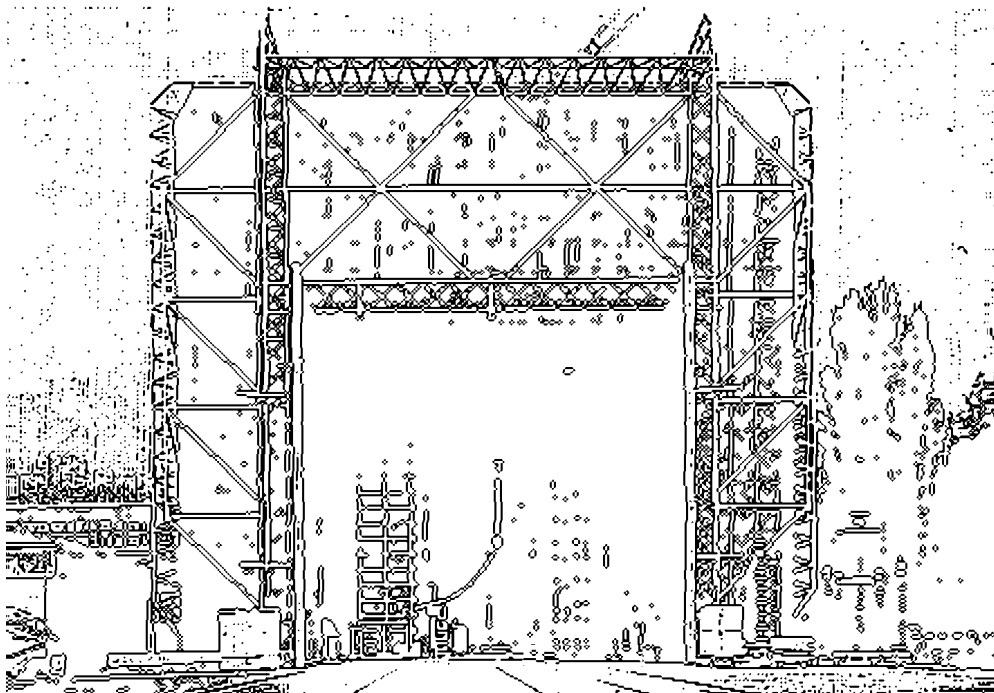


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT

Claudia Rumpf
März 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER



**ANALYSE TRANSIENTER BEANSPRUCHUNGEN
AN 10-KV-VERTEILNETZSTRUKTUREN BEI KABEL-
UND FREILEITUNGSKOMBINATIONEN
TRANSIENT STRESS IN
10-KV-DISTRIBUTIONSYSTEM BASED ON CABEL-
OVERHEAD LINE COMBINATION**

MASTERARBEIT

Durchgeführt am
Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Claudia Rumpf

Graz, März 2014

Begutachter:	Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack
Betreuer:	Dipl.-Ing. Jürgen Plesch
Externer Betreuer:	Dipl.-Ing. Timo Peitler (SIEMENS AG Österreich)
Institutsleiter:	Univ.-Prof. Dr-Ing. Uwe Schichler

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTTLICHE 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

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Meinem Begutachter Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack der es mir ermöglicht hat diese Arbeit am Institut für Hochspannungstechnik durchzuführen und für seine Unterstützung.

Meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Plesch für seine Hilfe, den vielen anregenden Gesprächen und Diskussionen, sowie dafür, dass er sich immer für mich Zeit genommen hat.

Der SIEMENS AG Österreich für ihre Unterstützung und die praktische Erfahrung die ich als Werkstudentin sammeln konnte und meinem Chef Herrn Dipl.-Ing. Timo Peitler für seine fachliche Unterstützung, seine Geduld und sein Verständnis.

Meinen Freunden dafür, dass sie immer für mich da waren.

Meinen Eltern die mir mein Studium ermöglicht haben. Für ihre fortwährende Unterstützung und dafür, dass sie mich nie unter Druck gesetzt haben.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde ein isoliertes 10kV-Mittelspannungsnetz im numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV nachgebildet, um den Einfluss unterschiedlicher Freileitungs- und Energiekabelanordnungen auf das Verhalten transienter Vorgänge zu untersuchen. Dabei wurden atmosphärische Überspannungen, dreipolige Kurzschlüsse bzw. einpolige Erdschlüsse mit anschließender Schutzauslösung, sowie Einschaltstoßströme und Lastabwürfe berücksichtigt. Freileitungen und Energiekabel besitzen aufgrund ihres technisch strukturellen Aufbaus unterschiedliche elektrische Eigenschaften. Energiekabel weisen im Vergleich höhere Kapazitäten auf, während bei Freileitungen die Induktivitäten dominieren. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Wellenwiderstände und Ausbreitungskoeffizienten, was sich auf das Verhalten transienter Vorgänge auswirkt. Das für die Untersuchung betrachtete Mittelspannungsnetz besteht aus einem Umspannwerk mit zwei Abgängen. Die Versorgung erfolgt aus einem 110kV-Netz über einen 12MVA Umspanner. Jeder Abgang besteht aus einer 6km langen Übertragungsleitung bis zur nächsten Verteilstation. Für die Untersuchung wurde eine Freileitung der Type Al/St 150/25 und ein Energiekabel der Type NA2XS2Y 150/25 herangezogen. Für die Wahl der möglichen Leitungskombinationen wurden reale Mittelspannungsnetze betrachtet und die am häufigsten auftretenden Kombinationen herausgearbeitet. Kleine Mittelspannungsnetze in ländlichen Gebieten besitzen oft durchgehende Freileitungsabgänge. Durch den zunehmenden Verbrauch und den damit verbundenen Lastströmen müssen diese Abgänge durch stärkere Freileitungsseile oder durch die Verlegung von stärkeren Energiekabel ersetzt werden. Dies führt zu Teil- oder zu Vollverkabelungen einzelner Abgänge. Da der Laststrom am Anfang einer Übertragungsleitung am größten ist, tritt eine Teilverkabelung meist zu Beginn eines Abgangs auf. In dessen Folge kommt es zu einer Erhöhung des Kurzschlussstroms und zu einer höheren thermischen Belastung einzelner Teilabschnitte der Übertragungsleitung. Entsprechend dieser Überlegung wurden die ca. 20 Varianten für die Betrachtung festgelegt. Es wurden Kombinationen mit durchgehenden Freileitungen und Energiekabel betrachtet, sowie Kombinationen bei denen das Energiekabel vom Anfang der Übertragungsleitung, bzw. von beiden Seiten in die Freileitung hinein "wächst".

Abstract

In this thesis an insulated 10kV medium-voltage power grid was modelled in the numerical calculation program EMTP-RV to analyse the influence of different overhead line and power cable adjustments on the behavior of transient events. There for atmospheric overvoltages, three-phase short-circuits or earth faults with subsequent protective tripping, as well as inrush and load shedding were observed. Overhead lines and power cables have different electrical properties due to their technical structure. Power cables have higher capacities, while in case of overhead lines the inductors dominate. This results in different characteristic impedances and propagation coefficients, which affects the behavior of transient events. The medium-voltage power grid discussed in this analysis consists of a transformer station with two outgoing feeders. The power is supplied from a 110kV network via a 12MVA transformer. Each feeder has a transmission line with a length of 6km before reaching the next distribution station. For this study an overhead line type Al/St 150/25 and a power cable type NA2XS2Y was used. To choose possible line combinations actual medium voltage power grids were considered and most frequently occurring combinations were examined. Small medium voltage power grids in rural areas do often have continuous overhead line feeders. Due to the increasing power consumption and the associated load currents these feeders must be replaced by stronger overhead lines or by the installation of stronger power cables. This leads to partial or full wiring of individual feeders. Since the load current at the beginning of a transmission line is the highest, partial wiring is often found at the beginning of a feeder. As a consequence, an increase of the short-circuit current and therefore a higher thermal load of individual sections of the transmission line occurs. According to this consideration, 20 variations were determined for the examination. Combinations with solid overhead lines and power cables as well as combinations with power cables "growing" from either the beginning of the transmission line or from both sides into the overhead line were examined.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Transiente Überspannungen in Mittelspannungsnetzen	5
2.1	Überspannungsarten	5
2.2	Ursachen für Überspannungen	6
2.2.1	Einschaltstoßstrom (Inrush)	7
2.2.2	Dreipoliger Kurzschluss	8
2.2.3	Einpoliger Erdschluss	9
2.2.4	Atmosphärische Überspannungen	10
2.2.5	Lastabwurf	11
3	Das numerische Berechnungsmodell	12
3.1	Allgemein	12
3.1.1	Aufbau der Netzstruktur	13
3.1.2	Randbedingungen für das numerische Berechnungsmodell	17
3.1.3	Simulationsparameter	17
3.2	Das vorgelagerte 110-kV-Netz	18
3.2.1	Allgemein	18
3.2.2	Nachbildung im Simulationsprogramm	19
3.3	Vakuum-Leistungsschalter	20
3.3.1	Vakuum-Leistungsschalter allgemein	20
3.3.2	Nachbildung im Simulationsprogramm	21
3.4	Strom- und Spannungswandler	22
3.4.1	Strom- und Spannungswandler allgemein	22
3.4.2	Nachbildung im Simulationsprogramm	22
3.5	Freileitungen	23
3.5.1	Aufbau von Freileitungen	23
3.5.2	Betriebsverhalten und Wanderwellenvorgänge	23
3.5.3	Nachbildung im Simulationsprogramm	27
3.6	Energiekabel	29
3.6.1	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Energiekabeln	29
3.6.2	Nachbildung im Simulationsprogramm	31
3.7	Überspannungsableiter	33
3.7.1	Allgemeiner Aufbau und Funktion von Überspannungsableitern	33
3.7.2	Nachbildung im Simulationprogramm	33
3.7.3	Plausibilitätsüberprüfung des Überspannungsableitermodells	35

3.8	Transformatoren	38
3.8.1	Frequenzgänge und Eigenfrequenzspektren	38
3.8.2	Ausgleichsverhalten von Transformatoren	39
3.8.3	Niederfrequentes Ersatzschaltbild	41
3.8.4	Die Hysterese	43
3.8.5	Nachbildung im Simulationsprogramm	44
3.8.6	Plausibilitätsüberprüfung des Transformatormodells	49
4	Simulationsauswertung	51
4.1	Variantenübersicht	51
4.2	Einschaltstoßstrom (Inrush)	53
4.2.1	Einschaltstoßstrom	54
4.2.2	Spannungsausprägung beim Einschaltstromstoß	58
4.3	Dreipoliger Kurzschluss	59
4.3.1	Schaltströme infolge des Spannungseinbruchs	60
4.3.2	Spannungseinbrüche	63
4.3.3	Thermische Belastung der Leitungen	65
4.4	Einpoliger Erdschluss	66
4.4.1	Erdschlussströme	68
4.4.2	Maximale Spannungen im Erdschlussfall	73
4.5	Atmosphärische Überspannungen	75
4.5.1	Transiente Spannungen infolge des Blitzeinschlags	76
4.6	Lastabwurf	88
4.6.1	Spannungsanhebung	89
4.6.2	Restströme nach dem Lastabwurf	89
5	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	91
5.1	Das numerische Berechnungsmodell	91
5.2	Einschaltstoßstrom	91
5.3	Dreipoliger Kurzschluss	92
5.4	Einpoliger Erdschluss	93
5.5	Atmosphärische Überspannungen	94
5.6	Lastabwurf	94
6	Zusammenfassung	95
A	Tabellen Gesamtübersicht	97
B	Diagramme Gesamtauswertung	103

Kapitel 1

Einleitung

Die Diskussionen über den Abbau von Freileitungen und der Verkabelung einzelner Leitungsstrecken wird immer häufiger.

„Gemeinderat blockiert Freileitung - Ja zur Leitungsverstärkung. Aber nein zur oberirdischen Variante.“ - Kleinezeitung.at [34]

„Gesundheitliche Gefährdung und negative Auswirkungen auf Natur- und Landschaftsgebiete befürchtet“ - derStandard.at [35]

Doch welche technischen Auswirkungen bringen die Wahl der „oberirdischen“ bzw. der „unterirdischen“ Variante mit sich? Die Abschaffung einer Freileitung und die Verkabelung einer Leitungsstrecke kann sowohl positive, als auch negative Folgen haben.

Während Energiekabel den Zugang bei einer Fehlerbehebung erschweren, sind Freileitungen wesentlich fehleranfälliger. Die Magnetfeldbelastung durch eine Freileitung ist größer, als bei einem Energiekabel und die Wahl der passenden Leitungsvariante hat auch einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten transients Vorgänge in einem Netz.

Nicht immer basiert die Abschaffung einer Freileitung auf einer Bürgerinitiative. Meist erfolgt die Wahl aufgrund technischer Gegebenheiten.

Durch den Zuwachs von Verbrauchern müssen Leiterseile verstärkt werden. Meist werden Leitungsanfänge zuerst verstärkt bzw. verkabelt, da sich dort der größte Laststrom einstellt. Dadurch erhöht sich aber die thermische Belastung durch Kurzschlussströme über die Übertragungsleitung. Bei der Installation eines Schutzkonzeptes kann es infolge dessen, zu einem Selektivitätsproblem kommen, da die maximal zulässigen Abschaltzeiten der Leitungsausläufer so weit absinkt, dass keine selektive Abschaltung mehr möglich ist. Energiekabel können daher auch vom Leitungsende in die Freileitung „einwachsen“.

Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus, ergeben sich für Energiekabel und Freileitungen andere elektrische Gegebenheiten. Energiekabel weisen beispielsweise einen kleineren Wellenwiderstand und einen kleineren Ausbreitungskoeffizienten als Freileitungen auf, wodurch sich andere Brechungs- bzw. Reflexionsstellen ergeben, welche die Ausbreitung transients Wellen beeinflussen.

Weiters ändern sich für verschiedene Leitungstypen die Induktivitäten und Kapazitäten in einem Netz, die sich auf Eigenfrequenzen und Schwingverhalten auswirken.

Die geringen, stark frequenzabhängigen Induktivitäten eines Kabels begrenzen auftretende Kurzschlussströme schwächer und durch die höheren Kapazitäten werden vor allem Erdschlussströme begünstigt. Bei einer Verkabelung in einem isolierten Netz ist daher immer darauf zu achten, dass die auftretenden Erdschlussströme einen Wert von 35A nicht überschreiten, da es sonst zu Problemen in der Betriebsführung kommen kann.

Mit dem unterschiedlichen Aufbau und den daraus resultierenden elektrischen Parametern von Energiekabel und Freileitungen und deren Auswirkungen auf transiente Vorgänge beschäftigten sich schon viele. So handelt die Arbeit "Frequency Domain Transient Analysis of Resonant Behavior for Different HV Overhead Line and Underground Cable Configurations" über unterschiedliche Freileitungs- und Kabelkonfigurationen in einem Hochspannungsnetz und dessen daraus resultierendes Resonanzverhalten [30]. Andere Arbeiten beschäftigen sich mit neuen Kabeltypen zum Beispiel Hochtemperatur Supraleiter-Kabel wie "Transient Analysis of a 150 kV Fault Current Limiting High Temperature Superconducting Cable" die sich mit transienten Vorgängen bei einem Erdschluss beschäftigt [31]. Natürlich ist es wichtig sich mit allen Komponenten eines Übertragungsnetzes auseinander zu setzen und den gesamten Netzaufbau zu betrachten. Ein Beispiel dafür ist "The Impact of the Distribution Network Type and Configuration on the Transient Behavior of the Fault and Neutral Points during Earth Faults" [32].

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Leitungswahl auf den Verlauf transienter Vorgänge in Mittelspannungsnetzen. Das numerische Berechnungsmodell des 10kV isoliert betriebenen Netzes wird aus einem vorgelagerten 110-kV-Netz über einen 12MVA Transformator gespeist. Das Umspannwerk beinhaltet zwei Abgänge mit je einem Leistungsschalter. Die Übertragungsleitungen zu den Verteilerstationen haben jeweils eine Länge von 6km und enden bei Verteiltransformatoren mit einer Leistung von 250kVA. Die an den Verteiltransformatoren angeschlossenen Verbraucher werden durch eine Leistung von 150kVA repräsentiert.

Kapitel 2

Transiente Überspannungen in Mittelspannungsnetzen

Als „transiente Überspannungen“ werden kurzzeitig auftretende, nicht betriebsfrequente Spannungen verstanden, die den höchsten, dauernd zulässigen Wert der Betriebsspannung überschreiten.

Diese entstehen durch Ausgleichsvorgänge im Netz, hervorgerufen durch betriebsbedingte Schalthandlungen, auftretende Netzfehler oder atmosphärische Überspannungen.

Ausschlaggebend für die Frequenz der Ausgleichsvorgänge sind vor allem die Größe der Induktivitäten (Transformatoren) und Kapazitäten (Leitungen) im Netz, sowie die Laufzeiten und Wellenwiderstandsverhältnisse der einzelnen Netzabschnitten.

Der Begriff „Überspannung“ bezieht sich ausschließlich auf den Scheitelwert des Spannungsverlaufs. Allerdings müssen bei transienten Spannungen auch die Frequenzanteile berücksichtigt werden, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Belastung der Betriebsmittel eines Netzes haben [1].

2.1 Überspannungsarten

Die durch transiente Überspannungen verursachten Beanspruchungen elektrischer Betriebsmittel sind abhängig vom Scheitelwert der Spannung, den enthaltenen Frequenzanteilen und den Wiederholraten in denen transiente Überspannungen auftreten.

Das bedeutendste Beurteilungskriterium für Überspannungen stellt ihre Spannungs-Zeit-Charakteristik dar, daher werden diese, in Abhängigkeit ihres zeitlichen Verlaufs, in drei Gruppen unterteilt. Die unten dargestellte Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die jeweilige Überspannungskategorie, deren Spannungsart, Scheitelwert und Frequenzbereich [1].

Tabelle 2.1: Überspannungskategorien mit den zugehörigen Spannungsarten, Scheitelwerten und Frequenzbereichen[1]

Überspannungskategorie	Spannungsart	Scheitelwert [p.u]	Frequenzbereich
Langsam ansteigende Überspannungen	Schaltspannungen in Freiluft- oder Innenraumanlagen	1.0... 2.5 (4.0)	bis 20kHz
Schnell ansteigende Überspannungen	Atmosphärische Überspannungen	1.0... 5.0 (6.0)	10kHz bis 5MHz
Sehr schnell ansteigende Überspannungen	Schaltspannungen in gasisolierten Schaltanlagen	0.5... 2.0 (2.5)	100kHz bis 300MHz

2.2 Ursachen für Überspannungen

Im Allgemeinen treten transiente Überspannungen bei einem Übergang vom stationären in einen anderen stationären Zustand auf. Die Ursache dafür kann betriebsbedingt sein, durch Fehler im Netz oder durch Blitzeinschläge hervorgerufen werden [1]. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Ursachen für transiente Überspannungen mit den zugehörigen Frequenzbereichen.

Tabelle 2.2: Ursachen für transiente Überspannungen mit den zugehörigen Frequenzbereichen[1]

Ursachen	Frequenzbereiche
Lastabwurf	bis 3kHz
Eintritt eines Fehlers	bis 20kHz
Abschalten eines Fehlers	bis 3kHz
Einschalten und Wiederzuschalten von Leitungen	bis 20kHz
Einschwingen bei Stationskurzschlüssen	bis 20kHz
Einschwingen bei Abstandskurzschlüssen	bis 100kHz
Mehrfaches Wiederzünden in Leistungsschaltern	von 10kHz bis 1MHz
Fehler in Schaltanlagen	von 10kHz bis 3MHz
Atmosphärische Überspannungen	von 10kHz bis 1MHz
Atmosphärische Überspannungen mit nachfolgendem Spannungszusammenbruch	von 10kHz bis 5MHz
Schaltspannungen mit Vakuumschaltern	von 10kHz bis 10MHz
Schaltspannungen oder Fehler in gasisolierten Schaltanlagen	von 100kHz bis 300MHz

In dieser Arbeit werden Einschaltvorgänge eines Transformators (Inrush), dreipolige Kurzschlüsse und einpolige Erdschlüsse mit anschließender Schutzauslösung, Blitzeinschläge und Lastabwürfe und deren Auswirkung auf ein isoliert betriebenen 10-kV-Mittelspannungsnetz untersucht.

2.2.1 Einschaltstoßstrom (Inrush)

Beim Einschalten eines sekundärseitig leerlaufenden Transformators kommt es, aufgrund des Sättigungseffekts des Eisenkerns zu einem sogenannten Einschaltstoßstrom (Inrush), der je nach Schaltaugenblick, den bis zum 15-fachen Wert des Nennstroms erreichen kann.

Beim Einschalten eilt die Spannung dem stationären Fluss um 90° nach. Erreicht die Spannung im Einschaltaugenblick den Maximalwert, nimmt der Fluss sofort den stationären Wert an. Wird hingegen im Spannungsnulldurchgang zugeschaltet, besitzt der Fluss bereits seinen maximalen Wert. Es überlagert sich ein Ausgleichsvorgang, wodurch der Fluss auf den doppelten Wert seines maximalen Spitzenwertes ansteigt. Abbildung 2.1 zeigt die Wirkung dieser Flussverdoppelung auf den Magnetisierungsstrom.

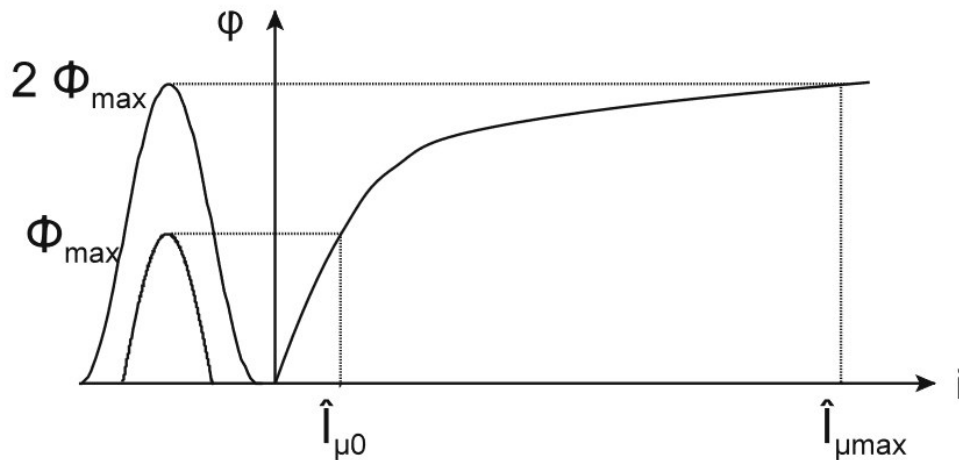


Abbildung 2.1: Wirkung der Flussverdoppelung auf den Magnetisierungsstrom [2]

Der Fluss kann in eine Gleich- und eine Wechselkomponente aufgespalten werden. Wird nur die Induktivität berücksichtigt, verläuft der Einschaltstoßstrom ungedämpft zwischen Null und seinem Maximalwert. Durch den Wicklungswiderstand klingt die Gleichstromkomponente ab und der Transformator erreicht seinen stationären Zustand. Dieser Vorgang kann bei großen Transformatoren bis zu einigen Minuten dauern.

Durch sogenannte Remanenzerscheinungen, d.h. durch eine vorhandene Restmagnetisierung beim Zuschalten kann der Strom sogar noch höhere Werte erreichen. In der Realität werden geeignete Maßnahmen ergriffen, um einen zu hohen Einschaltstoßstrom zu vermeiden, wie zum Beispiel durch eine Vormagnetisierung des Eisenkerns oder durch eine Synchronisation mit dem Netz.

In dieser Arbeit wird der Transformator allerdings ohne eine dieser Maßnahmen zugeschaltet, dafür reagiert der Transformator wie ein entmagnetisierter Transformator und es stellt sich kein Remanenzfluss ein [2][3].

2.2.2 Dreipoliger Kurzschluss

Ein dreipoliger Kurzschluss liegt vor, wenn alle drei Phasen leitend miteinander verbunden sind. Es wird zwischen einem „satten Kurzschluss“, bei dem ein Übergangswiderstand praktisch nicht vorhanden ist und einem „Lichtbogenkurzschluss“, bei dem die Phasen über einen Lichtbogen miteinander verbunden sind, unterschieden. Der Lichtbogen repräsentiert einen nichtlinearen Widerstand und liegt in der Größenordnung von wenigen Ohm. In dieser Arbeit sprechen wir nur von „satten Kurzschlüssen“.

Der dreipolige Kurzschluss ist vor allem für die Bemessung der Betriebsmittel ausschlaggebend, da er für die Bemessung der thermischen und mechanischen Beanspruchung der Betriebsmittel in einem Netz herangezogen wird.

Generell kann der Verlauf des Kurzschlussstroms in einen abklingenden Gleichanteil und einen Wechselanteil zerlegt werden. Für den Verlauf des Kurzschlussstroms spielt die Entfer-

nung zum Generator eine wichtige Rolle. Während bei einem generatornahen Kurzschluss der subtransiente und transiente Anteil des Kurzschlussstroms zu Beginn des Fehlerstromverlaufs auftritt, treten diese Anteile bei einem generatorfernen Kurzschluss nicht in Erscheinung und der Effektivwert des Kurzschlussstroms ist nach Eintritt des Fehlers praktisch zeitunabhängig. Ein generatorferner Kurzschluss liegt vor, wenn die Reaktanz zwischen dem Generator und der Fehlerstelle ausreichend groß ist. Dies ist der Fall, wenn der Kurzschluss hinter dem Umspanner einer Netzeinspeisung auftritt [4][5]. Abbildung 2.2 zeigt den Kurzschlussstromverlauf in einem ohmsch-induktiven Netz.

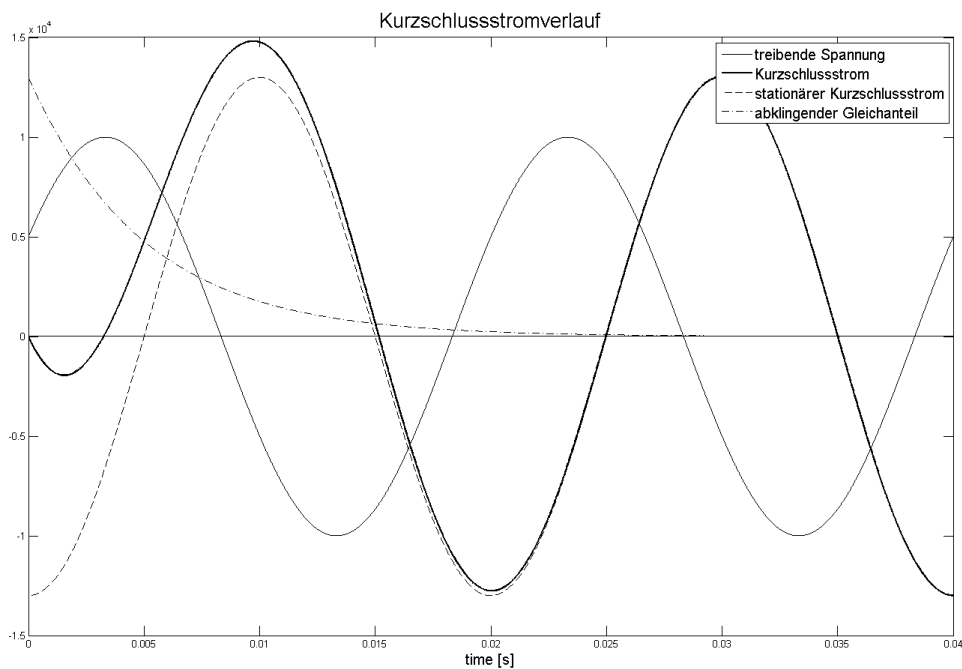


Abbildung 2.2: Kurzschlussstromverlauf mit Überlagerung des stationären Kurzschlussstroms und des Gleichanteils in einem ohmsch-induktiven Netz[4]

Die Spannung beim dreipoligen Kurzschluss bricht an der Fehlerstelle zusammen. Je weiter die Entfernung zur Fehlerstelle, umso größer wird die Spannung entsprechend dem Spannungsabfall des Kurzschlussstroms an den Leitungsimpedanzen [6].

2.2.3 Einpoliger Erdschluss

Ein Erdschluss liegt vor, wenn eine der Phasen leitend mit Erde verbunden ist. Dies kann, wie schon beim dreipoligen Kurzschluss erwähnt, ein "satter Erdschluss" oder ein "Lichtbogen-erdschluss" sein. Der Erdschluss spielt vor allem für die Auslegung der Erdungsanlagen und die induktive Beeinflussung der Netzkomponenten eine wichtige Rolle. Etwa 80% aller Fehler in Freileitungsnetzen sind auf einpolige Erdschlüsse zurückzuführen.

Bei den in dieser Arbeit simulierten Erdschlüssen handelt es sich um Fehler mit direkter Erdberührung, also um "satte Erdschlüsse" ohne Übergangswiderstand. Der Erdungswi-

derstand wird für die Berechnung nicht berücksichtigt, es handelt sich also um eine "ideale" Erdung.

Das hier betrachtete Mittelspannungsnetz wird isoliert betrieben. Das bedeutet, dass bei einem Fehler die Phasenspannungen der nicht betroffenen Phasen an der Fehlerstelle um den Faktor $\sqrt{3}$ ansteigen, während die Spannung der fehlerbehafteten Phase Erdpotential annimmt. Dies führt zu einer starken Beanspruchung der Überspannungsableiter und Isolatoren, wodurch in weiterer Folge Doppelfehler auftreten können [4]. Abbildung 2.3 zeigt das Spannungsdreieck bei einem einpoligen Erdschluss in einem isolierten Netz.

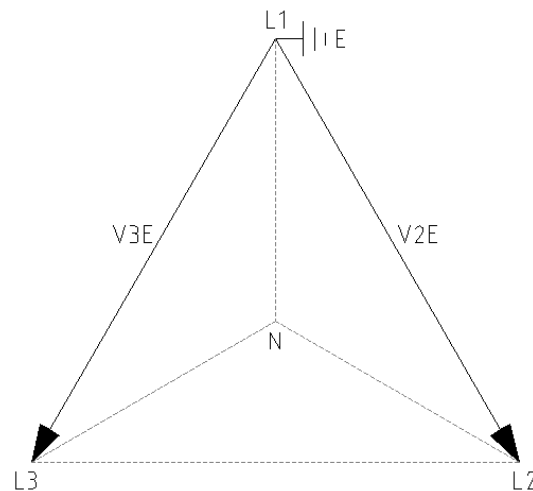


Abbildung 2.3: Spannungsdreieck: Spannungsanhebung der fehlerfreien Phasen bei einem einpoligen Erdschluss in einem isolierten Netz[6]

2.2.4 Atmosphärische Überspannungen

Atmosphärische Überspannungen in Hochspannungssystemen entstehen durch:

- Direkte Einschläge in die Leiterseile
- Rückwärtige Überschläge bei direktem Erdseil- oder Masteinschlag
- Induktion bei Einschlägen in Leitungs- oder Schaltanlagenhöhe
- Transiente Erdpotentialanhebung in der Nähe von Kabeln

Die Beurteilung der atmosphärischen Überspannungen erfolgt über den zeitlichen Verlauf des transienten Stroms, dem Blitzstrommaximum und der Blitzstromsteilheit.

Für den **Scheitelwert**, der sich auf der Freileitung aufbauenden Überspannung, ist der Maximalwert des Blitzstroms ausschlaggebend. Dabei ist der Isolationsdurchschlag oft mit der daraus resultierenden Spannungsbelastung verbunden.

Höchstwerte:

- positive Teilblitze: $17\text{kA}/\mu\text{s}$

- negative Teilblitze: $100\text{kA}/\mu\text{s}$
- erste Teilblitze: $50\text{kA}/\mu\text{s}$

Die Frequenzanteile von atmosphärischen Überspannungen erreichen bis zu 1MHz. Sollte es in Folge zu Über- oder Durchschlägen kommen, können Frequenzen bis zu 5MHz erreicht werde [1].

Laut ALDIS (Austrian Lightning Detection and Information System) sind die am häufigsten auftretenden Blitze negativ geladen und haben eine Amplitude von ca. 12kA. Aus diesem Grund wurde auch für die Simulation eine negative Blitzentladung mit 12kA gewählt.

2.2.5 Lastabwurf

Bei einem Lastabwurf kommt es zu einem Spannungsanstieg am Ende der Übertragungsleitung. Dieser bleibt solange bestehen, bis die Regeleinrichtungen (Generator, Transformator, Kompensationsanlagen) ansprechen und die Spannung auf die Betriebsspannung regeln. Dieser Vorgang kann von einigen Sekunden bis zu einigen Minuten andauern. Die Höhe einer durch Lastabwurf verursachten Spannungsanhebung beträgt im Schnitt 5% bis 10% . In Generatornähe und bei Vollastabwurf kann die Spannungsanhebung bis zu 50% betragen [2].

Wenn es am Ende einer Leitung zu einem Lastabwurf kommt, wird die sich am Ende der Leitung einstellende Spannung als Ferranti-Effekt bezeichnet [7]. Der Ferranti-Effekt beschreibt die Spannungsverhältnisse am Anfang und am Ende einer Leitung. Er hängt vom Ausbreitungskoeffizienten und der Leitungslänge ab und wird erst ab einer Länge von 100km berücksichtigt [1].

Kapitel 3

Das numerische Berechnungsmodell

3.1 Allgemein

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Auswirkung von Überspannungen in kleinen Mittelspannungsnetzen, die vor allem in ländlichen Gebieten üblich sind. Diese Netze werden teilweise noch isoliert betrieben, da die Kabellängen und infolge dessen die auftretenden Erdschlussströme so gering sind, dass keine zusätzlichen Maßnahmen wie Löschspulen notwendig sind.

Aufgrund des Wachstums dieser Netze müssen Leitungen verstärkt werden, um die geforderte Leistung übertragen und um die Spannungsqualität bis zum Endkunden gewährleisten zu können.

Dies führt allerdings zu neuen Problemen. Der Kurzschlussstrom steigt, was einerseits eine bessere Spannungsqualität zur Folge hat und andererseits zu einer erhöhten thermischen und mechanischen Belastung der Betriebsmittel im Fehlerfall führt. Die Schutzeinrichtungen dieser Netze müssen daher neu dimensioniert und eingestellt werden.

Anstatt die Freileitungsseile zu verstärken, werden immer wieder die vorhandenen Freileitungen gegen Energiekabel mit einem größeren Querschnitt ersetzt. Dies kann aus mehreren Gründen geschehen:

- Geringerer Wartungs- und Betriebsaufwand für den Netzbetreiber.
- Freileitungen sind fehleranfälliger, da sie ständig den Umwelteinflüssen ausgesetzt sind.
- Viele Menschen fordern die Demontage von Freileitungen, da diese für sie einen Eingriff in das Landschaftsbild darstellen.
- Wenn eine Freileitung zu nahe an Häusern vorbeiführt, kann es zu einer zu hohen Magnetfeldbelastung kommen.

In Folge der Verkabelung steigt der Erdschlussstrom, wodurch die Erdschlussstromgrenze überschritten werden kann und eine andere Sternpunktbehandlung, wie zum Beispiel der Einbau einer Löschspule, gewählt werden muss.

Freileitungen und Energiekabel besitzen aufgrund des technisch strukturellen Aufbaus unterschiedliche elektrische Eigenschaften. Energiekabel weisen im Vergleich höhere Kapazitäten auf, während bei Freileitungen die Induktivitäten dominieren. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Wellenwiderstände und Ausbreitungskoeffizienten. International festgelegte Werte des Wellenwiderstandes von Energiekabel liegen im Bereich von 30Ω bis 65Ω und bei Freileitungen im Bereich von 300Ω . Die Ausbreitungsgeschwindigkeit transienter Wellen über Energiekabel beträgt ca. $2 \cdot 10^8 \text{m/s}$ und über Freileitungen ca. $3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ (Lichtgeschwindigkeit). Das bedeutet, dass sich aufgrund der Verkabelung andere Transmissions- und Reflexionsvorgängen der transienten Welle innerhalb eines Netzes ergeben [1]. Um die Auswirkung unterschiedlicher Energiekabel- und Freileitungsanordnungen in Mittelspannungsnetzen auf das transiente Verhalten von Überspannungen näher zu untersuchen, wurde das unten beschriebene Mittelspannungsnetz im numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV, Version 2.1.1 (Electromagnetic Transient Program - Restructured Version) realisiert.

3.1.1 Aufbau der Netzstruktur

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des, für die numerische Berechnung verwendeten, 10-kV-Mittelspannungsnetzes.

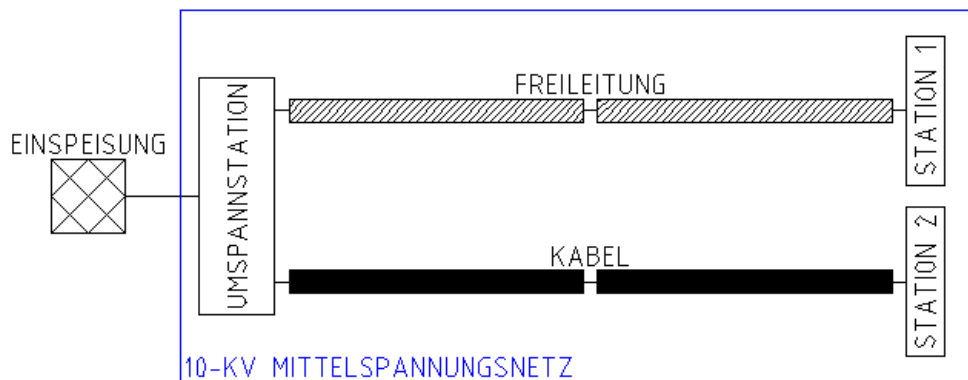


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des, für die numerische Berechnung verwendeten, 10-kV-Mittelspannungsnetzes

Abbildung 3.2 zeigt eine detaillierte Darstellung des, für die numerische Berechnung verwendeten, 10-kV-Mittelspannungsnetzes inklusive aller Netzkomponenten und Messstellen.

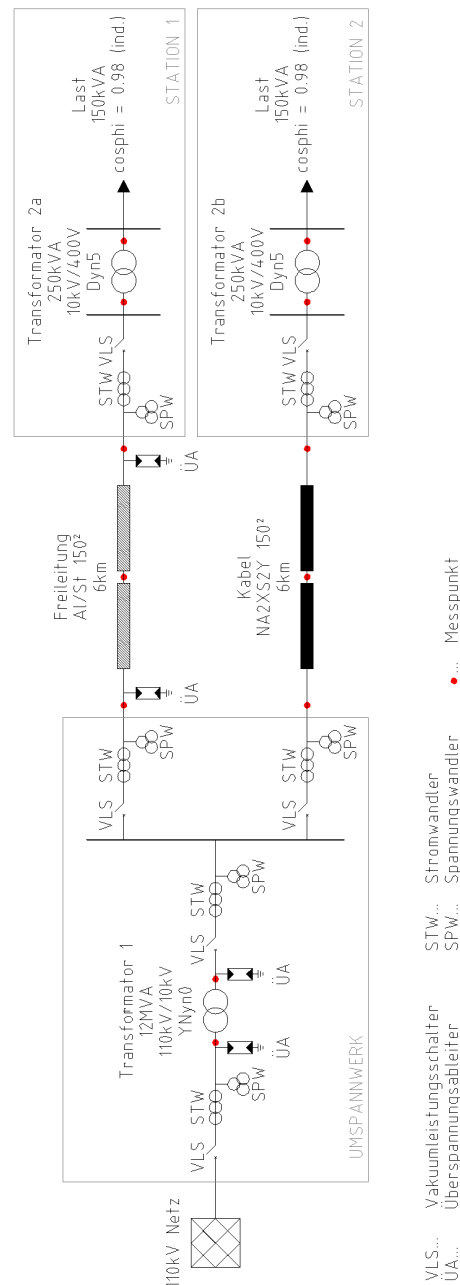


Abbildung 3.2: Detaillierte Darstellung des, für die numerische Berechnung verwendeten, 10-kV-Mittelspannungsnetzes inklusive aller Netzkomponenten und Messstellen

Das **Umspannwerk** besteht aus zwei ident aufgebauten Leitungsfeldern und einem Trans-

formatorfeld. Jedes Feld besitzt einen Vakuumleistungsschalter und jeweils einen Strom- und Spannungswandler. Die 110-kV-Sammelschiene wurde nicht gesondert dargestellt.

Der **Transformator 1** hat eine Leistung von 12MVA und besitzt die Schaltgruppe YNyn0, wobei der primärseitige Sternpunkt starr geerdet ist und der sekundärseitige Sternpunkt isoliert ausgeführt wird. Sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite des Transformators sind Überspannungsableiter vorhanden.

Die Darstellung in Abbildung 3.2 zeigt die Basisvariante. Die untersuchten Varianten werden im Punkt 4.1 näher behandelt und sind in Tabelle 4.1 (Variantenübersicht) ersichtlich. Alle für die Simulationen verwendeten **Freileitungsstücke** sind von der Type Al/St und haben einen Querschnitt von 150mm^2 . Die verwendeten **Energiekabelstücke** sind von der Type NA2XS2Y und besitzen ebenfalls einen Querschnitt von 150mm^2 .

Die **Transformatoren 2a und 2b** haben jeweils eine Leistung von 250kVA mit der Schaltgruppe Dyn5. Der sekundärseitige Sternpunkt ist starr geerdet. Für die Verteiltransformatoren wurde auf Überspannungsableiter verzichtet, da diese in der Parxis nur in Sonderfällen Anwendung finden.

Für die **Lasten** wurde eine Leistung von 150kVA angenommen (60%-ige Auslastung der Transformatoren 2a und 2b) mit einem $\text{Cos}\varphi$ von 0.98.

Die einzelnen Komponenten wurden zuerst getrennt betrachtet, nachgebildet und auf Plausibilität überprüft. Anschließend wurden die Komponenten zu einem numerischen Berechnungsmodell zusammengeschaltet.

Abbildung 3.3 zeigt das fertige 10-kV-Mittelspannungsnetz der Basisvariante.

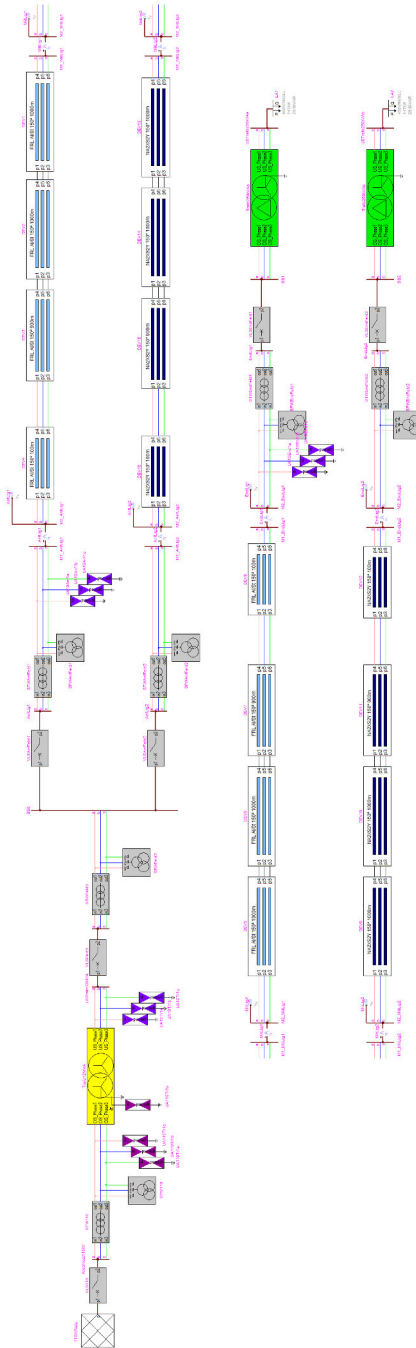


Abbildung 3.3: Numerisches Berechnungsmodell des betrachteten 10-kV-Mittelspannungsnetzes in EMTP-RV; Basisvariante

3.1.2 Randbedingungen für das numerische Berechnungsmodell

Bei der Modellbildung wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- **Sternpunktsbehandlung:** Das 10-kV-Netz wurde als isoliertes Netz nachgebildet.
- **Erdung:** Eine Sensitivitätsanalyse des Erdungswiderstandes zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die numerisch berechneten Ergebnisse und wurde daher als ideal angenommen ($R = 0$).
- **Lichtbogenimpedanz:** Die Lichtbogenimpedanz wurde aufgrund ihres geringen Widerstandswertes vernachlässigt.
- **Sammelschiene:** Die Sammelschiene wurde in den ersten Betrachtungen berücksichtigt. Für diese Studie wurde eine Schaltanlage mit offener Bauweise gewählt. Aufgrund der geringen Länge von 4m, konnten bei einer Sensitivitätsanalyse keine signifikanten Einflüsse auf die numerischen Berechnungsergebnisse festgestellt werden. Sie wurde daher in weiterer Folge vernachlässigt. Bei gekapselten oder SF6-isolierten Schaltanlagen treten kleinere Feldgrößen auf und die Länge der Sammelschienen variiert. Der Einfluss verschiedener Anlagengrößen und -bauweisen auf die transiente Welle wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.
- **Freileitungsmasten:** Da es sich in Mittelspannungsnetzen der meisten ländlichen Gebiete um Holzmasten ohne Erdseil handelt, wurde auch hier kein Erdseil nachgebildet. Der Widerstand des Holzmastes wurde aufgrund der geringen Leitfähigkeit des Materials vernachlässigt und es wurde kein eigenes Mastmodell modelliert.

3.1.3 Simulationsparameter

Das gegebene Mittelspannungsnetz wurde anhand von 250 Simulationen untersucht. Die Simulationen gliedern sich in folgende Punkte:

- **Plausibilitäts- und Sensitivitätsüberprüfung**
 - Anzahl der Simulationen: 35
- **Einschaltstoßstrom**
 - Anzahl der Simulationen: 20
 - Simulationszeit: 1s
 - Schrittweite: 250ns
 - Transformatorzuschaltung nach 10ms
- **Dreipoliger Kurzschluss**
 - Anzahl der Simulationen: 62
 - Simulationszeit: 200ms
 - Schrittweite: 10ns

- Fehlereintritt nach 10ms
- Fehlerabschaltung nach 110ms
- Leistungsschalterabrisstrom: 5A
- **Einpoliger Erdschluss**
 - Anzahl der Simulationen: 62
 - Simulationszeit: 200ms
 - Schrittweite: 10ns
 - Fehlereintritt nach 10ms
 - Fehlerabschaltung nach 110ms
 - Leistungsschalterabrisstrom: 5A
- **Atmosphärische Überspannung**
 - Anzahl der Simulationen: 46
 - Simulationszeit: 50ms
 - Schrittweite: 10ns
 - Blitzeinschlag erfolgt nach 10ms
 - Spitzenwert des Blitzstroms: 12kA
 - Anstiegszeit: $1.2\mu\text{s}$
 - Rückenhalbwertszeit: $50\mu\text{s}$
- **Lastabwurf**
 - Anzahl der Simulationen: 31
 - Simulationszeit: 100ms
 - Schrittweite: 10ns
 - Lastabwurf nach 10ms
 - Leistungsschalterabrisstrom: 5A

In den folgenden Abschnitten wird auf die numerische Modellbildung der einzelnen Systemkomponenten in EMTP-RV eingegangen.

3.2 Das vorgelagerte 110-kV-Netz

3.2.1 Allgemein

Die minimale Kurzschlussleistung eines Netzes ist ausschlaggebend für die Spannungshaltung im Netz. Je geringer die Kurzschlussleistung, desto stärker wirken sich Einspeisung und

Verbrauch auf die Spannungshaltung aus.

Typische Werte für die Kurzschlussleistungen in einem 110-kV-Netz sind[8]:

- $S_{kmin}'' = 1000MVA$
- $S_{kmax}'' = 4000MVA - 7500MVA$

3.2.2 Nachbildung im Simulationsprogramm

Für das verwendete 110-kV-Netz wurde eine Kurzschlussleistung von 1500MVA mit einem Netzimpedanzwinkel von 81.47° ($R/X = 0.15$) gewählt. Die Nachbildung des überlagerten 110-kV-Netzes erfolgt durch eine ideale dreipolige Spannungsquelle samt Netzimpedanz. Abbildung 3.4 zeigt das numerische Berechnungsmodell in EMTP-RV des vorgelagerten 110-kV-Netz.

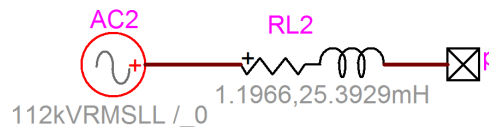


Abbildung 3.4: Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV des vorgelagerten 110-kV-Netz mit Spannungsquelle und Netzimpedanz

Typischer Weise werden in der Steiermark die 110-kV-Netze mit 112kV betrieben. Aus diesem Grund wurde auch für das numerische Berechnungsmodell die Betriebsspannung der Spannungsquelle mit 112kV (verkettet) gewählt.

Die Berechnung des Widerstandes und der Reaktanz wurde wie folgt durchgeführt:

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_k''} = \frac{110kV^2}{1500MVA} = 8.0667\Omega$$

$$R_n = Z_n \cdot \cos |\phi_k| = 8.0667\Omega \cdot \cos |81.47^\circ| = 1.1966\Omega$$

$$X_n = Z_n \cdot \sin |\phi_k| = 8.0667\Omega \cdot \sin |81.47^\circ| = 7.9774\Omega \Rightarrow L_n = \frac{X_n}{2\pi f_n} = 25.3929mH$$

Tabelle 3.1: Berechnungsergebnisse der Komponenten für das numerische Berechnungsmodell in EMTP-RV des 110-kV-Netzes

$U_{betr.}$	112kV
f_n	50Hz
R_n	1.1966 Ω
L_n	25.3929mH

3.3 Vakuum-Leistungsschalter

3.3.1 Vakuum-Leistungsschalter allgemein

Abbildung 3.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Vakuum-Leistungsschalters. Beim Öffnen der Kontakte wird durch den auszuschaltenden Strom eine Metaldampfboğenentladung erzeugt. Bis zum nächsten Stromnulldurchgang fließt über dieses Metaldampfplasma ein Strom und erlischt in der Nähe des Nulldurchgangs. Um unzulässige Schaltüberspannungen zu verhindern, muss der Abreißstrom auf möglichst kleine Werte begrenzt werden, daher beträgt dieser bei Vakuum-Leistungsschaltern nur wenige Ampere [9].

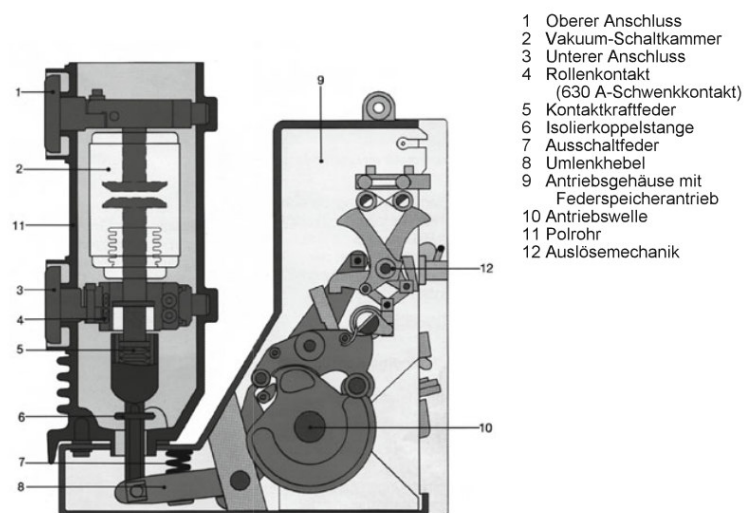


Abbildung 3.5: Prinzipieller Aufbau eines Vakuumleistungsschalters für Mittelspannung (ABB)[2]

Aus der hohen Leitfähigkeit des Metaldampfplasmas resultiert eine Brennspannung im Bereich von 20V bis 200V. Aufgrund der kurzen Lichtbogenzeiten, ist der Energieumsatz in der Schaltstrecke sehr klein [9]. Abbildung 3.6 zeigt den Verlauf der Durchschlagspannung verschiedener Löschmedien in Abhängigkeit der Schlagweite.

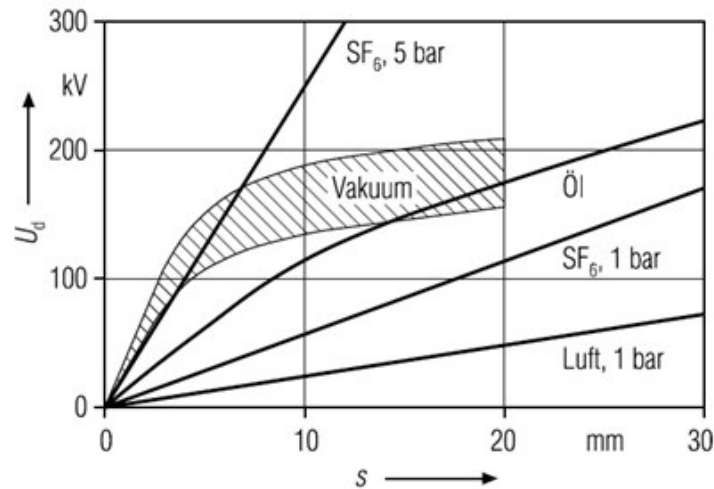


Abbildung 3.6: Durchschlagspannung unterschiedlicher Löschmedien in Abhängigkeit der Schlagweite[7]

Der Frequenzbereich von Schaltspannungen mit Vakuuum-Leistungsschaltern liegt zwischen 10kHz und 10MHz [1].

Die transient wirksamen Kapazitäten von Leistungsschaltern liegen bei 110kV zwischen 0.02nF und 0.4nF und bei 10kV zwischen 0.3nF und 0.5nF [1].

3.3.2 Nachbildung im Simulationsprogramm

Für die Nachbildung des Vakuuum-Leistungsschalters wurde im Simulationsprogramm EMTP-RV das "Ideal Switch Modell" gewählt und ein Abrissstrom von 5A eingestellt.

Um die Wanderwellenbeeinflussung zu berücksichtigen, wurde eine Kapazität parallel zum Schalter eingebaut. Sowohl für den 110-kV-Leistungsschalter, als auch für den 10-kV-Leistungsschalter wurde eine Kapazität in der Größe von 0.4nF gewählt. Abbildung 3.7 zeigt das numerische Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Vakuuum-Leistungsschalter.

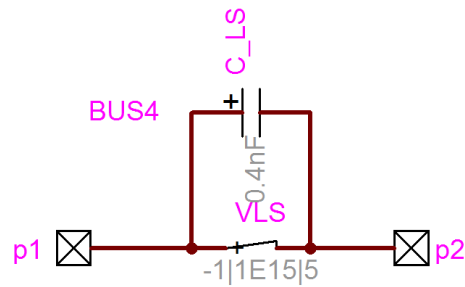


Abbildung 3.7: Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Vakuum-Leistungsschalter

3.4 Strom- und Spannungswandler

3.4.1 Strom- und Spannungswandler allgemein

Die transient wirksamen Kapazitäten von Stromwandlern liegen bei 110kV zwischen 0.1nF und 0.7nF und bei 10kV zwischen 0.3nF und 0.4nF. Bei einem Spannungswandler liegen die Kapazitäten bei 110kV zwischen 0.1nF und 2nF, während sie bei 10kV, wie beim Stromwandler, einen Wert zwischen 0.3nF und 0.4nF annehmen [1].

3.4.2 Nachbildung im Simulationsprogramm

Die Strom- und Spannungswandler wurden im numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV durch parallele Kapazitäten nachgebildet. Für sämtliche Wandler (10kV und 110kV) wurden die Kapazitäten mit 0.3nF angenommen. Die Abbildungen 3.8 und 3.9 zeigen die numerischen Berechnungsmodelle in EMTP-RV für die in der Simulation verwendeten Strom- und Spannungswandler.

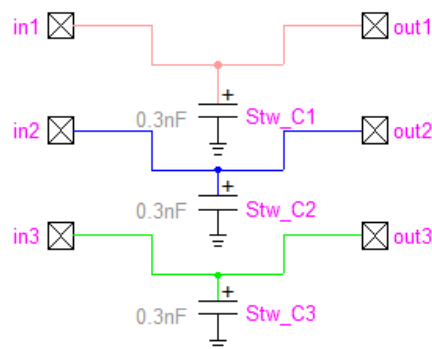


Abbildung 3.8: Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Stromwandler

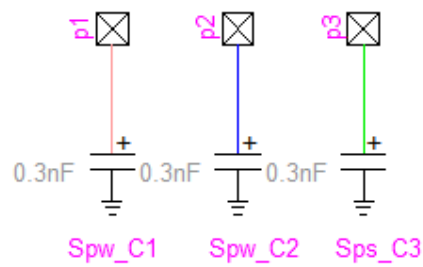


Abbildung 3.9: Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Spannungswandler

3.5 Freileitungen

3.5.1 Aufbau von Freileitungen

Die wesentlichen Komponenten von Freileitungen stellen die Leiterseile und der Mast dar. Ein grober Aufbau eines 10-kV-Freileitungssystems mit Holzmast ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

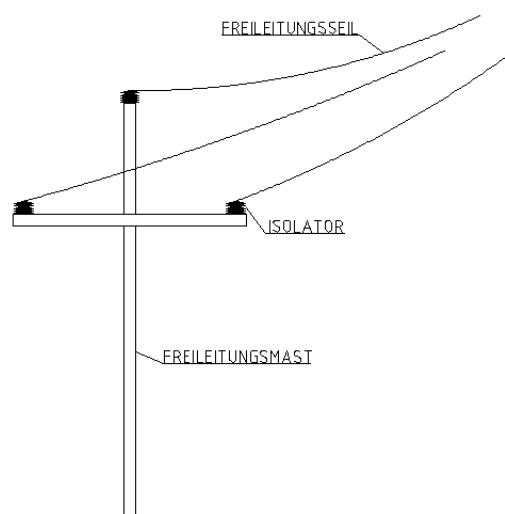


Abbildung 3.10: Grober Aufbau eines 10-kV-Freileitungssystems mit Holzmast

3.5.2 Betriebsverhalten und Wanderwellenvorgänge

Wanderwellenvorgänge allgemein

Trifft eine Wanderwelle auf einen Punkt an dem sich der Wellenwiderstand der Übertragungsleitung ändert, ändern sich auch Strom und Spannung. An diesen Punkten

kommt es dann zu einer Transmission bzw. Reflexion der Strom- und Spannungswelle. Vor dieser Stelle, setzt sich die Wanderwelle aus dem hinlaufenden und dem rücklaufenden Teil und nach der Stoßstelle aus dem weiterlaufenden Teil zusammen. Der transmittierte bzw. reflektierte Anteil der Spannungswelle ist gleich dem einfallenden Anteil multipliziert mit dem Reflexionsfaktor r , bzw. Brechungsfaktor b . Diese beiden Faktoren stehen zueinander in folgender Beziehung:

$$b = 1 + r$$

Besitzt die Übertragungsleitung außer unterschiedlichen Wellenwiderständen auch unterschiedliche Ausbreitungskoeffizienten (v_1, v_2), so läuft die reflektierte Welle mit v_1 in die eine und die transmittierte Welle mit v_2 in die andere Richtung weiter. Bei Freileitung beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit annähernd Lichtgeschwindigkeit c_0 .

Die Stromverteilung ergibt sich aus der Spannungsverteilung gebrochen durch den Wellenwiderstand, wobei für die rücklaufende Stromwelle auch ein Vorzeichenwechsel eintritt [1].

Bei der Änderung des Wellenwiderstandes von Z_1 auf Z_2 gilt für die reflektierte rücklaufende Welle [11]:

$$u_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot u_1 \quad \text{und} \quad i_r = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot i_1$$

Und für die transmittierte weiterlaufende Welle gilt:

$$u_b = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot u_1 \quad \text{und} \quad i_b = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot i_1$$

Extremfälle stellen hier eine leerlaufende Übertragungsleitung $Z_2 = \infty$ wie bei einer Längsunterbrechung oder eine kurzgeschlossene Übertragungsleitung $Z_2 = 0$ wie bei Kurzschlüssen oder Erdschlüssen, dar.

Bei leerlaufenden Übertragungsleitungen gilt für die reflektierte rücklaufende Welle:

$$u_r = u_1 \quad i_r = -i_1$$

Und für die transmittierte weiterlaufende Welle:

$$u_b = 2 \cdot u_1 \quad i_b = 0$$

Für kurzgeschlossene Übertragungsleitungen gilt für die reflektierte rücklaufende Welle:

$$u_r = -u_1 \quad i_r = i_1$$

Und für die transmittierte weiterlaufende Welle:

$$u_b = 0 \quad i_b = 2 \cdot i_1$$

Bei Freileitungen mit genügend großem Querschnitt ($G' = 0; \omega L' \gg R'$) berechnet sich der Wellenwiderstand wie folgt:

$$Z_W \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Dies gilt außerdem für nahezu alle Übertragungsleitungen bei genügend hohen Frequenzen ($\omega C' \gg G'; \omega L' \gg R'$) [1].

Natürlicher Betrieb

Eine Übertragungsleitung wird als verlustlos bezeichnet, wenn die Elemente R' und G' den Wert null aufweisen. Wird die Übertragungsleitung mit einer Impedanz abgeschlossen und ist diese genauso groß wie die Eingangsimpedanz, wird dies Anpassung genannt. Abbildung 3.11 zeigt das Ersatzschaltbild einer verdrehten und symmetrisch betriebenen Drehstromfreileitung mit der Länge l .

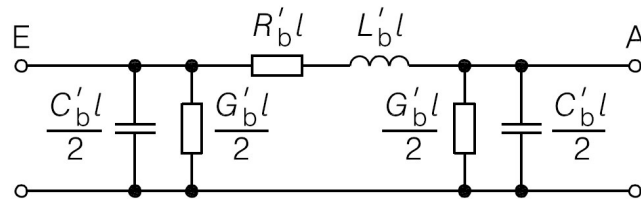


Abbildung 3.11: Ersatzschaltbild einer verdrehten und symmetrisch betriebenen Drehstromfreileitung mit der Länge l [4]

Für eine solche verlustlose Übertragungsleitung gilt:

$$\underline{Z}_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{U_A}{I_A} = Z \approx \sqrt{\frac{L'_b}{C'_b}}$$

Bei Anpassung kompensieren sich die kapazitiven und induktiven Ströme, es wird daher keine Zufuhr von Blindleistung zum Aufbau der elektrischen und magnetischen Felder benötigt. Bei Netznominalspannung ergibt sich die Wirkleistung einer angepassten Übertragungsleitung, auch natürliche Leistung genannt, zu:

$$P_{nat} = 3 \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{Z_W} = \frac{U_n^2}{Z_W}$$

Obwohl Eingangs- und Ausgangswiderstand gleich sind, trifft das nicht automatisch auf die Ströme zu. Lediglich die Beträge von Eingangs- und Ausgangsstrom bzw. Eingangs- und Ausgangsspannung sind gleich. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Phasenlage. Je länger die Übertragungsleitung, umso ausgeprägter ist die Phasenverschiebung.

Der Wellenwiderstand von Freileitungen liegt ungefähr bei 300Ω . Bei Bündelleitern liegt der Wert etwas darunter. Bei Freileitungen ohne Bündel liegt der Wert, aufgrund der größeren Betriebsinduktivität und der kleineren Betriebskapazität, etwas darüber.

Bei angepassten Übertragungsleitungen, kommt es an keiner Stelle zu einer Reflexion der Wanderwelle, diese läuft ungehindert weiter [4].

Übernatürlicher Betrieb

Beim übernatürlichen Betrieb gilt für den Abschlusswiderstand $Z < Z_W$. Durch den niederohmigen Leitungsabschluss entsteht ein hoher Laststrom, wodurch sich ein dementsprechend starkes Magnetfeld bildet. Der Einfluss dieses Feldes ist stärker als der Einfluss des elektrischen Feldes, welches hauptsächlich von der angelegten Betriebsspannung bestimmt wird, wodurch die Eingangsimpedanz ein induktives Verhalten aufweist.

Eingangs- und Ausgangsstrom unterscheiden sich im übernatürlichen Betrieb kaum, allerdings verringert sich die Ausgangsspannung bei steigender Leitungslänge immer mehr im Vergleich zur Eingangsspannung. Anders als beim natürlichen Betrieb, wird hier mehr Wirkleistung übertragen [4]. Abbildung 3.12 zeigt das Ersatzschaltbild mit dazugehörigem Sprungspannungsverlauf am Leitungsanfang bei übernatürlichem Betrieb [1].

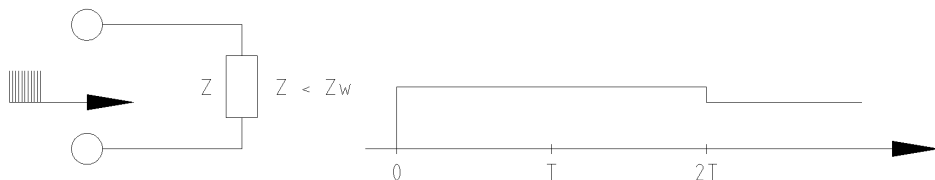


Abbildung 3.12: Ersatzschaltbild mit dazugehörigem Sprungspannungsverlauf am Leitungsanfang bei übernatürlichem Betrieb[1]

Den Extremfall stellt hier eine kurzgeschlossene Leitung ($Z = 0$) dar.

Unternatürlicher Betrieb

Beim unternatürlichen Betrieb gilt für den Abschlusswiderstand $Z > Z_W$. Es stellen sich ein verhältnismäßig kleiner Laststrom und dadurch ein kleines Magnetfeld ein, wodurch der Einfluss des elektrischen Feldes, bzw. des Verschiebestroms, verursacht durch die angelegte

Eingangsspannung, überwiegt. Die Übertragungsleitung bekommt dadurch ein kapazitives Verhalten. Den Extremfall stellt hier eine Leerlaufende Übertragungsleitung ($Z = \infty$) dar.

Abbildung 3.13 das Ersatzschaltbild mit dazugehörigem Sprungspannungsverlauf am Leitungsanfang bei unternatürlichem Betrieb [1].

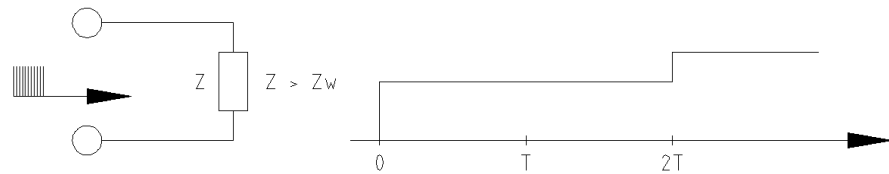


Abbildung 3.13: Ersatzschaltbild mit dazugehörigem Sprungspannungsverlauf am Leitungsanfang bei unternatürlichem Betrieb[1]

3.5.3 Nachbildung im Simulationsprogramm

Für das numerische Berechnungsmodell der Freileitung wurden die geometrischen Abmessungen des Mastens und die Position der Leiterseiler realen 10-kV-Mittelspannungsmasten nachempfunden. Die Abbildung 3.14 zeigt einen Kabelabspannmast, einen Abspannmast mit Transformator und ein Spannfeld mit Holzmasten in einem 10-kV-Mittelspannungsnetz.



Abbildung 3.14: Links: 10kV Kabelabspannmast; Mitte: 10kV Spannfeld; Rechts: 10kV Abspannmast mit Transformator

Abbildung 3.15 zeigt eine schematische Darstellung des verwendeten Mastens.

oder Ackerböden handelt. Der Erdrückleitungswiderstand wurde daher mit $100\Omega\text{m}$ berücksichtigt.

In 10-kV-Mittelspannungsnetzen werden Freileitungen meist unverdrillt ausgeführt, daher handelt es sich bei diesem Freileitungsmodell um eine unverdrillte Freileitung.

3.6 Energiekabel

3.6.1 Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Energiekabeln

Energiekabel besitzen im Allgemeinen die gleiche Struktur wie Freileitungen. Der Ableitwiderstand G' hängt von den dielektrischen Verlusten ab und ist nur bei Erwärmungs- und Wirkungsgrad zu betrachten. Für das Strom- und Spannungsverhalten kann dieser vernachlässigt werden. In Abbildung 3.16 werden die Ersatzschaltbilder eines Energiekabels dargestellt. Diese sind nur bis etwa 10Hz über der Netzfrequenz gültig [4].

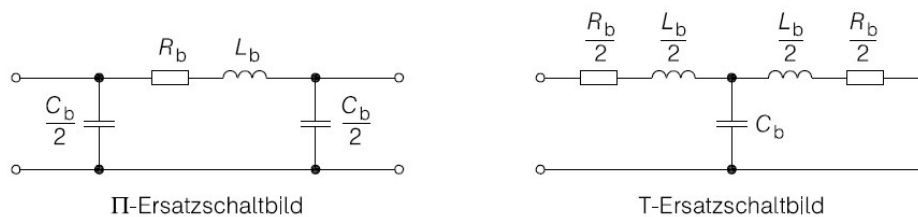


Abbildung 3.16: Links: Π -Ersatzschaltbild eines Energiekabels; Rechts: T-Ersatzschaltbild eines Energiekabels[4]

Die Leitungsbeläge eines Energiekabels sind stärker frequenzabhängig als bei Freileitungen. Der magnetische Fluss zwischen den Leitern ist relativ klein, wodurch die Feldlinien in den Adern und somit auch die Wirbelstromeffekte an Bedeutung zunehmen. Durch die Wirbelströme steigen die Verluste und damit auch der ohmsche Widerstand für höher frequente Anteile an. Die Induktivität verringert sich geringfügig. Auch im 50Hz-Bereich kann es bereits zu einer Erhöhung des Widerstandes kommen.

Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wird im Ersatzschaltbild der Betriebswiderstand R_b gegen den Wechselstromwiderstand R_w ersetzt, welcher größer als der Gleichstromwiderstand R_g ist.

Die Betriebsinduktivität L_b bei einem Dreileiterenergiekabel ist aufgrund der geringen Leiterabstände um den Faktor 3 kleiner als bei einer Freileitung und bei einem Einleiterenergiekabel um den Faktor 2. Aus diesem Grund wirkt sich die ohmsche Komponente im Verhältnis zur Induktivität stärker aus. Kurzschlussströme werden schwächer begrenzt als bei gleich langen Freileitungen mit dem selben Querschnitt.

Geringe Leiterabstände und eine relative Permittivität ϵ_r zwischen 2 und 4, führen zu einem relativ hohen Kapazitätsbelag.

Bei höheren Nennspannungen fällt die Koppelkapazität $C_{K\Delta}$ aufgrund der Erdungsmaßnahmen weg und die Betriebskapazität ergibt sich zu:

$$C'_b = C'_E$$

Die Betriebskapazität wird also nur von der Erdungskapazität bestimmt. Die Erdungskapazität selbst ist von der Stärke und Art der Isolierung abhängig und beträgt ca. $0.2\mu F$ [4]. Abbildung 3.17 zeigt die Kapazitäten eines Gürtelkabels und eines Radialfeldkabels.

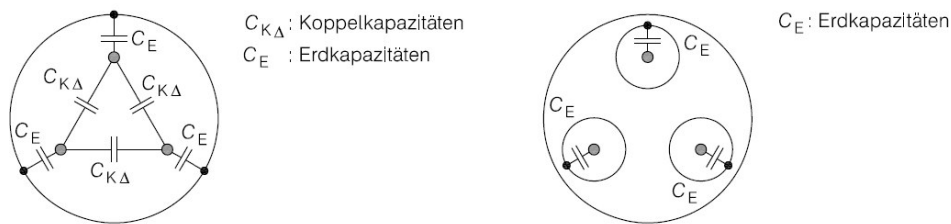


Abbildung 3.17: Links: Kapazitäten eines Gürtelkabels; Rechts: Kapazitäten eines Radialfeldkabels[4]

Durch die relativ großen Kapazitäten fließt im Leerlauf ein kapazitiver Strom, der sogenannte *Ladestrom*. Diese Erscheinung wird "Selbstaustlastung eines Energiekabels" genannt. Bei zunehmender Last, nimmt der Einfluss der Kapazität ab und im übernatürlichen Betrieb stellt sich schließlich ein induktives Verhalten ein.

Eine Kabellänge von 30km kann daher kaum überschritten werden, da sonst bei Teillast und im Leerlauf die Verluste, aufgrund des Ladestroms, zu groß werden.

Bei Mittelspannungsnetzen ist der Ladestrom, wegen der niedrigeren Spannung, kleiner. Um den Spannungsabfall bzw. die Spannungsanhebung bis zum Endverbraucher im zulässigen $\pm 10\%$ -Band zu halten, ist auch die Übertragungsleitungslänge in Mittelspannungsnetzen beschränkt. Die Ausdehnung eines Mittelspannungsnetzes überschreitet selten eine Länge von 200km.

Um das Betriebsverhalten detailliert betrachten zu können, muss näher auf den Wellenwiderstand eingegangen werden. Anders als bei Freileitungen, kann bei Energiekabel der ohmsche Längswiderstand nicht vernachlässigt werden. Der Wellenwiderstand berechnet sich aus dem Ersatzschaltbild zu:

$$Z_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'_b}{j\omega C'_b}}$$

Der Einfluss der imaginären Komponente liegt bei 4%, daher ist in erster Näherung der reelle Wellenwiderstand zulässig. Der Wellenwiderstand bei Energiekabel ist kleiner als bei Freileitungen, wodurch die natürliche Leistung $P_{nat} = U_n^2 / Z_w$ größer ist. Diese rückt bei Energiekabel näher an die querschnittsabhängige, thermisch zulässige Leistung heran oder übersteigt diese [4].

Energiekabel mit hinreichender Länge besitzen eine große Querkapazität. Für Oberschwingungen wirkt diese wie eine niederohmige Reaktanz, über die sich Oberschwingungsströme schließen können. Dadurch verringert sich die gegenseitige Belastung zwischen Verbraucher und Einspeiser. Aus ähnlichen Gründen begrenzen Energiekabel Überspannungen, die aufgrund ihrer hohen Anstiegszeiten und kurzen Einwirkdauer sehr hochfrequent sind. Energiekabel werden daher vor allem zur Versorgung wichtiger Netzteile eingesetzt [4].

3.6.2 Nachbildung im Simulationsprogramm

In Mittelspannungsnetzen treten Energiekabel mit unterschiedlichen Bauweisen (Blei-, Gürtel-, Mantelkabel, etc.) auf. In den letzten Jahren werden allerdings vermehrt VPE isolierte Kabel eingesetzt, daher wurde auch für die numerische Modellbildung der Energiekabel die geometrischen Abmessungen eines typischen Energiekabels vom Typ NA2XS2Y 150/25 10kV herangezogen.

Die Werte für die Leitfähigkeit des Innenleiters und des Schirms, sowie der Wert der Permeabilität für die Isolierung, wurden dem Handbuch Elektrotechnik [10] entnommen. Der Wert der Dielektrizitätskonstante ϵ_r für die Isolierung stammt aus der Habilitation: Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen der Energieversorgung [1]. Abbildung 3.18 gibt einen Überblick über Abmessungen eines Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die Modellbildung im numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV.

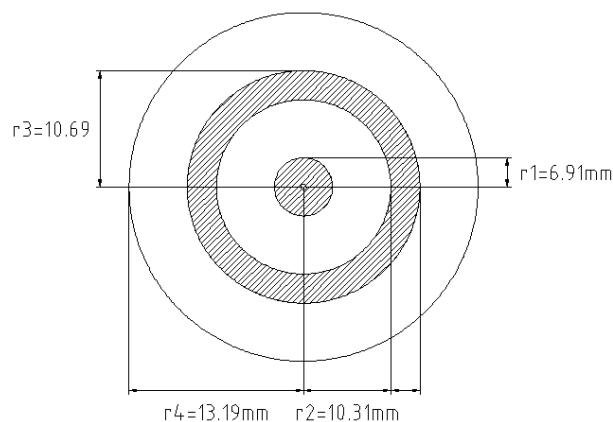


Abbildung 3.18: Abmessungen eines Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die Modellbildung im numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV [15]

Die diversen Radien wurden wie folgt berechnet:

$$150\text{mm}^2 = \pi \cdot r_1^2$$

$$r_2 = r_1 + \text{Isolationsdicke}$$

$$25\text{mm}^2 = \left[(r_2 + r_2)^2 - r_2^2 \right] \cdot \pi$$

$$r_3 = r_2 + x$$

$$r_4 = r_3 + \text{Manteldicke}$$

Die Werte für Isolationsdicke und Manteldicke wurden diversen Tabellen [15] entnommen. Zur Berücksichtigung der Verlegung des Energiekabels müssen die Positionen der einzelnen Leiter bei der numerischen Modellbildung in EMTP-RV berücksichtigt werden. Abbildung 3.19 zeigt die Position der einzelnen Teilleiter des im Dreieck verlegten Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die numerische Modellbildung in EMTP-RV.

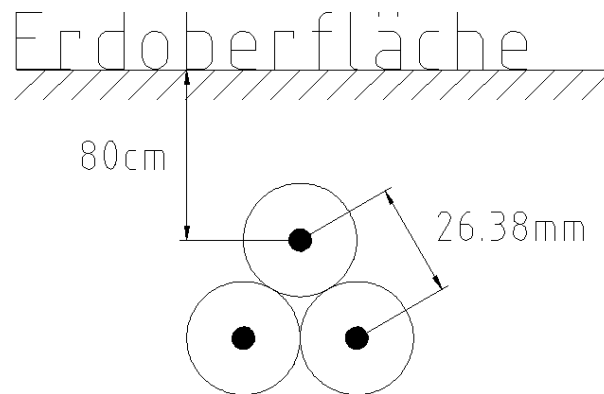


Abbildung 3.19: Position der einzelnen Teilleiter des im Dreieck verlegten Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die numerische Modellbildung in EMTP-RV

Tabelle 3.3 gibt eine Übersicht über die eingestellten Koordinaten für die numerische Modellbildung zur Positionierung der Teilleiter des Energiekabels in EMTP-RV.

Tabelle 3.3: Koordinaten der Teilleiter zur Positionierung des Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die numerische Modellbildung in EMTP-RV

Leiter	x-Koordinate in m	y-Koordinate in m
Leiter 1	0	0.8
Leiter 2	0.01319	0.822846
Leiter 3	-0.01319	0.822846

Wie für die Freileitung wurde auch für das Energiekabel ein Erdrückleitungswiderstand von 100Ω eingegeben.

3.7 Überspannungsableiter

3.7.1 Allgemeiner Aufbau und Funktion von Überspannungsableitern

Überspannungsableiter werden zum Schutz vor Blitz- und hohen Schaltüberspannungen eingesetzt. Sie dienen dazu, transiente Überspannungen abzuleiten, um eine Beschädigung der Isolation zu vermeiden. Ihre Schutzkennwerte müssen mit den Festigkeitswerten der jeweiligen Isolation koordiniert werden. Das Ansprechen des Ableiters sollte möglichst "weich" erfolgen, um eine zusätzliche transiente Spannungsbelastung zu vermeiden [1] [11].

Die Schutzpegel für Blitz- und Schaltstoßspannungen müssen weit unter der Bemessungsspannung der zu schützenden Isolation liegen [11].

Es gibt unterschiedliche Einrichtungen um transiente Spannungen zu begrenzen: Schutzfunkenstrecken, Ventil- oder Funkenstreckenableiter und Metalloxidableiter [1] [11]. In Mittelspannungsnetzen werden in den letzten Jahren meistens Metalloxidableiter verwendet. Aus diesem Grund wurde dieser auch für das numerische Berechnungsmodell ausgewählt. Jedoch sind Schutzfunkenstrecken und Ventilableiter noch als Altbestand in Mittelspannungsnetzen vorhanden.

3.7.2 Nachbildung im Simulationprogramm

Zur Nachbildung des Metalloxid-Ableiters wurde das in Abbildung 3.20 dargestellte Modell verwendet [17]. Dieses Modell berücksichtigt das kapazitive Verhalten des Ableiters.

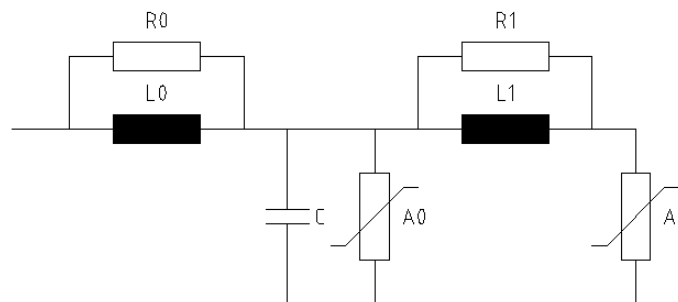


Abbildung 3.20: Ersatzschaltbild des Metalloxidableiters für die numerische Modellbildung in EMTP-RV [17]

Die U/I-Charakteristik des Ableiters wird durch zwei, durch einen R-L-Filter getrennte, nichtlineare Widerstände nachgebildet. Bei niederfrequenten Wellen ist die Impedanz des Filters sehr klein und die beiden nichtlinearen Widerstände sind praktisch direkt parallel miteinander verbunden. Bei hochfrequenten Wellen kommt es aufgrund des Filters zu einer Stromaufteilung zwischen den beiden Widerständen A_0 und A_1 [17].

Nimmt die Stirnzeit der Welle ab, steigt der Strom in A_0 an. Der Widerstand von A_0 ist größer als jener von A_1 . Das bedeutet, je schneller die einlaufende Stromwelle ist, umso höher ist

auch die Restspannung, da die hochfrequente Stromwelle durch die Induktivität L_1 stärker in Richtung des Widerstandes A_0 , als in Richtung des Widerstandes A_1 , gedrängt wird [17].

Die Induktivität L_0 berücksichtigt das magnetische Feld in unmittelbarer Umgebung des Ableiters. Um die numerische Berechnung zu stabilisieren wird parallel zu L_0 ein Widerstand R_0 geschaltet. Die Kapazität C repräsentiert die Kapazität zwischen den Endpunkten des Ableiters [17].

Die einzelnen Elemente des in Abbildung 3.20 dargestellten Ersatzschaltbildes berechnen sich zu: [17]

$$L_1 = \frac{15 \cdot d}{n} \quad [\mu H]$$

$$R_1 = \frac{65 \cdot d}{n} \quad [\Omega]$$

$$L_0 = \frac{0.2 \cdot d}{n} \quad [\mu H]$$

$$R_0 = \frac{100 \cdot d}{n} \quad [\Omega]$$

$$C = \frac{100 \cdot n}{d} \quad [pF]$$

d... Höhe des Ableiters in Meter n... Anzahl der parallelen Metalloxid-Scheiben

Zum Schutz des nachgebildeten 10-kV-Netzes wurde ein Metalloxid-Ableiter der Type SIEMENS 3EP5 015 1PC21-1 gewählt. Für die 110-kV-Seite des Umspanners wurde die Type SIEMENS 3EP4 108 1PE21-1 bestimmt. Tabelle 3.4 zeigt die Nenndaten des jeweiligen Überspannungsableiters [16]

Tabelle 3.4: Nenndaten der für die numerische Modellbildung verwendeten Überspannungsableiter [16]

	Ableiter Type	
	3EP5	3EP4
Nennspannung U_n	12kV	123kV
Dauerspannung U_c	12kV	86kV
Bemessungsspannung U_r	15kV	108kV
Restspannung U_{res} bei 10kA	39.8kV	286kV
Höhe d	0.368m	1.315m
Anzahl paralleler Systeme n	1	1

Dadurch berechnen sich die Werte für die einzelnen Komponenten des numerischen Überspannungsableitermodells, wie in Tabelle 3.5 angegeben.

Tabelle 3.5: Berechnete Werte für das numerische Berechnungsmodell der Überspannungsableiter in EMTP-RV

	3EP5	3EP4
L_0	73.6nH	263nH
R_0	36.8 Ω	131.5 Ω
L_1	5.52 μ H	19.725 μ H
R_1 bei 10kA	23.92 Ω	85.475 Ω
C	271.730pF	76.0456pF

Für die beiden nichtlinearen Widerstände A_0 und A_1 wurde das Nonlinear Resistance Element des numerischen Berechnungsprogramms EMTP-RV verwendet. Abbildung 3.21 zeigt die berechnete U/I-Charakteristik der beiden nichtlinearen Widerstände für die numerischen Überspannungsableitermodelle in EMTP-RV.

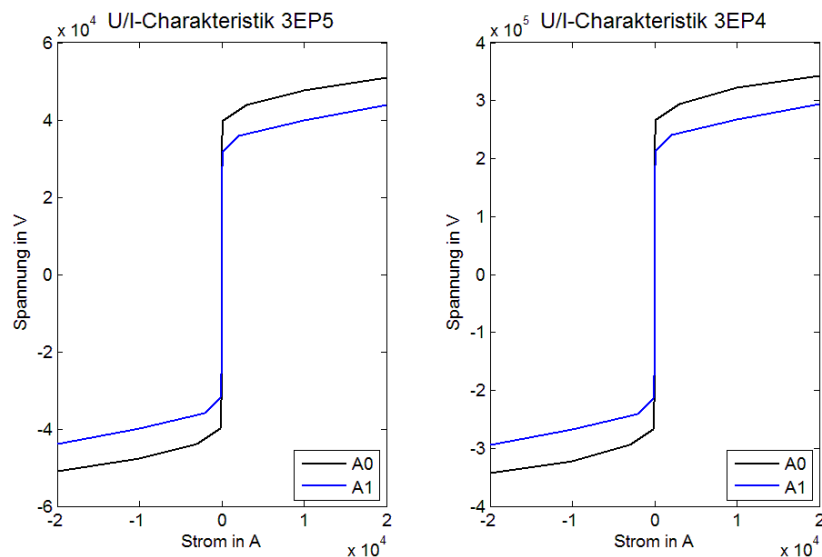


Abbildung 3.21: U/I-Charakteristik der nichtlinearen Widerstände für das numerische Berechnungsmodell der Überspannungsableiter in EMTP-RV

3.7.3 Plausibilitätsüberprüfung des Überspannungsableitermodells

Für das in Punkt 3.7.2 beschriebene Modell können sowohl das ZnO-Arrestor Element, als auch das Nonlinear Resistance des numerischen Berechnungsprogramms EMTP-RV Element verwendet werden. Um eine Entscheidung zwischen diesen beiden Elementen treffen zu können wurde eine Vergleichsanalyse durchgeführt.

Die beiden Elemente weisen folgende Eigenschaften auf:

- **ZnO-Arrestor:** Die U/I-Charakteristik kann in diesem Element direkt eingegeben werden. Durch die Spannung V_{ref} wird ein Skalierungsfaktor vorgegeben, um einen nu-

merischen "Overflow" zu vermeiden. Für die "Steady-State Solution" wird der "ZnO-Arrestor" als offen angesehen, außer es wird ein Widerstand R_{ss} für die Berechnung vordefiniert. Dieser hat nur bei der Berechnung der "Steady-State Solution" einen Einfluss, indem er eine Verbindung zum ZnO-Arrestor herstellt. Für die "Time-Domain Solution" wird die Verbindung gelöst.

- **Nonlinear Resistance:** Auch hier kann die U/I-Charakteristik direkt eingegeben werden. Dieses Element beschreibt einen einfachen nichtlinearen Widerstand. Durch die Spannung V_{start} kann ein Wert definiert werden, ab welchem der Widerstand erst mit dem Anschlusspunkt verbunden wird.

Die Einstellwerte der nichtlinearen Widerstände wurden über die Restspannung U_{res} gemäß der Kennlinie Abbildung 3.22 festgelegt. Diese Kennlinie beschreibt die U/I-Charakteristik der beiden Modellableiter A_0 und A_1 für einen Stoßstrom der Form $8/20\mu s$ mit 10kA [17].

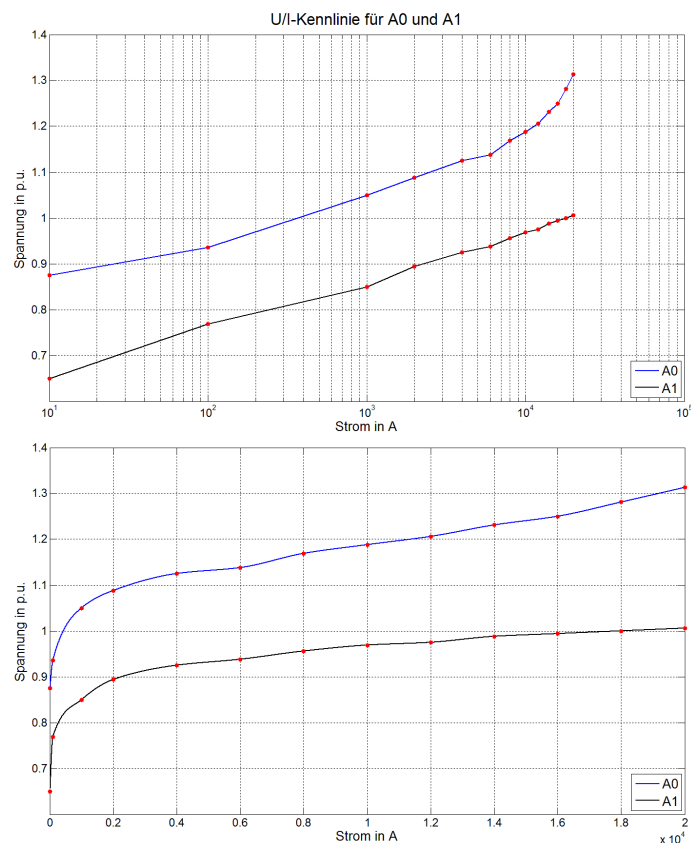


Abbildung 3.22: U/I-Charakteristik der nichtlinearen Widerstände A_0 und A_1 des Überspannungsableitermodells für einen Stoßstrom von 10kA $8/20\mu s$; Oben: Darstellung logarithmisch; Unten: Darstellung linear [17]

Für die Vergleichsanalyse wurde ein eigenes Versuchsnetz gemäß Abbildung 3.23 aufgebaut.

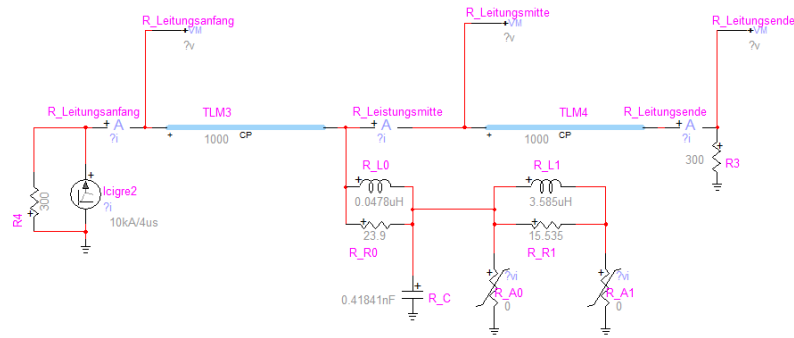


Abbildung 3.23: Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für die Vergleichsanalyse der Überspannungsableitermodelle

Der Aufbau besteht aus zwei 1 Kilometer langen Leitungselementen mit einem Überspannungsableiter in der Mitte. Die Leitungselemente wurden mit einem idealen Widerstand abgeschlossen um Reflektionen am Anfang und am Ende zu vermeiden. Für den angelegten Stoßstrom wurde die Wellenform $4/10\mu\text{s}$ mit einem Scheitelwert von 10kA gewählt, um das Ergebnis einer Vergleichsmessung der Firma ABB [19] gegenüberstellen zu können. Aus diesem Grund wurde auch für die Vergleichsanalyse, ein Metalloxidableiter der Firma ABB (ABB POLIM-K) verwendet.

Die Nenndaten des nachgebildet Überspannungsableiters werden in Tabelle 3.6 aufgelistet.

Tabelle 3.6: Nenndaten des für die Vergleichsanalyse der Überspannungsableitermodelle verwendeten Metalloxidableiters der Type ABB POLIM-K [18]

Dauerspannung U_c	15kV
Bemessungsspannung U_r	18.8kV
Restspannung U_{res} bei 10kA	50kV
Höhe d	0.239m
Anzahl paralleler Systeme n	1

Abbildung 3.24 zeigt das numerische Berechnungsergebnis der Vergleichsanalyse.

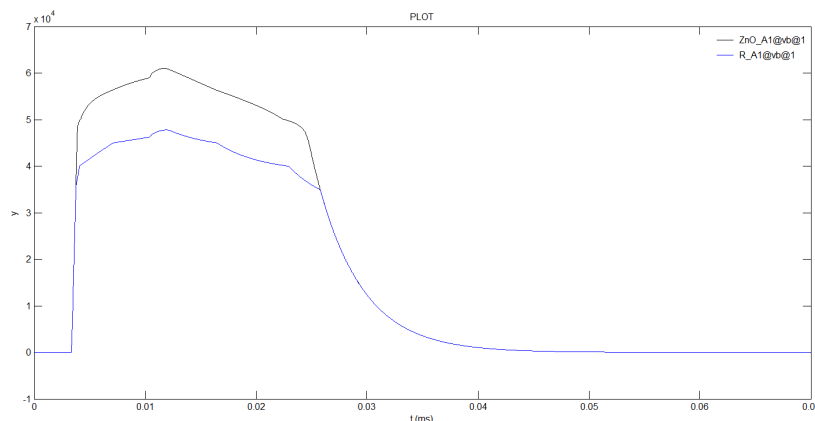


Abbildung 3.24: Numerisches Berechnungsergebnis der Restspannungen über den Ableiter A_1 jeweils für "ZnO-Arrestor" und "Nonlinear Resistor" bei $10\text{kA } 4/10\mu\text{s}$

Es ist zu erkennen, dass die Nachbildung des Überspannungsableitermodells mit "ZnO-Arrestor" Elementen zu einer signifikant höheren Restspannung, als in den Nenndaten angegeben, führt. Das "Nonlinear Resistor" Element hingegen begrenzt die auftretende Überspannung auf den vom Hersteller angegebenen Wert und wurde daher für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Für die Verifizierung des Ableitermodells wurde ein Überspannungsableiter der Firma ABB Type POLIM-K verwendet, da für diesen Vergleichsmessungen zur Verfügung standen. Für die fertigen Ableitermodelle, welche für die weiteren numerischen Berechnungen verwendet wurden, wurden Ableiter der Firma SIEMENS der Typen 3EP5 und 3EP4 verwendet.

3.8 Transformatoren

3.8.1 Frequenzgänge und Eigenfrequenzspektren

Einzelne parallel geschaltete Windungen einer Wicklung, bzw. einzelne Scheibenspulen, sind über ein magnetisches Feld miteinander verbunden. Jedes dieser Segmente besitzt eine Eigeninduktivität L und eine Gegeninduktivität M zu den anderen Segmenten [4].

Weiters stellen die einzelnen Windungen bzw. Scheiben, Elektroden dar, zwischen denen sich Kapazitäten bilden. Jeder Leiter ist daher auch durch ein elektrisches Feld miteinander gekoppelt. Die Größe dieser Teilkapazität ist von der Geometrie der Leiter und den Eigenschaften des Feldraums abhängig, nicht jedoch von den elektrischen Größen, Strom und Spannung [4].

Die Kapazitäten zwischen den Leitern und den leitfähigen geerdeten Konstruktionsteilen (z.B. Kessel) werden Erdkapazitäten genannt. Teilkapazitäten zwischen den einzelnen Windungen werden als Wicklungskapazitäten bezeichnet. Koppelkapazitäten sind Teilkapazitäten zwischen der Ober- und Unterspannungsseite eines Transformators [4].

Zur Nachbildung eines Zweiwicklungstransformators kann daher ein zweitoriges Reaktanznetzwerk herangezogen werden, welches bei zunehmender Genauigkeit immer mehr Eigenfrequenzen des Transformators erfasst. Bei einer solchen Nachbildung ist auch auf die primär- bzw. sekundärseitige Beschaltung des Transformators Rücksicht zu nehmen, da diese sowohl parallele, als auch serielle Schwingkreise darstellen können. Ein weiterer Einflussfaktor ist hierbei die Art und der Entstehungsort des Fehlers, welcher für die Zustandsänderung verantwortlich ist, die zum Einschwingvorgang führt [4].

Alle diese Einflussfaktoren beeinflussen die Ausgleichsströme und -spannungen im Umspanner, da sie unterschiedliche Eigenfrequenzspektren einprägen. Ihr Einfluss auf die unteren Frequenzspektren ist hierbei sehr viel nachhaltiger als auf die oberen [4].

Durch die geringen Wirkverluste eines Transformators runden sich die Pole und Nullstellen eines reinen Reaktanznetzwerkes ab und treten im Frequenzspektrum als Minima und Maxima auf [4]. Abbildung 3.25 zeigt den gemessenen Frequenzgang der Primäradmittanz auf der 110-kV-Seite eines 220/110/10-kV-Dreiwicklungstransformators.

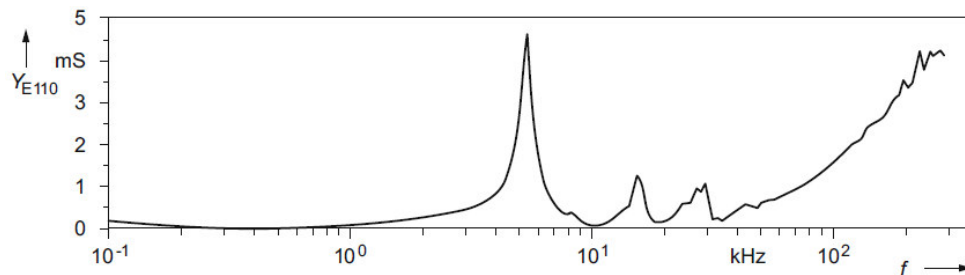


Abbildung 3.25: Gemessener Frequenzgang der Primäradmittanz auf der 110-kV-Seite eines 220/110/10-kV-Dreiwicklungstransformators mit einer Bemessungsleistung von 100MVA [4]

Die hier abgebildeten Pole liegen im Bereich von 5kHz bis 200kHz. In der Realität treten auch noch Eigenfrequenzen bis in den MHz-Bereich auf. Diese sind allerdings aufgrund der größer werdenden Wirbelstromverluste schwächer ausgeprägt [4].

Für untere Frequenzbereiche pendelt der Eingangsstrom zwischen induktiv und kapazitiv, während dieser für hohe Frequenzbereiche einen hauptsächlich kapazitiven Charakter annimmt. Die kapazitive Reaktanz $1/\omega_c$ wird in diesem Fall immer leitfähiger und führt anstelle der induktiven Reaktanz ω_l den Großteil des Stroms. Die internen Kapazitäten haben auch bei schnellen, hochfrequenten Überspannungen einen entscheidenden Einfluss. Bei einem 220/110-kV-Umspanner wird beispielsweise 1/3 der Überspannung von der Primär- auf die Sekundärseite übertragen [4].

3.8.2 Ausgleichsverhalten von Transformatoren

Zum besseren Verständnis wird zunächst der niederfrequente Bereich betrachtet, in dem alle Windungen einer Wicklung vom gleichen Strom durchflossen werden. Das dazugehörige

Magnetfeld kann in ein Haupt- und Streufeld aufgeteilt werden. Während das Hauptfeld über den Hauptschenkel verläuft und sich schließlich über den Rückschlussschenkel schließt, treten entlang des oberen Jochs Feldlinien aus dem Eisenkern aus und verlaufen in Luft, annähernd parallel zum Schenkel und schließen sich über das untere Joch und den Hauptschenkel. Abbildung 3.26 zeigt die Magnetfeldverteilung im Eisenkern.

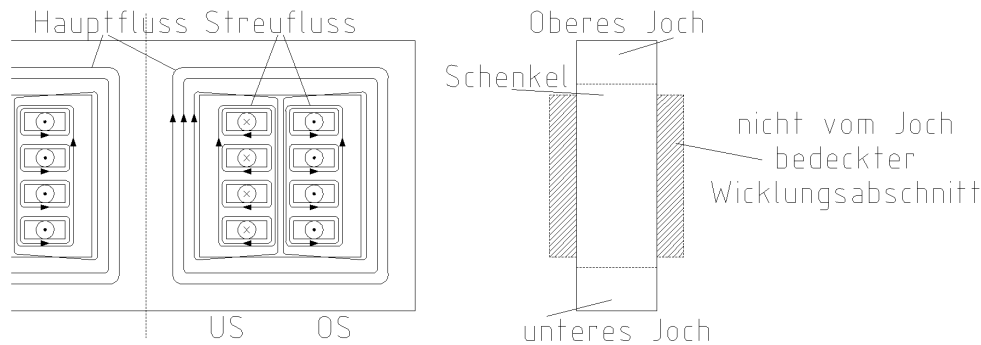


Abbildung 3.26: Links: Magnetfeldverteilung im Eisenkern eines Transformators; Rechts: Seitenansicht des Eisenkerns eines Transformators [4]

Ein Teil der Wicklungen wird nicht vom Joch bedeckt. Dieser Teil ist ebenfalls mit dem Feld verknüpft, welches annähernd parallel zum Hauptschenkel verläuft, aber über Luft geschlossen wird. Die Querfelder der einzelnen Windungen kompensieren sich nicht mehr, wodurch eine deutliche Querkomponente auftritt. Dieser Feldanteil durchsetzt nur eine der Wicklungen oder nur einzelne Bereiche und wird als Streufeld bezeichnet [4].

Während das Hauptfeld für die Energieübertragung verantwortlich ist, kann das Streufeld keine Energie übertragen und verursacht intern einen induktiven Spannungsabfall. Die dazugehörige Induktivität wird daher als Streuinduktivität bezeichnet und beschreibt das Verhalten des Transformators bis in den Bereich einiger Kilohertz. Diese hängt von den Windungszahlen und dem radialen Abstand zwischen den Wicklungen (Streukanal) ab [4].

In der Nähe einer Eigenfrequenz ist der Einfluss der Kapazität auf das Verhalten des Transformators deutlich erkennbar. Das Feld wird stärker zum Eisenrand gedrängt. Die Ströme der Windungen einer Spule beginnen aus den Windungen ein- bzw. auszutreten und fließen über die kleiner werdenden kapazitiven Reaktanzen zu bzw. ab. Die Windungen einer Wicklung führen nicht mehr den selben Strom und es ergeben sich andere Feldverläufe. Diese Feldverteilung wird als "Eigenform" bezeichnet [4].

Die Oberspannungswicklung spaltet sich in zwei Teilspulen auf, welche vom Strom gegenseitig durchflossen werden. Dieser fließt auf die Mitte zu, wo er von den dort auftretenden Erdkapazitäten abgeleitet wird. Das daraus resultierende Magnetfeld verläuft ausschließlich in Luft und der Hauptfluss im Eisen verschwindet. Es entsteht eine Art Serienresonanz, wodurch erhöhte Spannungsabfälle an den Teilspulen entstehen, da diese einen kurzgeschlossenen Übertrager darstellen, der sehr große Ströme verursacht. Dieses Verhalten tritt bei allen Eigenfrequenzen auf, jedoch wird mit zunehmender Ordnungszahl der Wicklungsbereich, welcher zusammenhängend reagiert, immer kleiner und das dazugehörige Magnetfeld kompensiert sich immer weitgehender [4].

Bei einer auftretenden Überspannung setzt sich der resultierende Feldverlauf im Umspanner aus den Eigenformen zusammen, deren Eigenfrequenzen im Spektrum des verursachenden Impulses enthalten sind. Die Ausprägung des Feldes einer Eigenform hängt von der Höhe der Amplitude des Impulses der dazugehörigen Eigenfrequenz ab. Der entstehende Feldverlauf bei kurzzeitigen Impulsen führt also zu einem stärkeren Streufeld in Querrichtung und dadurch zu höheren Wirbelstromverlusten. Für den niederfrequenten Bereich bis zu einigen Kilohertz ist nur das ohmsch-induktive Verhalten zu berücksichtigen [4].

3.8.3 Niederfrequentes Ersatzschaltbild

Im ersten Schritt werden die Wicklungen als verlustfrei angenommen und der stationäre Betriebszustand wird vorausgesetzt. Dadurch ergibt sich die Systemgleichung mit dazugehörigem Ersatzschaltbild zu [4]:

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1 - j\omega M \cdot \underline{I}_2$$

$$\underline{U}_2 = -j\omega L_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega M \cdot \underline{I}_1$$

Abbildung 3.27 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild für den Transformator.

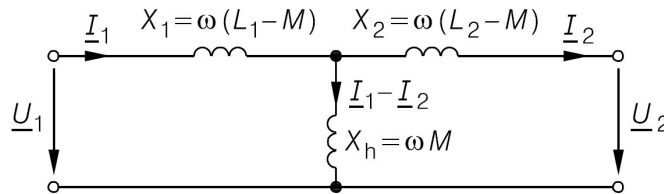


Abbildung 3.27: Vereinfachtes T-Ersatzschaltbild für den Transformator [4]

Bei Umspannern mit nur einem Eisenkern kann die Annahme getroffen werden, dass die Streufelder nur axial ausgerichtet und mit jeder Windung in gleicher Weise verbunden sind. Physikalisch lässt sich dieses Ersatzschaltbild allerdings nicht interpretieren, nur wenn der Spezialfall $w_1 = w_2$ eintritt, wobei w für die Windungszahl steht [4].

Durch Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses $\dot{u} = w_1/w_2$ kann für Umspanner mit ungleichen Windungszahlen das Ersatzschaltbild auf den Spezialfall zurückgeführt werden. Mit $M = X_h$ (die Hauptreaktanz) und $X_1 \sim (L_1 - M)$ bzw. $X_2 \sim (L_2 - M)$ (für die Streureaktanz X_σ), ergibt sich das Ersatzschaltbild entsprechend Abbildung 3.28: [4]

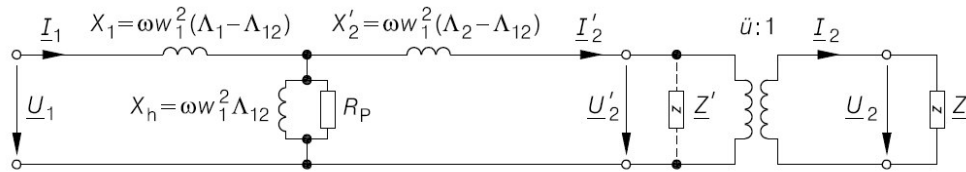


Abbildung 3.28: Ersatzschaltbild des Transformators mit Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses [4]

\underline{Z} stellt die transformierte Last dar mit [4]:

$$\underline{Z}' = \frac{\underline{U}'_2}{\underline{I}'_2} = \ddot{u}^2 \cdot \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \ddot{u}^2 \cdot \underline{Z}$$

Die Induktivitäten lassen sich über die Windungszahlen w und den Leitwert Λ wie folgt berechnen [4]:

$$L_1 = w_1^2 \cdot \Lambda_1$$

$$L_2 = w_2^2 \cdot \Lambda_2$$

$$M = w_1 w_2 \cdot \Lambda_{12}$$

Dadurch ergeben sich die Reaktanzen zu [4]:

$$X_1 = \omega \cdot w_1^2 (\Lambda_1 - \Lambda_{12})$$

$$X_2' = \omega \cdot w_1^2 (\Lambda_2 - \Lambda_{12})$$

$$X_h = \omega \cdot w_1^2 \cdot \Lambda_{12}$$

Ideale Transformatoren weisen eine unendliche Hauptinduktivität $\Lambda_{12} \rightarrow \infty$ auf und sind verlust- und streuungsfrei. In diesem Fall ist \ddot{u} identisch mit dem Quotienten der Ober- und Unterspannung. Bei realen Transformatoren tritt dieser Fall dann ein, wenn $\Lambda_1 \approx \Lambda_{12}$ und $\underline{I}_2 = 0$, also im Leerlauf [4].

Dieses Ersatzschaltbild gilt für niederfrequente Ausgleichsvorgänge. Die Größen L_1 , L_2 und M sind in diesem Fall allerdings nicht stromabhängig. Messungen zeigen, dass die Streuinduktivitäten praktisch stromunabhängig sind, während die Hauptinduktivität eine starke Stromabhängigkeit aufweist und das magnetische Feld im Eisen beschreibt. Die Hysterese- und Wirbelstromverluste im Eisenkern werden durch den parallel zur Hauptinduktivität geschalteten Widerstand R_p berücksichtigt [4].

3.8.4 Die Hysterese

Wie bereits im Punkt 2.2.1 erwähnt, kommt es beim Einschalten von leerlaufenden Transformatoren zu einem sogenannten Einschaltstoßstrom oder "Inrush". Dieser Vorgang kann mit der Hystereseckennlinie des Transformators erklärt werden [7].

Weichmagnetische Eisenbleche wie sie in Umspannern verwendet werden, treten als stromabhängige Induktivitäten und Gegeninduktivitäten in Erscheinung. Das Verhalten des stromabhängigen Flusses in diesen Materialien wird durch Sättigungserscheinungen und Magnetisierungsverluste geprägt, welche durch eine Hystereseschleife beschrieben werden können. Die Umkehrpunkte dieser Schleife werden durch die Magnetisierungskennlinie festgelegt [4]. Abbildung 3.29 zeigt die Hystereseckennlinie.

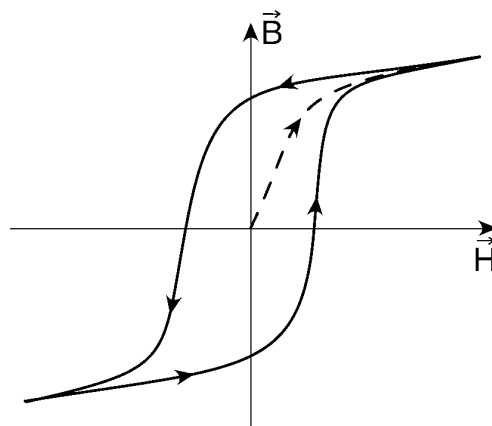


Abbildung 3.29: Hystereseckennlinie [20]

Wenn das Eisen zuerst entmagnetisiert wird, wird nach dem Einschalten eine Neukurve durchlaufen, die sich weitgehend nach der Magnetisierungskennlinie orientiert. Sobald sich das Vorzeichen des Stroms ändert, wird eine von der Magnetisierungskennlinie abweichende Abwärtskurve gebildet. Bei erneutem Vorzeichenwechsel wiederholt sich dieser Vorgang. Dieses Verhalten wird durch die Weißschen Bezirke im Eisen verursacht. Es ergibt sich der Zusammenhang [4]:

$$B = \mu(i) \cdot H \quad \text{bzw.} \quad \psi = L(\mu(i)) \cdot i$$

Direkt nach einem Umkehrpunkt ist die Anfangssteigung der neuen Trajektorie, die auch als reversible Permeabilität μ_{rev} bezeichnet wird, nur vom Fluss ψ und nicht vom Strom i abhängig. Andersfrequente Ströme mit kleinen Amplituden (Oberschwingungen), machen sich als kleine Unterschleifen im Kennlinienverlauf bemerkbar [4].

Wird der Transformator vor dem Einschalten nicht entmagnetisiert, ist im Kern noch ein Remanenzfluss ψ_{rem} vorhanden. Für den Augenblick des Zuschaltens gilt dann die folgende Bedingung [4]:

$$\psi(t=0) = \psi_{rem}$$

Erfolgt das Zuschalten im Spannungsnulldurchgang, ergibt sich durch die Integration des Induktionsgesetzes

$$\frac{d\psi}{dt} = U_0 \cdot \sin\omega t$$

folgender Flussverlauf im Kern:

$$\psi(t) = -\frac{U_0}{\omega} \cdot \cos\omega t + \psi_0$$

ψ_0 lässt sich durch die Anfangsbedingung ermitteln. Für den Zeitpunkt $t = 0$ ergibt sich dann:

$$\psi_{rem} = -\frac{U_0}{\omega} + \psi_0$$

Dadurch gilt für den Flussverlauf [4]:

$$\psi(t) = -\frac{U_0}{\omega} \cdot \cos\omega t + \left(\frac{U_0}{\omega} + \psi_{rem} \right)$$

In der darauf folgenden Halbperiode steigt der Fluss auf den Wert $2 \cdot U_0/\omega + \psi_{rem}$ an. Das Kennlinienfeld steuert weit in den Sättigungsbereich aus, dadurch nimmt der Strom sehr hohe Werte an. Aufgrund der Hystereseverluste, klingt dieser allerdings auf stationäre Werte ab [4].

3.8.5 Nachbildung im Simulationsprogramm

Für das numerische Berechnungsmodell wurden die in Tabelle 3.7 angegebenen Transformatoren nachgebildet:

Tabelle 3.7: Nenndaten der für das numerische Berechnungsmodell verwendeten Transformatoren [21]

	Transformator 1	Transformator 2
Nennscheinleistung S_n	12MVA	250kVA
Nennspannung primär U_{n1}	110kV	10kV
Nennspannung sekundär U_{n2}	10kV	400V
Schaltgruppe	YNyn0	Dyn5
Kurzschlussspannung u_k	10%	6%
ohmsche Kurzschlussspannung u_r	0.6%	1.06%
Eisenverluste P_{fe}	12kW	2.5kW
Leerlaufstrom i_0	0.4%	0.2%

In Abbildung 3.30 wird der innere Aufbau des numerischen Berechnungsmodells für den Transformator 1 dargestellt.

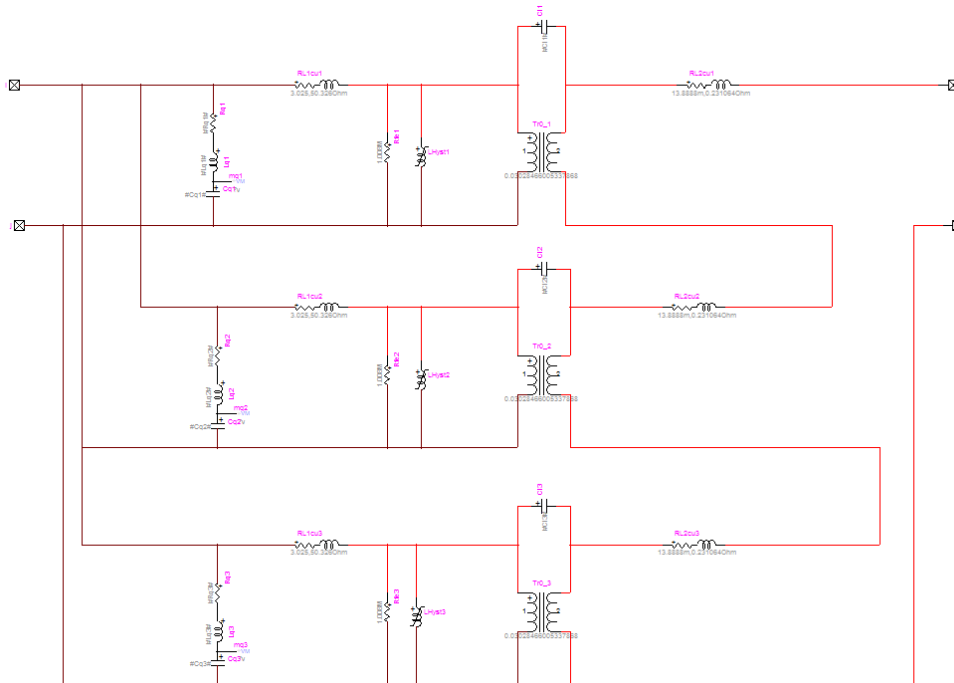


Abbildung 3.30: Detailausschnitt Resonator 1 des numerischen Berechnungsmodells für den Transformator 1 in EMTP-RV

- Die **Kurzschlussverluste** eines Transformators haben einen entscheidenden Einfluss auf sein Verhalten im Kurzschlussfall und wurde, wie in Punkt 3.8.5 beschrieben, über das Transformator-Ersatzschaltbild berechnet.
- Die **Hysterese** beschreibt das Sättigungsverhalten des Eisenkerns und hat Einfluss auf den Einschaltstoßstrom und das Verhalten im Fehlerfall. Diese wurde sowohl als "Hysteretic Reactor", als auch als stromabhängige Induktivität nachgebildet um die Unterschiede zu dokumentieren und das geeignetste Modell zu finden.
- Um auch **hochfrequente Vorgänge** zu berücksichtigen, wurden drei parallele Schwingkreise eingebaut und die Eigenfrequenzen des Transformators wurden bei 100kHz, 300kHz und 1MHz festgelegt.

Bestimmung der Komponenten des Ersatzschaltbildes

Um die Kupfer- und Eisenverluste des Transformators modellieren zu können, müssen die Komponenten des Ersatzschaltbildes bestimmt werden.

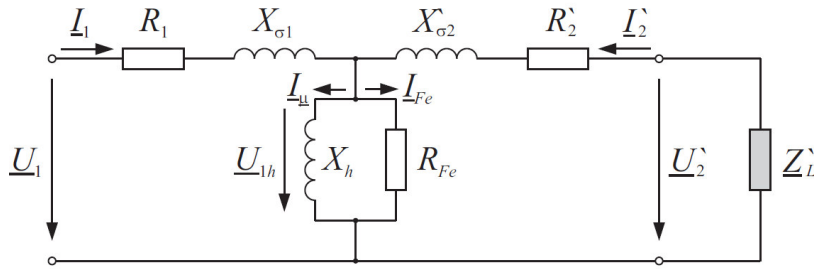


Abbildung 3.31: Ersatzschaltbild des Transformators zur Bestimmung der Komponenten für das numerische Berechnungsmodell in EMTP-RV [22]

Die einzelnen Komponenten des Ersatzschaltbildes können über die Kurzschluss- und Leerlaufparameter des Transformators bestimmt werden.

Mit

$$\ddot{u} = \frac{U_{1,str}}{U_{2,str}}$$

$$U'_2 = \ddot{u} \cdot U_2 \quad ; \quad I_2 = \ddot{u} \cdot I'_2$$

$$R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad ; \quad X'_2 = \ddot{u}^2 \cdot X_2$$

berechnen sich die Kurzschlussparameter wie folgt:

$$P_k = \sqrt{3} \cdot U_k \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_k \quad ; \quad P_k = \frac{S_n}{100\%} \cdot u_r$$

$$R_1 + R'_2 = \frac{U_{k,str}}{I'_2} \cdot \cos \varphi_k \quad ; \quad X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = \frac{U_{k,str}}{I'_2} \cdot \sin \varphi_k$$

$$R_1 = \frac{R_1 + R'_2}{2} \quad ; \quad X_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}}{2}$$

Über den Leerlaufversuch lässt sich der Widerstand R_{fe} ermitteln.

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_{1,str}^2}{P_{fe}}$$

Aufgrund der sekundärseitigen Verschaltung des Resonators, muss ein neues Übersetzungsverhältnis definiert werden, auf welches auch die sekundärseitigen Induktivitäten und Widerstände bezogen werden müssen. Durch den Einbau von drei Schwingkreisen, müssen auch drei Übersetzer verwendet werden, wodurch die Spannung auf der Sekundärseite der einzelnen Übersetzer durch den Faktor $1/x$ angepasst werden muss, wobei x die Anzahl der Schwingkreise darstellt. Somit addieren sich die drei Sekundärspannungen der Übersetzer zur gewünschten Ausgangsspannung U_{n2} .

Das neue Übersetzungsverhältnis berechnet sich zu:

$$\ddot{u} = \frac{U_{1,str}}{U_{2,str}} \cdot x$$

Der sekundärseitige Widerstand und die sekundärseitige Streuinduktivität ergeben sich wie folgt:

$$R'_2 = \frac{U_{k,str}}{I'_2} \cdot \cos\varphi_k - R_1 \quad \text{mit} \quad R_2 = \frac{R'_2}{\ddot{u}^2}$$

$$X'_{\sigma 2} = \frac{U_{k,str}}{I'_2} \cdot \sin\varphi_k - X_{\sigma 1} \quad \text{mit} \quad X_{\sigma 2} = \frac{X'_{\sigma 2}}{\ddot{u}^2}$$

Erweiterung des Modells um die Hysterese

Die Hysterese wurde mit einer nichtlinearen Induktivität nachgebildet. Für die Berechnung der Hysteresekennlinie wurde zuerst der Nennfluss berechnet. Es wird angenommen, dass sich der Nennfluss genau für den Leerlaufstrom einstellt. Die Schleife soll bei 130% des Nennflusses in den Sättigungsbereich wechseln. Der Nennfluss ergibt sich über die Gleichung [23] [24] [25]:

$$\phi_n = \frac{U_n}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt{2}$$

Dadurch ergeben sich für die Hysterese der beiden Transformatoren Kennlinienverläufe gemäß Abbildung 3.32.

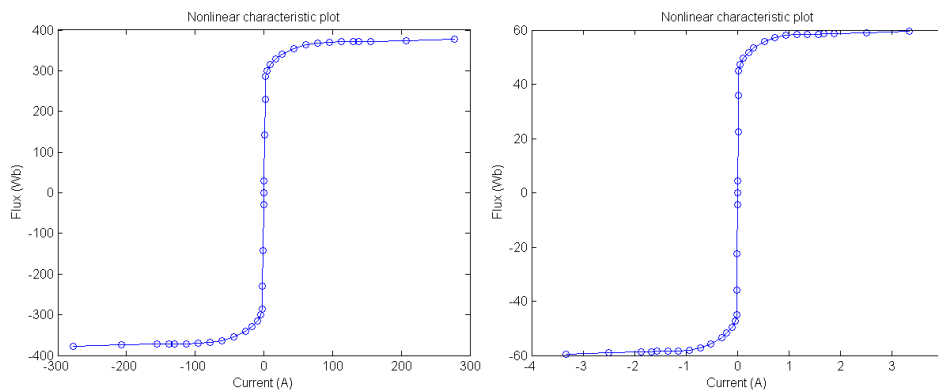


Abbildung 3.32: Hysteresekennlinie der numerischen Berechnungsmodelle für die Transformatoren; Links: Transformator 1; Rechts: Transformator 2

Berücksichtigung der Eigenfrequenzen

Um das Hochfrequenzverhalten der Transformatoren nachzubilden, wurden gesondert drei Schwingkreise eingebaut, deren Resonanzfrequenzen bei 100kHz, 300kHz und 1MHz liegen. Das Ziel ist es, das frequenzabhängige Verhalten des Transformators durch ein Zweitor nachzubilden und dieses in das vorhandene Modell zu integrieren.

Um die Eigenfrequenzen und die dazugehörigen Dämpfungsfaktoren δ_k eines Umspanners bestimmen zu können, müssen eigens Messungen durchgeführt werden. In dieser Arbeit handelt es sich um fiktive Transformatoren. Ihre Eigenfrequenzen und die dazugehörigen Dämpfungsfaktoren wurden daher angenommen und durch geeignete Simulationen verifiziert.

Die Koppelkapazität C_l wird über die Schwingkreise und das Übersetzungsverhältnis bestimmt [26], daher ist es nötig den Primärkreis des Transformators aufzuteilen, um sicher zu stellen, dass die Schwingkreise auch auf die vorgegebenen Frequenzen richtig reagieren.

Die einzelnen Komponenten der Schwingkreise wurden wie folgt berechnet [26]:

$$\omega_k = \frac{1}{\sqrt{L_q \cdot C_q}}$$

$$\delta = \frac{R_q}{2 \cdot L_q}$$

$$C_l = \left| \frac{1}{1 - \mu} \right|^2 \cdot C_q$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{U_{1,str}}{U_{2,str}} \cdot x \quad \text{mit } x \dots \text{Anzahl der Schwingkreise}$$

Für die beiden Transformatormodelle ergeben sich die einzelnen Komponenten des Ersatzschaltbildes wie in Tabelle 3.8 angeführt:

Tabelle 3.8: Berechnungsergebnisse der Schwingkreise für die numerische Modellbildung der Transformatoren

Eigenfrequenz		Transformator 1	Transformator 2
100kHz	L_{q1}	1kH	1kH
	C_{q1}	$2.533 \cdot 10^{-15} \text{F}$	$2.533 \cdot 10^{-15} \text{F}$
	R_{q1}	1 Ω	1 Ω
	C_{l1}	$2.694 \cdot 10^{-15} \text{F}$	$2.572 \cdot 10^{-15} \text{F}$
300kHz	L_{q2}	0.1H	0.1H
	C_{q2}	$2.8145 \cdot 10^{-12} \text{F}$	$2.8145 \cdot 10^{-12} \text{F}$
	R_{q2}	1 Ω	1 Ω
	C_{l2}	$2.9932 \cdot 10^{-12} \text{F}$	$2.8584 \cdot 10^{-12} \text{F}$
1MHz	L_{q3}	0.1mH	0.1mH
	C_{q3}	$2.533 \cdot 10^{-10} \text{F}$	$2.533 \cdot 10^{-10} \text{F}$
	R_{q3}	1 Ω	1 Ω
	C_{l3}	$2.6938 \cdot 10^{-10} \text{F}$	$2.572 \cdot 10^{-10} \text{F}$

Für beide Transformatormodelle wurden die selben Eigenfrequenzen angenommen da keine eingene Messung an realen Transformatoren durchgeführt wurde. Bei realen Transformatoren würden sich die Eigenfrequenzen aufgrund ihrer ungleichen Bauweise unterscheiden

3.8.6 Plausibilitätsüberprüfung des Transformatormodells

Um die Hysterese Kennlinie des Transformators in EMTP-RV nachzubilden gibt es zwei Elemente:

1. **Den "Hysteretic Reactor"**: Beim Hysteretic Reactor wird der positive Teil der Hysterese Kennlinie als Strom in Abhängigkeit vom Fluss vorgegeben. Das numerische Berechnungsprogramm EMTP-RV spannt dann die Hysterese fläche auf, wobei über den Faktor C die Breite der Fläche eingestellt werden kann. Um den Hysteretic Reactor in der Steady-State-Solution zu berücksichtigen, muss ein Startinduktivitätswert vorgegeben werden, sonst verhält sich der Transformator beim Starten der Berechnung als würde er erst zugeschaltet werden.
2. **Die stromabhängige Induktivität**: Bei der stromabhängigen Induktivität muss nur der Strom in Abhängigkeit vom Fluss, sowohl für positive, als auch für negative Werte, eingegeben werden und es muss sichergestellt sein, dass die Werte monoton steigend sind. Es wird nur der lineare Kennlinienverlauf dargestellt. Die Hysterese fläche wird nicht berücksichtigt.

Um zwischen den beiden Elementen eine Entscheidung treffen zu können, wurde eine Vergleichsanalyse durchgeführt. Dazu wurde das Transformatormodell mit einer stromabhängigen Induktivität und einem "Hysteretic Reactor" nachgebildet.

Die Abbildungen 3.33 und 3.34 zeigen den Stromverlauf über die Hysterese und die Hysterese Kennlinie des Transformators 1 einmal mit "Hysteretic Reactor" und einmal mit einer stromabhängigen Induktivität, bei einer angelegten Spannung von $U_n \cdot 1.36$ (150kV). Der Transformator wird sekundärseitig mit 10Ω belastet. Die Simulationsdauer beträgt 80ms mit einer Schrittweite von $1\mu s$.

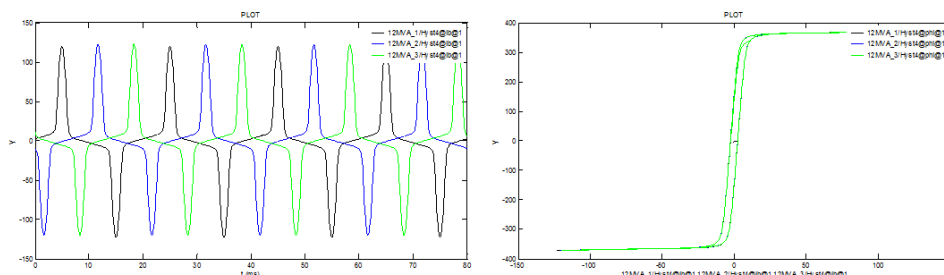


Abbildung 3.33: Links: Numerisches Berechnungsergebnis des Effektivwerts des Stroms im Transformator 1 über den "Hysteretic Reactor" bei 136% der Nennspannung; Rechts: dazugehörige Hysterese Kennlinie

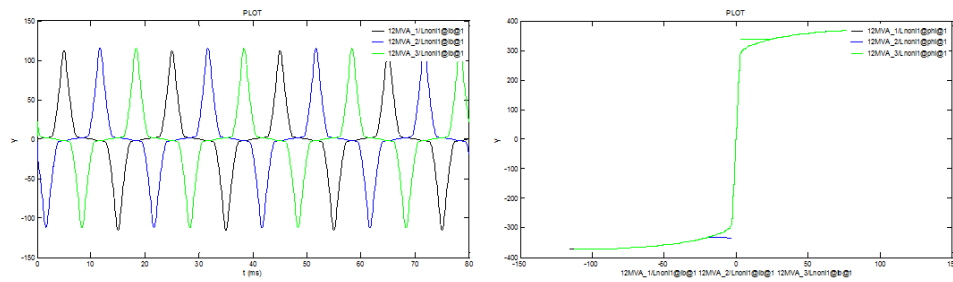


Abbildung 3.34: Links: Numerisches Berechnungsergebnis des Effektivwertes des Stroms im Transformator 1 über die stromabhängige Induktivität bei 136% der Nennspannung; Rechts: dazugehörige Hysterese-Kennlinie

Beide Modelle zeigen ein ähnliches Verhalten. Das Modell mit dem "Hysteretic Reactor" reagiert "weicher" beim Übergang in den Sättigungsbereich, da der Flussverlauf keiner starren Linie unterworfen ist.

Der Vergleich der Einschaltstoßströme (Abbildung 3.35) beider Modelle zeigt eine gute Übereinstimmung. Der Transformator wurde beim Einschaltvorgang sekundärseitig mit einem Widerstand von 10Ω belastet. Ein idealer Schalter schaltet den Transformator nach 20ms zu.

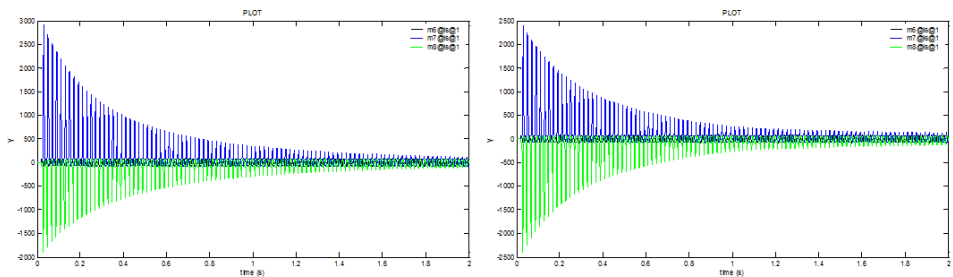


Abbildung 3.35: Numerisches Berechnungsergebnis des Einschaltstoßstroms des Transformators 1 überspannungsseitig; Links: mit Hysteretic Reactor; Rechts: mit stromabhängiger Induktivität

Aus den numerischen Berechnungsergebnissen geht hervor, dass für die Modellbildung der Transformatoren beide Elemente zur Nachbildung der Hysterese geeignet sind. Bei der Verwendung des "Hysteretic Reactor" wurden numerische Stabilitätsprobleme festgestellt. Zur Vermeidung dieser Stabilitätsprobleme, erfolgt die Nachbildung der Hystereseschleife mittels einer stromabhängigen Induktivität.

Kapitel 4

Simulationsauswertung

4.1 Variantenübersicht

Für diese Arbeit wurden mögliche Freileitungs- und Energiekabelanordnungen miteinander kombiniert und die am häufigsten auftretenden Kombination herausgearbeitet. In ländlichen Gebieten treten oft reine Freileitungsabgänge auf. Durch den zunehmenden Verbrauch und den damit steigenden Lastströmen werden bestehende Freileitungsabgänge durch stärkere Freileitungsseile oder durch die Verlegung neuer Energiekabel, meist in Teilstücken, ersetzt, um den nötigen Leistungsbedarf abdecken zu können. Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Darstellung der möglichen Freileitungs- und Energiekabelkombinationen.

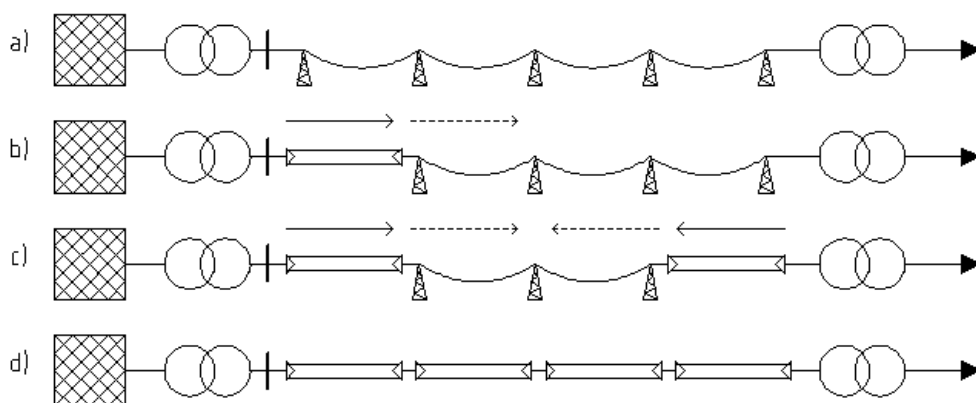


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung gewählter Freileitungs- und Energiekabelkombinationen

Die Ausgangsposition für die Variantenentwicklung bildet die in Abbildung 4.1 unter a) dargestellte Anordnung. Diese stellt einen reinen Freileitungsabgang dar.

In realen Netzen gibt es entlang der Abgänge Leitungsabzweige zu den einzelnen Verteilstationen, wodurch der Laststrom vor allem zu Beginn eines Abganges am größten ist. Aus diesem Grund werden Freileitungen meist zu Beginn eines Abganges verstärkt oder wie in diesem Fall, durch ein Energiekabel ersetzt, wie in Abbildung 4.1 unter b) dargestellt. Dieser Fall wurde für die **Varianten 60 bis 140** modelliert. Das Energiekabel "wächst" in die Freileitung.

Durch die Verstärkung von Übertragungsleitungen zu Beginn eines Abganges, kann es an deren Enden zu einer Erhöhung der Kurzschlussströme kommen. Um die thermische Kurzschlussfestigkeit über die gesamte Leitungstrecke gewährleisten zu können, kann entweder das Schutzkonzept angepasst oder die betroffenen Leitungsabschnitte müssen verstärkt werden. Wie in Abbildung 4.1 unter c) dargestellt "wächst" das Energiekabel daher von beiden Seiten in die Freileitung. Die **Varianten 150 bis 200** zeigen diesen Fall.

Die letzte Kombination, in Abbildung 4.1 unter d) dargestellt, zeigt schließlich den Fall einer Vollverkabelung.

Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der für die Studie modellierten Varianten.

Tabelle 4.1: Variantenübersicht aller für die numerische Berechnung verwendeten Freileitungs- und Energiekabelkombinationen

Var.	Leitungselemente															
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m	
10	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
20	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
30	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
40	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
50	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
60	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
70	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
80	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	ÜA
90	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
100	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
110	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
120	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
130	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
140	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
150	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
160	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
170	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
180	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
190	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
200	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

Generell wurden, wie bereits im Punkt 2.2 erwähnt, Einschaltstoßströme, dreipolige Kurz-

schlüsse, einpolige Erdschlüsse, atmosphärische Überspannungen und Lastabwürfe simuliert und näher betrachtet. Die unterschiedlichen Varianten spalten sich in weitere Variationen auf. Beispielsweise wurden Kurzschlüsse immer am Ende und am Anfang einer Übertragungsleitung untersucht. Des Weiteren wurden die Fehlerstellen bei Abgängen mit unterschiedlichem Leitungsaufbau (z.B. Variante 50) für beide Abgänge gesondert betrachtet.

In den nächsten Punkten wird auf die einzelnen Simulationen näher eingegangen und die unterschiedlichen Varianten werden zur Übersichtlichkeit für die jeweiligen Auswertungen gesondert aufgeführt. Eine genaue Übersicht aller durchgeführten Simulationsvarianten ist in den Tabellen im Anhang ersichtlich.

Bei allen Simulationsergebnissen, transiente Spannungen und Ströme, handelt es sich um **Spitzenwerte**.

4.2 Einschaltstoßstrom (Inrush)

Für die Betrachtung der transienten Vorgänge beim Auftreten eines Einschaltstoßstroms wird der Transformator im Umspannwerk über den Leistungsschalter auf der 110-kV-Seite, wie in Abbildung 4.2 dargestellt, nach **10ms zugeschaltet**.

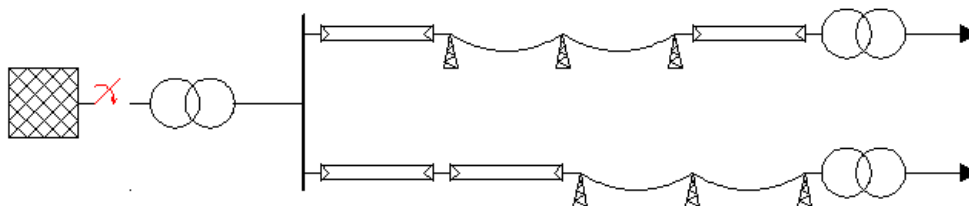


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des Einschaltstoßstroms

Da der Einschaltstoßstrom immer vom Transformator im Umspannwerk betrachtet wird, setzen sich die Simulationsvarianten aus den in Tabelle 4.1 beschriebenen Varianten zusammen.

Bei den numerischen Berechnungen wurde keine Vormagnetisierung für den Transformator angenommen, wodurch sich auch kein Remanenzfluss überlagert. Die auftretenden Einschaltstoßströme sind nur von der jeweiligen Phasenlage der Ströme im Schalt Augenblick abhängig.

Abbildung 4.3 zeigt den zeitlichen Verlauf des Einschaltstoßstroms auf der Oberspannungsseite des 12MVA Transformators. Dieser Stromverlauf stellt sich für alle betrachteten Simulationsvarianten ein. Es ist zu erkennen, dass die Phase 1 im Strommaximum zugeschaltet wird, wodurch sich sofort der stationären Wert einstellt. Die Phasen 2 und 3 führen im Einschalt Augenblick den halben Nennstrom mit entgegengesetztem Vorzeichen.

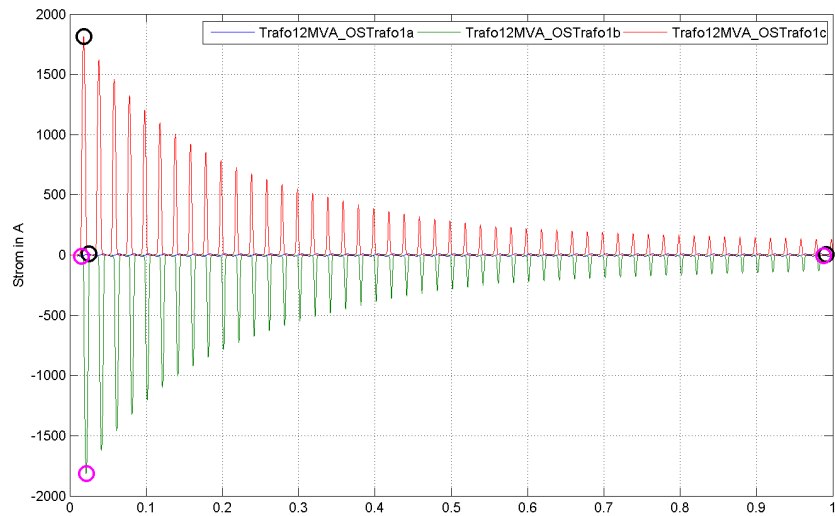


Abbildung 4.3: Numerisches Berechnungsergebnis des Einschaltstoßstroms auf der Oberspannungsseite des Transformators 1; a Phase 1; b Phase 2; c Phase 3

4.2.1 Einschaltstoßstrom

Auswertung der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme

Die Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigen die Auswertung der Spitzenwerte des Stroms über die beiden Abgänge. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die in den Abbildungen dargestellten Varianten.

Tabelle 4.2: Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme

Var.	Leitungselemente															
	100m		900m		1km		1km		1km		900m		100m			
10	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus
20	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
40	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
70	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA ÜA	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL
150	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA FL	aus aus	FL ÜA	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus
170	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus

Legende: K... Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

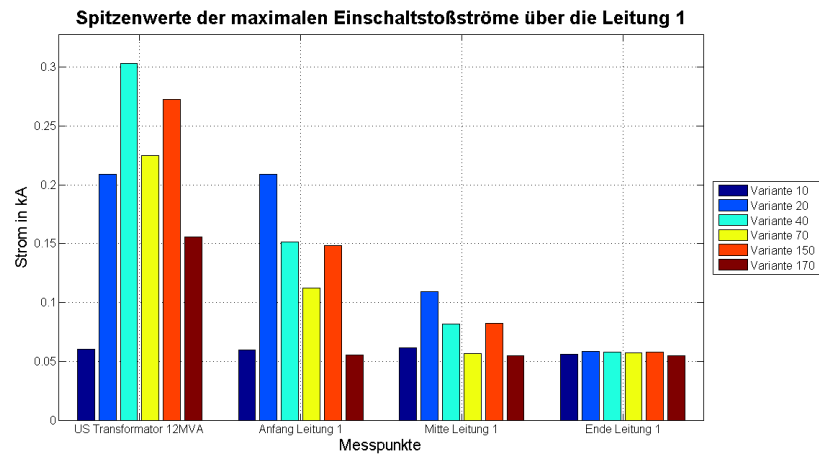


Abbildung 4.4: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 1

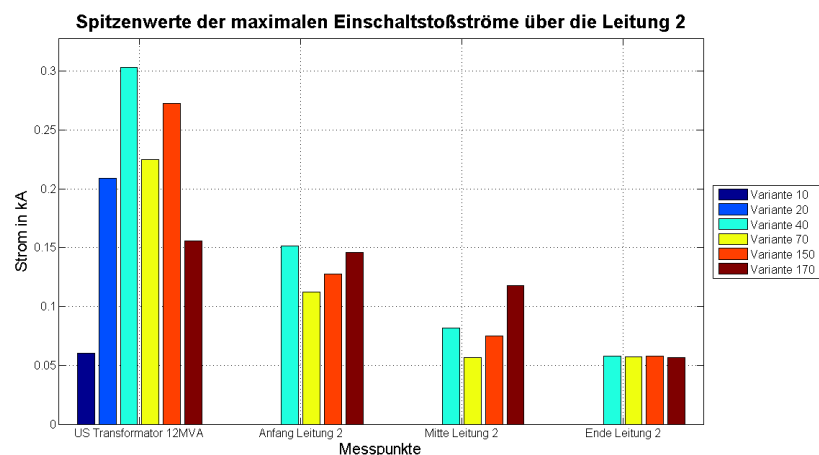


Abbildung 4.5: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 2

Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass beim Zuschalten des Transformators, unabhängig von der Leitungswahl, am Ende der Übertragungsleitung, keine signifikanten Stoßströme auftreten. Diese befinden sich in der selben Größenordnung. Werden hingegen die Stoßströme am Anfang der Leitung betrachtet, sind Unterschiede der Spitzenwerte bis zum Faktor 6 zu erkennen (Anstieg von ca. 50A auf ca. 300A).

Der Vergleich der Varianten 10, 20 und 40 zeigt, dass bei der Verwendung eines Energiekabel der Spitzenwert des Stoßstromes, aufgrund der geringeren frequenzabhängigen Induktivität, zunimmt. Durch die Parallelschaltung eines zweiten Energiekabel verringert sich die wirksame Impedanz, was zu einem weiteren Anstieg des Stoßstroms führt.

Bestehen beide Abgänge am Anfang der Übertragungsleitungen zu 50% aus Energiekabel

und am Ende zu 50% aus Freileitung (Variante 70) ist der Spitzenwert des Stroms um ca. 1/3 kleiner, als im Vergleich zu zwei durchgehenden Energiekabelabgängen.

Der Vergleich der Varianten 150 und 170 zeigt, dass bei einer Verkabelung des ersten Abgangs (Variante 150) die Stoßströme im zweiten Abgang aufgrund der Stromaufteilung abnehmen.

Auswertung der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme

Für die mittlere Belastung der Übertragungsleitungen wurde der gewichtete Mittelwert des Stromverlaufs ausgewertet. Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen die Auswertungsergebnisse über die Leitungen 1 und 2. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die in den Abbildungen dargestellten Varianten.

Tabelle 4.3: Variantenübersicht für die Auswertung der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme

Var.	Leitungselemente															
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m	
90	ÜA aus	FL K	aus	FL K	aus	FL ÜA	aus	FL FL	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL ÜA
100	ÜA aus	FL K	aus	FL K	aus	FL aus	aus	FL K	aus	FL ÜA	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL ÜA
110	ÜA aus	FL K	aus	FL K	aus	FL aus	aus	FL K	aus	FL aus	aus	FL K	aus	FL ÜA	aus	FL ÜA
120	aus aus	K K	aus aus	K K	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K ÜA
130	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K aus	aus aus	K ÜA	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K ÜA
140	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus ÜA	K FL	aus aus	K ÜA
150	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K aus	aus ÜA	K FL	aus aus	K aus	aus ÜA	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
170	ÜA aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL ÜA	aus aus	FL FL	aus aus	FL aus	aus ÜA	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus ÜA

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

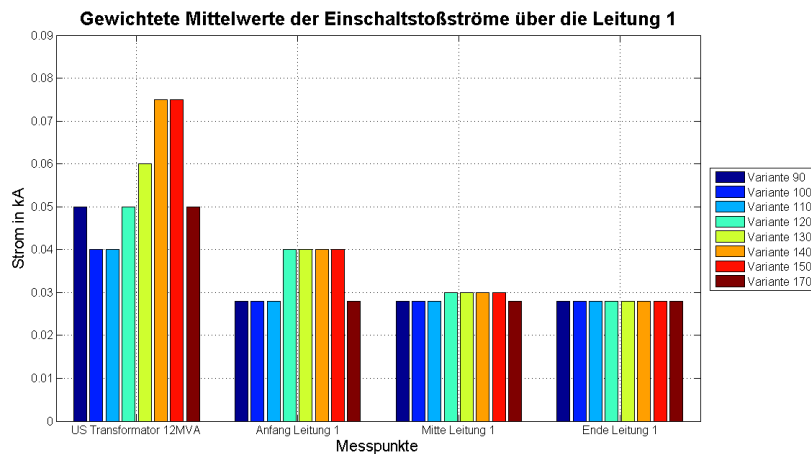


Abbildung 4.6: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 1

Die Auswertung der gewichteten Mittelwerte zeigen, dass sich die Spitzenwerte des Stroms unabhängig von der Leitungswahl am Ende der Übertragungsleitung in derselben Größenordnung befinden. Besteht der Abgang 1 aus einer durchgehenden Freileitung (Varianten 90, 100, 110 und 170) zeigt sich unabhängig von der Leitungswahl des parallelen Abganges ein um ca. 30% geringerer Mittelwert des Stroms als im Vergleich, wenn Abgang 1 aus einem durchgehenden Energiekabel besteht (Varianten 120, 130, 140 und 150).

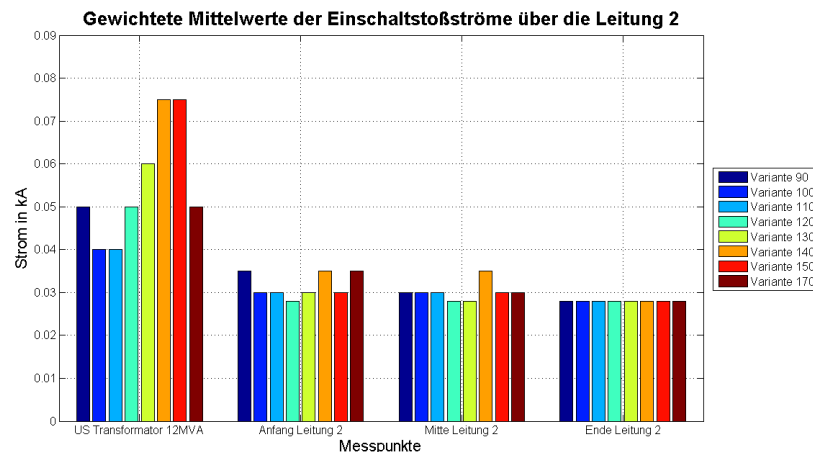


Abbildung 4.7: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 2

Die Varianten 90, 100 und 110 besitzen im Abgang 1 eine durchgehende Freileitung und die Varianten 120, 130 und 140 ein durchgehendes Energiekabel. Bei all diesen Varianten besteht die Leitung 2 am Anfang aus einem Energiekabel. Nimmt dessen Länge zu, sinkt der Mittelwert des Stroms am Anfang der Leitung 2 für die Leitungskonfiguration der Varianten 90, 100 und 110. Der Mittelwert des Stroms für die Leitungskonfigurationen der Varianten 120, 130 und 140 nimmt hingegen bei zunehmender Länge des Energiekabels zu. Bei einem Vergleich der Varianten 150 und 170 zeigt sich, wie zuvor für die maximalen Spitzenwerte der Ströme, dass wenn die Leitung 2 nur in der Mitte aus einem kurzen Freileitungsteil besteht, der Strom am Anfang der Übertragungsleitung einen höheren Wert annimmt, wenn die Leitung 1 aus einer durchgehenden Freileitung besteht, als wenn die Leitung 1 aus einem durchgehenden Energiekabel besteht.

Auch hier ist ein deutlicher Unterschied im Dämpfungsverhalten zwischen Energiekabel und Freileitung zu erkennen. Durch die niedrigere, frequenzabhängige Induktivität des Energiekabels werden Kurzschlussströme schwächer begrenzt, als im Vergleich zu Freileitungen. Dadurch kommt es bei einer Belastung von zwei parallelen Abgängen durch einen Einschaltstoßstrom, aufgrund der leitungsbedingten Stromaufteilung, zu einer stärkeren mittleren Strombelastung einer gemischt aufgebauten Übertragungsleitung, wenn deren Parallelleitung aus einer durchgehenden Freileitung besteht.

Eine Gesamtübersicht der Auswertung für die beim Einschaltstoßstrom auftretenden Ströme findet sich im Anhang.

4.2.2 Spannungsausprägung beim Einschaltstromstoß

Auswertung der maximalen Spitzenwerte der Spannungen

Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen den maximalen Spitzenwert der Spannungen über die Übertragungsleitungen für die einzelnen Varianten. Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über die in den Abbildungen dargestellten Varianten.

Tabelle 4.4: Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der maximalen Spannungen bei einem Einschaltstoßstrom

Var.	Leitungselemente																
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m		
10	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus
20	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus
30	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus
40	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus
50	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus
90	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus
100	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus
180	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

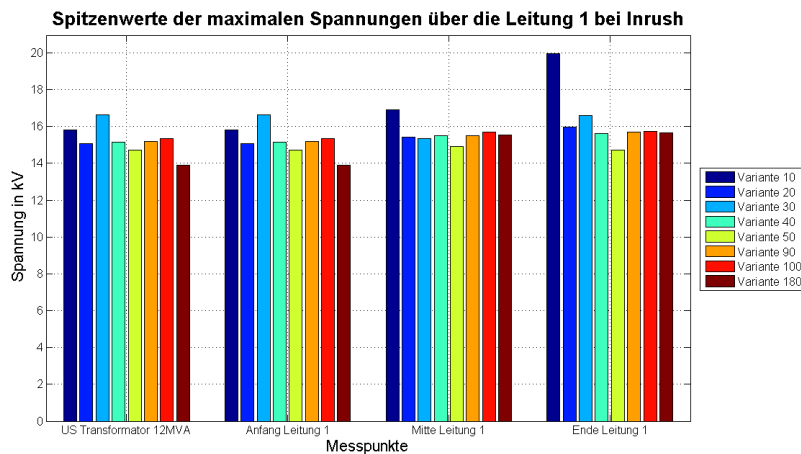


Abbildung 4.8: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 1 bei einem Einschaltstoßstrom

Bei der Betrachtung der Varianten 10 (durchgehende Freileitung) und 20 (durchgehendes Energiekabel), bei denen nur 1 Abgang vorhanden ist, ist zu erkennen, dass der Spitzenwert der Spannung bei einer Freileitung höhere Werte annimmt. Bei beiden Varianten wird der Spitzenwert der Spannung über die Übertragungsleitung größer und die Differenz der Werte zwischen Energiekabel und Freileitung nimmt vom Anfang bis zum Ende der

Übertragungsleitung zu. Am Leitungsanfang beträgt die Differenz ca. 6.5% und am Leitungsende ca. 25%.

Werden die beiden Variaten 10 und 20 jeweils um einen zusätzlichen Abgang mit derselben Übertragungsleitung erweitert, ist zu erkennen, dass im Fall von zwei parallelen Freileitungen der Spitzenwert der Spannung am Leitungsanfang bei nur einem Abgang geringer ist, als bei zwei Abgängen und im Vergleich am Leitungsende einen um ca. 20% höheren Wert annimmt. Bei der Verwendung von zwei durchgehenden Energiekabel zeigen sich keine signifikanten Auswirkungen.

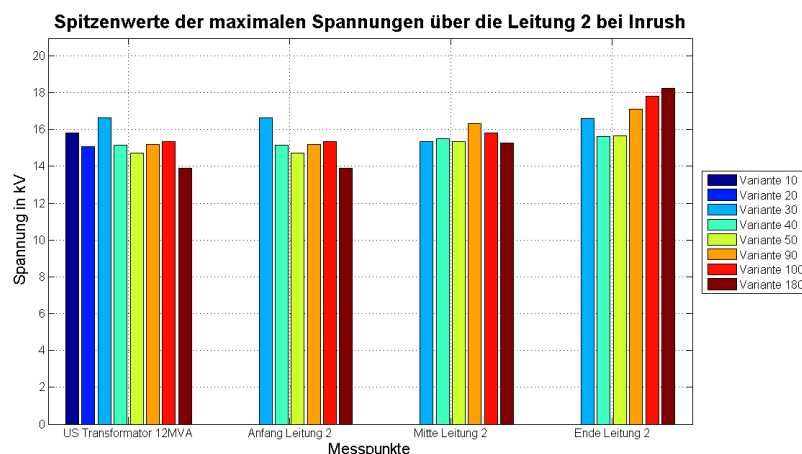


Abbildung 4.9: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 2 bei einem Einschaltstoßstrom

Für die Varianten 180, 100 und 90 ändert sich der Wellenwiderstand über die Leitung 2 dahingehend, dass es am Leitungsende zu einer stärkeren Reflexion kommt, als für die anderen Varianten. Bei diesen Varianten besteht die Leitung im Abgang 1 aus einer durchgehenden Freileitungen und die Leitung 2 weist einen Kabelanteil von $\geq 50\%$ auf. Durch den Übergang von Energiekabel auf Freileitung in der Leitung 2 kommt es, aufgrund des größeren Wellenwiderstandes der Freileitung, zu einem hohen Spitzenwert der weiterlaufenden Spannungswelle, welcher durch die parallele Freileitungsanordnung noch begünstigt wird. Die Überspannungen sind mit einem maximalen Spitzenwert von ca. 20kV so gering, dass der Überspannungsableiter keinen Einfluss hat.

Eine Gesamtauswertung der Spitzenwerte der Spannungen findet sich im Anhang.

4.3 Dreipoliger Kurzschluss

Der dreipolige Kurzschluss wurde, wie in Abbildung 4.10 dargestellt, jeweils am Anfang und am Ende der Übertragungsleitung, in einer Entfernung von 100m von der Sammelschiene, simuliert. Der Fehler tritt nach 10ms auf (1). Nach 110ms öffnet sich der Leistungsschalter (2) des betroffenen Abzweigs. In der Realität kommt es aufgrund der Messzeit und der

Schaltereigenzeit zu einer verzögerten Auslösung des Schutzgerätes bis zu 100ms. Für diese Untersuchung wird nur diese Verzögerungszeit betrachtet. Das Schutzgerät selbst regt direkt zum Zeitpunkt des Fehlereintritts an. Die Abbildung 4.10 zeigt eine schematische Darstellung der durchgeführten Simulation.

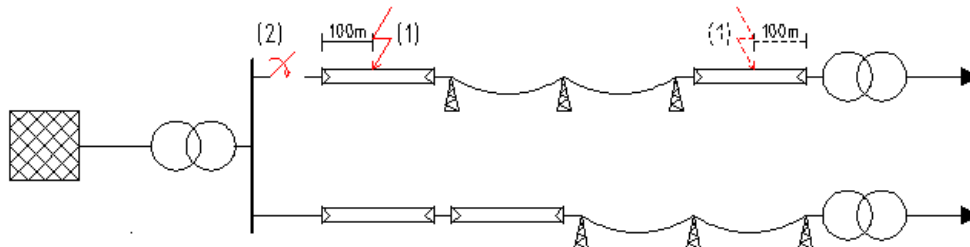


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des dreipoligen Kurzschlusses; (1) nach 10ms Fehlereintritt; (2) nach 100ms Fehlerabschaltung

Für die Auswertung werden die durchgeführten Simulationen in zwei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe beschreibt die transienten Vorgänge bei einem Fehler am Leitungsanfang und die zweite Gruppe bei einem Fehler am Leitungsende. Für die Übersichtlichkeit wird eine tabellarische Übersicht über die betrachteten Varianten bei den entsprechenden Auswertungen gesondert angeführt. Eine Gesamtübersicht aller durchgeführten Varianten ist im Anhang ersichtlich.

4.3.1 Schaltströme infolge des Spannungseinbruchs

Durch den auftretenden Kurzschluss kommt es zu einem Spannungseinbruch an der Kurzschlussstelle. Die Entfernung, zwischen der Fehlerstelle und dem 12MVA Transformator im Umspannwerk, ist bei einem Fehler am Ende der Übertragungsleitung so gering, dass sich der Spannungseinbruch bis zum Umspannwerk hin auswirkt.

Durch den Spannungseinbruch kommt es zu einer Flussänderung im Transformator. Zum Zeitpunkt der Fehlerabschaltung baut sich die Spannung wieder auf, der Fluss nimmt zu und es kommt zu einer Sättigung des Eisenkerns. Diese ist zwar nur geringfügig ausgeprägt, führt allerdings zu einem Sättigungsstrom mit einem Spitzenwert von ungefähr 100A.

Die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen den Spannungseinbruch auf der Unterspannungsseite des Transformators und den auftretenden Sättigungsstrom auf der Oberspannungsseite nach der Fehlerabschaltung für die Variante 51.

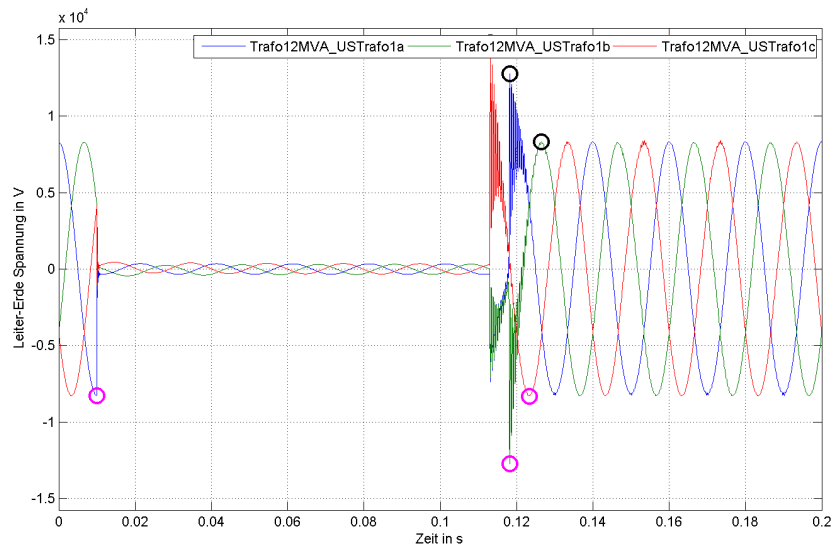


Abbildung 4.11: Numerisches Berechnungsergebnis des Spannungseinbruchs auf der Unterspannungsseite des 12MVA Umspanners bei einem dreipoligen Kurzschluss für die Variante 51

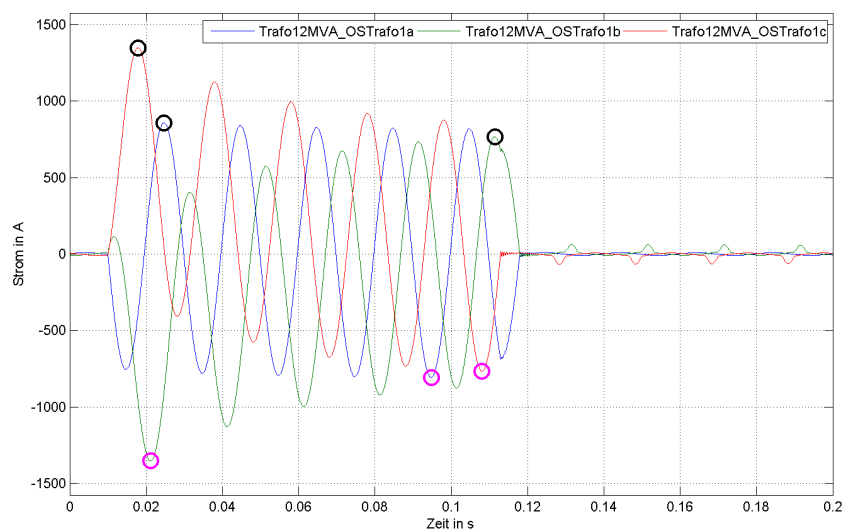


Abbildung 4.12: Numerisches Berechnungsergebnis des Sättigungsstrom auf der Oberspannungsseite des 12MVA Umspanners nach der Schutzauslösung für die Variante 51

Dieser Strom breitet sich nach der Abschaltung über die nicht fehlerbehaftete Leitung aus. Die Abbildung 4.13 zeigt die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte dieser "Schaltströme" über die Leitung 2 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1. Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht über die bei der Auswertung betrachteten Varianten.

Tabelle 4.5: Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Anfang der Leitung 1

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
31	ÜA ÜA	FL FL	KS aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	ÜA ÜA	
41	aus aus	K K	KS aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	
51	ÜA aus	FL K	KS aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	ÜA aus	
141	aus aus	K K	KS aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K ÜA	aus FL	K aus	aus aus	K FL	aus ÜA	
142	aus aus	K K	KS aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K ÜA	aus FL	K aus	aus aus	K FL	aus ÜA	
151	aus aus	K K	KS aus	K K	aus aus	K K	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus ÜA	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	
191	aus aus	K K	KS aus	K K	aus aus	K K	aus ÜA	FL FL	aus aus	FL FL	aus ÜA	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

Spitzenwerte der maximalen Schaltströme über die Leitung 2 - Kurzschluss am Anfang der Leitung 1

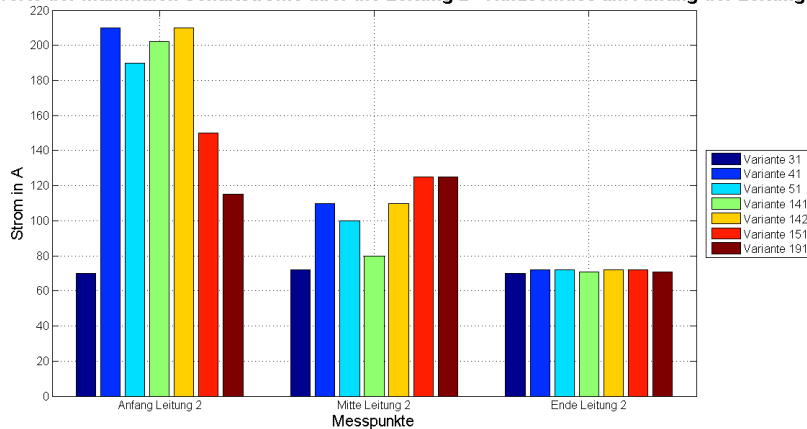


Abbildung 4.13: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1

Die Abbildung 4.14 zeigt die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der "Schaltströme" über die Leitung 2 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1. Die Tabelle 4.6 gibt eine Übersicht über die bei der Auswertung betrachteten Varianten.

Tabelle 4.6: Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Ende der Leitung 1

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
32	ÜA ÜA	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL KS	aus aus	FL FL	ÜA ÜA	
42	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K KS	aus aus	K K	aus aus	
133	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K KS	aus aus	K FL	aus ÜA	
144	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K ÜA	aus FL	K KS	aus aus	K FL	aus ÜA	
153	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus ÜA	K K	aus aus	K K	aus aus	K KS	aus aus	K K	aus aus	
192	aus aus	K K	aus aus	K K	aus aus	K K	aus ÜA	FL FL	aus aus	FL FL	aus ÜA	K K	aus aus	K K	aus aus	K KS	aus aus	K K	aus aus	

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

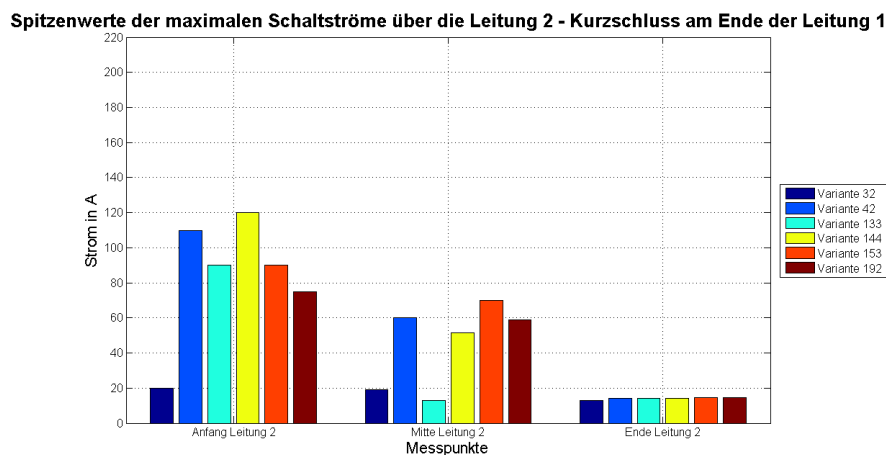


Abbildung 4.14: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1

Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass bei wiederkehrender Spannung, die Spitzenwerte des Schaltstroms, unabhängig von der Leitungswahl, am Ende der Übertragungsleitung, keine signifikanten Größenunterschiede aufweisen.

Ein Vergleich der Varianten 31 und 41 zeigt, dass im Falle einer Vollverkabelung beider Abgänge, der Schaltstrom bis zum 3-fachen zunimmt. Besteht ein Abgang aus einem durchgehenden Energiekabel und befindet sich der dreipolige Kurzschluss auf dem benachbarten Abgang, ist zu erkennen, dass der Kurzschlussstrom in Abhängigkeit vom Energiekabelanteil zunimmt. Dominiert im fehlerfreien Abgang der Energiekabelanteil und nimmt der Freileitungsanteil im fehlerbehafteten Abgang zu, ist aus den Berechnungen zu entnehmen, dass der Schaltstrom nach Fehlerlöschung im fehlerfreien Abgang signifikant geringer wird.

Bei einem Kurzschluss am Leitungsanfang kommt es aufgrund der Nähe zum Transformator zu einem stärkeren Spannungseinbruch über beide Abgänge. Dieser wirkt sich dadurch auch direkt am Transformator stärker aus. Die daraus resultierende Flussänderung im Eisen, ist dem entsprechend größer und es entsteht ein höherer Schaltstrom im Vergleich zu einem Fehler am Ende der Übertragungsleitung.

Eine Übersicht der gesamten Ergebnisse für die Schaltstrommaxima befindet sich im Anhang.

4.3.2 Spannungseinbrüche

Die durch Kurzschlüsse verursachten Spannungseinbrüche über eine Übertragungsleitung sind vom auftretenden Kurzschlussstrom und der Leitungsimpedanz abhängig. Ein großer Strom und eine große Leitungsimpedanz begünstigen die Spannungsregeneration entlang der Leitung. Kurzschlussströme werden durch Energiekabel aufgrund ihres höheren R/X-Verhältnisses schwächer begrenzt. Freileitungen weisen dafür eine größere Leitungsimpedanz als Energiekabel auf.

Abbildung 4.15 zeigt die auftretenden Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem Kurzschluss am Ende dieser Leitung. Die Tabelle 4.7 gibt einen Überblick über die für bei der Auswertung betrachteten Varianten.

Tabelle 4.7: Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Leitungsende

Var.	Leitungselemente																
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m		
12	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	KS aus	FL aus	ÜA aus
22	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus
72	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	KS aus	FL aus	ÜA aus
104	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	KS aus	FL aus	ÜA aus
134	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	KS aus	FL aus	ÜA aus
192	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus
202	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

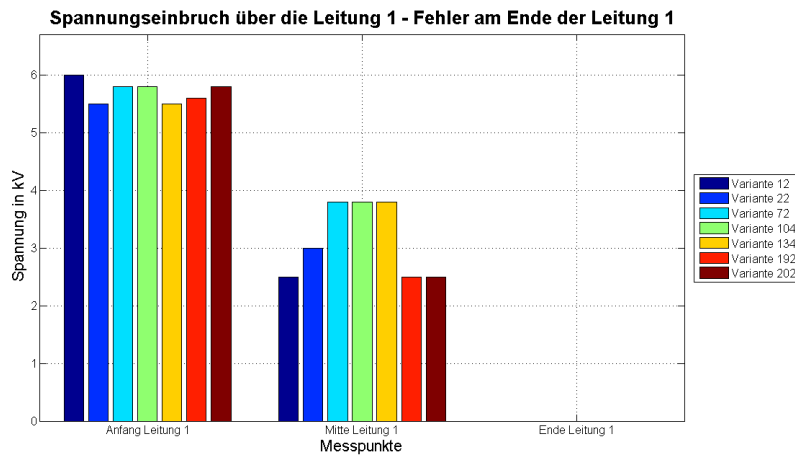


Abbildung 4.15: Auswertungsergebnisse der Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem Kurzschluss am Leitungsende

Der höchste Spannungswert in der Mitte der Übertragungsleitung tritt für die Varianten 72, 104 und 134 auf (ca. $0.45 \times I_n$). Bei jeder dieser Varianten besteht die Leitung 1 zu Beginn aus 3km Energiekabel und endet mit einer 3km langen Freileitung. Die Ströme werden durch die bis zur Mitte reichenden Energiekabel schwächer begrenzt. Die weiterlaufende Freileitung besitzt eine größere Leitungsimpedanz, dadurch wirkt die Fehlerstelle weiter entfernt. Beide diese Faktoren begünstigen eine höhere Spannung in der Mitte der Leitung im Vergleich zu den anderen Varianten.

Bei den Varianten 12, 192 und 202 ist ein niedrigerer Spannungswert (ca. $0.3 \times I_n$) in der Mitte der Übertragungsleitung, im Vergleich zu den anderen Varianten zu erkennen. Bei der Variante 12 handelt es sich um eine Leitungskonfiguration mit nur einem Abgang. Dieser Abgang besteht aus einer durchgehenden Freileitung. Diese begrenzt den Strom aufgrund

ihres R/X-Verhältnisses so stark, dass ihre Leitungsimpedanz einen untergeordneten Einfluss hat. Bei den Varianten 192 und 202 begünstigt zwar das Energiekabel zu Beginn und am Ende der Übertragungsleitung die Ausbreitung des Kurzschlussstroms, wirkt sich aber negativ auf die Leitungsimpedanz aus. Die Leitungsimpedanz des Energiekabels ist kleiner und die Kurzschlussstelle wirkt näher, als bei einer Freileitung. Zusätzlich dämpft die Freileitung in der Mitte den Strom und es ergeben sich Spannungswerte in der Größenordnung der Variante 12 (ca. 5.8kV).

Bei einem Vergleich der Varianten 12 (Konfiguration mit nur einem Freileitungsabgang) und Variante 22 (Konfiguration mit nur einem Energiekabelabgang) ist zu erkennen, dass die Spannung in der Mitte der Leitung 1 bei einem Energiekabel um ca. 15% größer ist, als bei einer Freileitung. Am Anfang der Übertragungsleitung ist hingegen die Spannung bei einer Freileitung um ca. 8% größer, als bei einem Energiekabel. Durch die niedrigere Leitungsimpedanz des Energiekabels im Vergleich zu einer Freileitung besitzt die Fehlerstelle eine "geringere" Entfernung zum Messpunkt in der Mitte der Übertragungsleitung und der Spannungseinbruch ist bei einem Energiekabel geringer, als bei einer Freileitung. Am Anfang der Leitung 1 wirkt sich das Dämpfungsverhalten stärker aus und das Energiekabel besitzt einen niedrigeren Spannungswert als die Freileitung. Das Energiekabel weist, im Vergleich zu einer Freileitung, eine geringere Strombegrenzung, aufgrund seines höheren R/X-Verhältnisses, auf.

Eine Übersicht aller Ergebnisse für den Spannungseinbruch ist im Anhang dargestellt.

4.3.3 Thermische Belastung der Leitungen

Wie bereits oben erklärt, ist die Dämpfung hochfrequenter Ströme bei Freileitungen stärker ausgeprägt. Abbildung 4.16 zeigt die maximalen Spitzenwerte der auftretenden Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem Kurzschluss am Anfang und am Ende der Übertragungsleitung. Die Tabelle 4.8 gibt einen Überblick über die für bei der Auswertung betrachteten Varianten.

Die rote Linie repräsentiert den Grenzwert für den maximal zulässigen effektiven Kurzschlussstrom über eine Belastungsdauer von 1s für die verwendete Freileitungstyp. Die schwarze Linie stellt denselben Grenzwert für das verwendete Energiekabel dar.

Tabelle 4.8: Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Leitungsanfang bzw. Leitungsende

Var.	Leitungselemente																
	100m		900m		1km		1km		1km		900m		100m				
12	ÜA	FL	KS	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	KS	FL	ÜA
22	aus	K	KS	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	KS	K	aus
32	ÜA	FL	KS	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	KS	FL	ÜA
42	aus	K	KS	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	KS	K	aus

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

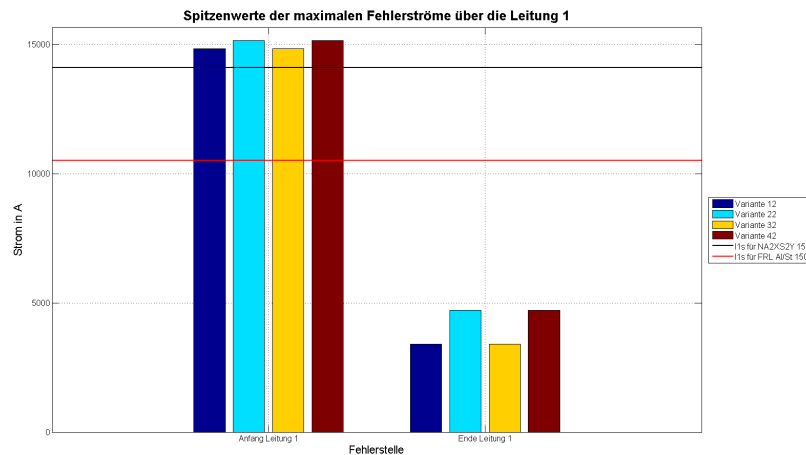


Abbildung 4.16: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximal auftretenden Kurzschlussströme über die Leitung 1

Bei den Varianten 12 und 32 handelt es sich bei der fehlerbehafteten Übertragungsleitung um eine durchgehende Freileitung. Der bei diesen Varianten auftretende Kurzschlussstrom ist bei einem Fehler am Ende der Übertragungsleitung um ca. 30% geringer als bei den Varianten 22 und 42 (Varianten mit durchgehendem Energiekabel). Auch bei einem Kurzschluss nach 100m ist die Auswirkung des unterschiedlichen R/X-Verhältnisse zwischen Energiekabel und Freileitung zu erkennen. Der Kurzschlussstrom nimmt bei einem Energiekabel einen um 2% höheren Wert an als bei einer Freileitung. Dafür liegt der Grenzwert für den maximal zulässigen effektiven Kurzschlussstrom über eine Belastungsdauer von 1s bei einer Freileitung bei ca. 70% und bei einem Energiekabel bei ca. 95% des bei der Simulation auftretenden Spitzenwertes des Kurzschlussstroms bei einem Fehler am Leitungsanfang. Das bedeutet, dass die maximal zulässige Abschaltzeit bei einer Freileitung kürzer als bei einem Energiekabel des gleichen Querschnitts zu wählen ist.

4.4 Einpoliger Erdschluss

Wie bereits zuvor für den dreipoligen Kurzschluss, werden auch beim einpoligen Erdschluss, wie in Abbildung 4.17 dargestellt, die Fehlerstellen jeweils am Ende und am Anfang jedes Abgangs, in einer Entfernung von 100m zur Sammelschiene, betrachtet. Der **Erdschluss tritt nach 10ms in der Phase 1 auf (1)**. Nach **110ms öffnet der Leistungsschalter (2)** des betroffenen Abgangs. In der Realität erfolgt die Fehlerabschaltung bei einem Erdschluss erst nach der Fehlerortung. Bei dieser werden einzelne Abgänge abgeschaltet um die Fehlerstelle lokalisieren zu können. Der fehlerbehaftete Abgang wird hierbei oft nicht als erster Abgang abgeschaltet. Es handelt sich hier also um eine ideale Annahme. Die Abbildung 4.17 zeigt eine schematische Darstellung der durchgeführten Simulation.

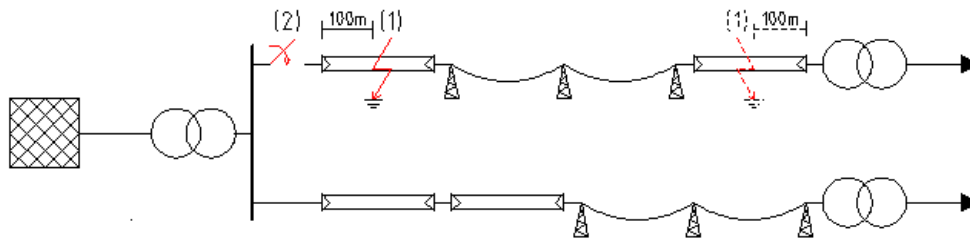


Abbildung 4.17: Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des Erdschlusses; (1) nach 10ms Fehlereintritt; (2) nach 110ms Fehlerabschaltung

Für die Auswertung werden die durchgeführten Simulationen in zwei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe beschreibt die transienten Vorgänge bei einem Fehler am Leitungsanfang und die zweite Gruppe bei einem Fehler am Leitungsende. Für die Übersichtlichkeit wird eine tabellarische Übersicht über die betrachteten Varianten bei den entsprechenden Auswertungen gesondert angeführt. Eine Gesamtübersicht aller durchgeführten Varianten ist im Anhang ersichtlich.

Wie bereits erwähnt haben Energiekabel eine größere Kapazität. Aus diesem Grund besitzen diese im Normalbetrieb in Mittelspannungsnetzen, abhängig von der Betriebsspannung, einen kapazitiven Ladestrom von ungefähr 1.5A/km. Dieser Ladestrom wird vom Laststrom, welcher meist einen leicht induktiven Charakter aufweist überlagert und zeigt im Normalbetrieb kaum Auswirkungen. In ausgedehnten Kabelnetzen kann dieser jedoch an Bedeutung zunehmen, vorallem wenn die Last einen rein ohmschen Wert besitzt [27] [28].

Abbildung 4.18 zeigt das Verhalten der Erdschlussströme in einem Mittelspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt bei einem Fehler in der Phase 1.

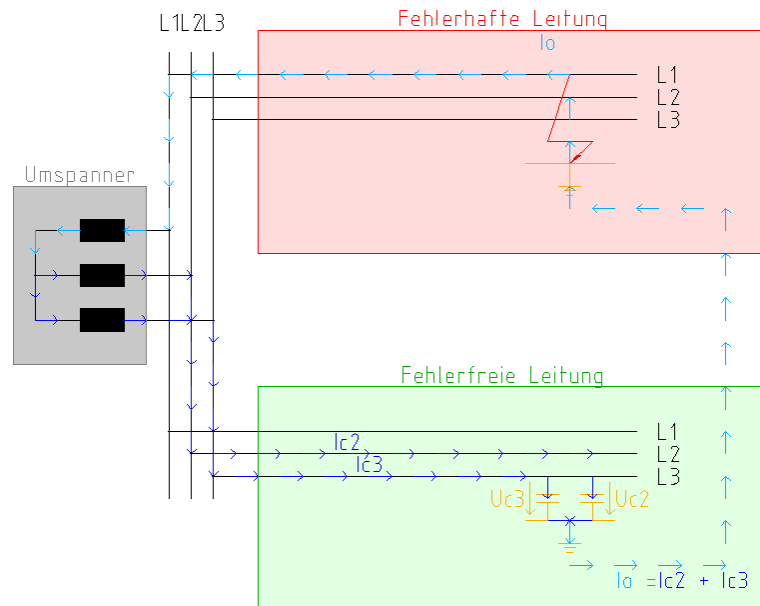


Abbildung 4.18: Schematische Darstellung der Erdschlussströme in einem Mittelspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt [27] [28]

Im Erdschlussfall fließt ein kapazitiver Erdschlussstrom. Die Spannung in der, über Erde kurzgeschlossenen Übertragungsleitung, bricht zusammen, während die Spannung über die beiden gesunden Phasen auf die verkettete Spannung ansteigt. Diese Phasen erzeugen nun kapazitive Stromanteile, welche über die Erde zur Fehlerstelle fließen und sich dort mit dem Erdschlussstrom überlagern. Der kapazitive Erdschlussstrom wird somit von allen Leitungskapazitäten in einem galvanisch zusammenhängenden Netz bestimmt [27] [28].

4.4.1 Erdschlussströme

Die Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigen die Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Übertragungsleitungen bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1. Die Tabelle 4.9 gibt eine Übersicht über die bei der Auswertung betrachteten Varianten.

Tabelle 4.9: Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1

Var.	Leitungselemente															
	100m				900m				1km				100m			
11	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus
21	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
31	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus
41	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
92	aus ÜA	K FL	ES aus	K FL	aus aus	ÜA FL	aus aus	FL FL	aus aus	aus FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL ÜA
102	aus ÜA	K FL	ES aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K ÜA	aus FL	aus FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL ÜA
121	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
122	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	ÜA FL	aus aus	FL aus	aus aus	aus FL	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL ÜA
131	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus
132	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	ÜA FL	aus aus	FL aus	aus aus	FL ÜA

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

Spitzenwerte der max. Erdschlussströme über die Leitung 1 - Erdschluss am Anfang der Leitung 1

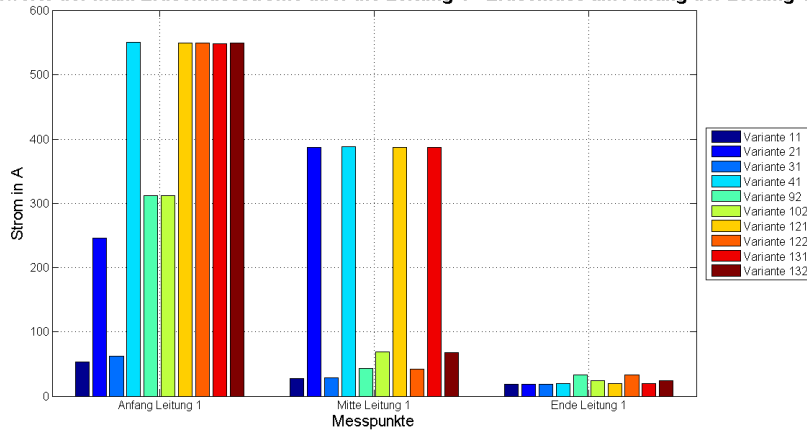


Abbildung 4.19: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1

Der Vergleich der Varianten 11, 21, 31 und 41 zeigt, dass bei einem Erdschluss die Spitzenwerte der Erdschlussströme bei steigendem Energiekabelanteil durch die größer werdende Kapazität zunimmt. Ein Vergleich der Varianten 21 und 41 verdeutlicht diesen Fall. Eine Verdopplung des Energiekabelanteils führt zu einer Vergrößerung des Erdschlussstrom um ca. 200%. Wird hingegen der Freileitungsanteil verdoppelt (Varianten 11 und 31), steigt der Erdschlussstrom um ca. 10%.

Die Varianten 121, 122, 131 und 132 besitzen jeweils einen Abgang mit einem durchgehenden Energiekabel und einen Abgang der mit einem Energiekabel beginnt und mit einer Freileitung endet. Bei den Varianten 121 und 122 ist die Freileitung 5km und bei den Varianten 131 und 132 3km lang. Der Vergleich der Varianten 121, 122, 131 und 132 zeigt, dass sich am Anfang der Übertragungsleitung bei einem durchgehenden Energiekabel eines Abgangs

der Erdschlussstrom unabhängig vom Aufbau der Parallelleitung einen Wert von ca. 550A annimmt. Werden die Erdschlussströme hingegen in der Mitte der Übertragungsleitung betrachtet, ist zu erkennen, dass bei den Varianten, bei welchen die fehlerbehaftete Leitung aus einem reinen Energiekabel besteht (Varianten 121 und 131), der Erdschlussstrom in der Größenordnung von ca. 390A liegt. Wächst hingegen die Freileitung von der Verteilstation in das Energiekabel hinein, ist zu erkennen, dass die Amplitude der Erdschlussströme mit steigendem Freileitungsanteil sinkt.

Der höchste Stromwert am Leitungende stellt sich für die Varianten 92 und 122 ein. Bei diesen Varianten besteht die Leitung 1 zu 83% aus Freileitung.

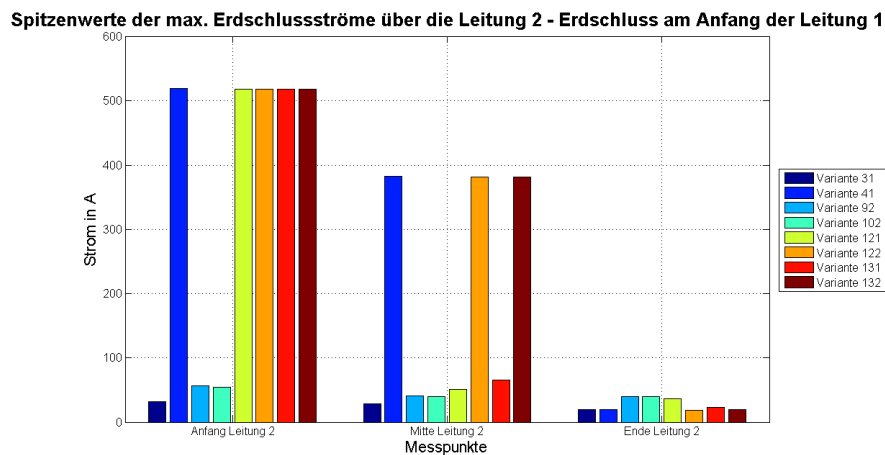


Abbildung 4.20: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1

Die Auswertung der Varianten 41, 121, 122, 131 und 132 des fehlerfreien Abgangs zeigt, dass bei dominantem Energiekabelanteil die Spitzenwerte des Erdschlussstroms am Anfang der Übertragungsleitung in der Größenordnung von ca. 520A liegt. Bei Betrachtung der Spitzenwerte des Erdschlussstroms in der Mitte der Übertragungsleitung ist zu erkennen, dass der Erdschlussstrom über das durchgehende Energiekabel in der Größenordnung von 390A liegt. Wächst die Freileitung wiederum von hinten in den fehlerfreien Abgang hinein, so reduzieren sich die Erdschlussströme in Abhängigkeit des Freileitungsanteils auf Werte im Bereich von ca. 55A.

Die Varianten zeigen, dass in beiden Fällen der Spitzenwert des Erdschlussstroms am Ende der Übertragungsleitungen in der Größenordnung von ca. 50A liegt.

Die Abbildungen 4.21 und 4.22 zeigen die Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Übertragungsleitungen bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1. Die Tabelle 4.10 gibt eine Übersicht über die bei der Auswertung betrachteten Varianten.

Tabelle 4.10: Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1

Var.	Leitungselemente																	
	100m			900m			1km			1km			1km			900m		100m
12	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ES aus	FL aus	ÜA aus	
22	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	
32	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ES aus	FL aus	ÜA aus	
42	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	
54	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	ES aus	K FL	aus ÜA	
93	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus ÜA	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ES aus	FL aus	ÜA aus	
94	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	ES aus	K FL	aus ÜA	
143	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus ÜA	
153	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	
163	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	aus aus	K FL	ES aus	K aus	aus aus	

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

Spitzenwerte der max. Erdschlussströme über die Leitung 1 - Erdschluss am Ende der Leitung 1

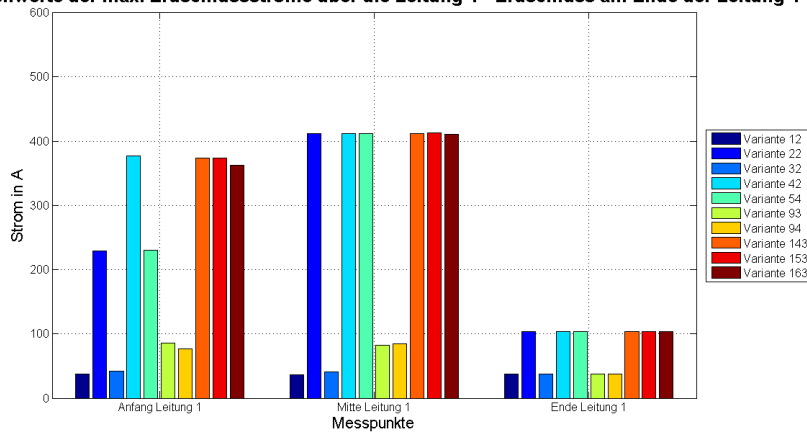


Abbildung 4.21: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

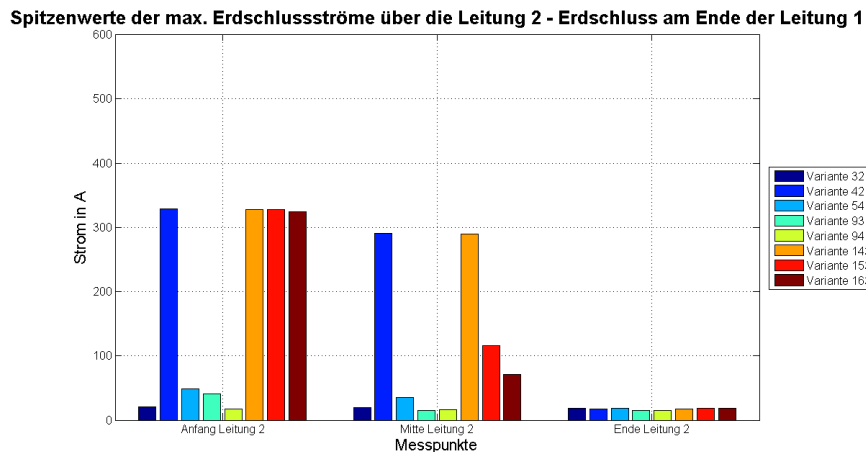


Abbildung 4.22: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse zeigt, dass sich bei einem Fehler am Ende der Übertragungsleitung der Spitzenwert des Erdschlussstroms wie bei einem Fehler am Anfang der Leitung verhält. Der Vergleich der Abbildungen 4.21 und 4.22 zeigt dieselbe Charakteristik. Der Erdschlussstrom am Ende der fehlerfreien Übertragungsleitung liegt bei allen Varianten in derselben Größenordnung von ca. 20A. Hingegen steigt bei dominantem Energiekabelanteil der fehlerbehafteten Übertragungsleitung der Erdschlussstrom an der Fehlerstelle an.

Es ist zu erkennen, dass je größer der Anteil des nicht kurzgeschlossenen Energiekabels ist, desto größer wird auch der auftretende Erdschlussstrom.

Infolge der auftretenden Erdschlussströme kommt es nach der Abschaltung zu einer Anhebung der Spannung auf der fehlerfreien Übertragungsleitung. Der Grund dafür sind die geladenen Kapazitäten, wodurch die Spannung mit einem Gleichanteil überlagert wird, der die Spannung auf einen höheren Wert anhebt. Der Abklingvorgang dieses Gleichanteils erfolgt bei Freileitungen mit ihren niedrigeren Kapazitäten schneller als bei Energiekabel.

Die Abbildungen 4.23 und 4.24 zeigen diesen Verlauf bei der Variante 31 für eine Freileitung und bei der Variante 41 für ein Energiekabel.

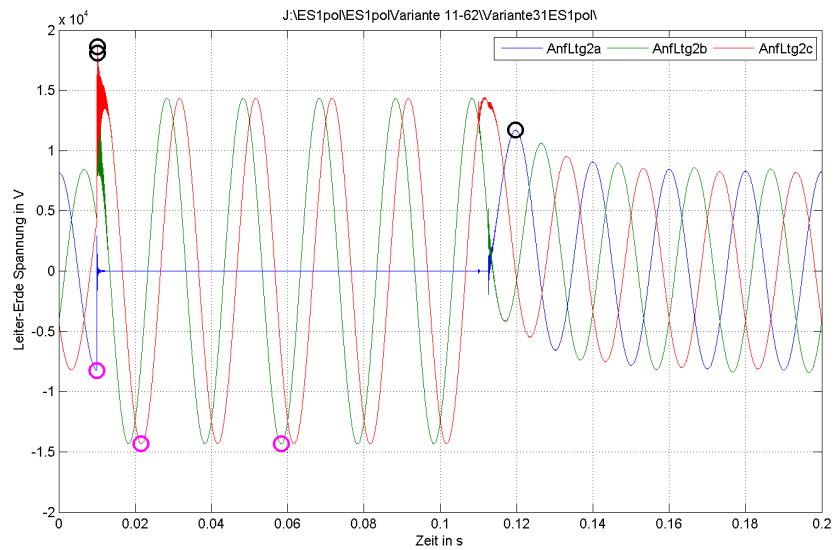


Abbildung 4.23: Abklingvorgang der Spannung über die Leitung 2 nach der Schutzauslösung für die Variante 31; a Phase 1; b Phase 2; c Phase 3

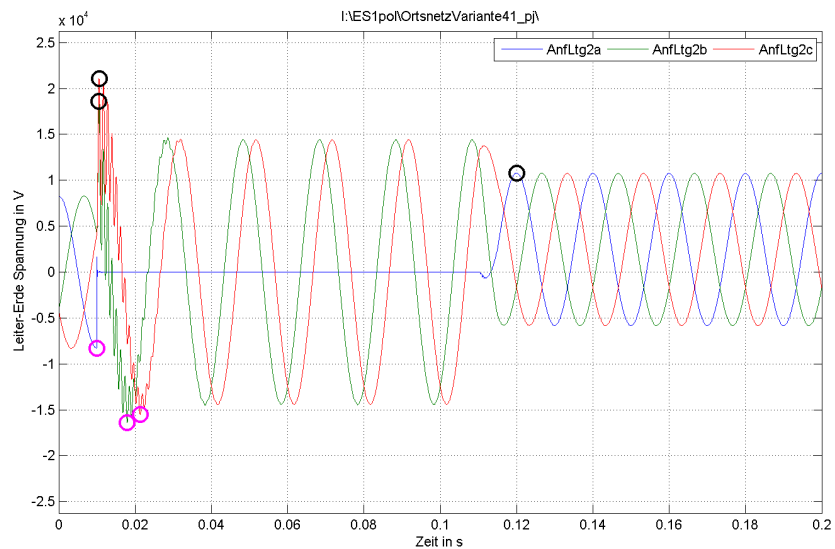


Abbildung 4.24: Abklingvorgang der Spannung über die Leitung 2 nach der Schutzauslösung für die Variante 41; a Phase 1; b Phase 2; c Phase 3

4.4.2 Maximale Spannungen im Erdschlussfall

Bei der Betrachtung der Erdschlussspannungen über die Übertragungsleitungen ist zu erkennen, dass bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1 die Spannungsmaxima bei den

Varianten 61, 91, 92, 101, 102, 171, 172, 181, 182 und 201 am Ende der Übertragungsleitungen auftreten. Die Spannungsmaxima der jeweiligen Variante werden in den Abbildungen 4.25 und 4.26 dargestellt. Eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten ist in den Tabellen 4.11 und 4.12 ersichtlich.

Tabelle 4.11: Variantenübersicht der Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
61	aus	K	ES	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
92	aus	K	ES	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
101	ÜA	FL	ES	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
171	ÜA	FL	ES	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
181	ÜA	FL	ES	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannsableiter

Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 - Erdschluss am Anfang der Leitung 1

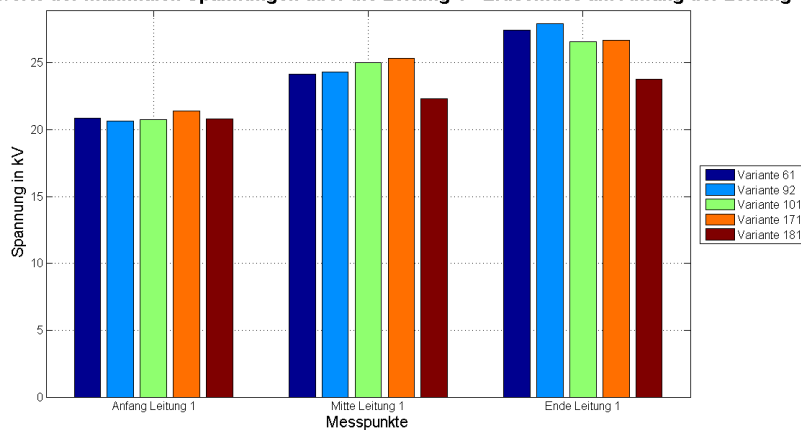


Abbildung 4.25: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

Tabelle 4.12: Variantenübersicht der Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
61	aus	K	ES	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
91	ÜA	FL	ES	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
92	aus	K	ES	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
102	aus	K	ES	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
172	aus	K	ES	K	aus	K	ÜA	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA	
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
182	aus	K	ES	K	ÜA	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA	
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	
201	aus	K	ES	K	ÜA	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA	
	aus	K	aus	K	ÜA	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA	

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannsableiter

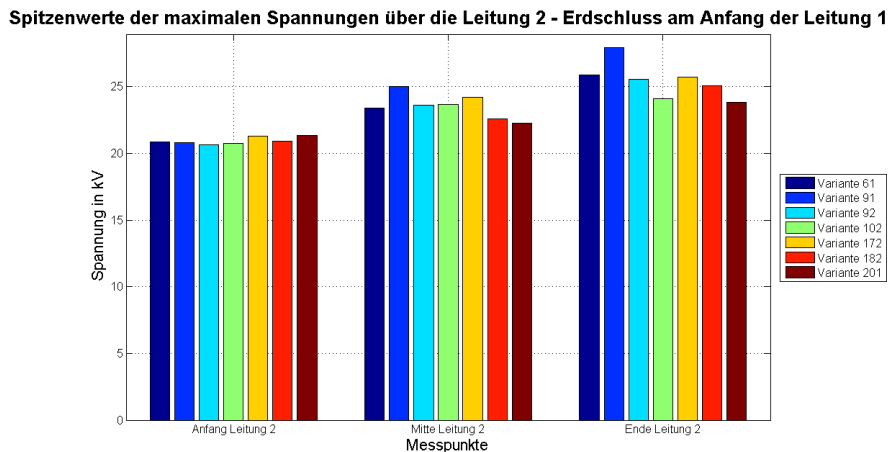


Abbildung 4.26: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

Diese Varianten weisen einen Energiekabelanteil von $<50\%$ auf und enden mit einer Freileitung. Durch den größeren Wellenwiderstand der Freileitung kann die Spannungswelle beim Übergang von Energiekabel auf Freileitung leichter transmittieren. Am Ende der Übertragungsleitung kommt es zu einer stärkeren Reflexion bei einem Leitungsabschluss mit einer Freileitung, als bei einem Leitungsabschluss mit einem Energiekabel, aufgrund des Übergangswiderstandes zwischen Übertragungsleitung und Verteilstation.

4.5 Atmosphärische Überspannungen

Wie bei den vorangegangenen Simulationen, wurde auch hier jeweils ein Blitzeinschlag am Ende und am Anfang der Übertragungsleitungen simuliert. Da der Blitz allerdings nur in die Freileitungsseile einschlägt, wandert der Einschlagsort, wie in Abbildung 4.27 dargestellt, bei manchen Varianten vom Ende bzw. vom Anfang der Übertragungsleitung in die Mitte. Um die einzelnen Varianten miteinander vergleichen zu können, werden diese je nach Einschlagsort sortiert und in sieben Gruppen, in Abhängigkeit der Entfernung des Einschlagsortes zum Umspannwerk, unterteilt.

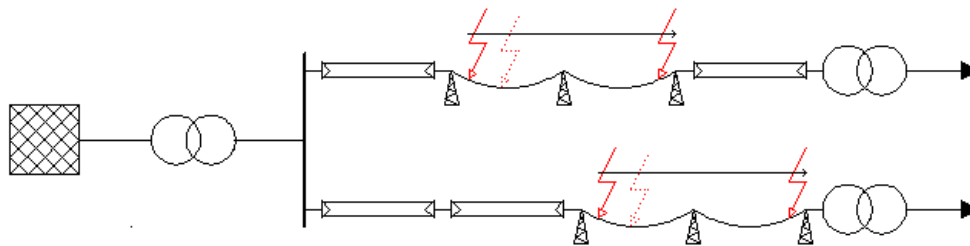


Abbildung 4.27: Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung atmosphärischer Überspannungen

Der **Blitzeinschlag erfolgt nach 10ms**. Der hierfür verwendete Blitz besitzt eine **Anstiegszeit** von $1.2\mu\text{s}$ und eine **Rückenthalbwertszeit** von $50\mu\text{s}$ mit einer Stromspitze von **12kA**.

Die Auswertungsergebnisse wurden der genormten Bemessungs-Blitzstoßspannung (BIL) gegenübergestellt. Diese besitzt für eine maximal zulässige Spannung der Betriebsmittel von 12kV (Effektivwert) einen Spitzenwert von 75kV [29].

4.5.1 Transiente Spannungen infolge des Blitzeinschlags

Auswertung der Variantengruppe 1

Die Spitzenwerte der Spannungen dieser Gruppe liegen in derselben Größenordnung. Die Leitung 1 besteht aus einer durchgehenden Freileitung, mit einem großen Wellenwiderstand im Vergleich zum Energiekabel. Aus diesem Grund kommt es am Ende der Leitung 1 zu einer Reflexion, welche die Spannungswerte in der Mitte der Übertragungsleitung auf einen Wert von ca. 1300kV anhebt. Die Messstellen am Ende und am Anfang der Leitung 1 befinden sich nach dem Überspannungsableiter, der die Spannung weitgehend auf Werte unterhalb von 70kV begrenzt.

Die auftretenden Maximalwerte der Spannungen auf der Leitung 2 werden bereits am Anfang von einem Überspannungsableiter begrenzt. Es ist ebenfalls eine Erhöhung der Spannung in der Mitte der Übertragungsleitung zu erkennen, die von Reflexionserscheinungen verursacht wird. Die höchsten Spannungswerte treten bei den Varianten 11 und 31 (durchgehende Freileitungsabgänge) im Bereich von ca. 79kV und bei den Varianten 171 und 181, bei welchen der Abgang 1 aus einer durchgehenden Freileitung und die Leitung 2 in der Mitte aus einer Freileitung besteht, mit ca. 81kV auf.

Am Ende von Leitung 2 liegen die Spannungen im Bereich von ca. 80kV. Variante 51 weist ein durchgehendes Energiekabel auf und die Spannung ist um ca. 40kV größer als bei den anderen Varianten. Am Leitungsende ist kein Überspannungsableiter vorhanden.

Die Abbildungen 4.28 und 4.29 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Übertragungsleitungen bei einem Blitzeinschlag am Anfang der Leitung. Die Tabelle 4.13 gibt eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.13: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 1 - Blitzschlag nach 100m

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
11	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
31	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
51	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
91	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
101	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
111	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
171	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	
181	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	ÜA aus	

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

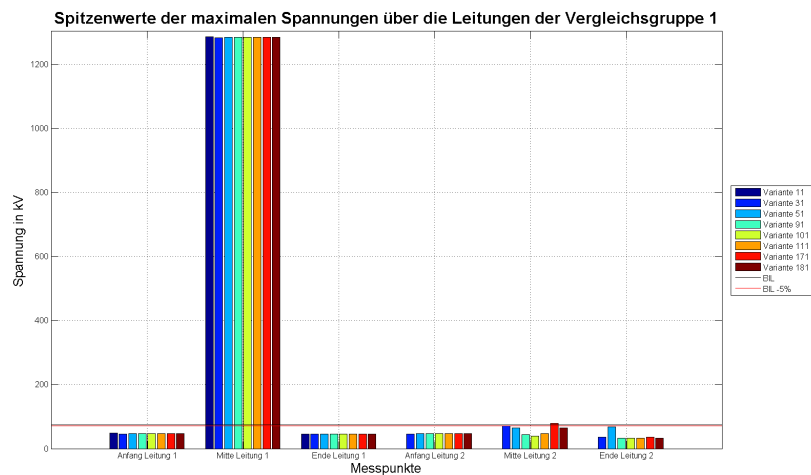


Abbildung 4.28: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 1

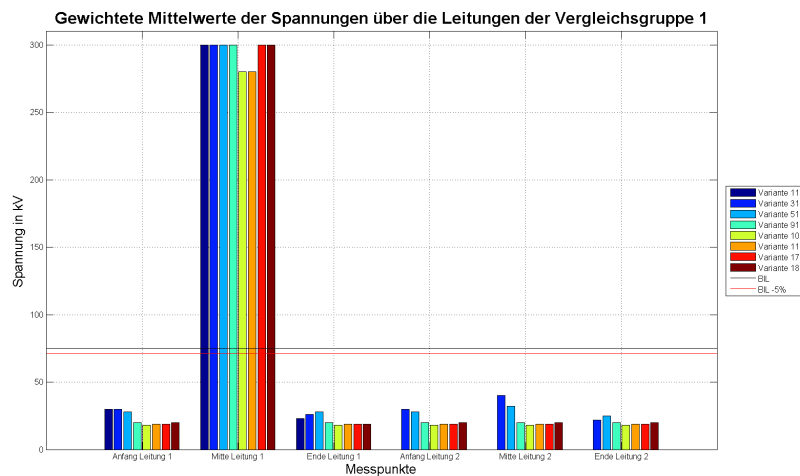


Abbildung 4.29: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 1

Auswertung der Variantengruppe 2

Die Spannungen am Anfang und am Ende der Leitungen liegen für alle Varianten bei ca. 40kV. Auch in diesem Fall gibt es eine Reflexionserscheinung am Ende der Übertragungsleitung, wodurch sich in der Mitte der Übertragungsleitung höhere Spannungen einstellen. Für die Varianten 61, 91 und 121 nimmt die Spannung in der Mitte der Leitung 1 einen Wert von ca. 50kV und für die Varianten 151, 182 und 201 von ca. 60kV an. Bei den ersten drei Varianten handelt es sich bei der Leitung 1 um eine Übertragungsleitung mit einem Freileitungsanteil $>83\%$ und die Leitung endet mit einer Freileitung. Bei den letzten drei Varianten beträgt der Freileitungsanteil der Leitung 1 ca. 66% und sie beginnt und endet mit einem jeweils 1km langen Energiekabel.

In der Mitte der Leitung 2 besitzen die Varianten 61, 91, 182 und 201 einen Spannungswert von ca. 45kV und die Varianten 121 und 161 einen Wert von ca. 70kV. Bei diesen beiden Varianten besteht die Leitung 2 aus einem durchgehenden Energiekabel. Auch am Ende der Übertragungsleitung stellt sich für diese Varianten ein Spannungswert von ca. 75kV ein. Dieser Spannungswert am Ende der Leitung ist ca. doppelt so groß wie der Spannungswert der anderen vier Varianten. Wie zuvor bei der Variante 51 wird auch hier die Spannung vor der Messstelle von keinem Überspannungsableiter begrenzt.

Durch den Überspannungsableiter in der Nähe des Einschlagortes ergibt sich für alle Varianten eine mittlere Spannungsbelastung in der Größenordnung von ca. 25kV.

Die Abbildungen 4.30 und 4.31 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Leitungen bei einem Blitzeinschlag nach 1km Leitungslänge. Die Tabelle 4.14 gibt eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.14: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 2 - Blitzschlag nach 1km

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
61	aus aus	K K	aus aus	K K	ÜA ÜA	Blitz aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	ÜA ÜA		
92	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	ÜA aus	Blitz aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	ÜA ÜA		
121	aus aus	K K	aus aus	K K	ÜA aus	Blitz aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	ÜA aus		
161	aus aus	K K	aus aus	K K	ÜA aus	Blitz aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	aus aus	FL K	ÜA aus		
182	aus ÜA	K FL	aus aus	K FL	ÜA aus	Blitz aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	ÜA ÜA		
201	aus aus	K K	aus aus	K K	ÜA ÜA	Blitz aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL FL	aus aus	FL K	ÜA aus		

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

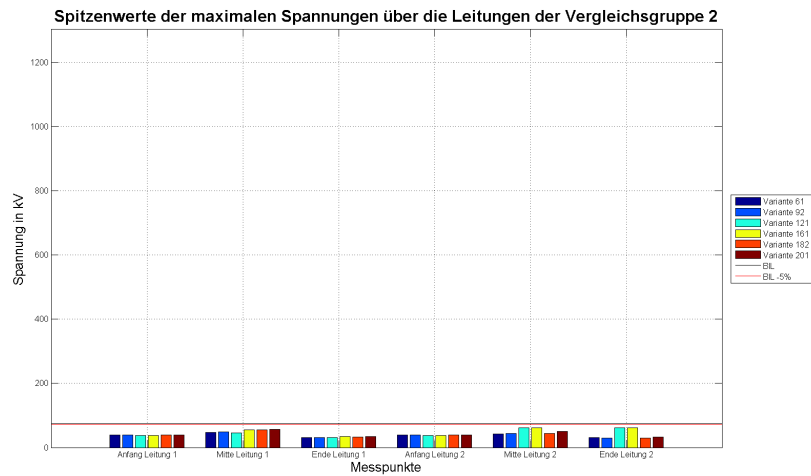


Abbildung 4.30: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 2

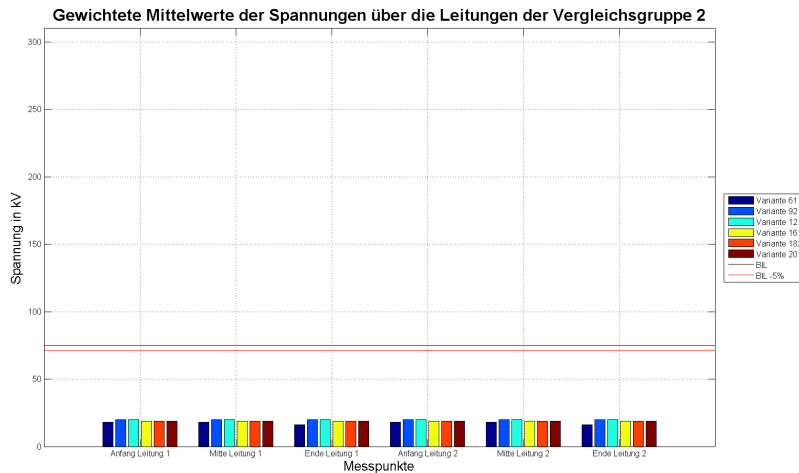


Abbildung 4.31: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 2

Auswertung der Variantengruppe 3

Die Variante 151 weist mit 70kV eine um 35kV höhere Spannung am Ende der Leitung 2 auf als die Varianten 172 und 191. Der Grund dafür ist, dass es sich hier um ein Energiekabel handelt. Die reflektierte Welle am Ende der Übertragungsleitung wird daher von keinem Überspannungsableiter begrenzt. Die Spannung wird bei allen drei Varianten am Ende der Übertragungsleitung reflektiert. Alle drei Varianten bestehen in der Mitte aus einer Freileitung mit Überspannungsableiter wodurch die Spannung in der Leitungsmitte begrenzt wird. Bei der Variante 151 handelt es sich bei der Leitung 2 um ein durchgehendes Energiekabel ohne Überspannungsableiter.

Wie zuvor verteilen sich die gewichteten Mittelwert der Spannungen in allen Varianten, aufgrund der Einschlagnähe zum Überspannungsableiter, gleichmäßig über die Übertragungsleitungen. Der Mittelwert für alle Varianten beträgt ca. 21kV.

Die Abbildungen 4.32 und 4.33 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Übertragungsleitungen bei einem Blitzeinschlag nach 2km Leitungslänge. Die Tabelle 4.15 gib eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.15: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 3 - Blitzeinschlag nach 2km

Var.	Leitungselemente																	
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m			
151	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	K	aus	K	aus	K	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus
172	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	K	aus	K	aus	K	aus
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA
191	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	K	aus	K	aus	K	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	K	aus	K	aus

Legende: K...Energiekabel; FL...Freileitung; ÜA...Überspannungsableiter

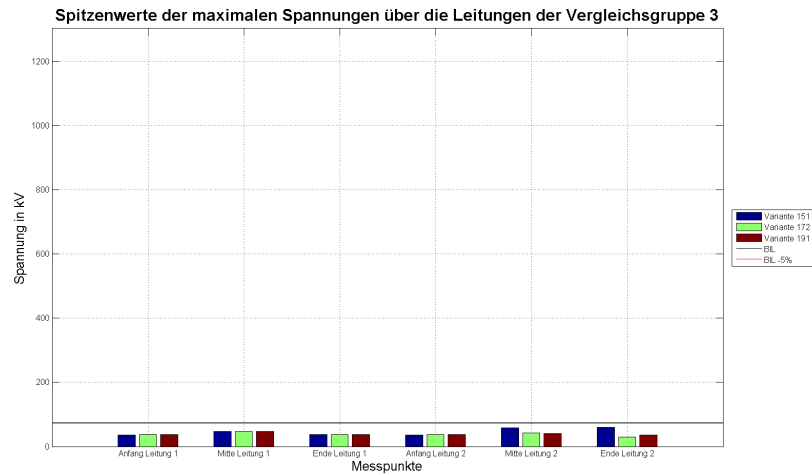


Abbildung 4.32: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 3

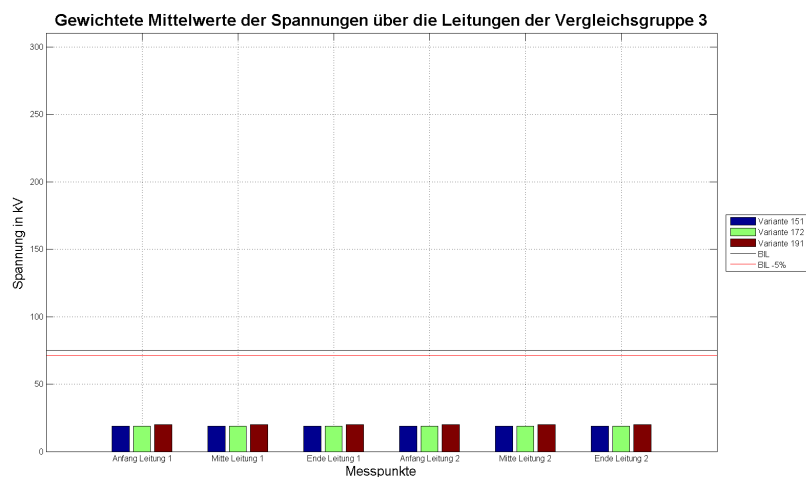


Abbildung 4.33: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 3

Auswertung der Variantengruppe 4

Bei allen drei Varianten besteht die Leitung 1 zu 50% aus einem Energiekabel und zu 50% aus einer Freileitung. Die Leitung 2 der Variante 71 besteht ebenfalls zur Hälfte aus einem Energiekabel und zur Hälfte aus einer Freileitung. Die Leitung 2 der Variante 102 ist eine durchgehende Freileitung und die Leitung 2 der Variante 131 ist ein durchgehendes Energiekabel.

Die Spannung am Anfang der Leitung 1 beträgt für alle drei Varianten ca. 40kV. In der

Mitte der Leitung kommt es zu einer Reflexion, wodurch sich dort für alle drei Varianten ein Spannungswert von ca. 68kV ergibt. Am Anfang der Leitung 2 beträgt die Spannung für alle drei Varianten ebenfalls ca. 40kV. In der Leitungsmitte kommt es bei Variante 102 wie zuvor auf der Leitung 1 zu einer Reflexion und infolge dessen zu einer Spannung von ca. 66kV. Wie bereits bei der Gruppe 3 stellt sich am Ende und in der Mitte der Leitung 2 für die Variante 131 eine höhere Spannung mit ca. 70kV ein. Auch in diesem Fall handelt es sich bei der Übertragungsleitung um ein durchgehendes Energiekabel ohne einen Überspannungsableiter.

Da sich auch hier die Einschlagstelle in der Nähe eines Überspannungsableiters befindet, verteilen sich die gewichteten Mittelwert der Spannungen gleichmäßig über die Übertragungsleitungen. Der gewichtete Mittelwert der drei Varianten beträgt ca. 21kV.

Die Abbildungen 4.34 und 4.35 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Übertragungsleitungen bei einem Blitzeinschlag in der Leitungsmitte. Die Tabelle 4.16 gib eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.16: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 4 - Blitzeinschlag in der Leitungsmitte

Var.	Leitungselemente																	
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m			
71	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA
102	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA
131	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

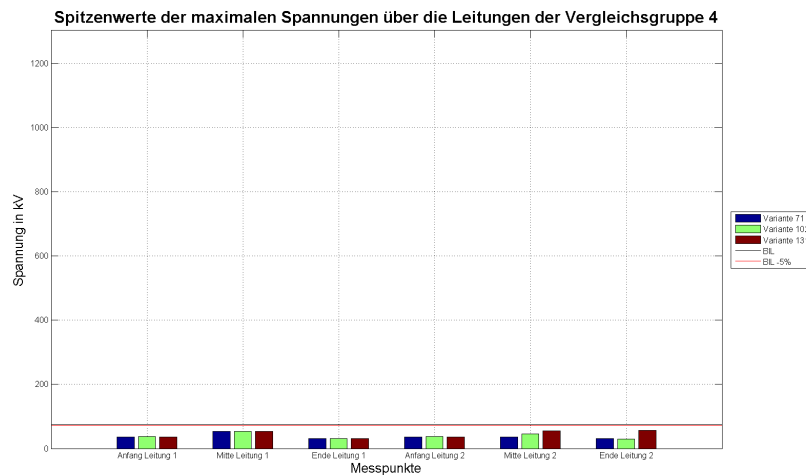


Abbildung 4.34: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 4

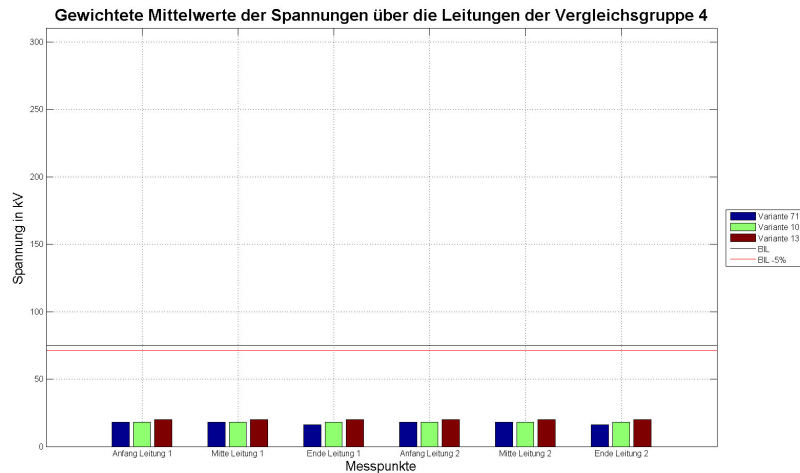


Abbildung 4.35: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 4

Auswertung der Variantengruppe 5

Bei allen Varianten zeigt sich aufgrund der Reflexion am Ende der Leitung 1 eine höhere Spannung mit einem Wert von ca. 83kV. Bei allen Varianten endet die Übertragungsleitung mit einem Energiekabel, wodurch die Spannung an der Messstelle von keinem Überspannungsableiter begrenzt wird. In der Mitte der Übertragungsleitungen befindet sich eine Freileitung mit Überspannungsableitern, wodurch die maximale Spannung in der Mitte der Übertragungsleitung auf ca. 50kV begrenzt wird.

Für die Leitung 2 weist die Variante 152 mit ca. 41kV den höchsten Wert am Ende der Übertragungsleitung auf, da diese aus einem durchgehenden Energiekabel besteht. Die Variante 174, bei der die Übertragungsleitung hingegen aus einer reinen Freileitung mit Überspannungsableiter am Ende besteht, weist daher mit ca. 38kV den niedrigsten Spannungswert für diese Messstelle auf. Die Spitzenwerte der Spannungen über die Leitung 2 liegen bei allen drei Varianten unter 42kV.

Wie zuvor verteilen sich die gewichteten Mittelwerte der Spannungen in allen Varianten, aufgrund der Einschlagnähe zum Überspannungsableiter, gleichmäßig über die Übertragungsleitungen. Der Mittelwert der drei Varianten liegt unter 25kV.

Die Abbildungen 4.36 und 4.37 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Leitungen bei einem Blitzeinschlag nach 4km Leitungslänge. Die Tabelle 4.17 gibt eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.17: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 5 - Blitzschlag nach 4km

Var.	Leitungselemente																					
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m			
152	aus	K	aus	aus	K	aus	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	Blitz	ÜA	K	aus	aus	K	aus	aus	K	aus
174	aus	K	aus	aus	K	aus	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	Blitz	ÜA	K	aus	aus	K	aus	aus	K	aus
192	aus	K	aus	aus	K	aus	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	Blitz	ÜA	K	aus	aus	K	aus	aus	K	aus

Legende: K...Energiekabel; FL...Freileitung; ÜA...Überspannungsableiter

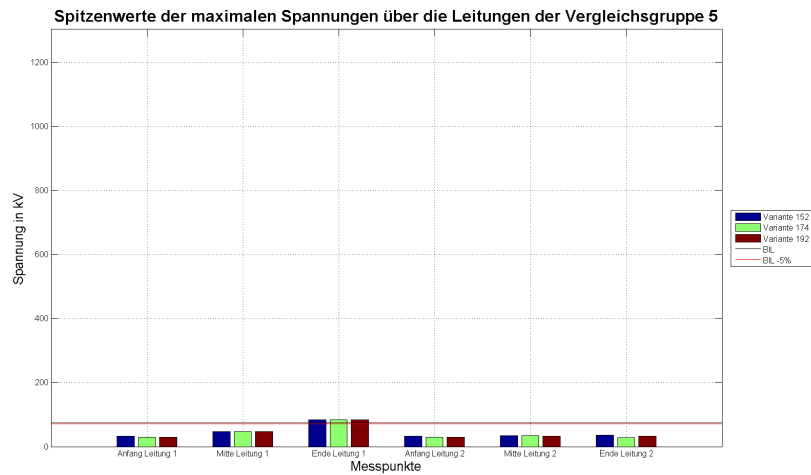


Abbildung 4.36: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 5

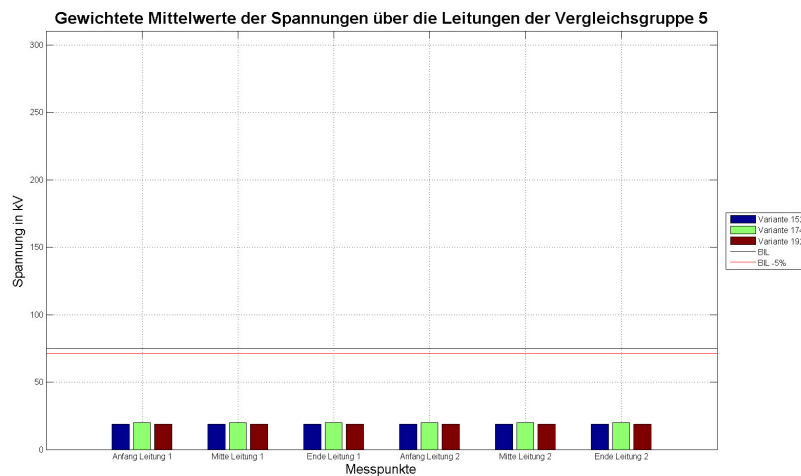


Abbildung 4.37: Auswertungsergebnisse der gewichtete Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 5

Auswertung der Variantengruppe 6

Bei all diesen Varianten befindet sich der Einschlagort genau beim Übergang zwischen Energiekabel und Freileitung.

Die Varianten 81, 112 und 141 besitzen ein Energiekabel bis zur Einschlagstelle und enden dann in einer Freileitung.

Bei den Varianten 162, 184 und 202 handelt es sich um eine Freileitung bis zur Fehlerstelle und die Übertragungsleitungen enden in einem Energiekabel. Da die Freileitung einen größeren Wellenwiderstand besitzt, breitet sich die Welle bei diesen Varianten stärker in Richtung des Umspannwerkes aus, wodurch in der Mitte der Leitung 1 vor allem bei Variante 184 mit ca. 68kV eine höhere Spannung zu erkennen ist, als bei den übrigen Varianten. Das Energiekabel am Ende besitzt keinen Überspannungsableiter, wodurch auch hier mit ca. 90kV im Vergleich mit den anderen drei Varianten mit ca. 40kV eine höhere Spannung zu erkennen ist.

Über die Leitung 2 stellt sich bei der Variante 141 am Leitungsende eine Spannung von ca. 68kV ein. Dieser Wert ist um ca. 40% höher als bei den anderen Varianten. Die Leitung 2 der Variante 141 besteht aus einem reinen Energiekabel ohne Überspannungsableiter. Alle anderen Varianten besitzen höchstens 1km vor der Messstelle einen Überspannungsableiter der die auftretende Spannung begrenzt.

Da sich auch hier die Einschlagstelle in der Nähe eines Überspannungsableiters befindet, verteilen sich die gewichteten Mittelwerte der Spannungen gleichmäßig über die Abgänge. Die Mittelwerte aller Varianten liegen unter 25kV

Die Abbildungen 4.38 und 4.39 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Übertragungsleitungen bei einem Blitzeinschlag nach 5km Leitungslänge. Die Tabelle 4.18 gib eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.18: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 6 - Blitzeinschlag nach 5km

Var.	Leitungselemente																															
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m													
81	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
112	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL
141	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
162	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
184	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL
202	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	Blitz	FL	aus	FL	ÜA

Legende: K...Energiekabel; FL...Freileitung; ÜA...Überspannungsableiter

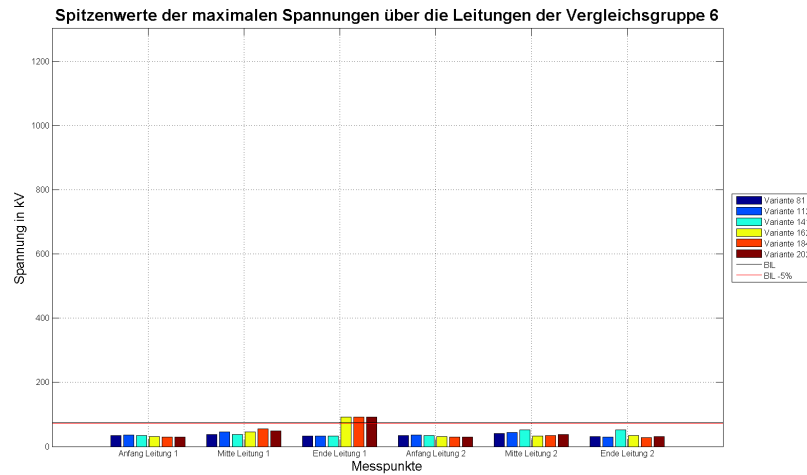


Abbildung 4.38: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 6

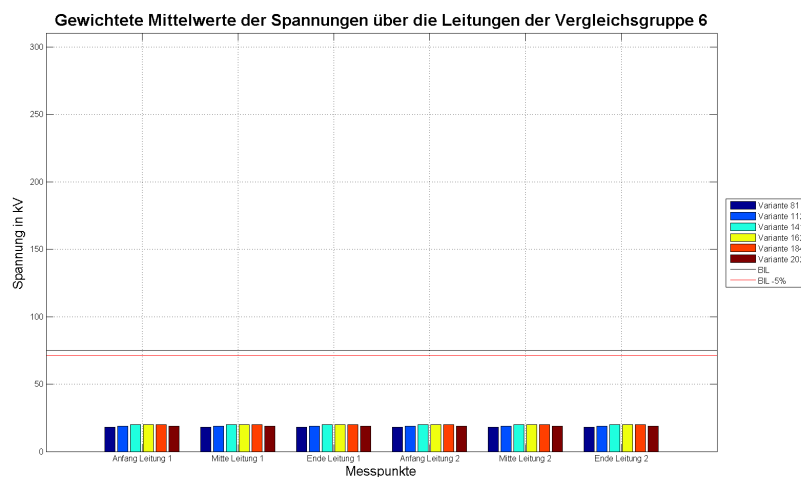


Abbildung 4.39: Auswertungsergebnisse der gewichtete Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 6

Auswertung der Variantengruppe 7

Die Varianten 12, 32, 52, 62, 93, 94, 103, 113, 122, 173 und 183 bestehen von der Fehlerstelle am Ende der Übertragungsleitung, bis zum Umspannwerk, beinahe alle aus einer durchgehenden Freileitung. Aufgrund des hohen Wellenwiderstandes der Freileitung, kommt es zu einer starken Reflexion an den Leitungsenden und zu einem hohen Spannungswert von ca. 1300kV in der Mitte der Leitung 1.

Auf der Leitung 2 lässt sich bei den Varianten 32 und 173 eine Spannungsspitze von ca.

100kV in der Leitungsmitte erkennen. Bei der Variante 173 liegt der Übergang zwischen Freileitung und Energiekabel sehr mittig, wodurch direkt dort eine Reflexionsstelle auftritt.

Die gewichteten Mittelwerte der Spannungen verhalten sich wie die Maximalwerten. Die reine Freileitungsvarianten 12 mit nur einem Abgang besitzen in der Mitte der Leitung 2 einen gewichteten Mittelwert über 30kV. Für die restlichen Varianten liegen die gewichteten Mittelwerte über die Leitung 2 unter 25kV. Bei den Varianten 12, 32, 52, 94, 103, 113, 122, 173 und 183 liegen die gewichteten Mittelwerte in der Mitte der Leitung 1 bei ca. 300kV. Bei Variante 62 ergibt sich in der Mitte der Leitung 1 ein Mittelwert von ca. 260kV und für die Variante 93 ein Mittelwert von ca. 250kV.

Die Abbildungen 4.40 und 4.41 zeigen die auftretenden Spitzenwerte und gewichteten Mittelwerte der maximalen Spannungen über die beiden Übertragungsleitungen bei einem Blitzeinschlag am Leitungsende. Die Tabelle 4.19 gibt eine Übersicht über die für die Auswertung betrachteten Varianten. Der Einschlagort ist rot markiert.

Tabelle 4.19: Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 7 - Blitzeinschlag 100m vor dem Leitungsende

Var.	Leitungselemente																			
	100m			900m			1km			1km			1km			900m			100m	
12	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
32	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
52	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
62	aus aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
72	aus aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
82	aus aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
93	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
94	aus aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
103	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
104	aus aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
113	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
114	aus aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
122	aus aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
132	aus aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
142	aus aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
173	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		
183	ÜA aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	FL aus	aus	Blitz aus	FL aus	ÜA aus		

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

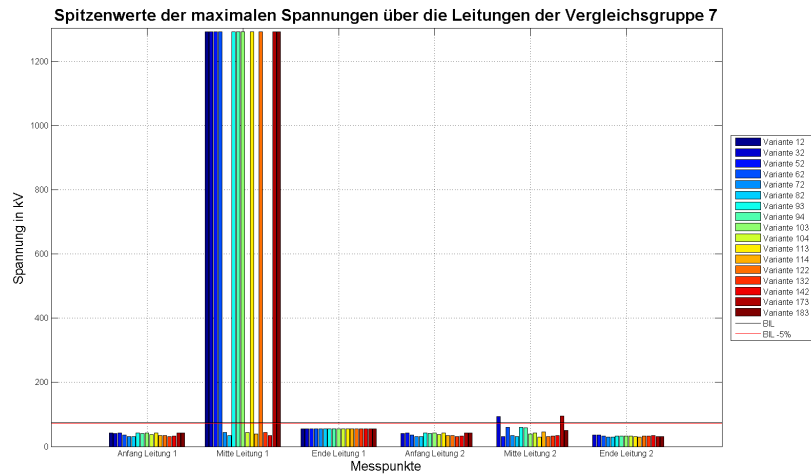


Abbildung 4.40: Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 7

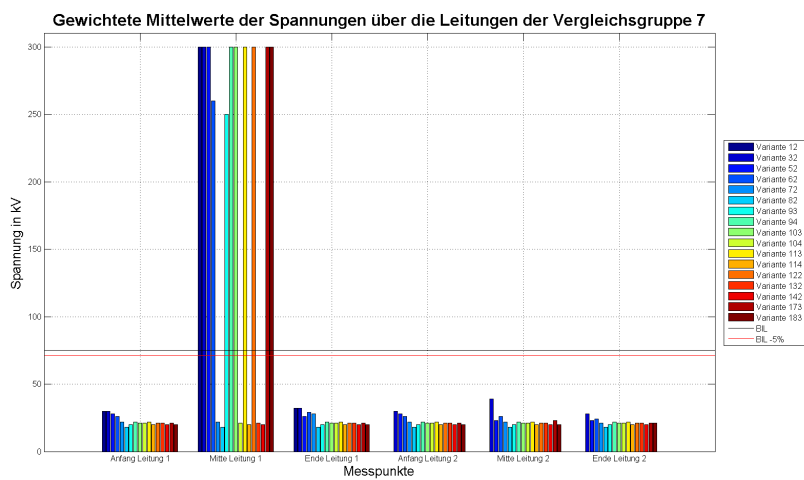


Abbildung 4.41: Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 7

4.6 Lastabwurf

Beim Lastabwurf wird der **Leistungsschalter** am Ende der Leitung 1, wie in Abbildung 4.42 dargestellt, nach **10ms geöffnet**.

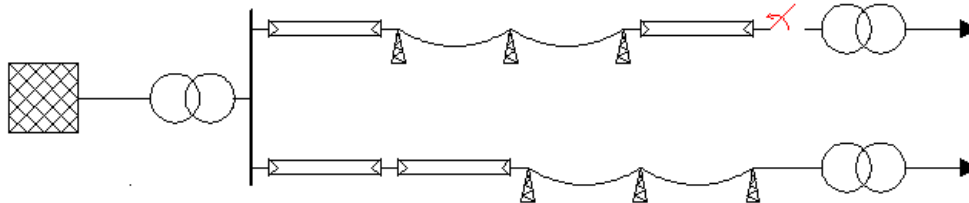


Abbildung 4.42: Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des Lastabwurfs

4.6.1 Spannungsanhebung

Aufgrund der kurzen Leitungslängen kommt der Ferranti-Effekt nicht zu tragen.

Die Spannungserhöhung nach einem Lastabwurf ist von der Entlastung der abgegebenen Blindleistung des vorgelagerten Generators, der transienten Generatorreaktanz, der Streureaktanz des Maschinentransformators und der Spannungsregelung abhängig [8].

Die hier angenommene Blindlast ist mit einer Scheinleistung von 150kVA und einem $\cos\varphi$ von 0.98 pro Abzweig relativ klein. Des weiteren wurde für die Versorgung des Netzes eine ideale Spannungsquelle verwendet. Aus diesem Grund kommt es bei den Simulationen zu keiner signifikanten Spannungserhöhung und es wird auf eine Auswertung der Ergebnisse verzichtet. Es werden lediglich die nach der Abschaltung im Netz verbleibenden Ströme betrachtet.

4.6.2 Restströme nach dem Lastabwurf

Abbildung 4.43 zeigt die Restströme nach der Abschaltung über die Leitung 1. Die Tabelle 4.20 gib einen Überblick über die bei der Auswertung betrachteten Varianten. Eine Gesamtübersicht über die die durchgeführten Simulationsvarianten ist im Anhang enthalten.

Tabelle 4.20: Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der nach einem Lastabwurf verbleibenden Restströme

Var.	Leitungselemente																
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m		
31	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA
41	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus
51	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA
52	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus
101	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	ÜA
102	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

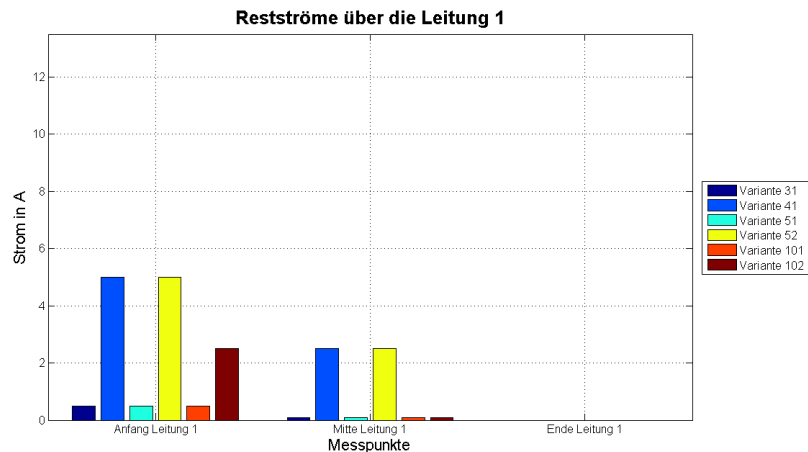


Abbildung 4.43: Auswertungsergebnisse der Restströme nach der Abschaltung über die Leitung 1

Bei der Variante 31 handelt sich bei beiden Abgängen um durchgehende Freileitungsabgänge. Der Strom am Anfang der Leitung 1 beträgt ca. 0.5A und in der Leitungsmitte 0.15A. Variante 41 besitzt zwei durchgehende Energiekabelabgänge. Der Strom am Leitungsanfang ist um den Faktor 10 größer als bei Variante 31 und besitzt in der Mitte der Übertragungsleitung den Wert von ca. 2.5A.

Die Varianten 51 und 52 besitzen jeweils einen durchgehenden Freileitungs- und Kabelabgang. Bei Variante 51 tritt der Lastabwurf auf der Freileitung und bei Variante 52 auf dem Energiekabel auf. Für Variante 51 ergeben sich dieselben Stromwerte wie für Variante 31 und für Variante 52 ergeben sich dieselben Stromwerte wie für Variante 41.

Bei Variante 101 besteht die Leitung 1 aus einer durchgehenden Freileitung und bei Variante 102 beginnt die Leitung 1 mit einem 3km langen Energiekabel und endet mit einer 3km langen Freileitung. Für Variante 101 ergeben sich dieselben Stromwerte wie für die Varianten 31 und 51. Bei der Variante 102 hingegen ergibt sich am Leitungsanfang ein Stromwert von ca. 2.5A.

In Abhängigkeit des Energiekabelanteils über die Leitung 1 stellt sich die Höhe des auf der Übertragungsleitung verbleibenden Stroms ein. Die Ursache dafür sind die geladenen Kabelkapazitäten.

Kapitel 5

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Das numerische Berechnungsmodell

Für die numerische Untersuchung des gegebenen Mittelspannungsnetzes wurde in EMTP-RV ein Simulationsmodell erstellt. Die verschiedenen Kombinationen der Abgänge wurden realen Energiekabel-/Freileitungsstrukturen entnommen. Durch die Variation der Energiekabel und Freileitungsanteile der Übertragungsleitungen wurden 20 unterschiedliche Varianten erstellt. Für diese Varianten wurden einerseits betriebsbedingte Vorgänge im Netz, wie das Zuschalten eines Transformators oder ein Lastabwurf und andererseits Fehlerfälle, wie dreipolige Kurzschlüsse, einpolige Erdschlüsse und atmosphärische Entladungen untersucht. Durch die Variation der Fehlerstellen ergeben sich ca. 220 Simulationsvarianten.

Das numerische Berechnungsmodell des 10kV isoliert betriebenen Netzes wird aus einem vorgelagerten 110-kV-Netz über einen 12MVA Transformator gespeist. Das Umspannwerk beinhaltet zwei Abgänge mit je einem Leistungsschalter. Die Übertragungsleitungen zu den Verteilerstationen haben jeweils eine Länge von 6km und enden bei Verteiltransformatoren mit einer Leistung von 250kVA. Die an den Verteiltransformatoren angeschlossenen Verbraucher werden durch eine Leistung von 150kVA repräsentiert.

Für die Freileitung wurde die Type Al/St 150/25 10kV und für das Energiekabel die Type NA2XS2Y 150/25 10kV verwendet.

5.2 Einschaltstoßstrom

Bei dem hier verwendeten Transformatormodell kann nur eine Aussage über das allgemeine Verhalten der transienten Vorgänge getroffen werden. Für eine spezifische Auswertung muss die Hysteresekennlinie durch eine eigene Messung aufgenommen und im Modell implementiert werden. Weiters können nur Aussagen für den hier simulierten Zuschaltaugenblick getroffen werden. Wenn sich die Phasenlage bei der Zuschaltung ändert oder eine Vormagnetisierung des Eisenkerns vorliegt, stellen sich andere Ströme und Spannungen ein.

Energiekabel weisen eine niedrigere Dämpfung gegenüber den Einschaltstoßströmen als Freileitungen auf, da diese aufgrund der hohen Frequenzabhängigkeit und der niedrigen Betriebsinduktivität den Strom schwächer begrenzen. Bei einem Abgang mit einem durchgehenden Energiekabel treten bis zu $4\times$ höhere Ströme auf als bei einem Abgang mit einer durchgehenden Freileitung. Bei zwei parallelen Abgängen kommt es zu einer Stromaufteilung. Besteht einer der beiden Abgänge aus einer durchgehenden Freileitung, steigt die Strombelastung des zweiten Abganges in Abhängigkeit des Energiekabelanteils.

Werden beide Abgänge gleich aufgebaut und besteht die Übertragungsleitung zu 50% aus einem Energiekabel und zu 50% aus einer Freileitung, kann der Strom um $1/3$, im Vergleich zu zwei durchgehenden Energiekabelabgängen, verringert werden.

Besitzt das Umspannwerk nur einen Abgang nimmt die Spannung sowohl über das Energiekabel, als auch über die Freileitung zu. Die Differenz der Spannung zwischen einer Konfiguration mit nur einem Energiekabel und einer Konfiguration mit nur einer Freileitung nimmt über die Übertragungsleitung zu und es ergibt sich eine Differenz von ca. 25%. Besitzt das Umspannwerk hingegen zwei Abgänge mit durchgehenden Freileitungen oder Energiekabel beträgt die Spannungsdifferenz am Ende der Übertragungsleitung nur mehr 6.5%.

Aus den numerischen Berechnungsergebnissen geht hervor, dass beim Zuschalten von Transformatoren des untersuchten, isoliert betriebenen Mittelspannungsnetz die Leitungswahl keinen signifikanten Einfluss auf die Spitzenwerte des Einschaltstoßstromes am Ende der Übertragungsleitung zeigt. Durch die gegebenen elektrotechnischen Eigenschaften von Energiekabel und Freileitungen ist die Wahl der Übertragungsleitung vor allem am Anfang eines Abganges entscheidend und haben einen signifikanten Einfluss auf die auftretenden Einschaltstoßströme.

Bei der Auswertung der maximalen Spitzenwerte der Spannungen zeigt die Wahl einer Leitungskonfiguration, bestehend aus mindestens zwei Abgängen, keine signifikanten Einflüsse. Im Falle einer einfachen Stichleitung - Freileitung - ist aus den Berechnungsergebnissen zu entnehmen, dass die auftretenden Maximalwerte vor allem am Ende der Übertragungsleitung um bis zu 25% vom Mittelwert zunehmen.

5.3 Dreipoliger Kurzschluss

Für den dreipoligen Kurzschluss wird nur ein generatorferner Kurzschluss betrachtet.

Auch hier kann wegen des unterschiedlichen R/X-Verhältnisses zwischen Energiekabel und Freileitung die niedrigere Dämpfung des Energiekabels, für die auftretenden Ströme festgestellt werden, da Energiekabel eine kleine frequenzabhängige Induktivität aufweisen und die überwiegend induktiv auftretenden Kurzschlussströme begünstigen. Bereits bei einem Fehler nach 100m ist ein Unterschied der Dämpfung zwischen einer Freileitung und einem Energiekabel des gleichen Querschnitts zu erkennen.

Durch die kurzen Leitungslängen bis zu den Fehlerstellen, tritt auch ein Spannungseinbruch am Transformator im Umspannwerk auf. Dadurch kommt es bei der Fehlerabschaltung zu einem Sättigungsverhalten im Eisen, welches zu erhöhten Ausgleichsströmen über die

Übertragungsleitungen führt. Diese Ausgleichströme nehmen ab, je weiter die Fehlerstelle vom Umspanner entfernt liegt, da sich auch der Spannungseinbruch über die parallelen Abgänge verringert.

Es zeigt sich, dass die Ausgleichsströme niedrigere Werte annehmen, wenn der Energiekabelanteil über die Übertragungsleitung gering bleibt. Dadurch wirkt die Fehlerstelle "weiter" entfernt und der Ausgleichsstrom wird von der Freileitung stärker gedämpft. Bei hohen Kurzschlussströmen wirken sich daher Freileitungen positiv aus.

Die Spannungseinbrüche bei einem Kurzschluss hängen außerdem vom auftretenden Kurzschlussstrom und der Leitungsimpedanz ab. Ein großer Strom und eine große Leitungsimpedanz begünstigen die Spannungsregeneration. Freileitungen weisen eine größere Leitungsimpedanz auf, hingegen lassen Kabelleitungen einen größeren Kurzschlussstrom zu. Bei einem Fehler tritt daher am Ende einer Übertragungsleitung ein geringer Spannungseinbruch auf, wenn die Übertragungsleitung mit einem Energiekabel beginnt und mit einer Freileitung endet.

5.4 Einpoliger Erdschluss

Der auftretende Erdschlussstrom ist von allen Leitungskapazitäten gegen Erde in einem galvanisch miteinander verbundenen Netz abhängig. Die Spannungen der vom Fehler nicht betroffenen Phasen werden um den Faktor $\sqrt{3}$ angehoben und erzeugen kapazitive Stromanteile, die über die Erde zur Fehlerstelle fließen. Bei Leitungen mit großen Kapazitäten, wie Energiekabel, ist der auftretende Erdschlussstrom daher größer.

Hierbei spielt natürlich wieder die Entfernung zur Fehlerstelle eine Rolle. Besteht die betroffene Übertragungsleitung aus einem durchgehenden Energiekabel und der Fehler befindet sich am Anfang dieser Leitung, wirken sich die nach der Fehlerstelle befindlichen Kapazitäten schwächer aus. Liegt der Fehler hingegen am Leitungsende wirken sich die Kapazitäten der gesamten Übertragungsleitung auf den auftretenden Erdschlussstrom aus.

Nach der Fehlerabschaltung kommt es auf der fehlerfreien Übertragungsleitung zu einer Überlagerung der stationären Spannungen mit einem Gleichanteil. Dieser tritt aufgrund der noch geladenen Kapazitäten auf und klingt daher bei einem Energiekabel langsamer ab, wodurch es zu einer stärkeren mittleren Spannungsbelastung der Übertragungsleitung kommt.

Die maximalen Spannungen im Erdschlussfall werden am Ende der Übertragungsleitung bei einem Fehler am Leitungsanfang und einer Anordnung von Energiekabel-Freileitung begünstigt. Die Spannungswelle kann sich von Energiekabel auf Freileitung aufgrund des Übergangs von kleinerem zu größerem Wellenwiderstand leichter ausbreiten und wird am Leitungsende aufgrund des Übergangs von größerem zu kleinerem Wellenwiderstand stark reflektiert. Eine weitere Reflexionsstelle bildet hier auch der neuerliche Übergang für die reflektierte Welle, dieses Mal von Freileitung auf Energiekabel.

5.5 Atmosphärische Überspannungen

Freileitungen sind durch atmosphärische Entladungen besonders gefährdet. Aus den numerischen Berechnungen geht hervor, dass aufgrund der gewählten Freileitung maximale Spitzenwerte der Spannungen bis hin zum Megavoltbereich auftreten können. Das Zustandekommen von Maximalwerten bis hin zum Megavoltbereich ist ein Zusammenspiel aus dem Verhältnis zwischen Energiekabel- und Freileitungsanteil, sowie dem Einschlagort und den grundlegenden Gesetzen der Transmission und Reflektion transienter Wellen.

Aus den numerischen Berechnungen geht hervor, dass sich besonders Einschlagorte am Ende und am Anfang der Übertragungsleitung in Kombination mit geringem Energiekabelanteil ungünstig auswirken. Durch Teilverkabelung von Freileitungen und durch den zusätzlichen Einsatz von Überspannungsableitern an den Verbindungsstellen der Übertragungsmedien werden auftretende Maximalwerte von über 1000kV auf Werte unterhalb von 100kV begrenzt.

Problematisch hat sich gezeigt, dass es ab einer gewissen Energiekabellänge zu einem Aufschaukeln der transienten Spannungswellen kommen kann. Dieser Fall tritt jedoch nur ein, wenn beim Übergang zwischen Energiekabel und der Schaltanlage keine Überspannungsableiter installiert sind.

5.6 Lastabwurf

Bei einem Lastabwurf stellt sich eine Spannungserhöhung ein. Diese ist von der vom Netz bezogenen Blindleistung, der transienten Reaktanz des vorgelagerten Generators, der Transformator-Streureaktanz und dem Spannungsregler abhängig.

Da für das Transformatormodell kein Spannungsregler nachgebildet wurde, das Netz von einer idealen Spannungsquelle versorgt wird und der Blindleistungsbezug der Lasten gering ist, bildet sich keine signifikante Spannungserhöhung aus. Um eine Aussage treffen zu können, müsste das Transformatormodell angepasst und die frequenzabhängige Generatorreaktanz bei der Einspeisung berücksichtigt werden.

Es ist zu erkennen, dass sich in Abhängigkeit des Energiekabelanteils, am Ende der abgeschalteten Übertragungsleitung, ein kapazitiver Reststrom einstellt. Dieser ist von den vorhandenen Kapazitäten des betroffenen Abgangs abhängig und wird daher bei einem großen Energiekabelanteil im Netz begünstigt.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Eine Teilverkabelung bzw. ein vollständiger Austausch bestehender Freileitungen durch Energiekabel hat nicht nur positive sondern auch negative Auswirkungen auf den Betrieb des betrachteten, isolierten 10-kV-Mittelspannungsnetzes. Für die Untersuchungen wurde ein typisches Mittelspannungsnetz im transienten numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV nachgebildet und hinsichtlich der möglich auftretenden Fehlerzustände betrachtet. Anhand von mehr als 200 numerischen Berechnungen konnten die Unterschiede der möglichen Konfigurationen von Energiekabeln und Freileitungen erarbeitet werden. Rückblickend auf das eingangs erwähnte Statement *Doch welche technischen Auswirkungen bringen die Wahl der "oberirdischen" bzw. der "unterirdischen" Variante mit sich?* kann aus den durchgeführten numerischen Berechnungen auf folgende Aussagen geschlossen werden:

Beim Zuschalten von Transformatoren des betrachteten Mittelspannungsnetzes konnte gezeigt werden, dass Freileitungen sich besonders am Anfang eines Abganges positiv auf die auftretenden Einschaltstoßströme auswirken, jedoch negative Wirkung auf die auftretenden Spannungen am Ende der Übertragungsleitung zeigen. Ein symmetrischer Aufbau paralleler Abgänge zeigt ein signifikant besseres Verhalten beim Zuschalten von Transformatoren als ein gemischter Aufbau.

Bei zu großen Kurzschlussströmen kann aufgrund der geringen Dämpfungseigenschaften von Energiekabel nicht auf eine Freileitung verzichtet werden. Des Weiteren zeigen auch die möglichen Konfigurationen der Übertragungsleitungen einen signifikanten Einfluss auf die beim Kurzschluss auftretenden Spannungseinbrüche.

Erdschlüsse zeigen wiederum, dass sich eine Verkabelung signifikant auf den Erdschlussstrom auswirken kann. Durch die großen Kapazitäten vom Energiekabel kommt es bei großen Energiekabelanteilen zu einer starken Erhöhung der Erdschlussströme. In diesem Fall haben die numerischen Berechnungsergebnisse gezeigt, dass es entscheidend ist, zu welchen Anteilen der fehlerbehaftete Abgang aus Energiekabel bzw. Freileitung besteht.

Atmosphärische Überspannungen, durch Blitzeinschläge kommen ausschließlich durch Freileitungen zustande und wirken sich in ungeschützten Anlagen negativ auf die vorhandenen Betriebsmittel aus. Durch eine Teil- bzw. Vollverkabelung von Freileitungsstrecken kann das Risiko von Blitzeinschläge verringert werden. Teilverkabelungen wiederum zeigen, dass vor allem an den Übergangsstellen von Freileitungen zu Energiekabel und um-

gekehrt zusätzliche Schutzeinrichtungen (Überspannungsableiter) vorzusehen sind, damit auftretende Überspannungen auf ein für Betriebsmittel erträgliches Maß begrenzt werden können.

Abschließend ist anzumerken, dass sowohl Freileitungen als auch Energiekabel positive und negative Erscheinungen mit sich bringen und die Wahl des jeweiligen Übertragungsmediums von der Betriebsführung des Netzes abhängig ist. Dennoch können nie alle betriebsbedingten Einflüsse und Vorgänge abgeschätzt und erhoben werden. Zahlreiche Untersuchungen möglicher Freileitungs- und Kabelkombination, wie auch die vorliegende Arbeit, haben die Auswirkungen auf den jeweiligen Netzabschnitt gezeigt, dennoch passt sich die Auswahl eines gewünschten Übertragungsmediums stets den aktuellen politischen, umweltrechtlichen und technischen Gegebenheiten an.

Anhang A

Tabellen Gesamtübersicht

Tabelle A.1: Variantenübersicht Einschaltstoßstrom

Var.	Leitungselemente															
	100m		900m		1km		1km		1km		1km		900m		100m	
10	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus
20	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus	aus
30	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
40	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
50	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
60	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
70	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
80	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	ÜA
90	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
100	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
110	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	ÜA
120	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	ÜA
130	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	ÜA
140	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	ÜA
150	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
160	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	aus	ÜA
170	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
180	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	ÜA
	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
190	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
200	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus
	aus	K	aus	K	ÜA	FL	aus	FL	aus	FL	aus	FL	aus	K	aus	aus

Legende: K...Energiekabel; FL... Freileitung; ÜA... Überspannungsableiter

Tabelle A.2: Variantenübersicht dreipoliger Kurzschluss am Leitungsanfang

Var.	Leitungselemente															
	100m	100m	900m	1km	1km	1km	1km	900m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	100m	
11	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
21	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
31	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
41	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
51	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
52	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
61	aus aus	K aus	KS aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
71	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
81	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
91	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
92	aus aus	K aus	KS aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
101	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
102	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
111	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
112	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
121	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
122	aus aus	K aus	KS aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
131	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
132	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
141	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
142	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
151	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
152	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
161	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
162	aus aus	K aus	KS aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	aus aus
171	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
172	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
181	ÜA aus	FL aus	KS aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	ÜA aus
182	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
191	aus aus	K aus	KS aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	aus aus
201	aus aus	K aus	KS aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	aus aus

Legende: K...Energiekabel; FL...Freileitung; ÜA...Überspannungsableiter

Tabelle A.4: Variantenübersicht einpoliger Erdschluss am Leitungsanfang

Var.	Leitungselemente															
	100m		900m		1km		1km		1km		900m		100m			
11	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
21	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
31	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
41	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
51	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
52	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
61	aus aus	K aus	ES aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
71	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
81	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	ÜA aus	
91	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
92	aus aus	K aus	ES aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
101	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
102	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
111	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
112	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	ÜA aus	
121	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
122	aus aus	K aus	ES aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
131	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
132	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
141	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
142	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	ÜA aus	
151	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
152	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
161	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
162	aus aus	K aus	ES aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
171	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
172	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	K aus	aus aus	
181	ÜA aus	FL aus	ES aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	ÜA aus	
182	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
191	aus aus	K aus	ES aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	K aus	aus aus	
201	aus aus	K aus	ES aus	K aus	ÜA aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	FL aus	aus aus	K aus	aus aus	

Legende: K...Energiekabel; FL...Freileitung; ÜA...Überspannungsableiter

Anhang B

Diagramme Gesamtauswertung

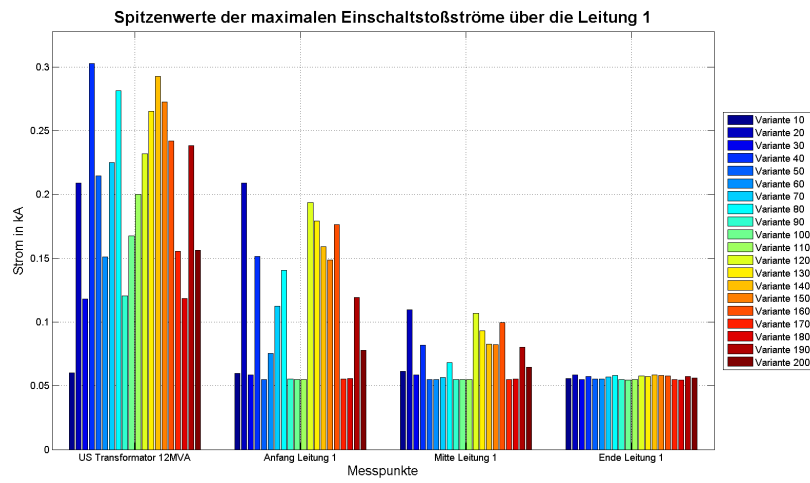


Abbildung B.1: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 1

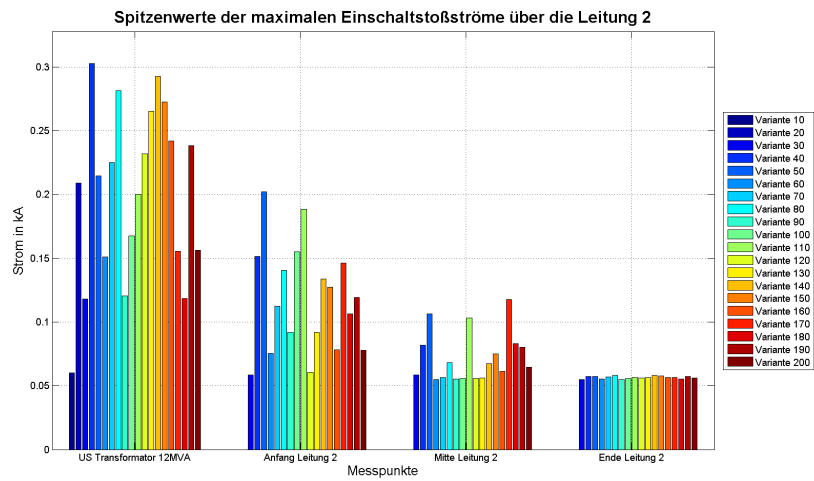


Abbildung B.2: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 2

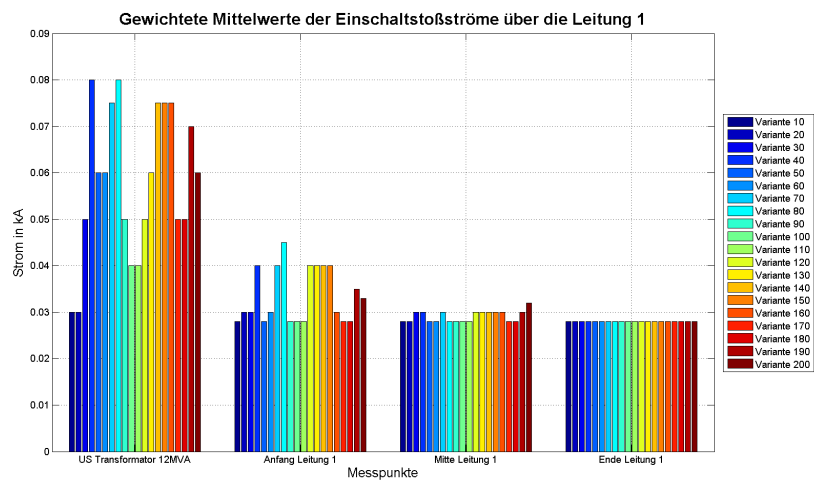


Abbildung B.3: Gesamtauswertung - Gewichtete Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 1

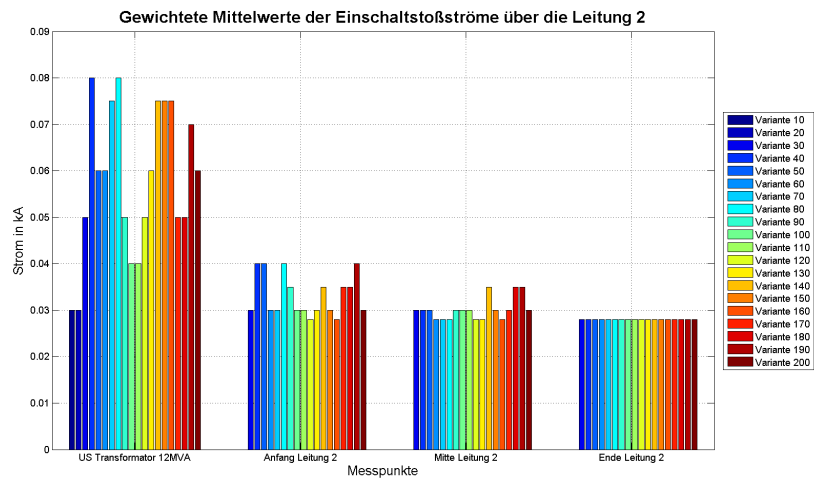


Abbildung B.4: Gesamtauswertung - Gewichtete Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 2

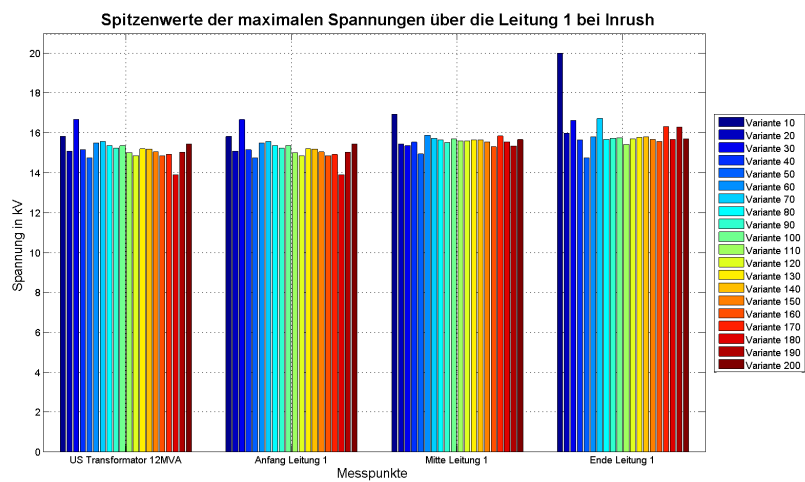


Abbildung B.5: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 1 bei Inrush

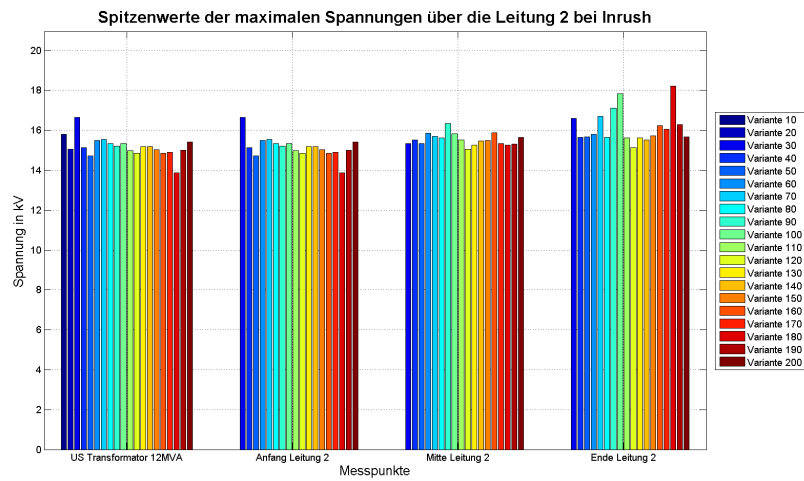


Abbildung B.6: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 2 bei Inrush

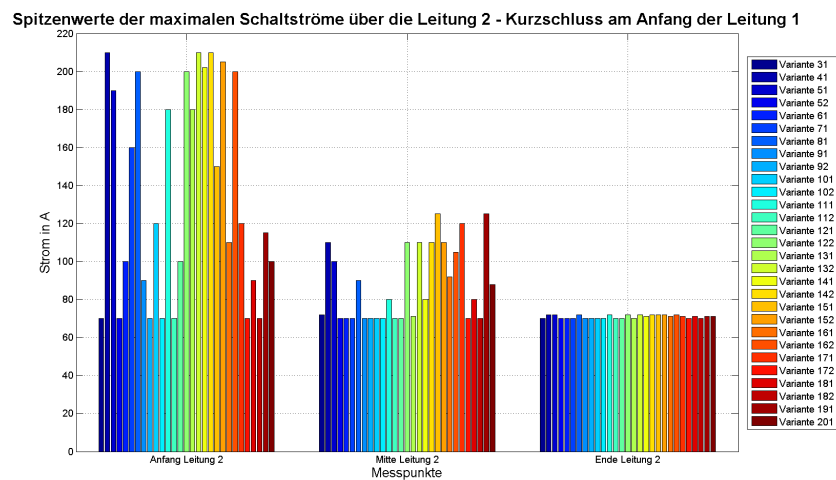


Abbildung B.7: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1

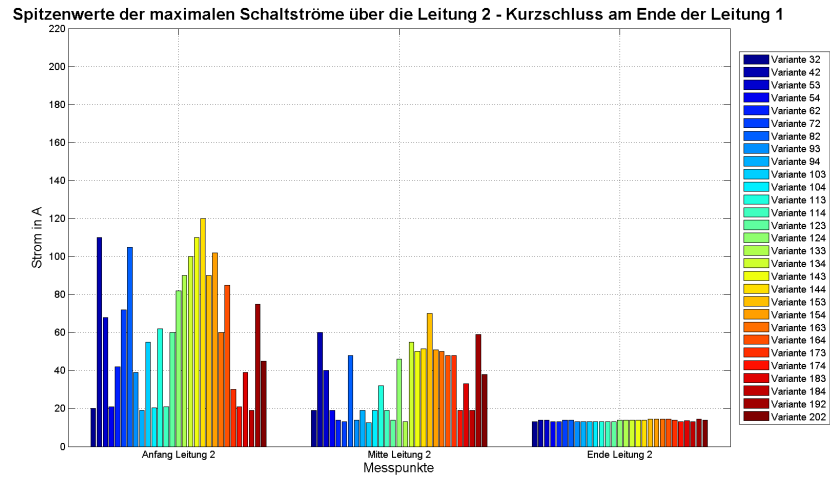


Abbildung B.8: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1

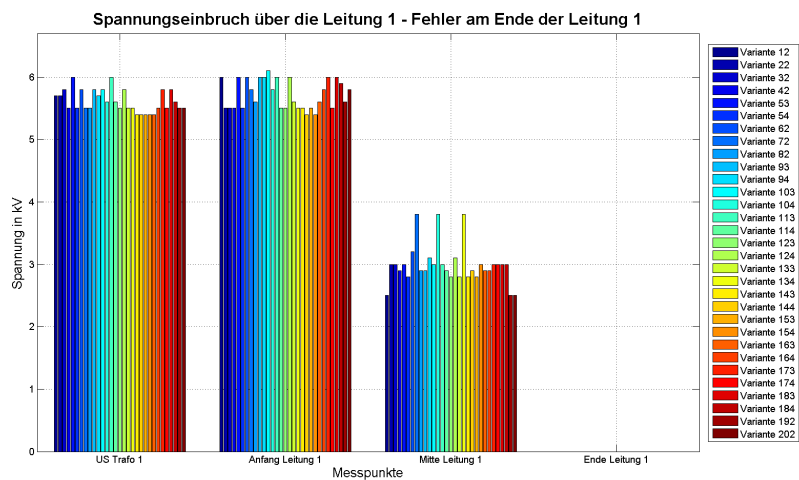


Abbildung B.9: Gesamtauswertung - Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem Kurzschluss am Leitungsende

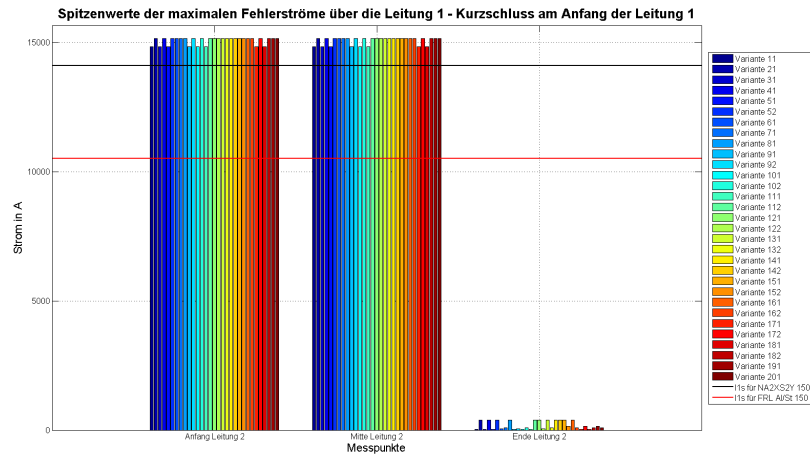


Abbildung B.10: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1

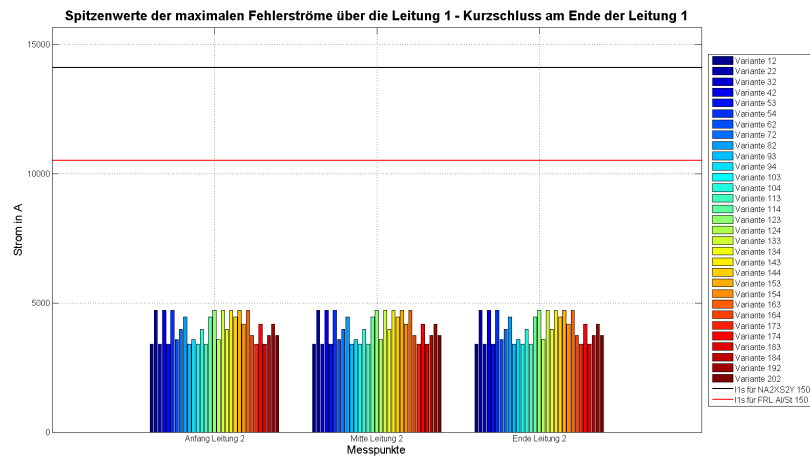


Abbildung B.11: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1

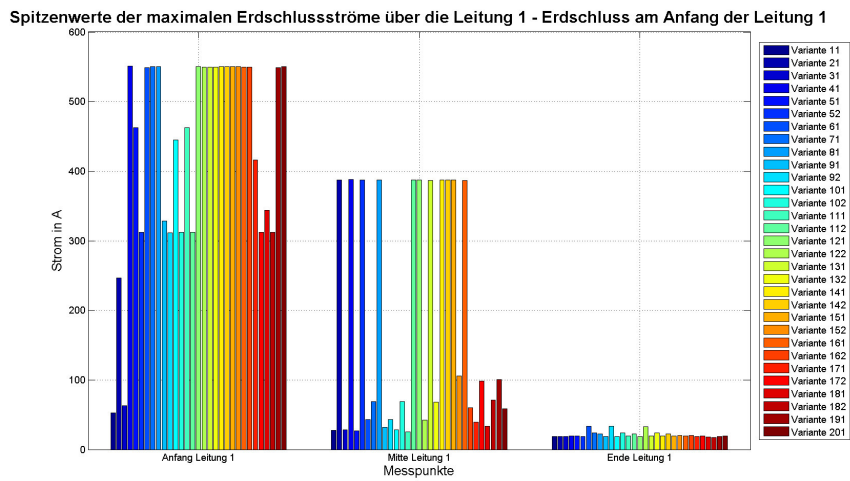


Abbildung B.12: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1

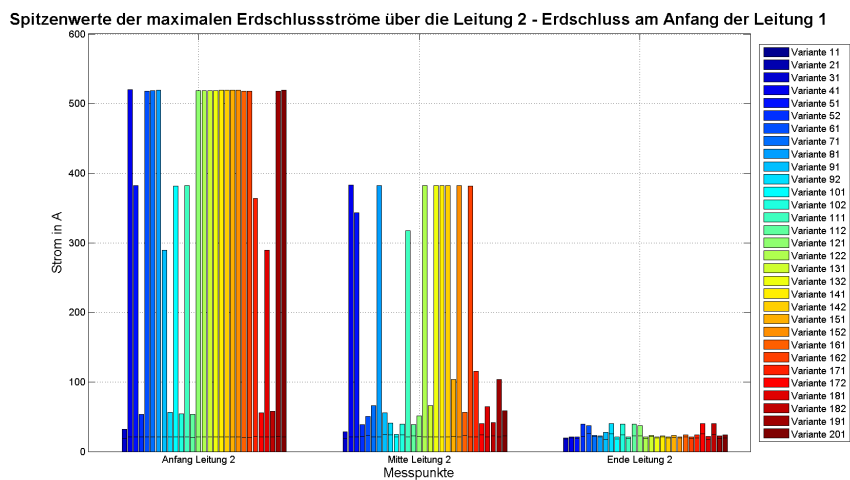


Abbildung B.13: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1

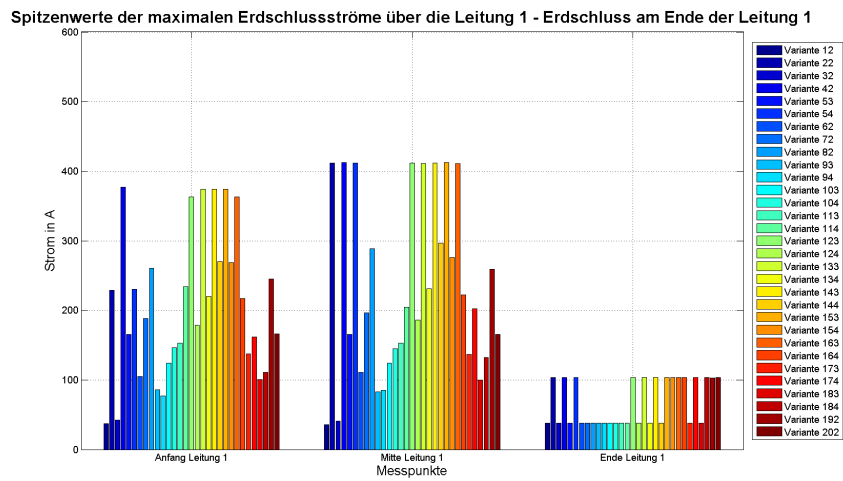


Abbildung B.14: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

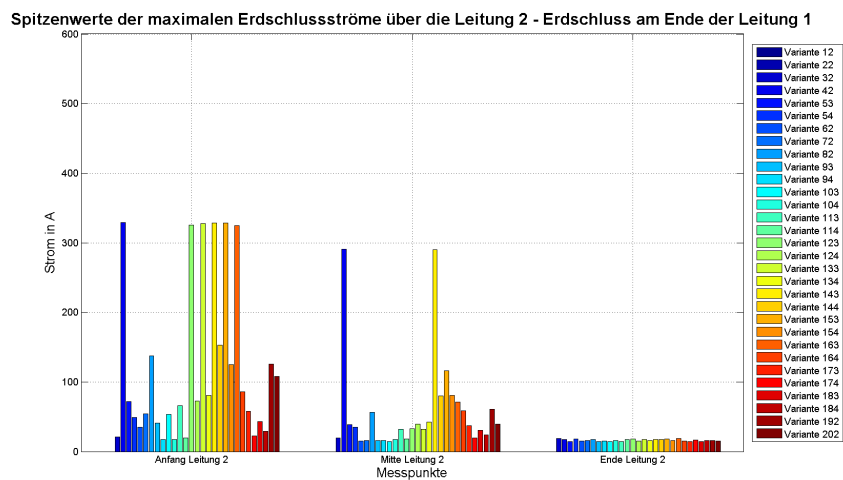


Abbildung B.15: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

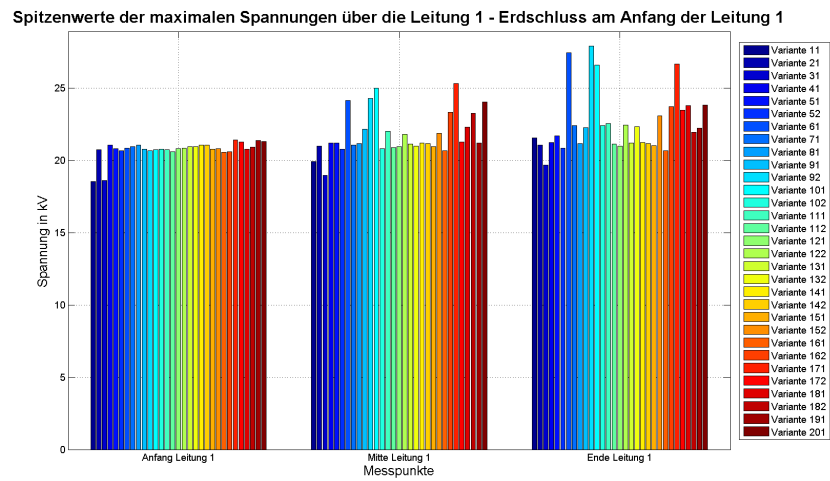


Abbildung B.16: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

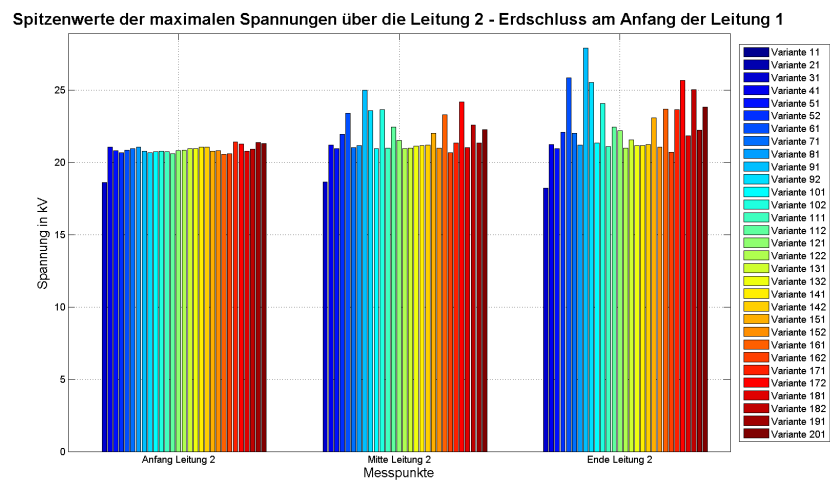


Abbildung B.17: Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1

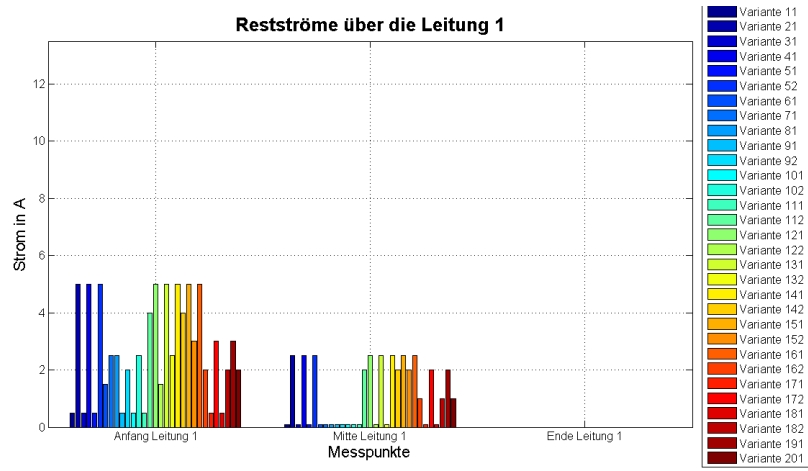


Abbildung B.18: Gesamtauswertung - Restströme nach der Abschaltung über die Leitung 1

Tabellenverzeichnis

2.1	Überspannungskategorien mit den zugehörigen Spannungsarten, Scheitelwerten und Frequenzbereichen	6
2.2	Ursachen für transiente Überspannungen mit den zugehörigen Frequenzbereichen	7
3.1	Berechnungsergebnisse der Komponenten für das numerische Berechnungsmodell in EMTP-RV des 110-kV-Netzes	19
3.2	Übersicht der verwendeten Parameter für die numerische Modellbildung der Freileitung Al/St 150/25 10kV in EMTP-RV	28
3.3	Koordinaten der Teilleiter zur Positionierung des Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die numerische Modellbildung in EMTP-RV	32
3.4	Nennenden für die für die numerische Modellbildung verwendeten Überspannungsableiter	34
3.5	Berechnete Werte für das numerische Berechnungsmodell der Überspannungsableiter in EMTP-RV	35
3.6	Nennenden für die Vergleichsanalyse der Überspannungsableitermodelle verwendeten Metalloxidableiters der Type ABB POLIM-K	37
3.7	Nennenden für das numerische Berechnungsmodell verwendeten Transformatoren	44
3.8	Berechnungsergebnisse der Schwingkreise für die numerische Modellbildung der Transformatoren	48
4.1	Variantenübersicht aller für die numerische Berechnung verwendeten Freileitungs- und Energiekabelkombinationen	52
4.2	Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme	54
4.3	Variantenübersicht für die Auswertung der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme	56
4.4	Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der maximalen Spannungen bei einem Einschaltstoßstrom	58
4.5	Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Anfang der Leitung 1	62
4.6	Variantenübersicht für die Auswertung der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Ende der Leitung 1	62

4.7	Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Leitungsende . . .	64
4.8	Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem dreipoligen Kurzschluss am Leitungsanfang bzw. Leitungsende	65
4.9	Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1 . .	69
4.10	Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1 . .	71
4.11	Variantenübersicht der Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	74
4.12	Variantenübersicht der Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	74
4.13	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 1 - Blitzeinschlag nach 100m	77
4.14	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 2 - Blitzeinschlag nach 1km	79
4.15	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 3 - Blitzeinschlag nach 2km	80
4.16	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 4 - Blitzeinschlag in der Leitungsmitte	82
4.17	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 5 - Blitzeinschlag nach 4km	84
4.18	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 6 - Blitzeinschlag nach 5km	85
4.19	Variantenübersicht atmosphärische Überspannungen Variantengruppe 7 - Blitzeinschlag 100m vor dem Leitungsende	87
4.20	Variantenübersicht für die Auswertungsergebnisse der nach einem Lastabwurf verbleibenden Restströme	89
A.1	Variantenübersicht Einschaltstoßstrom	97
A.2	Variantenübersicht dreipoliger Kurzschluss am Leitungsanfang	98
A.3	Variantenübersicht dreipoliger Kurzschluss am Leitungsende	99
A.4	Variantenübersicht einpoliger Erdschluss am Leitungsanfang	100
A.5	Variantenübersicht einpoliger Erdschluss am Leitungsende	101
A.6	Variantenübersicht Lastabwurf	102

Abbildungsverzeichnis

2.1	Wirkung der Flussverdoppelung auf den Magnetisierungsstrom	8
2.2	Kurzschlussstromverlauf mit Überlagerung des stationären Kurzschlussstroms und des Gleichanteils in einem ohmsch-induktiven Netz	9
2.3	Spannungsdreieck: Spannungsanhebung der fehlerfreien Phasen bei einem einpoligen Erdschluss in einem isolierten Netz	10
3.1	Schematische Darstellung des, für die numerische Berechnung verwendeten, 10-kV-Mittelspannungsnetzes	13
3.2	Detaillierte Darstellung des, für die numerische Berechnung verwendeten, 10-kV-Mittelspannungsnetzes inklusive aller Netzkomponenten und Messstellen	14
3.3	Numerisches Berechnungsmodell des betrachteten 10-kV-Mittelspannungsnetzes in EMTP-RV; Basisvariante	16
3.4	Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV des vorgelagerten 110-kV-Netz mit Spannungsquelle und Netzimpedanz	19
3.5	Prinzipieller Aufbau eines Vakuumleistungsschalters für Mittelspannung (ABB)	20
3.6	Durchschlagspannung unterschiedlicher Löschmedien in Abhängigkeit der Schlagweite	21
3.7	Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Vakuum-Leistungsschalter	22
3.8	Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Stromwandler	22
3.9	Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für den in der Simulation verwendeten Spannungswandler	23
3.10	Grober Aufbau eines 10-kV-Freileitungssystems mit Holzmast	23
3.11	Ersatzschaltbild einer verdrehten und symmetrisch betriebenen Drehstromfreileitung mit der Länge l	25
3.12	Ersatzschaltbild mit dazugehörigem Sprungspannungsverlauf am Leitungsanfang bei übernatürlichem Betrieb	26
3.13	Ersatzschaltbild mit dazugehörigem Sprungspannungsverlauf am Leitungsanfang bei unternatürlichem Betrieb	27
3.14	Links: 10kV Kabelabspannmast; Mitte: 10kV Spannfeld; Rechts: 10kV Abspannmast mit Transformator	27
3.15	Schematische Darstellung des verwendeten Mastens mit Maßangaben für die numerische Modellbildung in EMTP-RV	28

3.16	Links: Π -Ersatzschaltbild eines Energiekabels; Rechts: T-Ersatzschaltbild eines Energiekabels	29
3.17	Links: Kapazitäten eines Gürtelkabels; Rechts: Kapazitäten eines Radialfeldkabels	30
3.18	Abmessungen eines Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die Modellbildung im numerischen Berechnungsprogramm EMTP-RV	31
3.19	Position der einzelnen Teilleiter des im Dreieck verlegten Energiekabels der Type NA2XS2Y 150/25 10kV für die numerische Modellbildung in EMTP-RV	32
3.20	Ersatzschaltbild des Metalloxidableiters für die numerische Modellbildung in EMTP-RV	33
3.21	U/I-Charakteristik der nichtlinearen Widerstände für das numerische Berechnungsmodell der Überspannungsableiter in EMTP-RV	35
3.22	U/I-Charakteristik der nichtlinearen Widerstände A_0 und A_1 des Überspannungsableitermodells für einen Stoßstrom von 10kA 8/20 μ s; Oben: Darstellung logarithmisch; Unten: Darstellung linear	36
3.23	Numerisches Berechnungsmodell in EMTP-RV für die Vergleichsanalyse der Überspannungsableitermodelle	37
3.24	Numerisches Berechnungsergebnis der Restspannungen über den Ableiter A_1 jeweils für "ZnO-Arrestor" und "Nonlinear Resistor" bei 10kA 4/10 μ s	38
3.25	Gemessener Frequenzgang der Primäradmittanz auf der 110-kV-Seite eines 220/110/10-kV-Dreiwicklungstransformators mit einer Bemessungsleistung von 100MVA	39
3.26	Links: Magnetfeldverteilung im Eisenkern eines Transformators; Rechts: Seitenansicht des Eisenkerns eines Transformators	40
3.27	Vereinfachtes T-Ersatzschaltbild für den Transformator	41
3.28	Ersatzschaltbild des Transformators mit Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses	42
3.29	Hysteresekennlinie	43
3.30	Detailausschnitt Resonator 1 des numerischen Berechnungsmodells für den Transformator 1 in EMTP-RV	45
3.31	Ersatzschaltbild des Transformators zur Bestimmung der Komponenten für das numerische Berechnungsmodell in EMTP-RV	46
3.32	Hysteresekennlinie der numerischen Berechnungsmodelle für die Transformatoren; Links: Transformator 1; Rechts: Transformator 2	47
3.33	Links: Numerisches Berechnungsergebnis des Effektivwerts des Stroms im Transformator 1 über den "Hysteretic Reactor" bei 136% der Nennspannung; Rechts: dazugehörige Hysteresekennlinie	49
3.34	Links: Numerisches Berechnungsergebnis des Effektivwerts des Stroms im Transformator 1 über die stromabhängige Induktivität bei 136% der Nennspannung; Rechts: dazugehörige Hysteresekennlinie	50
3.35	Numerisches Berechnungsergebnis des Einschaltstoßstroms des Transformators 1 überspannungsseitig; Links: mit Hysteretic Reactor; Rechts: mit stromabhängiger Induktivität	50
4.1	Schematische Darstellung gewählter Freileitungs- und Energiekabelkombinationen	51

4.2	Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des Einschaltstoßstroms	53
4.3	Numerisches Berechnungsergebnis des Einschaltstoßstroms auf der Oberspannungsseite des Transformators 1; a Phase 1; b Phase 2; c Phase 3	54
4.4	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 1	55
4.5	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 2	55
4.6	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 1	56
4.7	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 2	57
4.8	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 1 bei einem Einschaltstoßstrom	58
4.9	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 2 bei einem Einschaltstoßstrom	59
4.10	Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des dreipoligen Kurzschlusses; (1) nach 10ms Fehlereintritt; (2) nach 100ms Fehlerabschaltung	60
4.11	Numerisches Berechnungsergebnis des Spannungseinbruchs auf der Unterspannungsseite des 12MVA Umspanners bei einem dreipoligen Kurzschluss für die Variante 51	61
4.12	Numerisches Berechnungsergebnis des Sättigungsstrom auf der Oberspannungsseite des 12MVA Umspanners nach der Schutzauslösung für die Variante 51	61
4.13	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1	62
4.14	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1	63
4.15	Auswertungsergebnisse der Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem Kurzschluss am Leitungsende	64
4.16	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximal auftretenden Kurzschlussströme über die Leitung 1	66
4.17	Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des Erdschlusses; (1) nach 10ms Fehlereintritt; (2) nach 110ms Fehlerabschaltung	67
4.18	Schematische Darstellung der Erdschlussströme in einem Mittelspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt	68
4.19	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1	69
4.20	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1	70
4.21	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	71
4.22	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	72
4.23	Abklingvorgang der Spannung über die Leitung 2 nach der Schutzauslösung für die Variante 31; a Phase 1; b Phase 2; c Phase 3	73

4.24	Abklingvorgang der Spannung über die Leitung 2 nach der Schutzauslösung für die Variante 41; a Phase 1; b Phase 2; c Phase 3	73
4.25	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	74
4.26	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	75
4.27	Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung atmosphärischer Überspannungen	76
4.28	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 1	77
4.29	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 1	78
4.30	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 2	79
4.31	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 2	80
4.32	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 3	81
4.33	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 3	81
4.34	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 4	82
4.35	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 4	83
4.36	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 5	84
4.37	Auswertungsergebnisse der gewichtete Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 5	84
4.38	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 6	86
4.39	Auswertungsergebnisse der gewichtete Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 6	86
4.40	Auswertungsergebnisse der Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 7	88
4.41	Auswertungsergebnisse der gewichteten Mittelwerte der Spannungen über die Leitungen der Variantengruppe 7	88
4.42	Schematische Darstellung der durchgeführten Simulation für die Betrachtung des Lastabwurfs	89
4.43	Auswertungsergebnisse der Restströme nach der Abschaltung über die Leitung 1	90
B.1	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 1	103
B.2	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Einschaltstoßströme über die Leitung 2	104
B.3	Gesamtauswertung - Gewichtete Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 1	104

B.4	Gesamtauswertung - Gewichtete Mittelwerte der Einschaltstoßströme über die Leitung 2	105
B.5	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 1 bei Inrush	105
B.6	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannung über die Leitung 2 bei Inrush	106
B.7	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1	106
B.8	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Schaltstrommaxima über die Leitung 2 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1	107
B.9	Gesamtauswertung - Spannungseinbrüche über die Leitung 1 bei einem Kurzschluss am Leitungsende	107
B.10	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem Fehler am Anfang der Leitung 1	108
B.11	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der Kurzschlussströme über die Leitung 1 bei einem Fehler am Ende der Leitung 1	108
B.12	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1	109
B.13	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Anfang der Leitung 1	109
B.14	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	110
B.15	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Erdschlussströme über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	110
B.16	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 1 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	111
B.17	Gesamtauswertung - Spitzenwerte der maximalen Spannungen über die Leitung 2 bei einem Erdschluss am Ende der Leitung 1	111
B.18	Gesamtauswertung - Restströme nach der Abschaltung über die Leitung 1 . .	112

Literaturverzeichnis

- [1] S. Pack; Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen der Energieversorgung; Habilitationsschrift; TU Graz; 1999
- [2] V. Crastan; Elektrische Energieversorgung 1; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2012
- [3] A. J. Schwab; Elektroenergiesysteme; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2009
- [4] K. Heuck, K. D. Dettmann und D. Schulz; Elektrische Energieversorgung; Vieweg + Teubner; 2007
- [5] L. Fickert und H. Renner; Elektrische Energiesysteme; Vorlesungsskriptum; TU Graz; 2008
- [6] H. Renner, G. Achleitner und W. Friedl; Elektrische Energiesysteme Labor; Vorlesungsskriptum; TU Graz; 2006
- [7] D. Oeding und B. R. Oswald; Elektrische Kraftwerke und Netze; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2011
- [8] G. Hosemann; Elektrische Energietechnik; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2001
- [9] SIEMENS AG; Vakuum-Schalttechnik und Komponenten für die Mittelspannung; Produktinformation SIEMENS; Power Transmission and Distribution Medium Voltage Division Nonnendammallee 104 13623 Berlin, Deutschland; 2007
- [10] W. Pläßmann und D. Schulz; Handbuch Elektrotechnik; Vieweg + Teubner, 2009
- [11] A. Küchler; Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2009
- [12] Freileitungs-Gesellschaft mbH & Co; "www.baobab.de" (Online); Available: http://www.baobab.de/freileitung/3_alustahl/; (Zugriff am 5. April 2013)
- [13] F. Kießling, P. Nefzger und U. Kaintzyk; Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung; mit 163 Tabellen; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2001
- [14] MEINHART Kabel Österreich GmbH; Kabel und Leitungen - Preisliste und technischer Katalog; MEINHART Kabel Österreich GmbH; 2009
- [15] L. Heinhold, R. Stubbe; Kabel und Leitungen für Starkstrom, Tl.2, Tabellen mit Projektierungsdaten für Kabel, Leitungen und Garnituren, Angaben zur Querschnittbemessung; Publicis Corporate Publishing; 1989

- [16] SIEMENS AG; Porzellan-Überspannungsableiter 3EP; Produktinformation SIEMENS; Power Transmission and Distribution High Voltage Division (PTD H51) Nonnendammallee 104 13629 Berlin Germany
- [17] T. Saengsuwan, W. Thipprasert; The Lightning Arrester Modeling Using ATP-EMTP; Kasetsart J. (Nat. Sci.) 42 : 156 - 164; 2008
- [18] ABB Schweiz AG; Datenblatt Überspannungsableiter ABB POLIM-K; ABB Schweiz AG; 2012
- [19] ABB Schweiz AG; Anwendungsrichtlinien Überspannungsschutz, Bemessung, Prüfung und Einsatz von Metalloxidableitern in Mittelspannungsnetzen; ABB Schweiz AG; 2008
- [20] F. Scheck; Theoretische Physik 3; Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2006
- [21] S. Kämpfer und G. Kopatsch; ABB Schaltanlagen Handbuch; Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co. KG, Berlin; 2011
- [22] TU Graz; Elektrische Maschinen und Antriebe, Labor; Vorlesungsskriptum; TU Graz; 2008
- [23] N. Chiesa, H. K. Høidalen, M. Lambert, M. Martinez Duró, Calculation of Inrush Currents – Benchmarking of Transformer Models; International Conference on Power Systems Transients (IPST2011); 2011
- [24] N. Chiesa; Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation; Doctoral theses at NTNU; 2010
- [25] The MathWorks, Inc.; "www.mathworks.de" (Online); Available: <http://www.mathworks.de/de/help/physmod/powersys/ref/saturabletransformer.html>; (Zugriff am 10. April 2013)
- [26] P. T. M. Vaessen; Transformer Model for High Frequences; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4; October 1988
- [27] R. Schmid; Erdschlussschutz im Mittelspannungsverteilstnetz; Bulletin SEV/VSE; Juli 2009
- [28] R. Schmid; Technische Grundlagen zu Erdschlussschutz im Mittelspannungsverteilstnetz; "www.technik-forum.ch"; Available: http://www.technik-forum.ch/_files/downloads/TEIL_2_fuer_Internet.pdf; (Zugriff am 5. September 2013)
- [29] DIN EN 60071-1 (VDE 0111-1); Isolationskoordination - Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen (IEC 60071-1:2006 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 60071-1:2006 + A1:2010
- [30] L. Wu, P. A. A. F. Wouters, E. F. Steennis; Frequency Domain Transient Analysis of Resonant Behavior for Different HV Overhead Line and Underground Cable Configurations; Conference Paper : 10th International Conference on Power Systems Transients (IPST 2013), Vancouver, (pp. 1-6); Juli 2013
- [31] V. S. Mehairjan, M. Popov, A. Geschiere, W. L. Kling; Transient Analysis of a 150 kV Fault Current Limiting High Temperature Superconducting Cable; Proceedings of the

- International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011), Delft, The Netherlands; Juni 2011
- [32] M. F. Abdel-Fattah, M. Lehtonen, R. J. Millar, C. J. Kim; The Impact of the Distribution Network Type and Configuration on the Transient Behavior of the Fault and Neutral Points during Earth Faults; The International Conference on Power Systems Transients (IPST2011), Delft, The Netherlands; Juni 2011
- [33] M. Z. Daud; Transient behaviour modelling of underground high voltage cable systems; University of Wollongong, 2009
- [34] E. Moser; "www.kleinezeitung.at" (Online); Available: <http://www.kleinezeitung.at/kaernten/villach/villach/3053883/gemeinderat-blockiert-freileitung.story>; (Zugriff 11. Oktober 2013)
- [35] DER STANDARD; "standard.at" (Online); Available: <http://derstandard.at/1363710882546/6000-Unterschriften-gegen-Salzbuerger-380-KV-Freileitung>; (Zugriff 11. Oktober 2013)