5 Bestimmende und zweitrangige Einflussgrößen auf die induktive Beeinflussung

Beim Versuch die physikalischen Gegebenheiten von Kabelleitungen in einem mathematischen Modell abzubilden, um damit die wechselseitige induktive Beeinflussung zu untersuchen, muss im Idealfall jede einzelne Einflussgröße berücksichtigt werden. Die beste, heute zur Verfügung stehende Methode wäre die Finite Elemente Methode (FEM). Trotz Verfügbarkeit dieses Berechnungsverfahrens seit mehreren Jahrzehnten ist es auf die in dieser Dissertation gestellte Aufgabenstellung nicht sinnvoll anwendbar, da die Knotenanzahl einer mehrere Kilometer langen Leitung mit einer bestimmten Trassenbreite und Verlegetiefe derart hoch ist, dass sie mit den heute zur Verfügung stehenden Rechnern nicht lösbar ist.

Das vorgestellte Simulationsmodell ist derart entwickelt worden, sodass die relevanten Einflussgrößen auf die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen berücksichtigt werden können. Wie den vorherigen Kapiteln zu entnehmen ist haben die Untersuchungen gezeigt, dass sich zwar alle Einflussgrößen auf die induzierten Spannungen und Ströme auswirken, jedoch einige davon, unter den üblichen Gegebenheiten von Kabelleitungen vernachlässigt werden können, ohne dabei an Berechnungsgenauigkeit einzubüßen.

Die bestimmenden Einflussgrößen sind:

- die elektrische Symmetrie der Kabelleitungen,
- die Phasenleiterströme,
- die Drehstromsystemanzahl,
- die Verdrillungsart,
- das Crossbonding,
- die System- und die Leiterabstände.

Die zweitrangigen bzw. vernachlässigbaren Einflussgrößen sind

- die Verlegetiefe der Kabel,
- die Querschnittsfläche der Kabelschirme,
- die Querschnittsfläche der Begleiterder,
- der spezifische elektrische Bodenwiderstand.

Aus den Berechnungsergebnissen wird abgeleitet, dass bei gängigen Verlegetiefen der Leitungen, unter den zugrundeliegenden Randbedingungen (Netzfrequenz, geringe elektrische Leitfähigkeit des Bodens (0,001 S/m bis 0,05 S/m), geringe Abstände zwischen gekoppelten Leitern) die Selbst- und Koppelimpedanzen unabhängig von der Verlegetiefe der Leitungen sind. In [36] kann nachgelesen werden, dass dies auch auf Freileitungen, das heißt für Leitungen, die über der Erdoberfläche verlegt sind, zutrifft. Die in [19] angeführte Aussage, dass die Gleichungen von Carson und Pollaczek beinahe gleiche Ergebnisse liefern bestätigt dies ebenfalls, denn Carson hat in seiner Arbeit angenommen, dass die Leitungen auf der Erdoberfläche liegen und Pollaczek hat eine bestimmte Höhe der Leiter berücksichtigt.



5.6 Maßnahmen zur Verhinderung potenzieller Gefahrensituationen

Bei der Planung neuer Kabelleitungen ist bezüglich der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung unbedingt auf eine hohe elektrische Symmetrie der Leitung mit niedrigen Widerständen der Kabelschirme, der Crossbondingboxen und der Muffen-Erdungsanlagen zu achten. Dies kann durch Phasenverdrillung, Kabelschirm-Crossbonding, Positionstausch der Drehstromsysteme innerhalb der Gesamtleitungsformation, durch drei teilbare Anzahl an Abschnitten, gleiche Abschnittslängen, gleiche Erdungswiderstände und gleiche Verlegeprofile erreicht werden. Wenn es gelingt, bei der Planung bzw. bei der Installation der Kabelleitung die oben aufgezählten Punkte einzuhalten, so reduziert man unweigerlich auch die möglichen Gefahrensituationen, denn bei einer elektrisch symmetrischen Kabelleitung sind die induzierten Spannungen und Ströme kleinstmöglich. Bei bestehenden Leitungen sind regelmäßig wiederkehrende Inspektionen bzw. Zustandsbewertungen durchzuführen und, wenn technisch möglich, Messungen der Erdungsanlagen durchzuführen.

Das Einschleppen fremder Potentiale in Muffenbauwerke ist unbedingt zu vermeiden. Ein Potentialausgleich ist aufgrund der beengten Platzverhältnisse in Muffenbauwerken (siehe Abbildung 5-28) jedenfalls erforderlich. Wenn Muffenbauwerke betreten werden müssen, so muss das Personal im Hinblick auf die möglichen Gefahren beim Durchführen von Arbeiten an abgeschalteten und geerdeten Leitungen, insbesondere im Fehlerfall der parallelverlaufenden und in der Regel sich in Betrieb befindlichen Kabelleitungen ausführlich geschult werden: Die Kontaktzeit mit scheinbar niederohmig mit „Erde“ verbundenen Anlagenteilen in Muffenbauwerken ist möglichst kurz zu halten. Im Idealfall sind Isolierhandschuhe während des gesamten Aufenthaltes in Muffenbauwerken zu tragen und zusätzlich eine Standortisolierung zu realisieren. Korrodierte Verbindungs- bzw. Anschlusspunkte von Erdungs- und Potentialausgleichleitungen an Kabelmuffen, Endverschlüssen und Crossbondingboxen sind zu erneuern, wobei alle berührbaren, nicht mehr unmittelbar mit Erde verbundenen Anlagenteile, vor dem Öffnen von Erdungsverbindungen, zu erden sind.

Abbildung 5-28 zeigt die beengten Platzverhältnisse in einem Muffenbauwerk einer 400-kV-Kabelleitung.



Abbildung 5-28: Beengte Platzverhältnisse innerhalb eines Muffenbauwerks einer 400-kV-Kabelleitung (gezeichnete Leiter symbolisieren mögliche benachbarte Kabelleitungen, hinter der Betonwand)

In [56] wird zwischen „Arbeiten im spannungsfreien Zustand“, „Arbeiten unter Spannung“ und „Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile“ unterschieden. Für jede der drei Arbeitsmethoden sind Arbeitsanweisungen angeführt, die unbedingt einzuhalten sind. Das Durchführen von Arbeiten in Muffenbauwerken von 400-kV-Kabelleitungen gehört eigentlich zur Kategorie Arbeiten im Spannungsfreien Zustand, da die betroffene Leitung abgeschaltet wird. Wenn jedoch Erdungs- oder Potentialausgleichsleitungen geöffnet werden müssen, um zum Beispiel Kabelschirmmessungen durchzuführen, so kann es im Fehlerfall einer benachbarten Leitung zu hohen lokalen Potentialdifferenzen kommen.



6 Durchgeführte Messungen zur Modellverifikation

6.1 Messaufbau

Messungen an 400-kV-Kabelsystemen sind zum einen aufgrund der sehr geringen Anzahl entsprechender Leitungen und zum anderen aufgrund ihrer hohen strategischen Bedeutung innerhalb von Übertragungsnetzen sehr schwierig durchzuführen. Umso bedeutsamer ist die Tatsache einzuschätzen, dass für die Verifikation des im Zuge der vorliegenden Dissertation entwickelten Simulationsmodells Messungen an 400-kV-Kabelleitungen durchgeführt werden konnten. Zusätzlich zu den Messergebnissen konnte ein umfassenderes Verständnis über die umfassende Thematik der induktiven Beeinflussung von Kabelleitungen, insbesondere der Fragestellungen bezüglich des Arbeitnehmerschutzes gewonnen werden.

Die Messungen sind an einer ca. 10 km langen, zweisystemigen Kabel-Freileitungsstrecke, die zwei Umspannwerke (UW) miteinander verbindet, durchgeführt worden. In der Fachliteratur spricht man in diesen Fällen von einer Teilverkabelung einer Freileitung. Die kombinierte Kabel-Freileitungsleitung teilt sich auf einen ca. 4 km langen Kabelabschnitt und einen ca. 6 km langen Freileitungsabschnitt auf. Der Kabelabschnitt ist im städtischen Bereich mit einem Abstand zwischen den beiden Drehstromsystemen von mindestens 5 m (gemessen zwischen den jeweils mittleren Phasen) und in einer Tiefe von 1,75 m verlegt und geht an einem Kabelübergangs-Portal in eine Freileitung über. In Abbildung 4-2 (siehe Kabelleitung KL 2-2) ist das Querverlegeprofil der Kabelleitung KL 2-2 und in Abbildung 4-7 das Längsverlegeprofil dargestellt. In Abbildung 6-1 ist der Aufbau der durchgeführten Messungen abgebildet. Man kann der Abbildung 6-1 entnehmen, dass während der Messungen ein Drehstromsystem in Betrieb und das andere außer Betrieb war. Während der gesamten Messdauer blieben die Kabelschirme des, sich in Betrieb befindlichen Drehstromsystems (DS-System 1) im Umspannwerk, in allen Muffenstellen und am KÜ-Portal geerdet. Die Kabelschirme des, sich außer Betrieb befindlichen Drehstromsystems (DS-System 2) waren dagegen am KÜ-Portal nicht geerdet. Die Phasenleiter des, sich außer Betrieb befindlichen Drehstromsystems waren im UW A am Ende der Kabelleitung und am KÜ-Portal während der gesamten Messdauer geerdet. Im UW B, am Ende der Freileitung wurde ihre Erdung für ca. 3h offengelassen.

Der beeinflussende Strom im Drehstromsystem 1 zu Beginn der Messungen lag bei ca. 400 A pro Phase und stieg im Laufe der Messungen durch eine Schalthandlung im Netz auf ca. 610 A pro Phase an. Die induzierten Ströme sind im UW A am DS-System 1 und am KÜ-Portal am DS-System 2 gemessen worden.

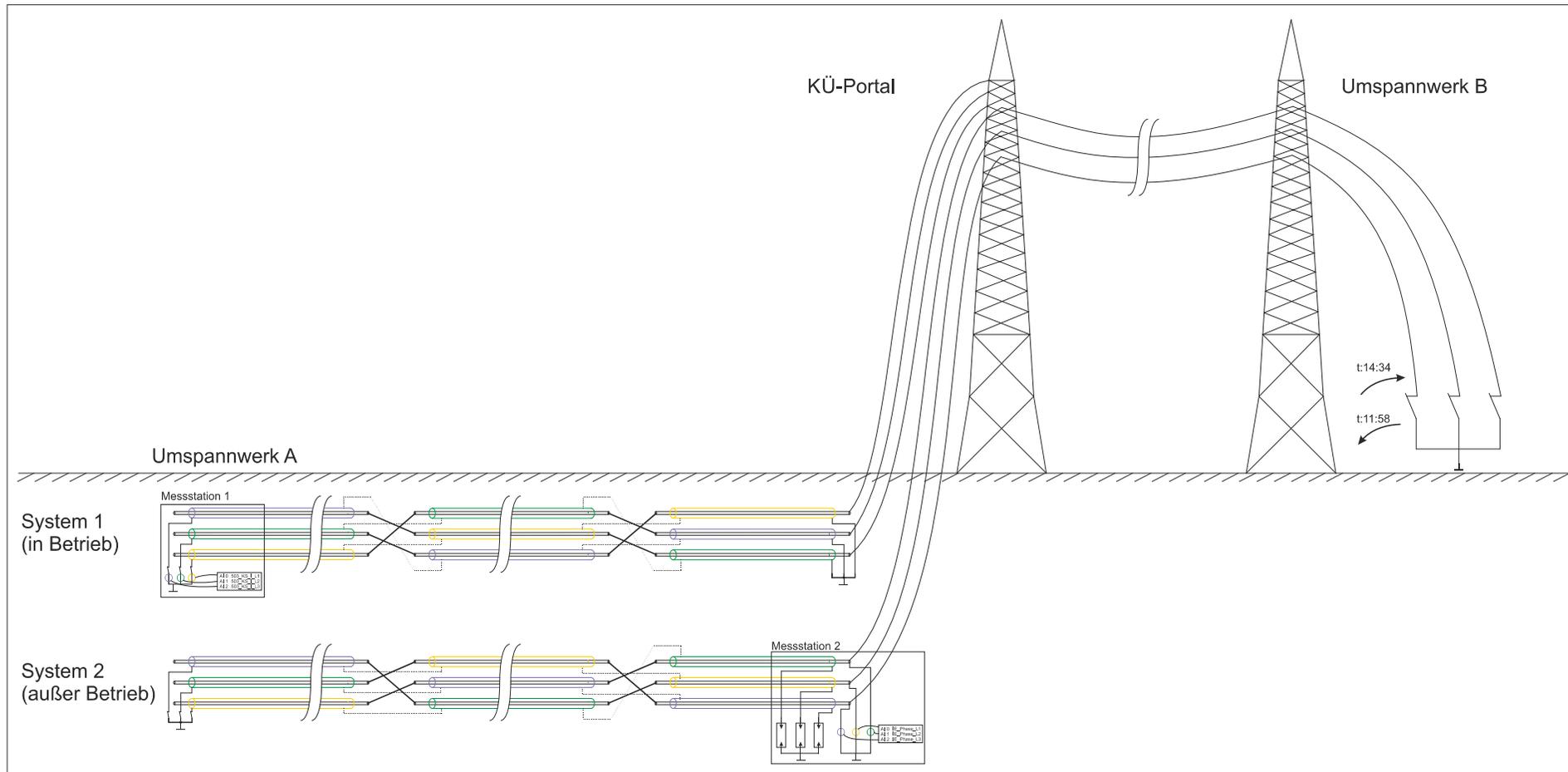


Abbildung 6-1: Übersichtsbild der durchgeführten Messungen an einer 400-kV-Kabel-Freileitung



6.2 Messergebnisse

Am Anfang der Messungen waren die Phasen des abgeschalteten DS-Systems 2 an beiden Enden der Leitung und beim KÜ-Portal geerdet. Der beeinflussende Strom, d.h. der Strom pro Phase im, sich in Betrieb befindlichen Drehstromsystem lag bei ca. 400 A. In diesem Schaltzustand werden Ströme in die Kabelschirme des Systems in Betrieb von $I_{KS_L1} \approx 53$ A, $I_{KS_L2} \approx 72$ A, $I_{KS_L3} \approx 65$ A (siehe Abbildung 6-3, Cursor I) induziert. Weiters werden in diesem Schaltzustand Ströme in die Phasen des Systems außer Betrieb von $I_{E_L1} \approx 21$ A, $I_{E_L2} \approx 4$ A, $I_{E_L3} \approx 26$ A (siehe Abbildung 6-4, Cursor I) induziert und fließen in die Erdungsanlage des KÜ-Portals. Zu diesem Zeitpunkt konnte mit dem zur Verfügung stehenden Messequipment nicht bestimmt werden, welcher Anteil der Ströme im Kabelabschnitt und welcher im Freileitungsabschnitt induziert wird.

Eine Messung der induzierten Spannungen war nicht möglich, da die Messstationen sich in stark verbautem städtischem Gebiet befunden haben (d.h. in einem Globalen Erdungssystem) und eine unbeeinflusste Fläche bzw. die Ferne Erde nicht ohne einen erheblichen Mehraufwand gefunden werden konnte.

Nachdem die Erdungen der Phasen des DS-Systems 2 um 11:58 im Umspannwerk B geöffnet wurden konnte keinerlei Auswirkung auf die induzierten Ströme in den Kabelschirmen des Systems in Betrieb an der Messstation 1 festgestellt werden (siehe Abbildung 6-3). Die Auswirkungen dieser Schalthandlung auf die, in die Erdungsanlage des KÜ-Portals fließenden Ströme der Phasen des Systems außer Betrieb sind in der Abbildung 6-4 ersichtlich. Alle drei Phasenströme sinken auf Werte unter 1 A, was zur Erkenntnis führt, dass der Großteil der Ströme im Freileitungsabschnitt der Leitung induziert wird. Die Gründe dafür sind nachfolgend aufgezählt:

- Die Kabelabschnittslänge (40 % der Gesamtleitungslänge) ist kürzer als die Freileitungsabschnittslänge (60 % der Gesamtleitungslänge)
- Der Kabelabschnitt besitzt 3 Kabelschirme, die in diesem Fall als sehr gute Reduktionsleiter fungieren, wohingegen der Freileitungsabschnitt nur ein Erdseil aufweist, das als Reduktionsleiter fungiert
- Die Phasen entlang des Kabelabschnittes sind, wie man der Abbildung 4-7 entnehmen kann, verdreht

In der Abbildung 6-2 sind die Auswirkungen eines Anstiegs des beeinflussenden Stromes von 400 A auf 610 A, d.h. eines Stromanstiegs um mehr als 53 % dargestellt. Die Kabelschirmströme sind um 23 A, 31 A und 28 A angestiegen, was bei allen drei Kabelschirmen einem Anstieg von ca. 43 % entspricht.

In der Abbildung 6-4 ist die Auswirkung des Stromanstieges auf die, in die Erdungsanlage des KÜ-Portals fließenden Phasenströme des DS-Systems 2 dargestellt. Da zum Zeitpunkt des Stromanstiegs die Erdung der Phasen im UW B offen war, ist die Auswirkung in Absolutwerten kaum sichtbar und daher in Abbildung 6-5 herausgezoomt dargestellt. Ein Anstieg des Stromes ist in der herausgezoomten Darstellung sichtbar jedoch ist eine Angabe in Absolut- oder Prozentwerten nicht sinnvoll, da in diesem Fall die Messabweichungen der verwendeten Strommesszangen einen wesentlichen Einfluss haben.



6.2.1 Messergebnisse der Messstation 1

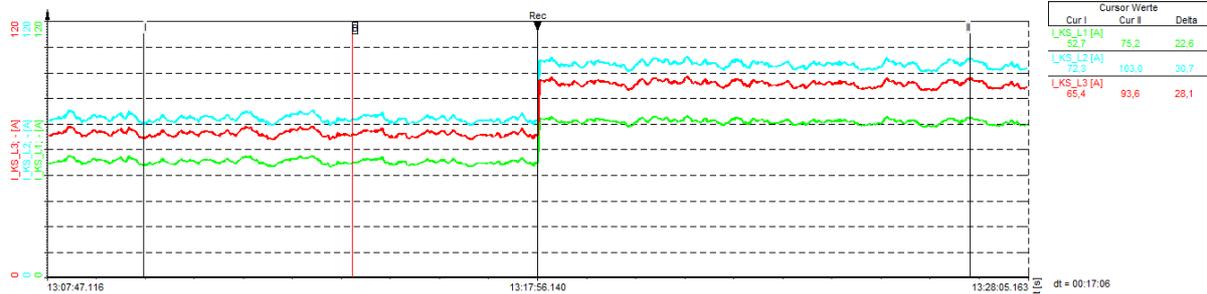


Abbildung 6-2: Induzierte Ströme in die Kabelschirme des DS-Systems 1 zum Zeitpunkt des Anstiegs des beeinflussenden Stromes von 400A auf 610A, Messstation 1 / Kabelanfang

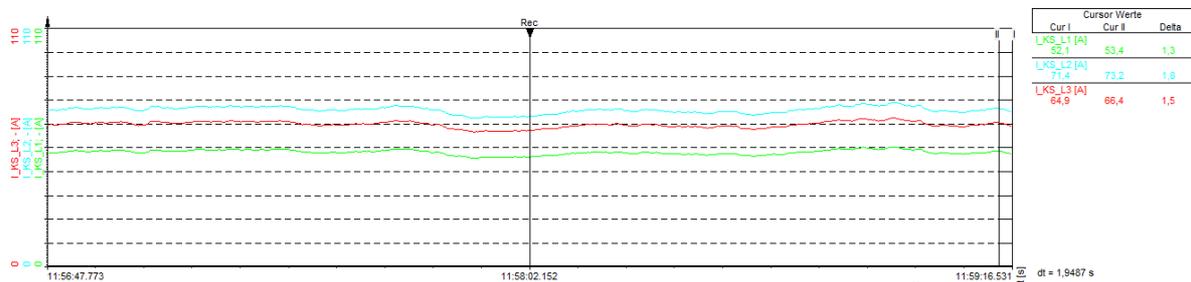


Abbildung 6-3: Induzierte Ströme in die Kabelschirme des DS-Systems 1 zum Zeitpunkt der Öffnung der Phasen-erdung des DS-Systems 2 im UW B (um 11:58), Messstation 1 / Kabelanfang

6.2.2 Messergebnisse der Messstation 2

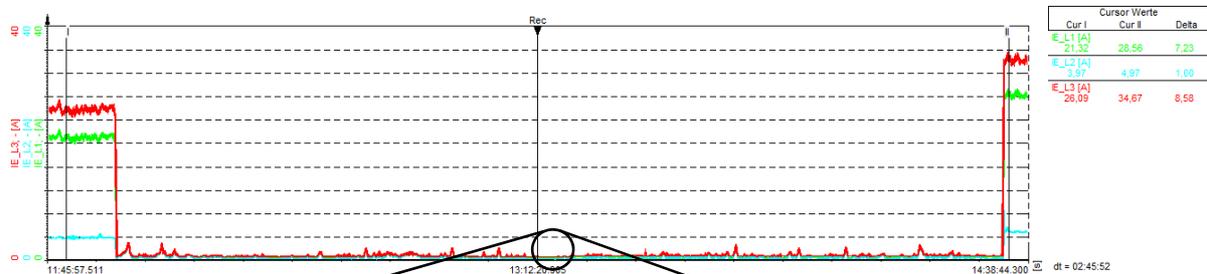


Abbildung 6-4: Übersicht über die induzierten Ströme in die Phasen des DS-Systems 2 (Phasenerdung wird geöffnet, Stromanstieg, Phasenerdung wird geschlossen), Messstation 2 / KÜ-Portal

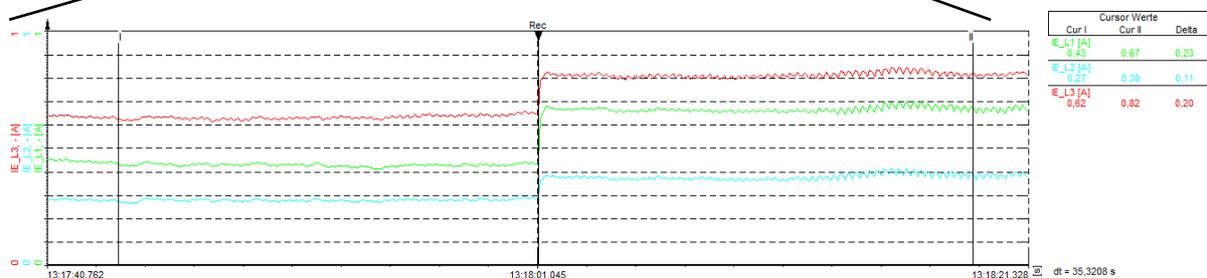


Abbildung 6-5: Induzierte Ströme in die Phasenleiter des DS-Systems 2 zum Zeitpunkt des Anstiegs des beeinflussenden Stromes von 400A auf 610A, Messstation 2 / KÜ-Portal



6.3 Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen

Die 400-kV-Kabelleitung wurde Anfang der 1980-er Jahre in Betrieb genommen und so ausgeführt, dass ihre Muffenstellen nicht zugänglich bzw. begehbar sind. Daher ist es heute nicht mehr möglich, den Zustand der Erdungsanlagen der Muffenstellen zu bewerten. Eine messtechnische Bestimmung der Erdungswiderstände jeder einzelnen Muffenstelle ist rein theoretisch möglich, praktisch jedoch äußerst schwierig so umsetzbar, dass die Messergebnisse belastbare Aussagen zum Zustand der Erdungsanlagen, die seit mehreren Jahrzehnten im Erdreich liegen, liefern. Um den Erdungswiderstand jeder einzelnen Muffenstelle messtechnisch bestimmen zu können, müsste man alle Kabelschirme und andere eventuell vorhandenen leitfähigen Verbindungen auftrennen und einen bestimmten, konstanten Strom in die Erdungsanlage einspeisen. Die für die Bestimmung des Erdungswiderstandes der Erdungsanlage notwendige Messung des Spannungstrichters jeder einzelnen Muffenstelle ist im ausgebauten städtischen Gebiet nicht oder nur schwer möglich. Aus diesem Grund werden die in der nachfolgenden Tabelle 6-1 angeführten Annahmen über die Erdungswiderstände der Leitung, nach Rücksprache mit dem Betreiber der betroffenen Leitung und weiteren Fachexperten als Eingangsdaten des Simulationsmodells verwendet.

Anfang						Alle Erdungsabschnitte / Muffen				KÜ-Portal				Freileitung	Ende			Schaltzustand	Strom pro Phase
Sys 2 K	Sys 1 KS	Sys 1 KS	Sys 2 KS	Sys 2 KS	Alle Sys K & KS	EA 1, EA 2 und EA 3				Sys 2 K	Sys 1 KS	Sys 2 KS	Alle Sys K & KS	Masten	Sys 2 K	Erdseil	R _A UW	d. Freileitung am Ende	
R _E	R _E	R _{Box1}	R _E	R _{Box2}	R _A UW	R _E	R _{Box1}	R _{Box2}	R _A Muffen	R _E	R _E	R _E	R _A Portal	R _A	R _E	R _E Erdseil	R _A UW		
0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,5 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	FL geerdet	406 A
0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,5 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	FL offen	406 A
0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,5 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	FL geerdet	610 A
0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	0,1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,5 Ω	1 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,1 Ω	FL offen	610 A

Tabelle 6-1: Eingangsdaten, Kabelleitung KL 2-2, 2 DS-Systeme vorhanden, 1 DS-System außer Betrieb

Der Tabelle 6-2 kann entnommen werden, dass die vom Simulationsmodell berechneten Kabelschirmströme des DS-Systems 1 (siehe Spalte Schirm in Betrieb / Sys 1 I_{RE}) in derselben Größenordnung wie die messtechnisch erfassten Werte liegen (grüne Spalte). Der Anstieg der induzierten Kabelschirmströme, nachdem der beeinflussende Strom auf 610 A erhöht wurde, wird vom Simulationsmodell ebenfalls korrekt wiedergegeben. Weiters kann der Tabelle 6-2 entnommen werden, dass die Schaltheilung im UW B, wie bei den messtechnisch erfassten Werten, keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten induzierten Kabelschirmströme besitzt.

		Umspannwerk A / Messstation 1										
		Phasen i.B.			Phase außer Betrieb			Schirm in Betrieb			Schirm außer Betrieb	
		Sys 1 I	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 2 U _{RE}	Sys 2 I _{RE}	U _{RA}	I _{RA}	
Schaltzustand d. Freileitung im UW B		I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	I (A)	U _{RE} (V)	I (A)	U (V)	I (A)	
Aussenleiter	FL geerdet	405,44	0,007	0,70	0,63	63,11	53	0,01	1,17	0,11	1,08	
L1	FL geerdet	405,76	0,010	1,02	0,62	61,62	72	0,01	1,36			
L2	FL geerdet	405,81	0,014	1,36	0,62	62,32	65	0,01	0,68			
L3	FL geerdet	405,81	0,014	1,36	0,62	62,32	65	0,01	0,68	0,01	0,13	
L1	FL offen	405,43	0,005	0,53	0,63	63,20	53	0,00	0,42			
L2	FL offen	405,82	0,004	0,40	0,62	61,68	72	0,00	0,41			
L3	FL offen	405,81	0,005	0,54	0,62	62,18	65	0,00	0,40	0,16	1,63	
L1	FL geerdet	608,73	0,011	1,06	0,95	94,69	75	0,02	1,77			
L2	FL geerdet	609,46	0,015	1,53	0,93	92,58	103	0,02	2,05			
L3	FL geerdet	609,56	0,020	2,05	0,94	93,64	94	0,01	1,03	0,04	0,37	
L1	FL offen	608,69	0,008	0,78	0,95	94,82		0,01	0,65			
L2	FL offen	609,61	0,006	0,62	0,93	92,65		0,01	0,63			
L3	FL offen	609,50	0,008	0,82	0,93	93,46		0,01	0,58			

Tabelle 6-2: Mess- und Simulationsergebnisse zur Messstation 1 / Kabelanfang (berechnete Werte: weiß / gemessene Werte: grün)



Der Tabelle 6-3 kann entnommen werden, dass die vom Simulationsmodell berechneten Phasenleiterströme des DS-Systems 2 (siehe Spalte Phase außer Betrieb / I) in derselben Größenordnung wie die messtechnisch erfassten Werte liegen (grüne Spalte). Der Anstieg der induzierten Phasenleiterströme nachdem der beeinflussende Strom auf 610 A erhöht wurde, wird vom Simulationsmodell ebenfalls korrekt wiedergegeben. Weiters kann der Tabelle 6-3 entnommen werden, dass die Schalthandlung im UW B, wie bei den messtechnisch erfassten Werten, einen wesentlichen Einfluss auf die berechneten induzierten Phasenleiterströme besitzt. Die induzierten Ströme sinken in allen drei Phasen des DS-Systems 2 wie bei den Messwerten auf Werte unter 1 A.

		KÜ-Portal / Messstation 2								
Aussenleiter	Schaltzustand d. Freileitung im UW B	Phasen i. B.		Phasen außer Betrieb			Schirme in Betrieb		U _{Rk-KÜ-Portal} U (V)	I _{RA-KÜ-Portal} I (A)
		Sys 1 I		System 2		System 1				
		I (A)	U _{sg} (V)	I (A)	I (A)	U _{sg} (V)	I (A)			
L1	FL geerdet	406 A	0,14	13,62	21,32	0,38	38,24	4,67	9,34	
L2	FL geerdet	406 A	0,04	4,09	3,97	0,48	48,06			
L3	FL geerdet	406 A	0,19	18,54	26,09	0,53	52,66			
L1	FL offen	406 A	0,01	0,53	0,43	0,37	37,12	0,16	0,31	
L2	FL offen	406 A	0,00	0,40	0,27	0,48	48,31			
L3	FL offen	406 A	0,01	0,54	0,62	0,53	53,22			
L1	FL geerdet	610 A	0,20	20,50	28,56	0,57	57,39	7,05	14,10	
L2	FL geerdet	610 A	0,06	6,10	4,97	0,72	72,13			
L3	FL geerdet	610 A	0,28	27,79	34,67	0,79	79,14			
L1	FL offen	610 A	0,01	0,78	0,67	0,56	55,73	0,36	0,73	
L2	FL offen	610 A	0,01	0,62	0,39	0,72	72,49			
L3	FL offen	610 A	0,01	0,82	0,82	0,80	79,97			

Tabelle 6-3: Mess- und Simulationsergebnisse zur Messstation 2 / KÜ-Portal (berechnete Werte: weiß / gemessene Werte: grün)

Abweichungen der berechneten Simulationsergebnisse bezogen auf die messtechnisch erfassten Werte deuten entweder darauf hin, dass nicht alle getroffenen Annahmen bzw. Eingangsdaten des Simulationsmodells der Realität entsprechen oder darauf, dass leitfähige Fremdanlagen wie PEN Leiter, Leiter von Mittelspannungskabeln, Erdgas-, Fernwärme-, Wasserleitungen, ... im Erdreich in der Umgebung der Kabelleitung existieren, die im Simulationsmodell aufgrund fehlender Kenntnis darüber nicht berücksichtigt werden.

Mit diesen Messwerten bzw. Berechnungsergebnissen konnte das Simulationsmodell erfolgreich verifiziert werden. Die Verifikation des Simulationsmodells bestätigt darüber hinaus die, im Kapitel 5.5 angeführte Aussage, dass die Verlegetiefe der Leiter keinen wesentlichen Einfluss auf die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen besitzt, denn es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Simulationsmodell, durch die zusätzliche Berücksichtigung der FL-Strecke, auch für Freileitungen, d.h. für Leiter, die über der Erdoberfläche verlegt sind, richtige Ergebnisse liefert.

Zusätzlich zur Verifikation des Simulationsmodells durch die oben beschriebenen und selbst durchgeführten Messungen konnten die Berechnungsergebnisse des Simulationsmodell durch die vom Auftraggeber der Studie [3] gemessenen und zur Verfügung gestellten Summenströme bzw. im Kapitel 5.3.1.1 angeführten Berechnungsergebnisse als richtig bestätigt werden.

7 Stand der Normung bzgl. Beurteilung induzierter Spannungen

Wesentlichster Aspekt der Normung in der Elektrotechnik ist die Personen- und Anlagensicherheit. Folgerichtig beinhalten Normen in der Regel für sicherheitsrelevante, messbare Größen Grenzwerte, die je nach Rechtsstatus einer Norm in Österreich verbindlich sein können. Für das Gebiet der Elektrotechnik können an dieser Stelle auszugweise folgende physikalischen Größen genannt werden, für die in Österreich verbindliche Grenzwerte existieren: Ströme, Spannungen, Temperaturen, magnetische Flussdichten, elektrische Feldstärken, Abstände, Kräfte u.v.a. Durch die Festlegung von Grenzwerten respektive durch ihre Einhaltung, kann sichergestellt werden, dass ein bestimmtes Risiko hinsichtlich Personen- und Anlagenschutz nicht überschritten wird (gesellschaftlich akzeptiertes Risiko).

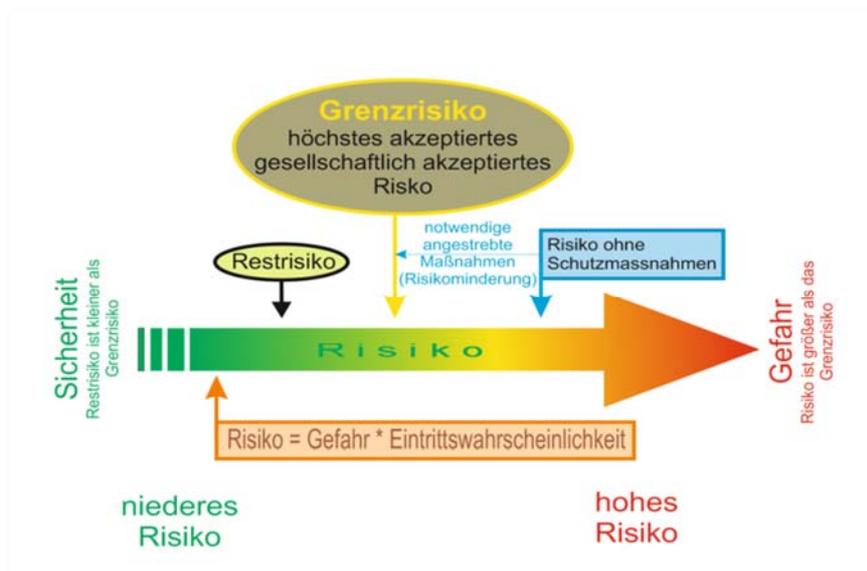


Abbildung 7-1: Risiko [Ernst Schmautzer, Skriptum Erdung- und Schutzmaßnahmen, 2018]

Um elektrotechnische Anlagen hinsichtlich Personengefährdung und/oder Betriebsmittelbeeinflussung bewerten zu können, sind in relevanten Normen Grenzen bzgl. Gefährdungströmen bzw. -spannungen festgeschrieben. Darin sind neben den Beeinflussungsfällen, für die eine Bewertung stattzufinden hat, auch Methoden und Verfahren zur Ermittlung der limitierten Größen angegeben.



Im Hinblick auf die ohmsch-induktive Beeinflussung elektrotechnischer Betriebsmittel durch Starkstromanlagen ist die, aus [2] entnommene und unten angeführte Aufzählung von Regelwerken in Österreich von größter Relevanz:

1. *ÖVE-B1/1976 „Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV“*
2. *DIN VDE 0845-6-1: 2013-04 „Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen - Grundlagen, Grenzwerte, Berechnungs- und Messverfahren“*
3. *DIN VDE 0845-6-2: 2014-09 „Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen - Beeinflussung durch Drehstromanlagen“*
4. *DIN VDE 0845-6-5: 2014-09 „Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen - Beeinflussung durch Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsanlagen (HGÜ-Anlagen)“*
5. *ITU-T Directives, 1989 “Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines” - Volumes 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9*
6. *ÖVE/ÖNORM E 8383: 2000-03-01 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV“ basierend auf dem Harmonisierungsdokument 637 SI: 1999*
7. *ÖVE/ÖNORM EN 50522: 2011-12-01 „Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“*
8. *ÖVE/ÖNORM EN 61936-1: 2015-01-01 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“*
9. *IEC TS 60479-1: 2005-07 „Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects“*

Erst in jüngerer Vergangenheit kann in der Elektrotechnik beobachtet werden, dass bei der Ausarbeitung von internationalen Normen, die Personengefährdung beinhalten, Risikobeurteilungen mit in Betracht genommen werden. Der Begriff Risikobeurteilung impliziert definitionsgemäß Eintrittswahrscheinlichkeiten von bestimmten Ereignissen bzw. im vorliegenden Fall von (Fehler-) Zuständen. Denn, wie der Abbildung 7-1 entnommen werden kann, ist das Risiko als Produkt von Gefahr (Schadenshöhe) und Eintrittswahrscheinlichkeit definiert. Die Berücksichtigung von Fehlerhäufigkeiten, Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Personen, Schadenshöhe findet bei der Erarbeitung neuer Normen bzw. Richtlinien unter Anwendung statistischer Methoden statt.

In älteren Normen sind in bestimmten Fällen, vereinzelt Erwartungsfaktoren bei der Festlegung von Grenzwerten miteinbezogen worden. Aktuell zeichnet sich jedoch ein Trend ab, wonach in Zukunft die Eintrittswahrscheinlichkeit von bestimmten Ereignissen, durch die es zu Anlagenstörungen und Personenschäden kommen kann, eine weitaus stärkere Rolle als in der Vergangenheit spielen wird. Neben der oben erwähnten Eintrittswahrscheinlichkeit von bestimmten Ereignissen bzw. im konkreten Untersuchungsgegenstand von (Fehler-) Zuständen ist die Kenntnis über die Höhe der möglichen Beeinflussungsspannungen für die Betreiber von Starkstromanlagen von besonderem Interesse. Sie müssen entsprechende Schritte zur Reduktion der Beeinflussung respektive der sich daraus ergebenden Gefahrenpotentiale zum Schutz von Personen und Einrichtungen einleiten können, da zusätzlich zu (Sonder-) Ereignissen wie Wartungs- und Reparaturarbeiten auch im Normalbetrieb der Anlagen eine kontinuierliche Beeinflussung stattfindet.



Nachstehend sind Anwendungsbereiche bzw. Ausnahmen davon, von in Österreich gemäß Elektrotechnikverordnung (ETV) 2010 verbindlichen und anzuwendenden Normen, hinsichtlich Starkstromanlagen und ihren Erdungsanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV angeführt. Beachtenswert hierbei ist insbesondere die Tatsache, dass die in diesen Normen angeführten Bestimmungen und Grenzwerte für Kabelleitungen zwischen getrennten Anlagen nicht anwendbar sind.

ÖVE/ÖNORM E 8383 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 KV“, letzte Ausgabe: 2000-03-01 (verbindlich in Österreich gemäß Elektrotechnikverordnung 2010)

Kapitel 1 „Anwendungsbereich und normative Verweisungen“

Diese Norm gilt nicht für die Projektierung und Errichtung von:

– Freileitungen und Kabeln zwischen getrennten Anlagen,

...

ÖVE/ÖNORM EN 50522 „Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“ Ausgabe 2011-12-01, ersetzt zum Teil die ÖVE/ÖNORM E 8383

Kapitel 1 „Anwendungsbereich“

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

– Freileitungen und Kabel zwischen getrennten Anlagen;

...

ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“ Ausgabe 2015-01-01, ersetzt die ÖVE/ÖNORM E 8383

Kapitel 1 „Anwendungsbereich“

Diese Norm gilt nicht für die Projektierung und Errichtung folgender Einrichtungen:

– Freileitungen und Kabeln zwischen getrennten Anlagen

...

Damit besteht in Österreich aktuell eine rechtliche Grauzone für Planer, Errichter und Betreiber von Kabelleitungen zwischen getrennten Anlagen, denn für eine Beurteilung von induzierten Spannungen entlang von Kabelleitungen, sind die in den oben gelisteten Normen angeführten Berührungsspannungs-Kurven und Grenzwerte nicht anwendbar. Die rechtliche Grauzone wird umso deutlicher, wenn man berücksichtigt, dass die ÖVE/ÖNORM E 8383 mittels Verordnung zum Elektrotechnikgesetz als verbindlich erklärt wurde, durch die ÖVE/ÖNORM EN 61936-1: 2011-12-01 aber bereits ersetzt wurde.

Mangels fehlender anwendbarer Normen für Kabelleitungen zwingt sich die Frage auf, ob man Muffenbauwerke, die bei Hoch- und Höchstspannungs-Kabelleitungen in der Regel immer existieren, nicht als „Anlage“ betrachten kann. Damit wären die, in den Normen angeführten Berührungsspannungs-Kurven und Grenzwerte zumindest für diese „Anlagen“, die bei Revisionen bzw. Wartungsarbeiten von Kabelleitungen vom Personal betreten werden müssen anwendbar.

Im Elektrotechnikgesetz (ETG) 1992 ist eine elektrische Anlage wie folgt definiert:

ETG 1992 §1 (2) Eine elektrische Anlage im Sinne dieses Bundesgesetzes ist eine ortsfeste betriebsmäßige Zusammenfassung elektrischer Betriebsmittel, soweit diese Zusammenfassung nicht nach Abs. 1 als Betriebsmittel zu betrachten ist. Anlagen zum Potentialausgleich, Erdungsanlagen, Blitzschutzanlagen und Anlagen zum kathodischen Korrosionsschutz sind ebenfalls elektrische Anlagen.

Hierin enthalten sind ausdrücklich auch Erdungs- und Potentialausgleichsanlagen, wie sie auch gemäß Stand der Technik in Muffenbauwerken vorkommen müssen, inbegriffen.

Die Angabe von zulässigen Grenzwerten werden in Normen entweder als Kurven, wie die in Abbildung 7-2 angeführte Berührungsspannungskurve oder in Tabellenform, wie die in Tabelle 7-1 angeführte Berührungsspannung in Abhängigkeit von der Fehlerdauer angegeben.

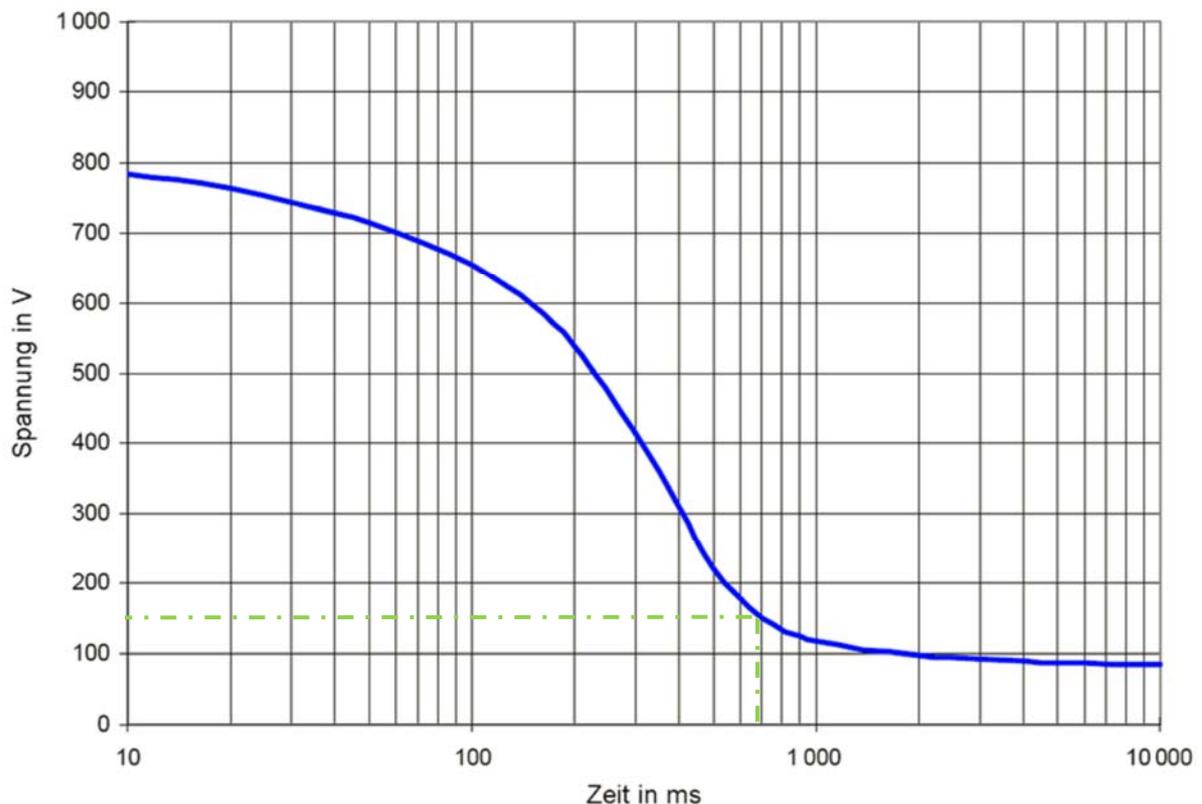


Abbildung 7-2: Zulässige Berührungsspannung U_{TP} [28]

Bemerkung: Die Berührungsspannung U_{TP} ist i.a. ein Teil der Erderspannung, weshalb in der ÖVE/ÖNORM EN 50522 ein allgemeiner Faktor von 2 als zulässig angegeben ist.

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

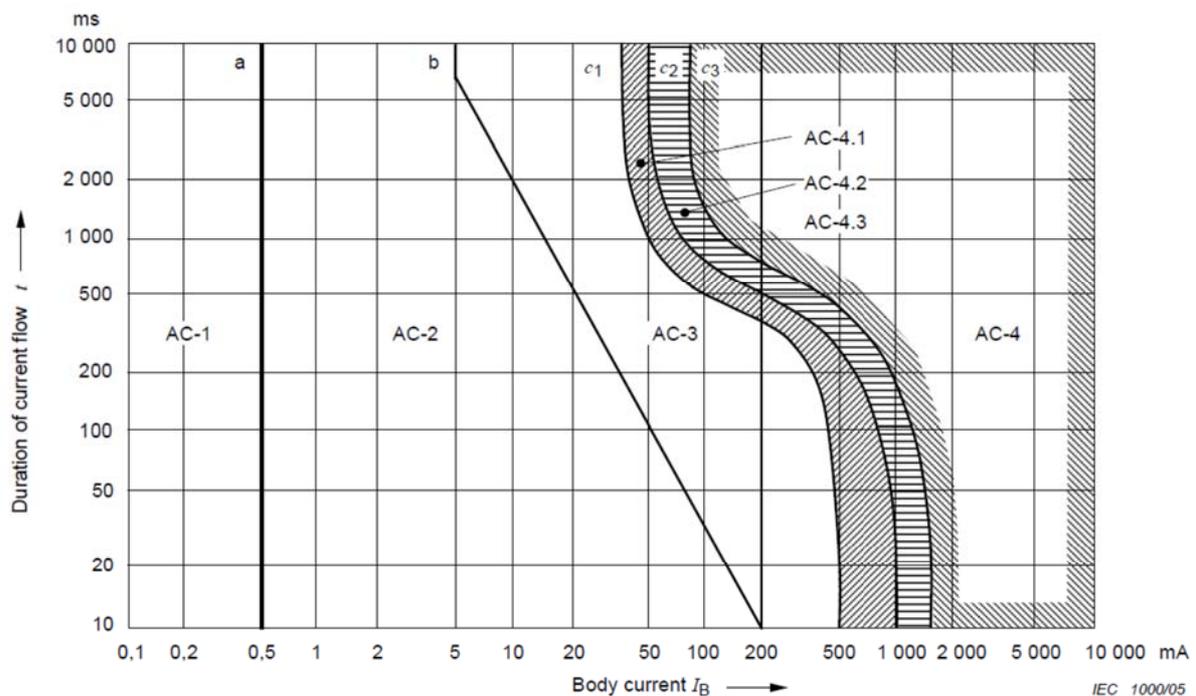
Fehlerdauer t_f s	Zulässige Berührungsspannung U_{Tp} V
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

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

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

Tabelle 7-1: Zulässige Berührungsspannung in Abhängigkeit der Fehlerdauer [27]

Zusätzlich werden zur oben angeführten Spannungs-/Zeitgrenzen-Kurve auch die, bei Annahme einer gewissen Wahrscheinlichkeit zulässigen Körperströme als Funktion der Durchströmungsdauer in der elektrischen Energieübertragungstechnik als Kurven angeben.


Figure 20 – Conventional time/current zones of effects of a.c. currents (15 Hz to 100 Hz) on persons for a current path corresponding to left hand to feet (for explanation see Table 11)
Abbildung 7-3: Zulässige Körperströme in Abhängigkeit der Durchströmungsdauer [29]



Die Wahrscheinlichkeit für Herzkammerflimmern steigt laut [29] im Bereich AC-4.1 auf etwa 5 %, im Bereich AC-4.2 auf etwa 50 % und im Bereich AC-4.3 auf über 50 %.

In Anbetracht der Anmerkung 1 der Tabelle 7-1 wird empfohlen für die Zeitdauer, in der Kabel aus den Anwendungsbereichen der Normen ausgenommen sind, die Beurteilung von induzierten Spannungen (Berührungsspannungen) gemäß IEC TS 60479-1: 2005-07 „Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects“ durchzuführen. Aufgrund der aktuell in Österreich fehlenden Klarheit bezüglich der Beurteilung von induzierten Spannungen, insbesondere bei Hoch- und Höchstspannungs-Kabelleitungen, wird an dieser Stelle eine Überarbeitung der in Frage kommenden Normen durch den zuständigen ÖVE-Ausschuss bzw. durch die CENELEC empfohlen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wird die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen untersucht. Dabei liegt der Untersuchungsfokus auf Kabelleitungen der Höchstspannungsebene und am Einfluss der Erdungsanlagen auf die induzierten Ströme und daraus resultierenden Erdungsspannungen. Es wird der Einfluss der Erdausbreitungswiderstände von Muffen-Erdungsanlagen (Erdungsabschnitten) untersucht, wobei die Erdausbreitungswiderstände der Kabelendverschluss-Bereiche (Kraftwerk, Umspannwerk, KÜ-Portal) aufgrund ihrer großen Ausdehnung und den dadurch geringen Widerstandswerten als konstant angenommen werden. Weiters wird eine Verschlechterung der Kontaktübergangswiderstände von Erdungs- und Crossbondingboxen durch Alterung, Korrosion, Schmierfilmbildung oder durch gelöste Schraubverbindungen berücksichtigt.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Höhe der Erdungsspannungen zum einen von den untersuchten Kabelleitungen und zum anderen und vor allem von den Schaltzuständen der Kabelleitungen abhängt und eine sehr große Bandbreite - von kleiner 1 V bei symmetrischen und geerdeten Kabelleitungen bis zu 150 Volt im Fehlerfall - aufweist. In der Regel liegen die maximal auftretenden Erdungsspannungen unter 20 V, wobei auch diese niedrigen Spannungen nicht die tatsächlich abgreifbaren Berührungsspannungen darstellen. Im Zuge von Arbeiten an Kabeln in den Muffenbauwerken ist durch die üblicherweise ausgeführten Potentialausgleichsanlagen nur ein Teil der berechneten Erdungsspannungen für das ausführende Personal abgreifbar. Den Abbildungen über die auftretende Spannungsverteilung entlang von Kabelleitungen kann entnommen werden, dass es praktisch nicht möglich ist, belastbare Pauschalaussagen zu treffen. Es variieren die auftretenden Spannungen je nach Kabelleitung, Drehstromsystem, Art der Leiter innerhalb eines Drehstromsystems, betrachteter Muffe und vor allem je nach Schaltzustand zum Teil stark. Die Analyse der Untersuchungsergebnisse zeigt andererseits, dass es bezüglich der induzierten Kabelschirmströme möglich ist, die Pauschalaussage zu tätigen, dass sich bei symmetrischen Kabelleitungen die induzierten Kabelschirmströme innerhalb eines Hauptabschnittes zum größten Teil kompensieren und, dass unter der praxisrelevanten Annahme, dass Erdungsanlagen der Anfangs- und Endpunkte von Kabelleitungen niederohmiger sind als Erdungsanlagen von Muffen, die resultierenden induzierten Kabelschirmströme als Längsströme entlang der gesamten Leitungslänge fließen. Nur ein sehr kleiner Teil der Ströme fließt über die dazwischen liegenden Muffen-Erdungsanlagen in das Erdreich ab. Außerdem wird gezeigt, dass in der mittleren Muffenstelle einer symmetrischen Kabelleitung kein Strom über ihre Erdungsanlage ins Erdreich abfließt.



Ein Anstieg einzelner Kontaktübergangswiderstände führt letztlich zu einer Stromverdrängung innerhalb des elektrischen Netzwerks, bestehend aus den Selbst- und Koppelimpedanzen aller vorhandenen Leiter, ihren galvanischen Verbindungen untereinander und den Verbindungen mit der Erde über die Erdungsanlagen. Das Ausmaß der Auswirkungen hängt wesentlich von den Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderständen der benachbarten Muffen-Erdungsanlagen ab. Bei sehr niederohmigen benachbarten Muffen-Erdungsanlagen bleiben die dort auftretenden Spannungen unbeeinflusst. Das bedeutet, dass vereinzelt lokale Verschlechterungen der Erdungsverhältnisse, bei ansonsten unveränderten Erdungsverhältnissen der benachbarten Muffen im fehlerfreien Betriebszustand der Kabelleitung zu keinen akut erhöhten Spannungen gegenüber Bezugserde führen. Sind hingegen alle Erdungswiderstände entlang von Kabelleitungen, beispielsweise durch Alterung erhöht, so kann eine weitere einzelne Verschlechterung einer Erdungsverbindung zu Spannungsanstiegen in benachbarten Muffen führen [2].

Nimmt man dieses Szenario als Ausgangsbasis für die Untersuchung des praxisrelevanten Schaltzustandes, bei dem im Zuge von Wartungsarbeiten am Kabelende eine Kabelschirm-Erdungsverbindung geöffnet wird, so kann die (erhöhte) Spannung der letzten Muffenstelle in Kombination mit der im letzten Abschnitt induzierten Längsspannung zu hohen Werten am offenen Ende der Kabelschirme führen, insbesondere während eines Fehlers. Daraus wird die Erkenntnis gewonnen, dass auch bei einseitig geerdeten Kabelschirmen, unter bestimmten Umständen, eine lokale Verschlechterung einer Erdungsanlage einer Muffenstelle zu einem merklichen Anstieg der Kabelschirmspannung am offenen Ende führt. Ferner wird gezeigt, dass geringe Änderungen der Kontaktübergangswiderstände zu nicht linearen Änderungen der Spannungen und Ströme führen können.

Es ist somit erforderlich, Muffen-Erdungsanlagen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren, um im Erdschlussfall einen Anstieg der auftretenden Erdungsspannungen in den jeweiligen Muffenbauwerken, durch bereits leichte Verschlechterung der Erdungsanlagen vorzubeugen. Weitere generell gültige Aussagen über die Auswirkungen von Erdungswiderstandanstiegen können nicht getätigt werden. Belastbare Bewertungen von Auswirkungen können nur durch detaillierte Analysen der kompletten Kabelleitung erfolgen.

Bei der Berechnung der Fehlerstromaufteilung ist neben der ohmschen Kopplung unbedingt auch die induktive Kopplung zu berücksichtigen. Das in dieser Dissertation vorgestellte Modell kann für die Berechnung der Fehlerstromaufteilung bei 1-poligen Erdkurzschlüssen von Kabelleitungen, aber auch von Freileitungen angewandt werden.

Mit einer Untersuchung der wechselseitigen induktiven Beeinflussung von parallel verlegten und parallel betriebenen MS-Kabelleitungen konnte gezeigt werden, dass in der Mittelspannungsebene während des fehlerfreien Normalbetriebes von Kabelleitungen fehlerhafte Schutzauslösungen der Kabelleitungen auftreten, wenn bei der Planung und Installation der Kabelleitungen die induktive Beeinflussung nicht berücksichtigt wird.

8.1 Ausblick

Das im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelte Simulationsmodell kann in einer weiterführenden wissenschaftlichen Arbeit angewandt werden, um das an der Erdoberfläche resultierende magnetische Feld von Kabelleitungen unter Berücksichtigung der induzierten Kabelschirmströme zu berechnen. Dies würde zu einer wesentlichen Steigerung der Präzision, der heute üblichen Magnetfeldberechnungen führen.



In einer weiterführenden bzw. aufbauenden wissenschaftlichen Arbeit könnten die Auswirkungen der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von Kabelleitungen der Niederspannungsebene untersucht werden. In der Niederspannungsebene werden Kabelleitungen zum Unterschied zur MS- und HS-Ebene üblicherweise ohne Kabelschirm, ohne Verdrillung der Phasen und oft nicht in Erde, sondern auf elektrisch leitfähigen, geerdeten Kabeltrassen über einige hundert Meter unmittelbar nebeneinander verlegt. Hier könnte der Einfluss der Kabeltrasse als Reduktionsleiter bzw. von Reduktionsleitern in der Kabeltrasse in Kombination mit der nicht stattfindenden Verdrillung der Phasen bzw. dem nicht vorhandenen Kabelschirm unter den im Niederspannungsnetz zugrundeliegenden Widerstandsverhältnissen, untersucht werden.

Weiters könnten in einer, auf die vorliegende, aufbauenden Arbeit über die niederfrequente wechselseitige induktive Beeinflussung von Kabelsystemen die hier nicht berücksichtigten, nachfolgend aufgezählten Parameter in das Simulationsmodell implementiert werden: Millikenleiteraufbau, Skin- und Proximityeffekt, Bodenschichtung bzw. nicht homogenes Erdreich, kapazitive Ladeströme und nicht isolierte erdfühlig verlegte Begleiterder.

Messungen an 400-kV-Kabelsystemen sind aufgrund der sehr geringen Anzahl und ihrer sehr hohen strategischen Bedeutung im Übertragungs- und Verteilnetz sehr schwierig durchzuführen. Bei zukünftigen wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema der niederfrequenten wechselseitigen induktiven Beeinflussung von 400-kV-Kabelsystemen ist es jedoch unbedingt notwendig, weitere umfassende Messungen durchzuführen. Die im Zuge der vorliegenden Dissertation durchgeführten Messungen sind während regulärer Wartungsarbeiten durchgeführt worden. Hierbei war ein Drehstrom-System in Betrieb und das andere außer Betrieb. Zukünftig sollten auch Messungen während des Normalbetriebes durchgeführt werden. Idealerweise werden zukünftige Messungen an 400-kV-Kabelsystemen durchgeführt, die nicht im dicht bebauten städtischen Gebiet verlaufen, um auch die Spannungsanhebung der Muffen-Erdungsanlagen, bezogen auf die ferne Erde messtechnisch erfassen zu können.

Die in Österreich, gemäß Elektrotechnikverordnung 2010 verbindlichen Normen, hinsichtlich Starkstromanlagen und ihren Erdungsanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, sind auf Kabelleitungen nicht anwendbar. Hieraus ergibt sich ein nicht klar geregelter Bereich, der vor allem 400-kV-Kabelsysteme-Betreiber vor Probleme hinsichtlich Risikoanalyse, Gefahrenevaluierung und wiederkehrende Überprüfung stellt. Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Abgrenzung des Standes der Technik von Höchstspannungskabelsystemen dar. Bei einer Zustandsbewertung sowie bei einer dringend notwendigen Überarbeitung der aktuellen Regelwerke in Österreich, wird man, entsprechend aktueller Tendenzen bei der Normgebung im Bereich der Elektrotechnik auch den Begriff des (gesellschaftlich) akzeptierbaren Restrisikos in Betracht ziehen müssen.



9 Literatur

- [1] R. Muratović, E. Schmutzner, et.al.: „Technische Voraussetzungen für den Einsatz von Hochspannungskabeln in elektrischen Netzen“ 14. Symposium Energieinnovation, 2016, Graz
- [2] R. Muratović, E. Schmutzner, R. Woschitz, et.al.: „Wechselseitige induktive Beeinflussung von 400-kV-Kabelsystemen“, Institut für Elektrische Anlagen und Netze und Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz, Wissenschaftliche Studie, April 2017
- [3] R. Muratović, L. Fickert; „Berechnung der induktiven Beeinflussung von parallelverlegten MS-Kabelsystemen zur Anbindung eines Kraftwerks an die Netzeinspeisung eines Industrie-Verteilnetzes“, Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz, Wissenschaftliche Studie, Mai 2017
- [4] R. Muratović, T. Mallits, E. Schmutzner: „Berechnung der wechselseitigen ohmschen und induktiven Beeinflussung durch Höchstspannungs-Kabelsysteme“, e & i – Elektrotechnik und Informationstechnik: Band 131, Heft 8 (2014), Seite 329 – 335
- [5] R. Muratović, E. Schmutzner, L. Fickert, R. Woschitz, et.al.: „Mutual inductive interference of 400 kV cable systems“, e&i – Elektrotechnik und Informationstechnik, Band 134, Heft 1 (2017), Seite 37 – 45
- [6] R. Muratović, E. Schmutzner, L. Fickert, R. Woschitz, et.al.: „Mutual inductive interference of 400 kV cable systems“, Paper, CIGRE Session, 2016, Paris
- [7] R. Muratović, E. Schmutzner, L. Fickert, R. Woschitz, et.al.: „Mutual inductive interference of 400 kV cable systems“, Poster, CIGRE Session, 2016, Paris
- [8] R. Muratović, E. Schmutzner, R. Woschitz: „Inductive Interference 400 kV Cable Systems“, 380 kV Cable Research Program, Technical University of Delft, 2015
- [9] T. Mallits, E. Schmutzner, L. Fickert, T. Höhn, R. Muratovic, J. Gether: „Die Rolle von Globalen Erdungssystemen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit elektrischer Netze“, 14. Symposium Energieinnovation, 2016, Graz
- [10] E. Schmutzner, L. Fickert, W. Emmer, R. Muratović, T. Mallits, et.al: „Strom im Tunnel – Ist alles sicher?“ Vortrag, Montan Universität Leoben, 2016
- [11] Cigre, JWG 21/22.01, Comparison of High Voltage Overhead Lines and Underground Cables, Report and Guidelines, 1996
- [12] Übertragungsnetzbetreiber Deutschland, Netzentwicklungsplan Strom 2030, Offshore- Netzentwicklungsplan Strom 2030, Zahlen, Daten, Fakten, Version 2017, 1. Entwurf
- [13] Netzausbaubeschleunigungsgesetz (§ 2 Abs. 5) Übertragungsnetz (NABEG) i. V. m. § 3 Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG)
- [14] B. R. Oswald: „Vergleichende Studie zu Stromübertragungstechniken im Höchstspannungsnetz“, Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg und Hannover, 2005
- [15] Adolf. J. Schwab, W. Kürner: „Elektromagnetische Verträglichkeit“, Springer, Heidelberg, ISBN 978-3-642-16609-9
- [16] V. Crastan: „Elektrische Energieversorgung 1“, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 978-3-540-69439-7
- [17] S. Paul, R. Paul: „Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1“, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-53947-3
- [18] K. Heuck, K.-D. Dettmann, D. Schulz: „Elektrische Energieversorgung“, Springer Vieweg, Wiesbaden ISBN 978-3-8348-1699-3
- [19] D. Oeding, B. R. Oswald: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, ISBN 978-3-642-19245-6



- [20] T. Mallits: „Fehlerstromaufteilung und Potentialverhältnisse in komplexen Erdungssystemen und deren Einfluss auf die Beurteilung“, Dissertation, Technische Universität Graz, 2018
- [21] W. Emmer, Vergleich von Formeln zur Berechnung induktiver Beeinflussungen, Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2012
- [22] Ch. Wahl: „Induktive und ohmsche Beeinflussung von Rohrleitungssystemen“, Dissertation, Technische Universität Graz, laufend
- [23] Adolf. J. Schwab. „Elektroenergiesysteme“, Springer, Heidelberg, ISBN 978-3-642-21957-3
- [24] DIN EN 60909-3, „Kurzschlussströme in Drehstromnetzen - Teil 3“, Mai 2004
- [25] DIN EN 50522, „Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“, November 2011
- [26] ÖVE/ÖNORM E 8383 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 KV“, 2000-03-01
- [27] ÖVE/ÖNORM EN 50522 „Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“, 2011-12-01
- [28] ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 „Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV“, 2015-01-01
- [29] IEC TS 60479-1 „Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects“, 2005-07
- [30] ÖVE-B1/1976 “Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV”
- [31] ITU-T, „Calculating Induced Voltages and Currents in Practical Cases“, Volume 2, 1998
- [32] E. Schmutzner: “Niederfrequente Beeinflussung technischer Systeme durch Elektrische Anlagen“, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung an der Technischen Universität Graz
- [33] R. Muckenhuber: „Elektrische Anlagen 1 - 3“, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Bau und Betrieb elektrischer Anlagen der Technischen Universität Graz, 1978 - 1987
- [34] E. Schmutzner: „Die kartografische Aufnahme und Berechnung von induktiven Einfach- und Mehrfachbeeinflussungen durch Hochspannungsfreileitungen und –kabel im Fehlerfall und im Normalbetrieb“, Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz, Technischer Bericht, 1990
- [35] G. Herold: „Elektrische Energieversorgung 2“, J. Schlembach-Fachverlag, Wilburgstetten, ISBN 978-3-935340-60-1
- [36] E.-P. Mayer: „Stromrückleitung über das Erdreich, Impedanzen und induktive Beeinflussung bei Leitern endlicher Länge“, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1982
- [37] E.-P. Mayer: „Impedanzbeläge von endlich langen Leitern mit Erdrückleitung“, etz Archiv, 1984
- [38] G. Hosemann; „Elektrische Energietechnik“, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio, ISBN 3-540-67343-1
- [39] The MathWorks: „Matlab & Simulink - Simscape™ User’s Guide“, R2015a
- [40] Rat der Europäischen Union: „Richtlinie 2008/114/EG über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern“ Amtsblatt der Europäischen Union, 8. Dezember 2008
- [41] VDE-AR-N 4210-5 „Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb“, 01. April 2011
- [42] L. Fickert, E. Schmutzner, W. Hipp: „Comparison of Measured and Calculated Pylon Resistances with the Results of Measurements of the Earth and Resistivity Tester CA 6472“, Studie, Technische Universität Graz, April 2007
- [43] F. Noack: “Bewertung der 380 kV-Steiermark-Leitung aus energietechnischer Sicht”, Gutachten, Technische Universität Illmenau, 28. November 2005



- [44] H-J. Haubrich: „Abtransport der in den Kraftwerken Kopswerk I & II und Rodundwerk II der Voralberger Illwerke AG erzeugten elektrischen Energie“, Wissenschaftliche Studie, RWTH Aachen, Juli 2007
- [45] H. Brakelmann: „Umbau 220-kV-Leitung Beznau-Birr auf 380/220 kV Teilverkabelung Rinken“, Gutachten, Universität Duisburg-Essen, Juli 2009
- [46] A. Williams, B. Gregory: „Feasibility Study for 500 kV Underground Cables for use in the Edmonton Region of Alberta, Canada“, Cable Consulting International, 18. Februar 2010
- [47] L. Hofmann, B.R. Oswald: „Vergleich Erdkabel-Freileitung im 110-kV-Hochspannungsbereich“ Gutachten, Leibnitz Universität Hannover, 16. Dezember 2010
- [48] G. Brauner: „Auswirkungen der Verkabelung des 110-kV-Netzes Kärnten auf den Netzbetrieb“, Gutachten, 29. Mai 2012
- [49] H. Brakelmann: „Teilverkabelung im voralpinen und alpinen Raum“, Studie, Universität Duisburg-Essen, September 2012
- [50] H. Stiegler, U. Bachhiesl, G. Nischler, A. Schüppel: „Das öffentliche Interesse an der Errichtung der 380-kV-Salzburgleitung“, Studie, Technische Universität Graz, September 2012
- [51] H-P. Beck, W. Dietze: „Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen-Band 1“, BMU-Studie, Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, Leibnitz Universität Hannover, TU Clausthal, Georg-August-Universität Göttingen, 31.12.2011
- [52] H. Brakelmann: „Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel?“, Studie, Universität Duisburg-Essen, Oktober 2004
- [53] B.R. Oswald: „Bewertung einer alternativen Verkabelung der geplanten 110-kV-Hochspannungsfreileitungen Baumstraße-Lüstringen und Pkt. Belm-Powe“, Gutachten, Universität Hannover, 15. März 2006
- [54] B.R. Oswald: „380-kV-Salzburgleitung Auswirkungen der möglichen (Teil)Verkabelung des Abschnittes Tauern-Salzach neu“, Studie, Universität Hannover, 27. Dezember 2007
- [55] J. Zillmer, S. Thiem, J. Fromme, I. Ellersdorfer: „Machbarkeitsuntersuchung zur Gesamt- oder Teilverkabelung der 380-kV-Leitung St. Peter – Tauern im Bundesland Salzburg“, Studie, KEMA IEV Dresden, IfG Bautzen, Universität Dortmund, Universität Stuttgart, 27. Jänner 2008
- [56] ÖVE/ÖNORM EN 50110-1 „Betrieb von elektrischen Anlagen“, 2008.09.01



10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Teilverkabelung einer zweisystemigen Freileitung, [1]	17
Abbildung 2-2: Zu berücksichtigende Beeinflussungsparameter.....	20
Abbildung 3-1: Zwei Abschnitte eines Drehstromkabelsystems mit Verdrillung der Phasen und Crossbonding der Kabelschirme in der Muffe zwischen den beiden Abschnitten n und n+1 [4].....	25
Abbildung 3-2: Ersatzschaltbild eines Abschnittes, dargestellt als elektrisches Netzwerk bei Vernachlässigung der Querelemente (E ... Erde)	25
Abbildung 3-3: Vierpol.....	32
Abbildung 3-4: Ersatzschaltbild des in Abbildung 3-1 dargestellten Drehstromkabelsystems mit gegenseitig verdrillten Phasen und ausgekreuzten und geerdeten Kabelschirmen in einer Muffe [4]	34
Abbildung 3-5: Muffenbauwerk bzw. Muffen-Abschnitt inkl. Kabelschirmerdungsbox und Erdungsanlage	34
Abbildung 3-6: Erdungsbox einer Muffenstelle eines 400-kV-Kabelsystems, 3 Kabelschirme direkt geerdet, Messung eines Kontaktübergangswiderstandes.....	35
Abbildung 3-7: Modellierungsvariante 1 der Erdung von Kabelschirmen in Muffen (Muffen-Abschnitt 1-2 der Abbildung 3-4) [4].....	35
Abbildung 3-8: Modellierungsvariante 2 der Erdung von Kabelschirmen in Muffen (Muffen-Abschnitt 1-2 der Abbildung 3-4) [4].....	37
Abbildung 3-9: Beispielhafte 400-kV-Kabelleitung als Inhalt des Simulationsmodells.....	40
Abbildung 3-10: Simulink-Modell Kabelsystem	41
Abbildung 3-11: Blockschaltbild Simulink-Modell	42
Abbildung 3-12: Detaillierte Darstellung der ersten drei Abschnitte eines Drehstromsystems inkl. induktiver und galvanischer Kopplungen	43
Abbildung 3-13: Detaillierte Darstellung des Blocks „Subsystem“ aus Abbildung 3-14.....	44
Abbildung 3-14: Simulink-Modell zur Berechnung von Summenströmen [3]	45
Abbildung 3-15: Beeinflussungsanordnung zweier Leitungen (eigene Darstellung nach [33])	46
Abbildung 3-16: Seitenansicht der beeinflussenden Leitung aus Abbildung 3-15 (eigene Darstellung nach [19])	47
Abbildung 3-17 Vereinfacht dargestellter Kabelspiegel [2]	50
Abbildung 4-1: Querverlegeprofil der Kabelleitung KL 1	57
Abbildung 4-2: Querverlegeprofile der Kabelleitungen KL 2-1 und KL 2-2	58
Abbildung 4-3: Querverlegeprofile der Kabelleitung KL 3	59
Abbildung 4-4: Querverlegeprofile der Kabelleitung KL 4	60
Abbildung 4-5: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 1	61
Abbildung 4-6: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 2-1	62
Abbildung 4-7: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 2-2	62
Abbildung 4-8: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 3	63
Abbildung 4-9: Längsverlegeprofil der Kabelleitung KL 4	64
Abbildung 4-10: Ansicht eines Kabel auf Freileitung Übergangportals (KÜ-Portals) mit Größenvergleich eines Muffenbauwerks.....	66
Abbildung 4-11: Widerstandsanstieg R_{box} durch Korrosion der Anschlussstelle einer Erdungs- oder Crossbondingbox	67
Abbildung 4-12: Ansicht einer Crossbondingbox (links oben) sowie eines Kontaktübergangswiderstand-Anstieges durch Schmierfilmbildung, verursacht durch induzierte Kabelschirmströme in Kombination mit Wassereintritt in eine Crossbondingbox.....	68
Abbildung 5-1: Model von Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit einem Drehstromsystem	71
Abbildung 5-2: Spannungsverteilung bei Variation von R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem.....	72
Abbildung 5-3: Querstromverteilung bei Variation von R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem.....	72
Abbildung 5-4: Längsstromverteilung bei Variation von R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem.....	73
Abbildung 5-5: Spannungaufteilung im Erdungsabschnitt 1 bei Variation von R_{boxen} und $R_{A Muffen}$ - 1 Drehstromsystem	74
Abbildung 5-6: Spannung im Erdungsabschnitt 1 als Funktion des R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem	75
Abbildung 5-7: Strom im Erdungsabschnitt 1 als Funktion des R_{boxen} bei $R_{A Muffen} = konst. = 1 \Omega$ - 1 Drehstromsystem	75
Abbildung 5-8: Längsstromverteilung - Vergleich zw. Verdrillung und keine Verdrillung - 1 Drehstromsystem	77
Abbildung 5-9: Querstromverteilung - Vergleich zw. Verdrillung und keine Verdrillung - 1 Drehstromsystem.....	77
Abbildung 5-10: Spannungsverteilung - Vergleich zw. Verdrillung und keine Verdrillung - Ein Drehstromsystem	78
Abbildung 5-11: Längsstromverteilung im Fehlerfall - Vergleich zw. Crossbonding und kein Crossbonding - 1 Drehstromsystem ..	79
Abbildung 5-12: Querstromverteilung im Fehlerfall - Vergleich zw. Crossbonding und kein Crossbonding - Ein Drehstromsystem.....	80
Abbildung 5-13: Spannungsverteilung im Fehlerfall - Vergleich zw. Crossbonding und kein Crossbonding - 1 Drehstromsystem ..	81



Abbildung 5-14: Model der Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit zwei Drehstromsystemen.....	83
Abbildung 5-15: Längsstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - beide DS-Systeme in Betrieb	84
Abbildung 5-16: Querstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - beide DS-Systeme in Betrieb	84
Abbildung 5-17: Spannungsverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - beide DS-Systeme in Betrieb	85
Abbildung 5-18: Längsstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - 1 DS-System außer Betrieb	86
Abbildung 5-19: Querstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - 1 DS-System außer Betrieb	87
Abbildung 5-20: Spannungsverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 2 Drehstromsysteme - 1 DS-System außer Betrieb	88
Abbildung 5-21: Modell der Muffen-Erdungsanlagen für Kabelleitungen mit vier Drehstromsystemen.....	92
Abbildung 5-22: Längsstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 4 Drehstromsysteme - 2 DS-Systeme außer Betrieb	93
Abbildung 5-23: Querstromverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 4 Drehstromsysteme 2 DS-Systeme außer Betrieb	94
Abbildung 5-24: Spannungsverteilung bei Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ - 4 Drehstromsysteme - 2 DS-Systeme außer Betrieb	95
Abbildung 5-25: Induzierte Spannungen bei einem Kabelverlegevorgang der Kabelleitung KL 1 im Schaltzustand A - Variation der verlegten Phase	97
Abbildung 5-26: Induzierte Spannungen bei einem Kabelverlegevorgang der Kabelleitung KL 1 im Schaltzustand A - Variation des Erdungswiderstandes der Ziehwinde	98
Abbildung 5-27: Spannungsverteilung entlang der Kabelleitung KL 1 Schaltzustand A bei Variation des spezifischen elektrischen Bodenwiderstand - 2 Drehstromsysteme.....	99
Abbildung 5-28: Beengte Platzverhältnisse innerhalb eines Muffenbauwerks einer 400-kV-Kabelleitung (gezeichnete Leiter symbolisieren mögliche benachbarte Kabelleitungen, hinter der Betonwand).....	109
Abbildung 6-1: Übersichtschartbild der durchgeführten Messungen an einer 400-kV-Kabel-Freileitung	111
Abbildung 6-2: Induzierte Ströme in die Kabelschirme des DS-Systems 1 zum Zeitpunkt des Anstiegs des beeinflussenden Stromes von 400A auf 610A, Messstation 1 / Kabelanfang	113
Abbildung 6-3: Induzierte Ströme in die Kabelschirme des DS-Systems 1 zum Zeitpunkt der Öffnung der Phasen-erdung des DS-Systems 2 im UW B (um 11:58), Messstation 1 / Kabelanfang.....	113
Abbildung 6-4: Übersicht über die induzierten Ströme in die Phasen des DS-Systems 2 (Phasenerdung wird geöffnet, Stromanstieg, Phasenerdung wird geschlossen), Messstation 2 / KÜ-Portal	113
Abbildung 6-5: Induzierte Ströme in die Phasenleiter des DS-Systems 2 zum Zeitpunkt des Anstiegs des beeinflussenden Stromes von 400A auf 610A, Messstation 2 / KÜ-Portal	113
Abbildung 7-1: Risiko [Ernst Schmutzter, Skriptum Erdung- und Schutzmaßnahmen, 2018].....	116
Abbildung 7-2: Zulässige Berührungsspannung U_{TP} [28]	119
Abbildung 7-3: Zulässige Körperströme in Abhängigkeit der Durchströmungsdauer [29]	120
Abbildung 12-1: Vier Drehstromsysteme – alle DS in Betrieb – Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ – Spannungsverteilung.....	132
Abbildung 12-2: Vier Drehstromsysteme – alle DS in Betrieb – Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ – Querstromverteilung.....	133
Abbildung 12-3: Vier Drehstromsysteme – alle DS in Betrieb – Variation der R_{boxen} bei $R_{A \text{ Muffen}} = \text{konst.} = 1 \Omega$ – Längsstromverteilung.....	133



11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Übersichtstabelle der untersuchten Kabelleitungen.....	56
Tabelle 4-2: Schaltzustände (Rot: System(e) in Betrieb, Grün: System(e) außer Betrieb)	64
Tabelle 4-3: Standardwerte der Kontaktübergangs- und Erdausbreitungswiderstände	67
Tabelle 4-4: Analytierte Verdrillungsvarianten.....	69
Tabelle 5-1: Spannungen und Ströme der Quelle und der Last	90
Tabelle 5-2: Resultierende Phasenleiter- und Kabelschirm-Ströme bei Parallelschaltung und Parallelbetrieb von vier Drehstromkabelsystemen.....	91
Tabelle 5-3: Eingangsdaten, Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe	100
Tabelle 5-4: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$, Teil 1	100
Tabelle 5-5: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$, Teil 2	100
Tabelle 5-6: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Verlegetiefe, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$, Teil 3	100
Tabelle 5-7: Eingangsdaten, Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Abschnitts- und Systemlänge	101
Tabelle 5-8: Ausgangszustand, 2 Drehstromsysteme, Variation der Abschnitts- und Systemlänge, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$	101
Tabelle 5-9: Eingangsdaten, Ausgangszustand, KL 1-1, 4 DS-Systeme vorhanden, 2 davon außer Betrieb, Variation der Querschnittsfläche und der Lage der Begleiterder	102
Tabelle 5-10: Ausgangszustand, KL 1-1, 4 DS-Systeme vorhanden, 2 davon außer Betrieb, Variation der Querschnittsfläche und der Lage der Begleiterder, $I_{ind.}$, Teil 1	102
Tabelle 5-11: Ausgangszustand, KL 1-1, 4 DS-Systeme vorhanden, 2 davon außer Betrieb, Variation der Querschnittsfläche und der Lage der Begleiterder, $I_{ind.}$, Querstromverteilung, Teil 2.....	102
Tabelle 5-12: Induzierte Kabelschirmströme in Kabelleitung KL 1 bei einem Crossbonding-Fehler zwischen Abschnitt 1 und Abschnitt 2, bei einem beeinflussenden Strom $I = 1000$ A pro Phase.....	104
Tabelle 5-13: Eingangsdaten, Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme	106
Tabelle 5-14: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$, Teil 1.....	106
Tabelle 5-15: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$, Teil 2.....	106
Tabelle 5-16: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 Drehstromsystem, Variation der Querschnittsfläche der Kabelschirme, $U_{ind.}$ und $I_{ind.}$, Teil 3.....	106
Tabelle 6-1: Eingangsdaten, Kabelleitung KL 2-2, 2 DS-Systeme vorhanden, 1 DS-System außer Betrieb	114
Tabelle 6-2: Mess- und Simulationsergebnisse zur Messstation 1 / Kabelanfang (berechnete Werte: weiß / gemessene Werte: grün)	114
Tabelle 6-3: Mess- und Simulationsergebnisse zur Messstation 2 / KÜ-Portal (berechnete Werte: weiß / gemessene Werte: grün)	115
Tabelle 7-1: Zulässige Berührungsspannung in Abhängigkeit der Fehlerdauer [27].....	120
Tabelle 12-1: Eingangsdaten, Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder	130
Tabelle 12-2: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder, Längs- und Querstrom- und spannungsverteilung, Teil 1	131
Tabelle 12-3: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder, Längs- und Querstrom- und spannungsverteilung, Teil 2	131
Tabelle 12-4: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder, Längs- und Querstrom- und spannungsverteilung, Teil 3	132



12 Anhang

12.1 Weitere Untersuchungsergebnisse

12.1.1 Ein Drehstromsystem

12.1.1.1 Einfluss von Begleiterdern und des Crossbondings beim 1-poligen Erdkurzschluss

Bei allen Berechnungen liegt der Begleiterderwiderstand bei $R_{BE1} = R_{BE2} = 0,01 \text{ Ohm}$ an allen Orten

FS 1-1			Anfang		RE			Ende		System 1		Crossbonding	Begleiterder	Aussenleiter	Strom
spez. Bodenwid.	Verlegetiefe	Abschnittslänge	R_E	$R_A \text{ UW}$	Erdungsabschnitt 1	Erdungsabschnitt 2	Erdungsabschnitt 3	R_E	$R_A \text{ UW}$	$R_{\text{Dreh.1}}$	$R_A \text{ Muffen}$				
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	ohne Crossbonding	ohne Begleiterder	L1	20000
														L2	1000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	ohne Crossbonding	ohne Begleiterder	L1	1000
														L2	20000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	ohne Crossbonding	ohne Begleiterder	L1	1000
														L2	1000
														L3	20000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	mit Crossbonding	ohne Begleiterder	L1	20000
														L2	1000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	mit Crossbonding	ohne Begleiterder	L1	1000
														L2	20000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	mit Crossbonding	ohne Begleiterder	L1	1000
														L2	1000
														L3	20000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	ohne Crossbonding	mit Begleiterder	L1	20000
														L2	1000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	ohne Crossbonding	mit Begleiterder	L1	1000
														L2	20000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	ohne Crossbonding	mit Begleiterder	L1	1000
														L2	1000
														L3	20000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	mit Crossbonding	mit Begleiterder	L1	20000
														L2	1000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	mit Crossbonding	mit Begleiterder	L1	1000
														L2	20000
														L3	1000
200	-1,75	1	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	1	mit Crossbonding	mit Begleiterder	L1	1000
														L2	1000
														L3	20000

Tabelle 12-1: Eingangsdaten, Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder



Anfang						Hauptabschnitt 1						Erdungsabschnitt 1										
Schirme		Begleiterder				Phasen		Schirme		Begleiterder		Schirme				Begleiterder						
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	U _{R, BE1}	I _{R, BE1}	U _{R, BE2}	I _{R, BE2}	U _{RA-LW}	I _{RA-LW}	Sys 1 I	Sys 1 I	BE1	BE2	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{R, box 1}	Sys 1 I _{R, box 1}	U _{R, BE1}	I _{R, BE1}	U _{R, BE2}	I _{R, BE2}	U _{RA 1}	I _{RA 1}	
U _{RE}	I					U	I	I	I	I	I	U	I	U _{R, box 1}	I _{R, box 1}					U _{RA 1}	I _{RA 1}	
147	14705					121	1213	18143	14705			1,8	176									
45	4506							990	4506			0,8	79	0,5	45,0						45,0	45,0
20	1986							1010	1986			1,0	97									
33	3264							1019	3264			0,8	77									
134	13375					100	1005	18336	13375			2,0	196	0,4	39,5						39,5	39,5
47	4679							989	4679			0,8	83									
31	3089							987	3089			0,8	81									
33	3335					124	1237	1019	3335			0,8	82	0,5	46,3						46,3	46,3
148	14798							18139	14798			1,8	182									
58	5807							18837	5807			0,1	14									
58	5807					117	1173	983	5807			0,1	14	0,4	41,3						41,3	41,3
58	5807							1069	5807			0,1	14									
60	5997							1046	5997			0,2	17									
60	5997					124	1236	18918	5997			0,2	17	0,5	51,8						51,8	51,8
60	5997							987	5997			0,2	17									
58	5819							956	5819			0,1	14									
58	5819					122	1222	1048	5819			0,1	14	0,4	42,9						42,9	42,9
58	5819							18889	5819			0,1	14									
144	14354							18233	14354			2,0	201									
39	3917	25,9	2593	6,6	658	77	767	994	3917	2593	658	0,8	76	0,9	86,6	0,6	64,7	0,3	31,4		29,2	29,2
12	1241							1005	1241			0,7	67									
27	2706							1015	2706			0,7	68									
137	13710	10,8	1082	12,3	1227	69	691	18319	13710	1082	1227	2,0	196	0,9	90,1	0,4	43,4	0,5	48,9		27,7	27,7
41	4060							993	4060			0,8	80									
22	2247							990	2247			0,5	52									
27	2733	8,0	800	26,0	2604	78	779	1015	2733	800	2604	0,7	71	0,9	90,6	0,4	35,4	0,6	64,8		29,9	29,9
145	14470							18229	14470			2,1	206									
54	5425							18903	5425			0,3	27									
54	5425	28,0	2797	17,8	1777	75	753	988	5425	2797	1777	0,3	27	0,8	80,0	0,2	24,7	0,6	56,6		28,0	28,0
54	5425							1060	5425			0,3	27									
61	6143							1041	6143			0,4	37									
61	6143	14,6	1464	17,6	1761	80	797	18854	6143	1464	1761	0,4	37	1,1	111,2	0,5	52,3	0,5	52,9		33,2	33,2
61	6143							990	6143			0,4	37									
54	5417							963	5417			0,3	27									
54	5417	19,3	1931	27,7	2770	77	774	1043	5417	1931	2770	0,3	27	0,8	80,4	0,6	56,6	0,2	24,2		28,6	28,6
54	5417							18948	5417			0,3	27									

Tabelle 12-2: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder, Längs- und Querstrom- und spannungsverteilung, Teil 1

Hauptabschnitt 2				Erdungsabschnitt 2										Hauptabschnitt 3			
Phasen		Begleiterder		Schirme						Begleiterder				Phasen		Begleiterder	
Sys 1 I	Sys 1 I	BE1	BE2	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{R, box 1}	Sys 1 I _{R, box 1}	U _{R, BE1}	I _{R, BE1}	U _{R, BE2}	I _{R, BE2}	U _{RA 1}	I _{RA 1}	Sys 1 I	Sys 1 I	BE1	BE2
I	I	I	I	U	I	U _{R, box 1}	I _{R, box 1}					U _{RA 1}	I _{RA 1}	I	I	I	I
18143	14851			0	0									18143	14851		
990	4460			0	0	0	0					0	0	990	4460		
1010	1907			0	0									1010	1907		
1019	3201			0	0									1019	3201		
18336	13553			0	0	0	0					0	0	18336	13553		
989	4630			0	0									989	4630		
987	3019			0	0									987	3019		
1019	3271			0	0	0	0					0	0	1019	3271		
18139	14948			0	0									18139	14948		
18837	5817			0	0									18837	5817		
983	5817			0	0	0	0					0	0	983	5817		
1069	5817			0	0									1069	5817		
1046	6013			0	0									1046	6013		
18918	6013			0	0	0	0					0	0	18918	6013		
987	6013			0	0									987	6013		
956	5829			0	0									956	5829		
1048	5829			0	0	0	0					0	0	1048	5829		
18889	5829			0	0									18889	5829		
18233	14510			0	0									18233	14510		
994	3891	2541	627	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	994	3891	2541	627
1005	1201			0	0									1005	1201		
1015	2662			0	0									1015	2662		
18319	13872	1041	1182	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18319	13872	1041	1182
993	4033			0	0									993	4033		
990	2211			0	0									990	2211		
1015	2689	765	2552	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1015	2689	765	2552
18229	14628			0	0									18229	14628		
18903	5445			0	0									18903	5445		
988	5445	2773	1757	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	988	5445	2773	1757
1060	5445			0	0									1060	5445		
1041	6169			0	0									1041	6169		
18854	6169	1428	1724	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18854	6169	1428	1724
990	6169			0	0									990	6169		
963	5438			0	0									963	5438		
1043	5438	1907	2747	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1043	5438	1907	2747
18948	5438			0	0									18948	5438		

Tabelle 12-3: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder, Längs- und Querstrom- und spannungsverteilung, Teil 2



Erungsabschnitt 3								Hauptabschnitt 4								Ende							
Schirme				Begleiterder						Phasen		Schirme		Begleiterder		Phasen		Schirme		Begleiterder			
Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	Sys 1 U _{R_box1}	Sys 1 I _{R_box1}	U _{R_BE1}	I _{R_BE1}	U _{R_BE2}	I _{R_BE2}	U _{RA1}	I _{RA1}	Sys 1 I	Sys 1 I	BE1	BE2	Sys 1 I	Sys 1 U _{RE}	Sys 1 I _{RE}	U _{R_BE1}	I _{R_BE1}	U _{R_BE2}	I _{R_BE2}	U _{RA-UW}	I _{RA-UW}	
U	I	U _{R_box-1}	I _{R_box-1}					U _{RA-1}	I _{RA}	I	I	I	I	I	U _{RE}	I					U	I	
1,8	176							45,0	45,0	18143	14705			18143	147	14705					121	1213	
0,8	79	0,5	45,0							990	4506			990	45	4506							
1,0	97									1010	1986			1010	20	1986							
0,8	77									1019	3264			1019	33	3264							
2,0	196	0,4	39,5					39,5	39,5	18336	13375			18336	134	13375					100	1005	
0,8	83									989	4679			989	47	4679							
0,8	81									987	3089			987	31	3089							
0,8	82	0,5	46,3					46,3	46,3	1019	3335			1019	33	3335					124	1237	
1,8	182									18139	14798			18139	148	14798							
0,1	14									18837	5807			18837	58	5807							
0,1	14	0,4	41,3					41,3	41,3	983	5807			983	58	5807						117	1173
0,1	14									1069	5807			1069	58	5807							
0,2	17									1046	5997			1046	60	5997							
0,2	17	0,5	51,8					51,8	51,8	18918	5997			18918	60	5997					124	1236	
0,2	17									987	5997			987	60	5997							
0,1	14									956	5819			956	58	5819							
0,1	14	0,4	42,9					42,9	42,9	1048	5819			1048	58	5819						122	1222
0,1	14									18889	5819			18889	58	5819							
2,0	201									18233	14354			18233	144	14354							
0,8	76	0,9	86,6	0,6	64,7	0,3	31,4	29,2	29,2	994	3917	2593	658	994	39	3917	26	2593	7	658	77	767	
0,7	67									1005	1241			1005	12	1241							
0,7	68									1015	2706			1015	27	2706							
2,0	196	0,9	90,1	0,4	43,4	0,5	48,9	27,7	27,7	18319	13710	1082	1227	18319	137	13710	11	1082	12	1227	69	691	
0,8	80									993	4060			993	41	4060							
0,5	52									990	2247			990	22	2247							
0,7	71	0,9	90,6	0,4	35,4	0,6	64,8	29,9	29,9	1015	2733	800	2604	1015	27	2733	8	800	26	2604	78	779	
2,1	206									18229	14470			18229	145	14470							
0,3	27									18903	5425			18903	54	5425							
0,3	27	0,8	80,0	0,2	24,7	0,6	56,6	28,0	28,0	988	5425	2797	1777	988	54	5425	28	2797	18	1777	75	753	
0,3	27									1060	5425			1060	54	5425							
0,4	37									1041	6143			1041	61	6143							
0,4	37	1,1	111,2	0,5	52,3	0,5	52,9	33,2	33,2	18854	6143	1464	1761	18854	61	6143	15	1464	18	1761	80	797	
0,4	37									990	6143			990	61	6143							
0,3	27									963	5417			963	54	5417							
0,3	27	0,8	80,4	0,6	56,6	0,2	24,2	28,6	28,6	1043	5417	1931	2770	1043	54	5417	19	1931	28	2770	77	774	
0,3	27									18948	5417			18948	54	5417							

Tabelle 12-4: Ausgangszustand, KL 1-1, 1 DS-System, Einfluss von Crossbonding und Begleiterder, Längs- und Querstrom- und spannungsverteilung, Teil 3

12.1.2 Vier Drehstromsysteme

12.1.2.1 Vier Drehstromsysteme in Betrieb

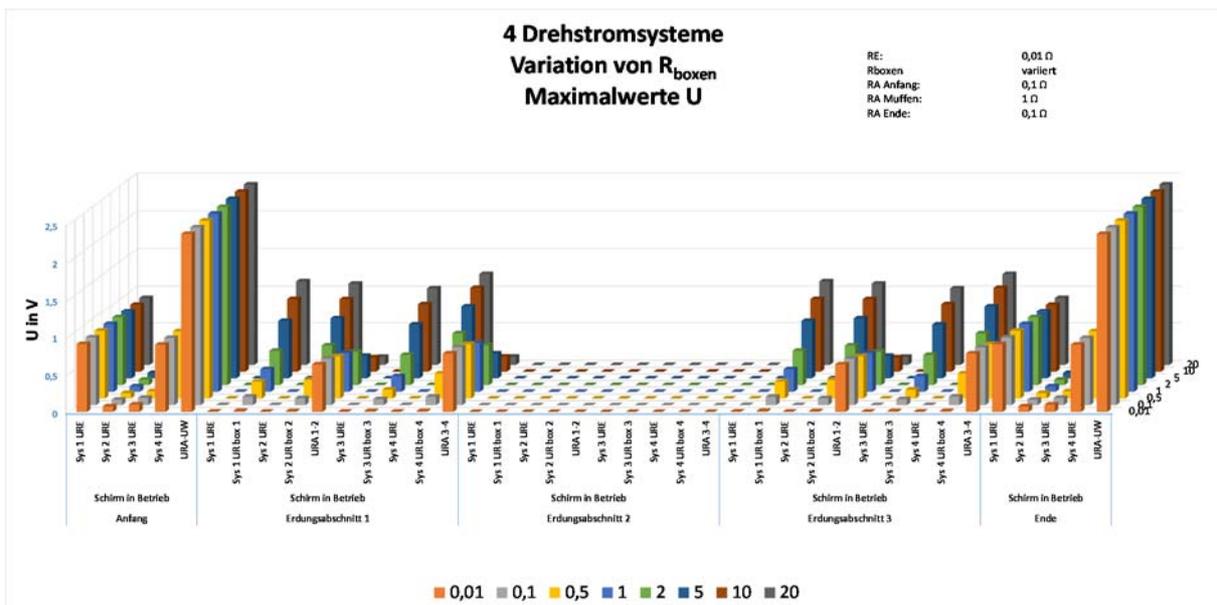


Abbildung 12-1: Vier Drehstromsysteme – alle DS in Betrieb – Variation der R_{boxen} bei R_A Muffen = konst. = 1 Ω – Spannungsverteilung

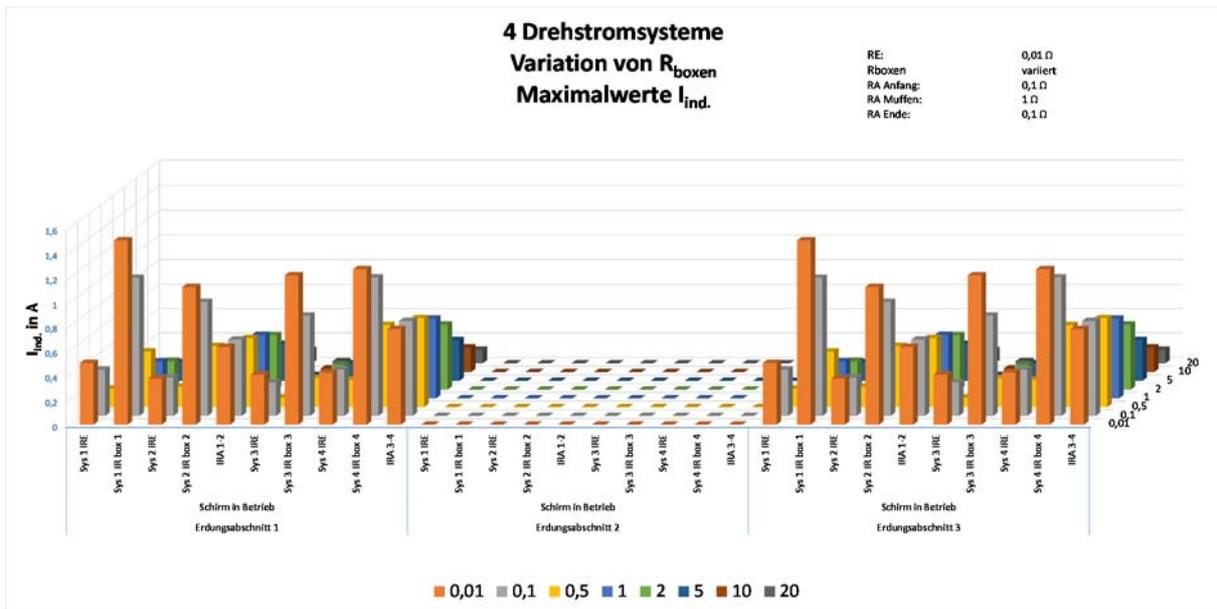


Abbildung 12-2: Vier Drehstromsysteme – alle DS in Betrieb – Variation der R_{boxen} bei R_A Muffen = konst. = 1 Ω – Querstromverteilung

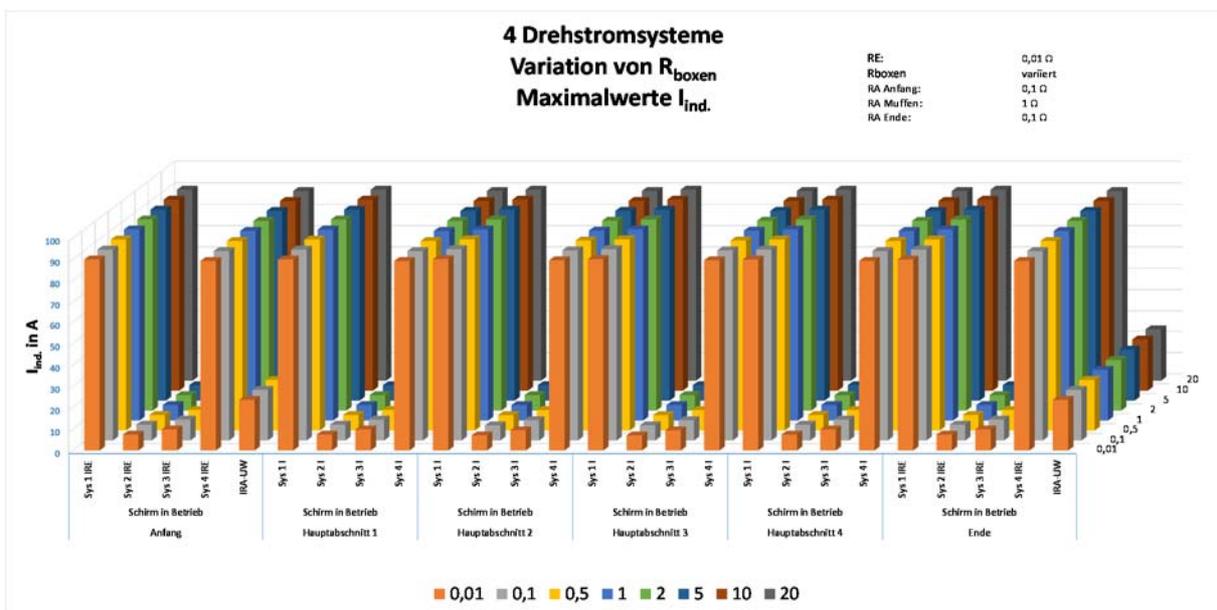


Abbildung 12-3: Vier Drehstromsysteme – alle DS in Betrieb – Variation der R_{boxen} bei R_A Muffen = konst. = 1 Ω – Längsstromverteilung