

Numerische Analyse der elektrischen Beeinflussung von Freileitungs-Erdungsanlagen

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst SCHMAUTZER

Vorgelegt von:

Herwig BREITWIESER

Institutsleiter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar FICKERT

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

Graz / Jänner - 2010



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Title

Numerische Analyse der elektrischen Beeinflussung von Freileitungs-Erdungsanlagen

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die elektrische Beeinflussung (ohmsch, induktiv, kapazitiv) der Erdungsanlage von Freileitungen – bestehend aus Erdseil und Masterdungen – durch die über ihre Phasenseile fließenden Lastströme mittels numerischer Verfahren untersucht. Basierend auf den wissenschaftlichen Computerprogrammen 'MATLAB', 'Simulink' und 'SimPowerSystems' wurde dafür zunächst eine universell einsetzbare Bibliothek zur präzisen Simulation solcher Beeinflussungen entwickelt. Unter Verwendung dieser Bibliothek wurde anschließend ein standardisiertes Kettenleitermodell einer Freileitung erstellt, anhand dessen der individuelle Einfluss von 13 verschiedenen Kenngrößen, wie beispielsweise Phasenbelegung, Mastgeometrie oder Erdungswiderstand, auf die Höhe und die Verteilung der Ströme in der Erdungsanlage bestimmt wurde. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurde schließlich ein allgemeines Verfahren für die Klassifizierung, den Vergleich und die Umrechnung der von verschiedenen Leitungskonfigurationen verursachten Beeinflussungen entwickelt.

Schlüsselwörter

Freileitung, Erdungsanlage, elektrische Beeinflussung, Kettenleitermodell, numerische Analyse

Title

Numerical analysis of the electrical influence on overhead line-earthing systems

Abstract

In this work, the electrical influence (ohmic, inductive, capacitive) on the earthing system of overhead lines – consisting of earth wire and tower earthings – caused by the load currents flowing over the phase wires of these lines is investigated using numerical methods. Based on the scientific computer programs 'MATLAB', 'Simulink' and 'SimPowerSystems', a multi-purpose library for accurately simulating such influences was developed first. Using this library, a standardized lattice network model of an overhead line was created, with which the individual impact of 13 different characteristics, such as phase configuration, tower geometry or earthing resistance, on the magnitude and the distribution of the electrical currents flowing in the earthing system was determined. Based on the results of this research, a general method for classifying, comparing and converting the influences caused by various line configurations was finally developed.

Key Words

overhead line, earthing system, electrical influence, lattice network model, numerical analysis

Inhaltsverzeichnis

1 Zeichenerklärung	8
2 Kurzfassung	9
2.1 Ziel	9
2.2 Methoden	9
2.3 Ergebnisse	9
2.4 Schlussfolgerungen	10
3 Einleitung	11
3.1 Allgemeines über Freileitungen	11
3.2 Aufgabenstellungen	12
4 Methoden	13
4.1 FLK_library – Simulink-Bibliothek	14
4.1.1 Allgemeine Eigenschaften der Blöcke	14
4.1.1.1 Der Bus	15
4.1.2 Block 'Spannfeld + Mast'	17
4.1.3 Block 'Mast bzw. UW-Erdung'	19
4.1.4 Block 'START'	20
4.1.5 Block 'ZIEL'	22
4.1.6 Block 'Leitungsabschnitt'	25
4.1.7 Block 'Adresse abfragen'	25
4.1.8 Sonstige Routinen	25
4.1.8.1 Subsystem 'Daten hinzufügen'	26
4.1.8.2 Subsystem 'Stromquelle'	27
4.1.9 Regeln zur korrekten Anwendung von FLK_library	28
4.2 FLK_library – MATLAB-Skripten und Funktionen	30
4.2.1 Der Präprozessor	30
4.2.1.1 Die Variable 'Input'	30
4.2.1.2 Grundsätzliche Befehlsfolge der Präprozessorroutine	32

4.2.1.3	Erweiterte Routinen	34
4.2.2	Der Prozessor	36
4.2.3	Der Postprozessor	37
4.3	Das untersuchte Freileitungsmodell	37
4.4	Verwendete Parameter und Benennungsstrukturen	39
4.4.1	Schaltungsbezogene Parameter	39
4.4.1.1	Verdrillungsmethode (VD)	40
4.4.1.2	Phasenbelegung (PB)	40
4.4.1.3	Betriebsart (SY)	41
4.4.1.4	Endpunktbehandlung (QL)	42
4.4.2	Leitungsbezogene Parameter	42
4.4.2.1	Mastkopfbild (MG)	43
4.4.2.2	Masthöhe (MH) und Erdseildistanz (ES)	44
4.4.2.3	Spezifischer Bodenwiderstand (RB)	44
4.4.3	Betriebsbezogene Parameter	44
4.4.3.1	Betriebsspannung (UB)	45
4.4.3.2	Mast-Erdungswiderstand (RM)	45
4.4.3.3	UW-Erdungswiderstand (RU)	45
4.4.3.4	Gesamt-Laststrom (IB)	45
4.4.3.5	Spannfeldlänge (SL)	46
4.4.4	Benennungsstrukturen für die verwendeten Dateien	46
4.5	Interner Arbeitsablauf einer Simulationsreihe	47
4.5.1	Aufbau und Verwendung der Konfigurationsdaten	50
4.6	Aufbau des verwendeten Postprozessors	51
4.6.1	Beschreibung der implementierten Algorithmen	53
4.7	Das Ergebnisfenster	57
4.7.1	Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung des Ergebnisfensters	59

5	Ergebnisse	64
5.1	Verwendetes Standard-Parameterset	64
5.2	Einfluss der Verdrillungsmethode (VD)	64
5.3	Einfluss der Phasenbelegung (PB)	69
5.3.1	Die Phasenoppositionsklasse (POK)	70
5.3.2	Der Trend	73
5.4	Einfluss der Betriebsart (SY)	75
5.4.1	Ausgeschaltetes System wird offen gelassen (SY = 1SysOffen)	75
5.4.1.1	Verdrillungsschema 'gleich'	76
5.4.1.2	Verdrillungsschema 'entgegengesetzt'	77
5.4.2	Ausgeschaltetes System wird kurzgeschl. und geerdet (SY = 1SysKSErd)	78
5.5	Einfluss der Endpunktbehandlung (QL)	80
5.6	Einfluss des Mastkopfbilds (MG)	81
5.7	Einfluss der Masthöhe (MH)	83
5.8	Einfluss der Erdseildistanz (ES)	84
5.9	Einfluss des spezifischen Bodenwiderstands (RB)	85
5.10	Einfluss der Betriebsspannung (UB)	86
5.11	Einfluss der Erdungswiderstände (RM, RU)	86
5.11.1	Fall 1: RM = RU	86
5.11.2	Fall 2: RM ≠ RU	89
5.12	Einfluss des Gesamt-Laststroms (IB)	91
5.13	Einfluss der Spannfeldlänge (SL)	92
6	Diskussion	95
6.1	Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	95
6.1.1	FLK_library (allgemeine Aussagen)	95
6.1.2	Untersuchtes Freileitungsmodell (spezielle Aussagen)	96
6.1.2.1	Genauigkeit der angegebenen prozentualen Abweichungen	96
6.2	Verfahren zur Umrechnung zwischen verschiedenen Parametersets	98

6.2.1	Der Geometriefaktor k_G	99
6.2.1.1	Berechnungsverfahren für k_G	99
6.2.2	Die Bodenwiderstandsfaktoren k_p	101
6.2.2.1	Berechnungsverfahren für k_p	102
6.2.3	Rechenbeispiele	103
6.2.3.1	Beispiel 1	103
6.2.3.2	Beispiel 2	106
6.2.3.3	Beispiel 3	108
6.2.3.4	Beispiel 4	109
6.2.4	Ergänzende Hinweise	111
6.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	114
6.4	Weiterführende Überlegungen	116
7	Literatur	118
8	Anhang	122
8.1	Tabelle der Phasenoppositionsklassen	122
8.2	Skizzen der untersuchten Mastkopfbilder	123
8.2.1	Mastkopfbild 'Tonne'	123
8.2.2	Mastkopfbild 'Donau'	124
8.2.3	Mastkopfbild 'Einebene'	125
8.3	Beschreibung der verwendeten Seilbelegung	125
8.4	Erstellte Geometrie-Umrechnungstabellen K_G	127
8.5	Diagramme der berechneten Bodenwiderstandsfaktoren k_p	129

1 Zeichenerklärung

MATLAB-Befehle bzw. aus MATLAB-Befehlen aufgebaute Codesegmente sind in dieser Arbeit folgendermaßen formatiert:

- Im Fließtext vorkommende Befehle sind *kursiv* formatiert.
- In separaten Zeilen angeführter Programmcode ist ***fett-kursiv*** formatiert. Weisen in solchen Abschnitten vorkommende Dreifachpunkte (...) ebenfalls die genannte Formatierung auf, sind sie Bestandteil des Codes ([1]). Dreifachpunkte im Format des übrigen Fließtexts kennzeichnen hingegen jene Stellen, an denen die Befehlssequenzen zwecks Verbesserung der Übersichtlichkeit gekürzt wurden.
- Kommentare in separat angeführtem Programmcode sind *kursiv* formatiert.

In den Codesegmenten der Kapitel 4.5 und 4.5.1 steht der Term 'Mastgeometrie' synonym für den Parameter 'Mastkopfbild'. In allen anderen Kapiteln bezeichnet dieser Term hingegen festgelegte Wertekombinationen der 3 Parameter 'Mastkopfbild', 'Masthöhe' und 'Erdseildistanz'.

Der ebenfalls in den Codesegmenten der Kapitel 4.5 und 4.5.1, sowie in Tabelle 4.11 vorkommende Term 'Ra' besitzt dieselbe Bedeutung wie der sonst verwendete Term 'Re'. Beide referenzieren die Erdungswiderstände der einzelnen Masten bzw. Umspannwerke.

2 Kurzfassung

2.1 Ziel

Zum Schutz vor atmosphärischen Entladungen und zur Verbesserung der Erdungsimpedanzen besitzen Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen ein oder mehrere Erdseile, welche in Verbindung mit den einzelnen Masterdungen die Erdungsanlage der Leitung ausmachen. Lastflüsse über die Phasenseile derselben bewirken die Induktion von Strömen in dieses System – die Erdungsanlage wird elektrisch beeinflusst. Ziel der Arbeit ist es, die konkreten Ausprägungen dieser Beeinflussung den einzelnen Kenngrößen der Freileitung zuzuordnen, und die diesbezüglichen Auswirkungen von Modifikationen derselben zu bestimmen.

2.2 Methoden

Mit Hilfe der wissenschaftlichen Computerprogramme 'MATLAB', 'Simulink' und 'SimPowerSystems' wurde zunächst eine vielseitig einsetzbare Bibliothek zur präzisen Simulation des elektrischen Verhaltens von Freileitungen entwickelt. Basierend auf ihren Elementen wurde anschließend ein allgemeines Kettenleitermodell einer Freileitung erstellt, sowie ein Satz aus 13 Parametern definiert (siehe Tabelle 2.1; verwendete Standardwerte: siehe Tabelle 5.1 auf Seite 64), deren Relevanz für die elektrische Beeinflussung der Erdungsanlage jeweils separat ermittelt wurde.

Parametername	Parameterbeschreibung	Ergebnisse
Verdrillungsmethode	Kapitel 4.4.1.1 (Seite 40)	Kapitel 5.2 (Seite 64)
Phasenbelegung	Kapitel 4.4.1.2 (Seite 40)	Kapitel 5.3 (Seite 69)
Betriebsart	Kapitel 4.4.1.3 (Seite 41)	Kapitel 5.4 (Seite 75)
Endpunktbehandlung	Kapitel 4.4.1.4 (Seite 42)	Kapitel 5.5 (Seite 80)
Mastkopfbild	Kapitel 4.4.2.1 (Seite 43)	Kapitel 5.6 (Seite 81)
Masthöhe	Kapitel 4.4.2.2 (Seite 44)	Kapitel 5.7 (Seite 83)
Erdseildistanz	Kapitel 4.4.2.2 (Seite 44)	Kapitel 5.8 (Seite 84)
spezifischer Bodenwiderstand	Kapitel 4.4.2.3 (Seite 44)	Kapitel 5.9 (Seite 85)
Betriebsspannung	Kapitel 4.4.3.1 (Seite 45)	Kapitel 5.10 (Seite 86)
Mast-Erdungswiderstand	Kapitel 4.4.3.2 (Seite 45)	Kapitel 5.11 (Seite 86)
UW-Erdungswiderstand	Kapitel 4.4.3.3 (Seite 45)	Kapitel 5.11 (Seite 86)
Gesamt-Laststrom	Kapitel 4.4.3.4 (Seite 45)	Kapitel 5.12 (Seite 91)
Spannfeldlänge	Kapitel 4.4.3.5 (Seite 46)	Kapitel 5.13 (Seite 92)

Tabelle 2.1: Auflistung aller untersuchten Parameter

2.3 Ergebnisse

Neben der Gesamtlänge der Freileitung sind insbesondere die Parameter 'Phasenbelegung', 'Mastkopfbild', 'Erdungswiderstand' und 'Gesamt-Laststrom' für die Größen und die Verläufe der in der Erdungsanlage auftretenden Strombeträge maßgebend. Die Erdseildistanz und

der spezifische Bodenwiderstand wirken sich ebenfalls teils merklich auf diese Ströme aus, während die Endpunktbehandlung und die Betriebsspannung nur einen sehr geringen Einfluss ausüben.

2.4 Schlussfolgerungen

Es ist kaum möglich, eine für alle Freileitungen gleichermaßen geltende Aussage bezüglich der elektrischen Beeinflussung ihrer Erdungsanlagen zu formulieren. Da sich alle dort auftretenden Ströme von den korrespondierenden Strömen anderer Konfigurationen (Parametersets) jedoch oftmals nur in einer Proportionalitätskonstante unterscheiden, können sie unkompliziert verglichen und ineinander umgerechnet werden. Ein dafür geeignetes Verfahren wurde in dieser Arbeit entwickelt.

3 Einleitung

Zur Übertragung elektrischer Energie kommen neben Kabeln auch in besonderem Maß Freileitungen zum Einsatz. Auf der Höchstspannungsebene werden derzeit nahezu ausschließlich Freileitungen verwendet, da diese hier im Vergleich zu Kabeln wesentlich wirtschaftlicher sind. Der steigende Bedarf an elektrischer Energie, hohe Anforderungen an die Spannungsqualität und die Zuverlässigkeit der Betriebsmittel, sowie einzuhaltende Vorschriften hinsichtlich der elektrischen Sicherheit stellen große Herausforderungen für die Entwicklung, Planung und den Betrieb solcher Leitungen dar. Für die Erarbeitung möglichst effizienter Konzepte zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist es daher von Vorteil, möglichst viel über die Eigenschaften von Freileitungen zu wissen.

3.1 Allgemeines über Freileitungen

Eine Hoch- bzw. Höchstspannungsfreileitung besteht aus blanken Leiterseilen, welche an Isolatoren zwischen geerdeten Stahlmasten aufgehängt sind. Die Leiterseile unterschiedlicher Phasen bzw. unterschiedlicher Systeme sind dabei räumlich ausreichend voneinander getrennt, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Zusätzlich besitzen Freileitungen dieser Spannungsebenen neben diesen, auch Phasenseile genannten Leiterseilen, ein oder mehrere Erdseile. Dies sind Leiterseile, meist von kleinerem Durchmesser als die Phasenseile, welche am höchsten Punkt der einzelnen Masten aufgehängt sind und, im Gegensatz zu den Phasenseilen, elektrisch mit den Masten verbunden sind. Die Erdseile erfüllen zwei Aufgaben: Erstens fangen sie atmosphärische Entladungen (Blitze) ab, sodass diese nicht in die Phasenseile einschlagen. Zweitens verbinden sie die Erdungen von sämtlichen Masten der Freileitung miteinander und sorgen damit für eine Verringerung der Erdungsimpedanzen an jedem Mast. Die Erdungsanlage einer Freileitung setzt sich somit aus den Erdungen der einzelnen Masten, sowie aus den zwischen ihnen gespannten Erdseilen zusammen.

Befindet sich eine solche Freileitung im Betrieb, werden die Phasenseile vom Laststrom durchflossen. Dadurch baut jedes Phasenseil ein Magnetfeld um sich herum, sowie elektrische Felder zwischen den anderen Leiterseilen und dem Boden auf. Nach den elektromagnetischen Gesetzen, insbesondere dem Induktionsgesetz, beeinflussen sich diese Felder gegenseitig und verursachen auch die Induktion von Strömen in Leiter wie etwa den Erdseilen. Somit weisen die Erdseile einer Freileitung ebenfalls einen Stromfluss und damit elektrische und magnetische Felder auf, welche auf die Felder der Phasenseile zurückwirken. Sämtliche Leiterseile einer Freileitung müssen daher als elektrisch und magnetisch verkoppelt angesehen werden. Änderungen von Strom oder Spannung in einem Leiterseil verursachen entsprechende Änderungen in allen anderen Phasen- und Erdseilen.

Der von den stromdurchflossenen Phasenseilen induzierte Erdseilstrom schließt sich über die Masten und das Erdreich zu Stromkreisen. Dadurch ergeben sich verschiedene Fragestellungen, vor allem hinsichtlich des Schutzes von Personen und Tieren. So bewirkt beispielsweise ein über den Mast und das Erdreich fließender Strom eine Anhebung des elektrischen Potentials im Bereich des Masts (Spannungstrichter). Die Höhe der daraus resultierenden Berührungs- bzw. Schrittspannungen darf nicht über den vorgeschriebenen Grenzwerten liegen. Die Kenntnis darüber, wie sich die Ströme in der Erdungsanlage einer Freileitung verhalten bzw. wie sich deren Höhe manipulieren lässt, ist somit essentiell für den sicheren Betrieb solcher Leitungen.

3.2 Aufgabenstellungen

In dieser Arbeit wird die in Kapitel 3.1 angesprochene elektrische Beeinflussung der Erdungsanlage von Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen in Wechselstromnetzen untersucht, insbesondere die Stromaufteilung in derselben. Es werden die dafür maßgeblichen Einflussgrößen, sowie die Auswirkungen von Modifikationen derselben bestimmt. Basierend auf den erhaltenen Ergebnissen wird ein Verfahren entwickelt, welches die Klassifikation, den Vergleich und die Umrechnung der von verschiedenen Leitungskonfigurationen verursachten Beeinflussungen auf unkomplizierte, aber dennoch genaue Weise ermöglicht.

4 Methoden

Alle im Zuge dieser Arbeit getätigten Untersuchungen wurden rechnerisch an einem allgemeinen Simulationsmodell durchgeführt. Dieses wurde mit dem wissenschaftlich-mathematischen Softwarepaket MATLAB (Version 2006b; The MathWorks, Inc.; USA) erstellt und betrieben. Die Versionsnummern der für diese Arbeit relevanten Teilkomponenten von MATLAB 2006b (Toolboxen) sind nachfolgend angeführt. Sie wurden mit Hilfe des MATLAB-Befehls `ver` ([2]) ermittelt.

- **MATLAB:** Version 7.3
- **Simulink:** Version 6.5
- **SimPowerSystems:** Version 4.3

Unter Verwendung dieser 3 Softwarekomponenten wurde eine Simulink-Bibliothek namens 'FLK_library' samt dazugehörenden MATLAB-Skripten und Funktionen erstellt, mit welcher alle Typen von Freileitungen bestehend aus 6 Phasenseilen (entspricht 2 separaten Drehstromsystemen bzw. 3 separaten Wechsel-/Gleichstromsystemen) und 1 Erdseil modelliert und deren elektrisches Verhalten präzise bestimmt werden kann. Sämtliche im Zuge dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse beruhen auf den mit Version 1.0 dieser Bibliothek durchgeführten Berechnungen.

In Kapitel 4.1 wird der interne Aufbau aller zu FLK_library gehörenden Simulink-Blöcke beschrieben. Des weiteren werden hier auch die Regeln zum korrekten Einsatz derselben angeführt. Kapitel 4.2 erklärt hauptsächlich die allgemeinen Befehlsfolgen zum Parametrieren der FLK_library-Blöcke innerhalb eines erstellten Modells, sowie die dabei zum Einsatz kommenden Eingabe-Datenstrukturen. Die Kapitel 4.3 ff. widmen sich der Implementierungsbeschreibung des bereits erwähnten allgemeinen Simulationsmodells, auf welchem sämtliche Ergebnisse dieser Arbeit beruhen.

4.1 FLK_library – Simulink-Bibliothek

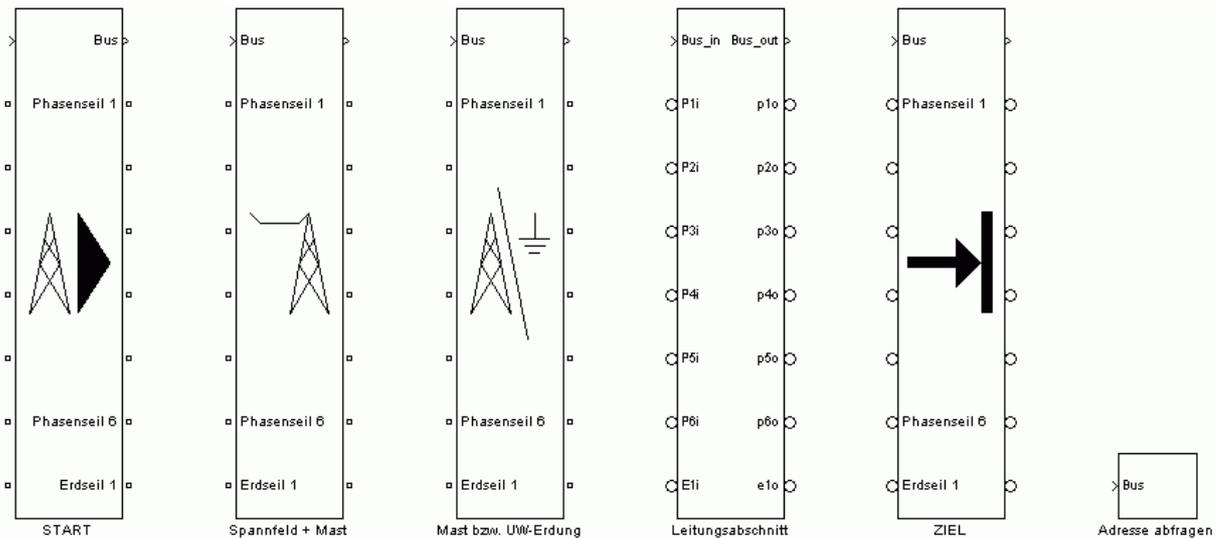


Abbildung 4.1: Die 6 Blöcke von FLK_library, Version 1.0

Bei dieser Bibliothek handelt es sich um einen Satz aus 6 Blöcken (siehe Abbildung 4.1), die zum Aufbau des gewünschten Freileitungsmodells in Simulink verwendet werden. Durch Einfügen einer entsprechenden Anzahl von Kopien dieser Blöcke in eine Simulink-Modelldatei und Verschaltung derselben entsprechend den gewünschten Anforderungen wird das zu untersuchende Modell erstellt. Die dabei zu beachtenden Regeln sind in Kapitel 4.1.9 aufgelistet.

4.1.1 Allgemeine Eigenschaften der Blöcke

Alle Blöcke von FLK_library sind als maskierte Subsysteme ([3]) ausgeführt, mit Ausnahme des Blocks 'Leitungsabschnitt', bei welchem es sich lediglich um ein gewöhnliches Subsystem handelt ([4]). Das Ausführen des Befehls 'Mask Parameters...' (entspricht einem Doppelklick mit der Maus auf den Block) öffnet ein Dialogfeld, das einen Beschreibungstext für den Block enthält, dem Anwender jedoch keinerlei Möglichkeiten zur Parametrierung desselben bietet. Dieser Vorgang geschieht ausschließlich über den in Kapitel 4.2.1 dokumentierten Präprozessor.

Die Blöcke besitzen 2 verschiedene Anschlusstypen: den Bus und die Leiterseile. Der Bus wird in Kapitel 4.1.1.1 näher beschrieben. Bei den Leiterseilen handelt es sich um spezielle Simulink-Leitungen. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Simulink-Signalen ([5]) repräsentieren diese die real vorhandenen Leitungsverbindungen ([6]). Sie besitzen keinerlei elektrische Eigenschaften und sind somit ideale Leitungen, vergleichbar mit den gezeichneten Leitungsverbindungen in einem Schaltplan. Erst durch das Hinzufügen von Blöcken wie Impedanzen, Spannungsquellen oder eben Blöcken aus FLK_library, erhält das zu modellierende Netzwerk seine elektrischen Eigenschaften.

Innerhalb der maskierten Blöcke sind einige der Routinen zu weiteren Subsystemen zusammengefasst um die Übersichtlichkeit zu erhöhen. Tabelle 4.1 listet diese auf.

Subsystem-name	Kurzbeschreibung	enthalten in	Kapitel
Modell	enthält sämtliche Elemente für die Simulation und Analyse des physikalischen Modells; Aufbau je nach Block unterschiedlich	'START', 'Spannfeld + Mast' und 'Mast bzw. UW-Erdung'	-
Daten hinzufügen	fügt die vom jeweiligen Block simulierten Messwerte zu den bereits am Bus vorhandenen Werten hinzu	Subsystem 'Modell' der Blöcke 'START', 'Spannfeld + Mast' und 'Mast bzw. UW-Erdung'	4.1.8.1
Stromquelle	implementiert eine ideale Stromquelle zum Einspeisen definierter Ströme in die Masterdung zu Analyse Zwecken	Subsystem 'Modell' der Blöcke 'START', 'Spannfeld + Mast' und 'Mast bzw. UW-Erdung'	4.1.8.2
Datenexport	sichert alle am Bus transportierten Werte in den MATLAB-Variablenspeicher (Workspace) am Ende des Simulationsvorgangs	'ZIEL'	4.1.5

Tabelle 4.1: Auflistung der in den einzelnen Blöcken von FLK_library vorkommenden Subsysteme

4.1.1.1 Der Bus

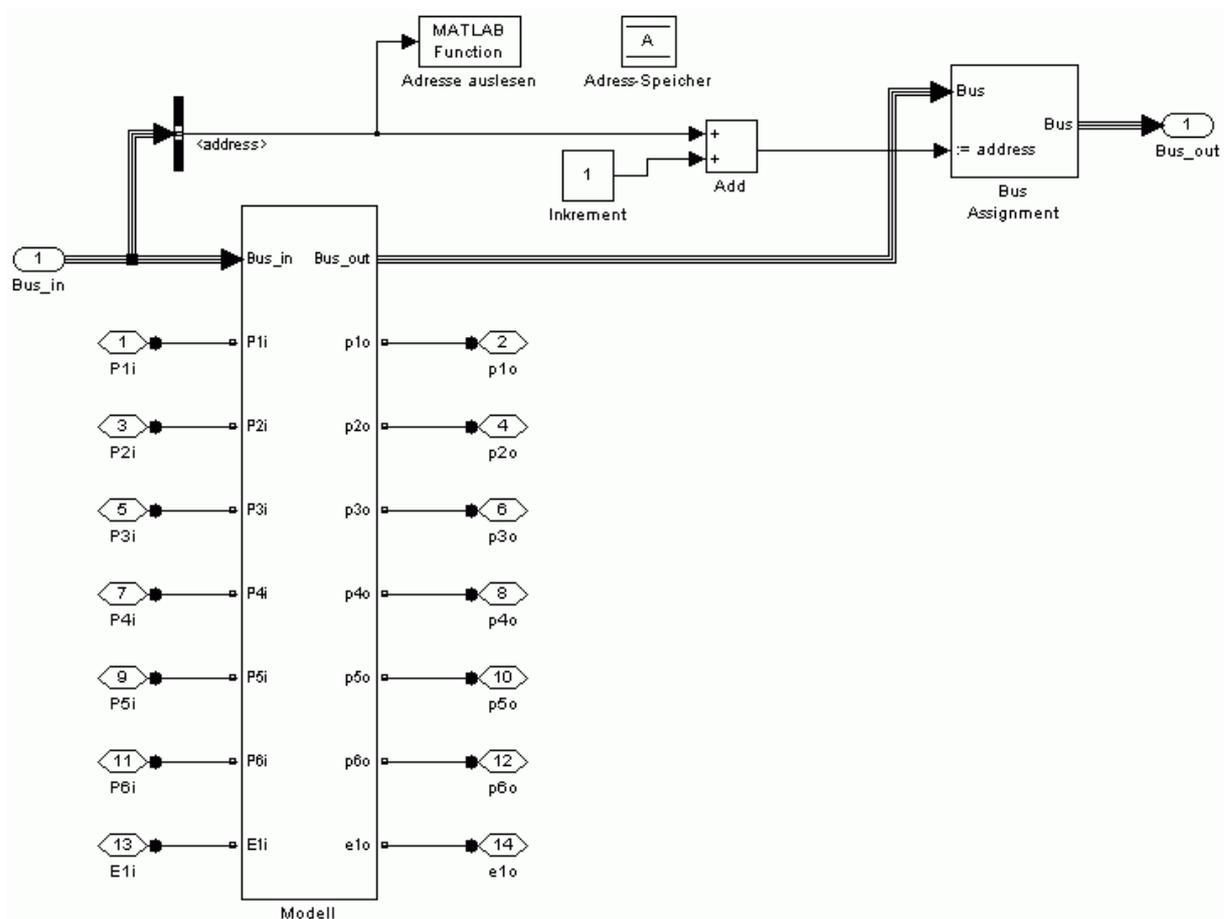


Abbildung 4.2: Oberste Subsystemebene eines Blocks mit Bus und automatischem Adresssystem (oben)

Der Bus ist ein Simulink-Signal vom gleichnamigen Typ ([5]). Er kann als grafische Zusammenfassung aller Simulink-Signale angesehen werden, welche die simulierten Messwerte (Ströme und Spannungen) von den FLK_library-Blöcken transportieren. Jeder Block der Bibliothek, in dem solche Werte ausgelesen werden, fügt diese dem Bus an den entsprechenden Stellen hinzu. Durch diese Zusammenfassung wird sichergestellt, dass alle simulierten Messwerte in klar definierter Form erfasst werden und es zu keinen Datenverlusten kommt. Am Endpunkt des Busses werden mit Hilfe des Blocks 'ZIEL' sämtliche am Bus transportierten Werte als Strukturvariable im MATLAB-Workspace abgelegt.

Neben der Aufgabe dieses soeben beschriebenen Messwertetransports hat der Bus auch noch die Aufgabe der automatischen Adressierung der FLK_library-Blöcke. Dies erleichtert deren Parametrierung sowie die Zuordnung der ausgelesenen Werte zu jedem Block. Der Bus besitzt zu diesem Zweck ein Signal namens 'address', welches einen Adresswert enthält. Am Beginn des Busses, dies ist der Block 'START', wird dieser Wert auf 1 gesetzt. Jeder FLK_library-Block, in welchem sich parametrierbare Elemente befinden oder simulierte Messwerte ausgelesen werden, fragt den Adresswert vom Bus ab und nimmt ihn für sich an. Danach inkrementiert er den Wert um 1 und schreibt ihn auf den Bus zurück, bevor dieser aus dem aktuellen Block heraus und in den nächsten Block geleitet wird (siehe Abbildung 4.2). Dieser Vorgang erfolgt vollautomatisch am Beginn jeder Simulation. Damit wird das Risiko von Verwechslungen oder Datenverlusten in den simulierten Messwerten, sowie das Risiko von Parametrierungsfehlern im Modell praktisch ausgeschlossen. Das Modell adaptiert sich bei Veränderungen wie beispielsweise dem Hinzufügen neuer Blöcke oder dem Vervielfältigen bereits bestehender Blöcke per „Kopieren-und-Einfügen“ selbstständig an das neue Umfeld.

4.1.2 Block 'Spannfeld + Mast'

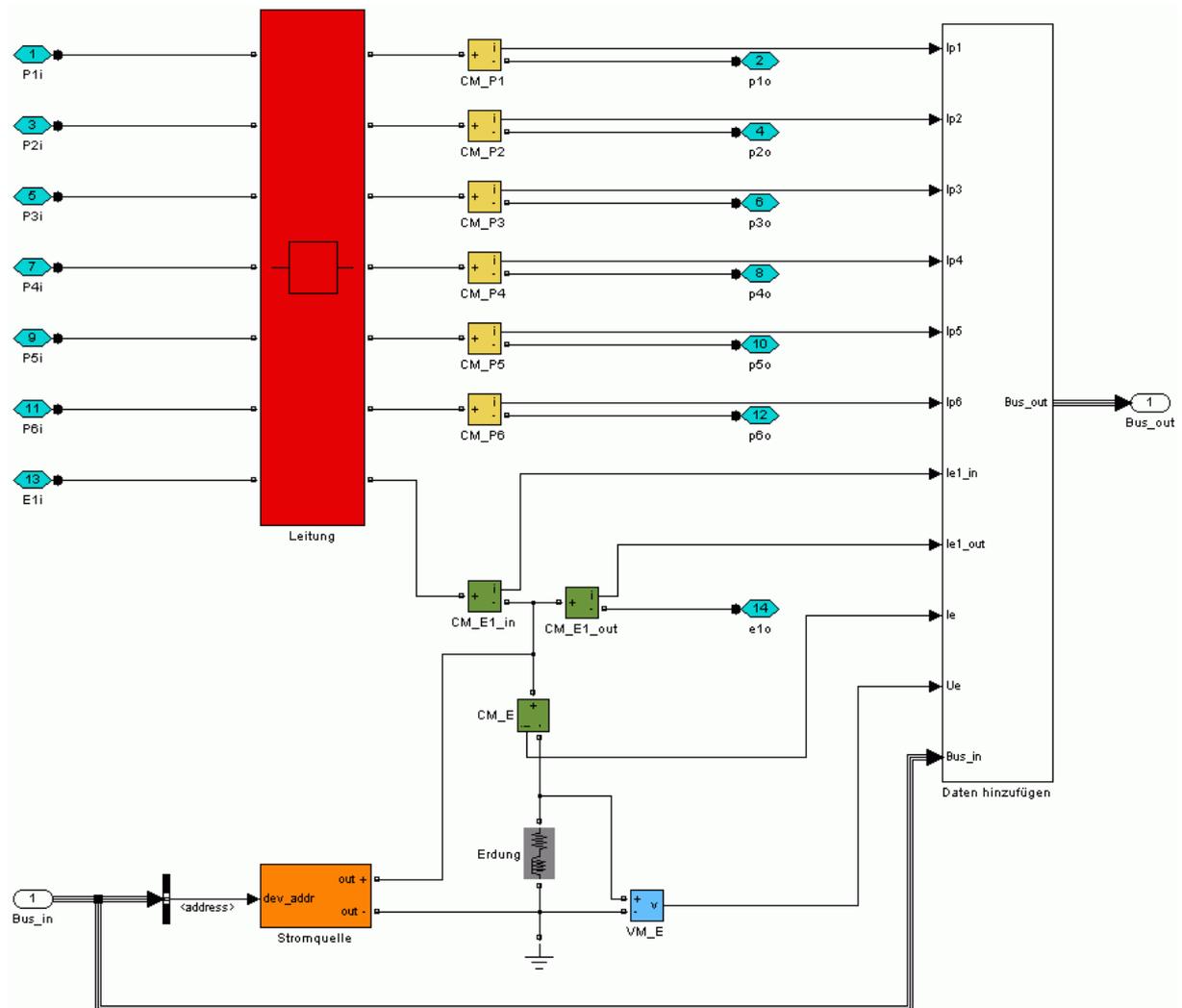


Abbildung 4.3: Subsystem 'Modell' des Blocks 'Spannfeld + Mast'

Dieser Block (siehe Abbildung 4.3) modelliert ein einzelnes Segment einer Freileitung, bestehend aus einem Spannfeld und der unmittelbar auf dieses Spannfeld folgenden Masterdung, wie im entsprechenden Blocksymbol in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Die modellierten elektrischen Leitungen werden zunächst über die linken Verbindungsports (cyan) ([7]) – nicht zu verwechseln mit den ebenfalls zu sehenden weißen Simulink-Blöcken der Typen 'Inport' ([8]) und 'Outport' ([9]) – zum Block 'Leitung' (rot) geführt. Es handelt sich hierbei um den Block 'Distributed Parameters Line' aus SimPowerSystems ([10]), mit dem das Spannfeld selbst modelliert wird. Er rechnet nicht, wie beispielsweise der ebenfalls in SimPowerSystems enthaltene Block 'Pi Section Line' ([11]), mit konzentrierten elektrischen Elementen sondern mit verteilten und erreicht dadurch eine höhere Präzision, speziell bei der Simulation höherfrequenter Vorgänge (Transienten, etc.). Zudem berücksichtigt der Block 'Pi Section Line' die elektrischen Kopplungen zwischen den einzelnen Leiterseilen nicht, was ihn somit unbrauchbar zur Lösung der gegebenen Aufgabenstellung macht.

Nach dem Verlassen des Blocks 'Leitung' auf der rechten Seite wird der berechnete Strom in sämtlichen Leiterseilen mit Blöcken vom Typ 'Current Measurement' ([12]) ausgelesen. Die Blöcke 'CM_P1' bis 'CM_P6' (gelb) erfassen dabei die zeitlichen Verläufe der elektrischen Ströme in den Phasenseilen (Simulink-Signale 'Ip1' bis 'Ip6'), bevor diese das Subsystem und damit den Block über die rechten Verbindungsports (cyan) wieder verlassen.

Das Erdseil kann den Block hingegen nicht auf diesem direkten Weg verlassen, da es ja leitend mit dem Mast und dessen Erdung verbunden ist, welche auch modelliert werden muss. Dies geschieht mit Hilfe des Blocks 'Erdung' (grau). Dieser ist vom Typ 'Series RLC Branch' ([13]) und repräsentiert die Impedanz der Masterdung gegen ferne Erde ([14]), welche sowohl als rein ohmsches als auch als ohmsch-induktives Element modelliert werden kann. Somit ist auch hier die Eignung zur vielseitigen Verwendung, z.B. zur Untersuchung des Verhaltens der Freileitung bei Blitzschlägen, sichergestellt. In diesem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, dass die Isolation der Phasenseile gegenüber dem Mast und der Erde immer als ideal angenommen wird. Phänomene wie rückwärtige Überschläge werden nicht berücksichtigt und müssen daher bei Bedarf durch dezidiertes Hinzufügen entsprechender Elemente zusätzlich modelliert werden.

Im elektrischen Verlauf des Erdseils stellt die Masterdung eine Abzweigung dar. Daher werden 3 separate Blöcke (dunkelgrün) zum Auslesen der berechneten Ströme verwendet:

- **CM_E1_in:** erfasst den vom modellierten Spannungsfeld kommenden Strom im Erdseil (Simulink-Signal 'Ie1_in').
- **CM_E:** erfasst den vom Erdseil in das Erdreich fließenden Strom (Simulink-Signal 'Ie').
- **CM_E1_out:** erfasst den Erdseilstrom welcher den Block wieder verlässt (Simulink-Signal 'Ie1_out').

Ein Stromfluss über die Erdungsimpedanz verursacht an ihr einen Spannungsabfall. Dessen zeitlicher Verlauf wird mit Hilfe des Blocks 'VM_E' (hellblau) ([15]) erfasst (Simulink-Signal 'Ue').

Die beiden ebenfalls in Abbildung 4.3 zu sehenden Subsysteme 'Daten hinzufügen' (weiß) und 'Stromquelle' (orange) werden in Kapitel 4.1.8.1 bzw. Kapitel 4.1.8.2 beschrieben.

4.1.3 Block 'Mast bzw. UW-Erdung'

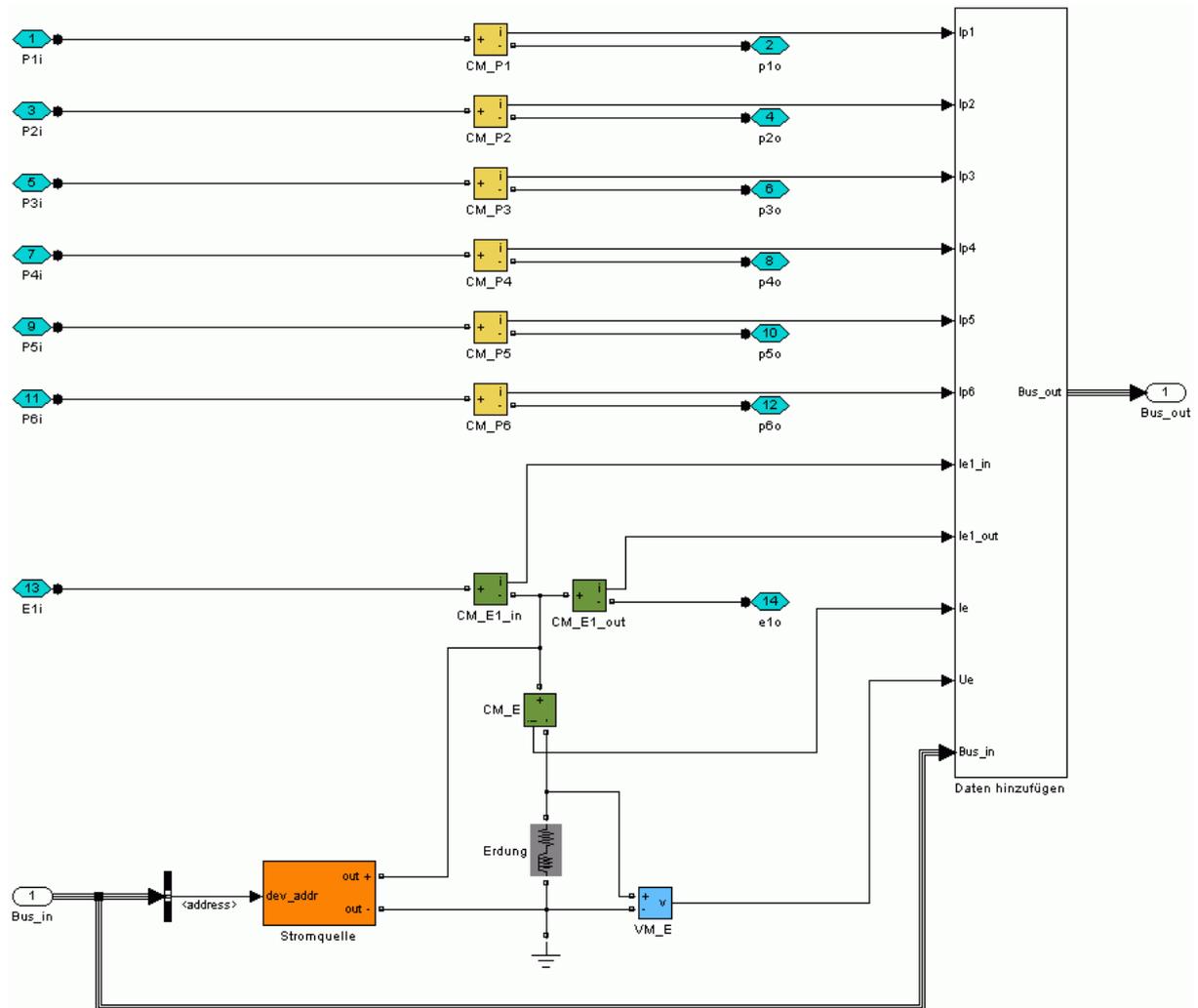


Abbildung 4.4: Subsystem 'Modell' des Blocks 'Mast bzw. UW-Erdung'

Dieser Block ist in seinem Aufbau ähnlich dem Block 'Spannfeld + Mast', der Block 'Leitung' zur Modellierung des Spannfelds ist hier jedoch nicht vorhanden (vergleiche Abbildung 4.4 mit Abbildung 4.3). Somit wird mit diesem Block nur eine einzelne Masterdung dargestellt, oder eine ähnliche Einrichtung dieser Art, wie etwa die Erdungsanlage eines Umspannwerks.

4.1.4 Block 'START'

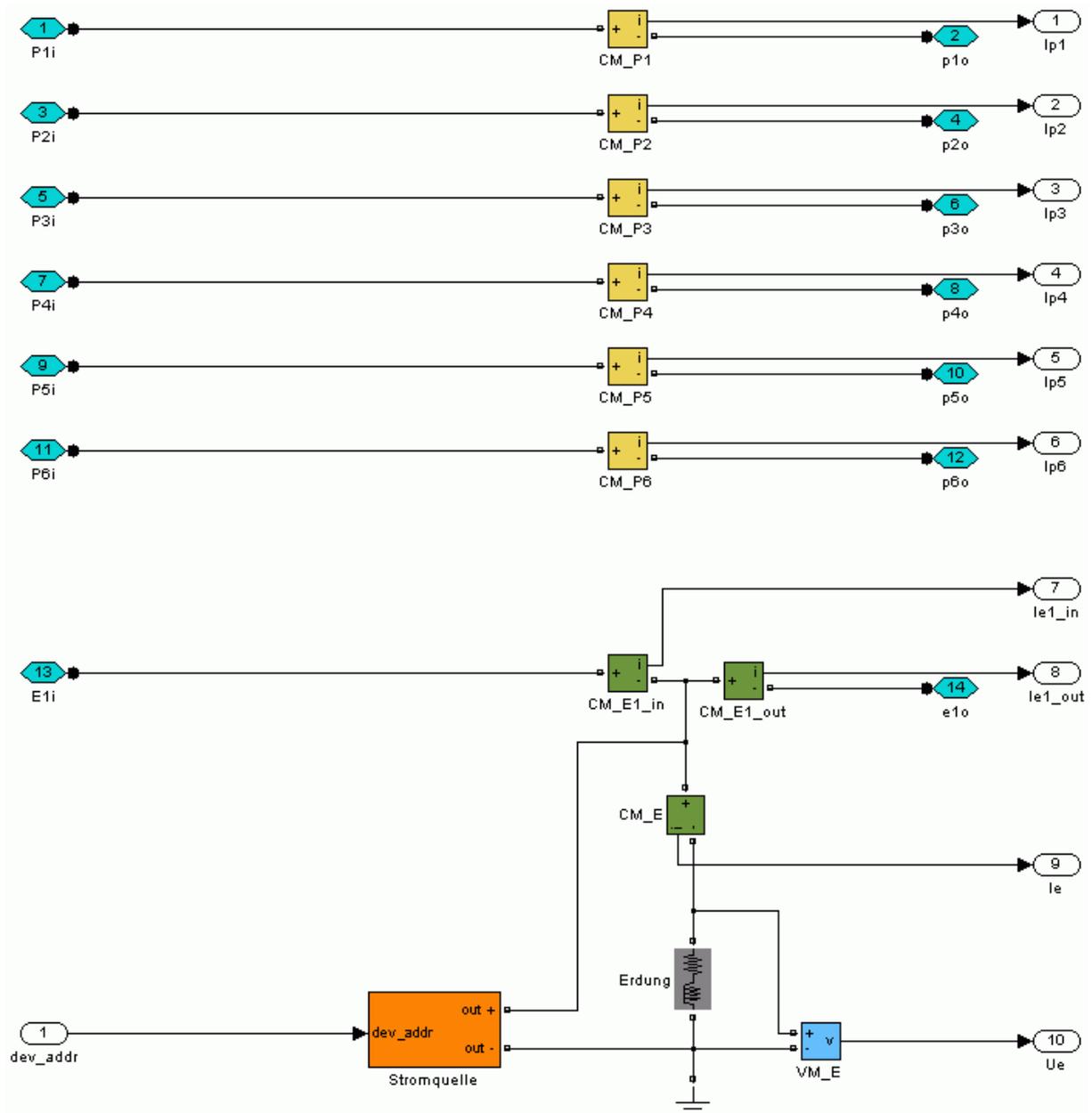


Abbildung 4.5: Subsystem 'Modell' des Blocks 'START'

Dieser Block dient, wie sein Name es bereits andeutet, zur Initialisierung des in FLK_library verwendeten Busses. Er stellt dabei dieselbe Funktionalität für das zu simulierende Freileitungsmodell zur Verfügung wie der Block 'Mast bzw. UW-Erdung', unterscheidet sich jedoch von diesem in der Art, wie die simulierten Messwerte weitergeleitet werden (vergleiche Abbildung 4.5 mit Abbildung 4.4). Das normalerweise vorkommende Subsystem 'Daten hinzufügen' kann hier nicht verwendet werden, da der Bus an dieser Stelle noch nicht existiert. Daher werden die von den einzelnen Messblöcken generierten Simulink-Signale direkt aus dem Subsystem 'Modell' heraus geleitet und danach außerhalb desselben mit Hilfe des Simulink-Blocks 'Bus Creator' ([16]) zu einem entsprechenden Bussignal vereinigt (siehe Abbildung 4.6).

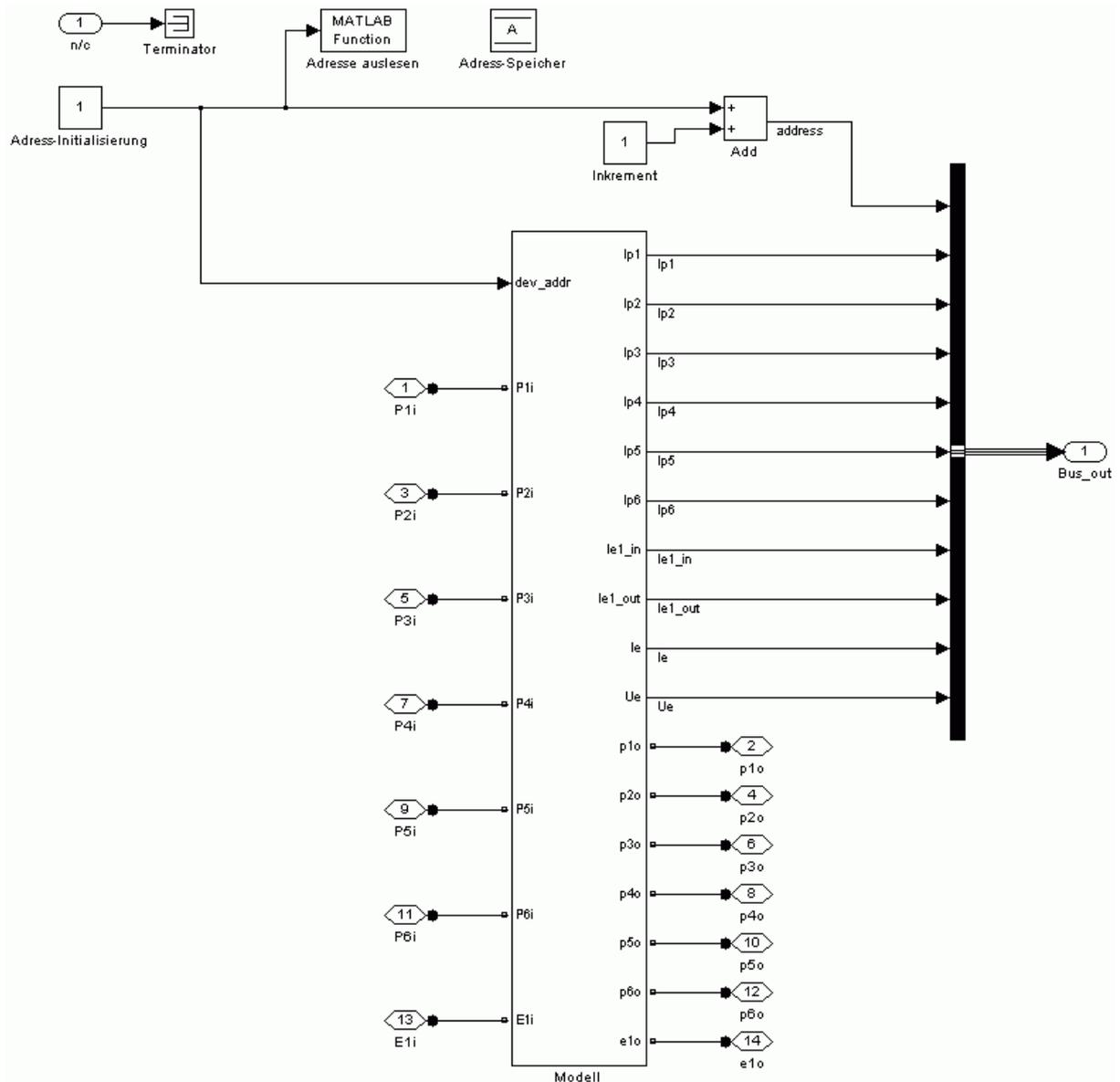


Abbildung 4.6: Oberste Subsystemebene des Blocks 'START'

Auch die Routine zur automatischen Adressierung unterscheidet sich von der in den anderen Blöcken verwendeten Routine. Statt, wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich, die aktuelle Adresse vom Bus abzufragen, wird selbiger hier mit dem Wert 1 initialisiert. Da sich im Modell-Subsystem des Blocks 'START' parametrierbare Elemente befinden, bzw. da dort simulierte Messwerte ausgelesen werden, muss auch ihm eine Busadresse zugewiesen werden. Diese entspricht, wie Abbildung 4.6 entnommen werden kann, immer dem Initialisierungswert 1. Der FLK_library-Block der unmittelbar auf den Block 'START' folgt besitzt somit bereits die Busadresse 2.

Der sonst für die Einleitung des Busses in den Block zuständige Verbindungsport trägt hier statt der Bezeichnung 'Bus_in' die Bezeichnung 'n/c' für „not connected“ und ist an einen Simulink-Block vom Typ 'Terminator' ([17]) angeschlossen. Etwaige an diesen Port angeschlossene Signale werden von ihm „verschluckt“.

4.1.5 Block 'ZIEL'

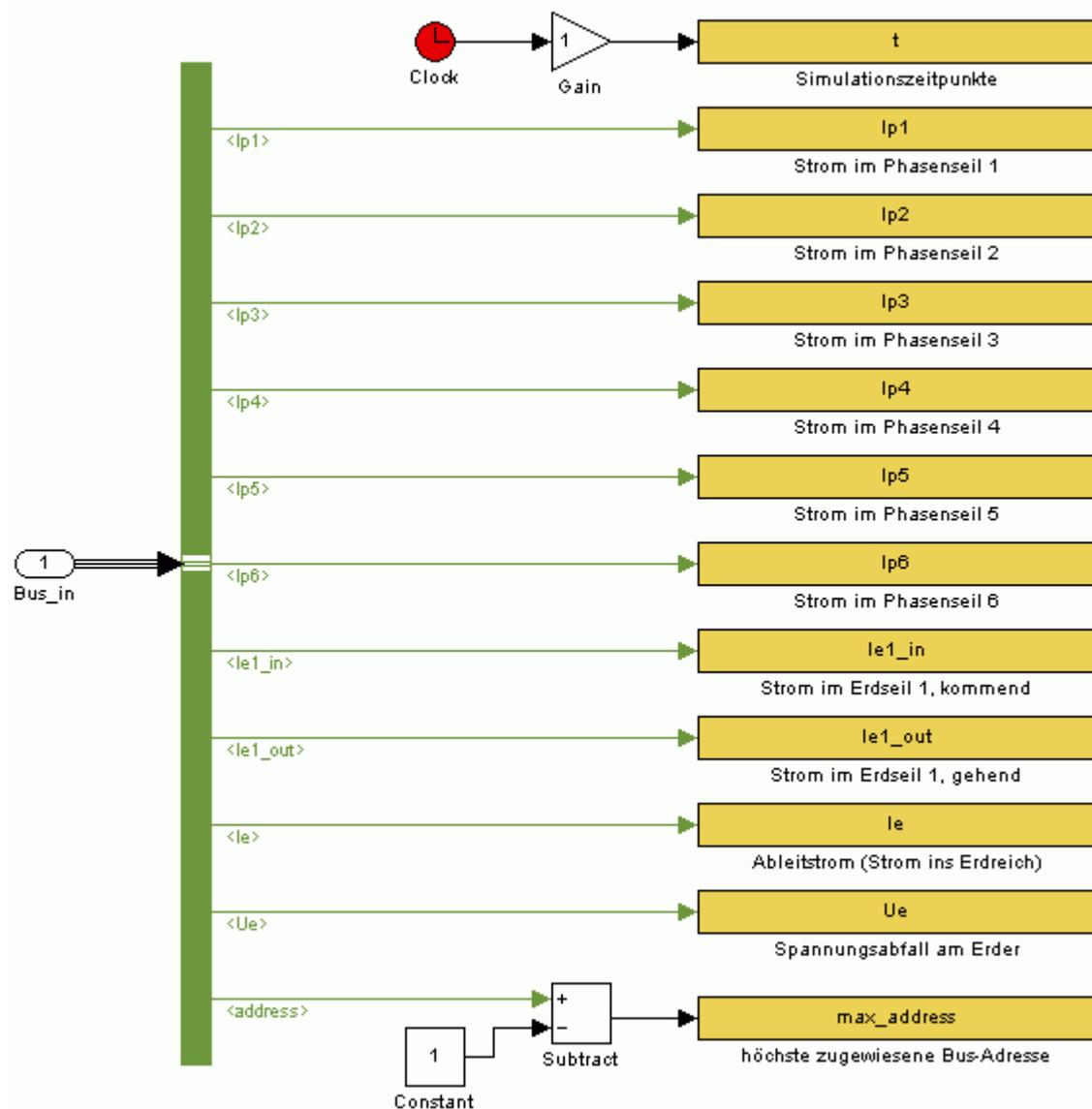


Abbildung 4.7: Subsystem 'Datenexport' des Blocks 'ZIEL'

Mit Hilfe dieses Blocks werden alle am Bus transportierten Daten am Ende des Simulationsvorgangs in einer Strukturvariable ([18]) mit klar definiertem Aufbau im MATLAB-Workspace abgelegt. Auf diese Variable kann gleich wie auf jede andere Strukturvariable zugegriffen werden. Somit kann das volle Funktionsspektrum von MATLAB für die Auswertung und Manipulation der Daten verwendet werden. Die oberste Hierarchieebene des Blocks 'ZIEL' enthält keinerlei nennenswerte Elemente. Es werden hier lediglich die virtuellen Leiterseile von der linken auf die rechte Seite durch geleitet. Die Routinen zur Speicherung der Daten in den MATLAB-Workspace befinden sich eine Ebene unterhalb im Subsystem 'Datenexport' (siehe Abbildung 4.7).

In diesem werden alle am Bus befindlichen Simulink-Signale per 'Bus Selector'-Block (dunkelgrün) ([19]) voneinander separiert, bevor sie an Blöcke vom Typ 'To Workspace' (gelb) ([20]) übergeben werden. Zudem werden mittels eines Blocks vom Typ 'Clock' (rot)

([21]) sämtliche Simulationszeitpunkte erfasst und ebenfalls exportiert. Die Menge der von den einzelnen 'To Workspace'-Blöcken zu speichernden Daten kann mit Hilfe eines Parameters namens 'Decimation' gesteuert werden, im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Dezimationsgrad bezeichnet. Besitzt dieser den Wert 1 werden die simulierten Messwerte bei jedem Zeitschritt exportiert, bei einem Wert von 2 nur die bei jedem zweiten Zeitschritt ausgelesenen Messwerte, usw. Diese Datenreduktion dient vor allem der Einsparung von Speicherplatz.

Jeder 'To Workspace'-Block schreibt den Inhalt des ihm zugewiesenen Signals in eine Strukturvariable namens 'Output'. Diese besitzt den folgenden Aufbau:

- **Output.t:** Simulationszeitpunkte als Spaltenvektor. Für jeden der darin angeführten Zeitpunkte ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_m$) existiert ein komplettes Set von simulierten Messwerten.
- **Output.Ip1** bis **Output.Ip6:** Werte der Ströme in den Phasenseilen 1 bis 6 von allen adressierten FLK_library-Blöcken als Matrix.
- **Output.Ie1_in:** Werte der zu den Masten hin fließenden, d.h. aus der Richtung des Busses kommenden Erdseilströme von allen adressierten FLK_library-Blöcken als Matrix.
- **Output.Ie1_out:** Werte der von den Masten weg fließenden, d.h. in die Richtung des Busses gehenden Erdseilströme von allen adressierten FLK_library-Blöcken als Matrix.
- **Output.Ie:** Werte der vom Erdseil in das Erdreich fließenden Ströme von allen adressierten FLK_library-Blöcken als Matrix.
- **Output.Ue:** Werte der Spannungsabfälle an den Erdungsimpedanzen von allen adressierten FLK_library-Blöcken als Matrix.
- **Output.max_address:** höchster im Modell vorkommender Adresswert eines Blocks als Spaltenvektor. Sämtliche Elemente dieses Vektors sind identisch.

Wie aus dieser Aufzählung ersichtlich ist, sind alle simulierten Messgrößen in separaten Matrizen organisiert, welche folgendermaßen aufgebaut sind:

- Jede Spalte einer Matrix enthält einen kompletten Zeitverlauf von einem einzelnen FLK_library-Block. Der Spaltenindex entspricht dabei der Adresse des FLK_library-Blocks von dem dieser Zeitverlauf stammt.
- Demzufolge repräsentiert jede Zeile einer Matrix alle Werte der Messgröße zu einem bestimmten Simulationszeitpunkt.

Tabelle 4.2 veranschaulicht dies am Beispiel der Variable 'Output.Ip1'.

$lp1(t_1)$ an Adr. 1	$lp1(t_1)$ an Adr. 2	$lp1(t_1)$ an Adr. 3	...	$lp1(t_1)$ an Adr. n
$lp1(t_2)$ an Adr. 1	$lp1(t_2)$ an Adr. 2	$lp1(t_2)$ an Adr. 3	...	$lp1(t_2)$ an Adr. n
$lp1(t_3)$ an Adr. 1	$lp1(t_3)$ an Adr. 2	$lp1(t_3)$ an Adr. 3	...	$lp1(t_3)$ an Adr. n
...
$lp1(t_m)$ an Adr. 1	$lp1(t_m)$ an Adr. 2	$lp1(t_m)$ an Adr. 3	...	$lp1(t_m)$ an Adr. n

Tabelle 4.2: Datenstruktur innerhalb der Variable 'Output.lp1'

Da alle simulierten Messgrößen als separate Zeitverläufe vorliegen, können somit auch alle Analysemethoden, wie etwa Effektivwertberechnung, Spektralanalyse, etc. zur Anwendung gelangen. Dies stellt abermals die größtmögliche Verwendbarkeit von FLK_library sicher.

Die Routinen im Subsystem 'Datenexport' weisen einige Besonderheiten auf, welche nachfolgend erklärt werden:

- Um sicherzustellen, dass die exportierten Simulationszeitpunkte (Variable 'Output.t') mit jenen Zeitpunkten übereinstimmen, zu denen tatsächlich simulierte Messwerte ausgelesen wurden, befindet sich zwischen dem Block 'Clock' und dem dazugehörenden 'To Workspace'-Block ein Block vom Typ 'Gain' ([22]). Dessen Verstärkungsfaktor beträgt 1, er verändert die von 'Clock' ausgegebenen Werte daher nicht. Aufgrund seines Parameters 'Sample time', dessen Wert immer automatisch auf den Wert der gewählten Simulationsschrittweite gesetzt wird, führt er jedoch die geforderte Synchronisation durch.
- Wie in Kapitel 4.1.1.1 erklärt, wird die Busadresse vom automatischen Adresssystem immer um 1 inkrementiert, bevor der Bus den jeweiligen Block wieder verlässt. Damit die Variable 'Output.max_address' den korrekten Wert enthält, muss die letzte Inkrementierung wieder rückgängig gemacht werden. Zu diesem Zweck wird das 'address'-Signal am Bus vor dem Export in den MATLAB-Workspace um 1 dekrementiert.
- Aufgrund einer während der Entwicklung von FLK_library festgestellten Einschränkung in Simulink ist es den 'To Workspace'-Blöcken nicht möglich, direkt in Strukturvariable zu schreiben. Aus diesem Grund legen alle Blöcke ihre Werte zunächst jeweils in einer einfachen, temporären Variable im MATLAB-Workspace ab. Deren Name entspricht dabei der im Inneren des Blocksymbols stehenden Bezeichnung (siehe Abbildung 4.7). Mit Hilfe seiner entsprechend programmierten Block-Callbackroutine 'StopFcn' ([23]) fügt jeder Block den Inhalt dieser von ihm soeben erstellten Variable dann in die bereits erwähnte Strukturvariable 'Output' ein und löscht die temporäre Variable danach. Da bei diesem Vorgang etwaige bereits im MATLAB-Workspace vorhandene Variablen mit den genannten Namen ohne jegliche Nachfrage überschrieben bzw. danach gelöscht werden, ist das vorherige Anlegen einer Sicherungskopie derselben gegebenenfalls notwendig.

4.1.6 Block 'Leitungsabschnitt'

Bei diesem Block handelt es sich um ein gewöhnliches Subsystem von Simulink ([4]). Der Block selbst stellt keinerlei Funktionalität für das Modell bereit. Er dient lediglich zum grafischen Zusammenfassen von Blöcken und erhöht damit die Übersichtlichkeit im Modell. Ein Doppelklick mit der Maus auf einen solchen Block oder das Ausführen des Befehls 'Open Block' zeigt seinen Inhalt an und erlaubt dessen Bearbeitung. Die Namen der Verbindungsports innerhalb des Blocks korrespondieren dabei mit den Anschlussbezeichnungen auf dem Block selbst.

4.1.7 Block 'Adresse abfragen'

Dieser Block dient zur Anzeige der Adresse an einer gewünschten Stelle des Busses. Er erleichtert dem Anwender die Parametrierung der FLK_library-Blöcke, sowie die korrekte Zuordnung der simulierten Messwerte zu denselben. So ist es beispielsweise hilfreich, vor eine interessierende Stelle im Modell einen solchen Block zu setzen, um sofort über die Adresse an dieser Stelle Bescheid zu wissen.

Sobald ein Simulationsvorgang gestartet wird, fragt der Block die Adresse des Busses von jener Stelle ab, in die er integriert wurde und zeigt den Wert unterhalb seines Namens dauerhaft an. Gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.1.1.1 entspricht dieser Wert dabei der Adresse, die der nächste am Bus befindliche FLK_library-Block erhalten hat. Werden danach Veränderungen am Modell vorgenommen, durch die sich auch die Adressen ändern (Hinzufügen bzw. Entfernen von Blöcken), aktualisiert der Block 'Adresse abfragen' den angezeigten Wert nicht automatisch. Es muss dazu erst ein neuerlicher Simulationsvorgang gestartet werden. Dies ist zur Vermeidung von Missverständnissen unbedingt zu beachten!

4.1.8 Sonstige Routinen

Die Modell-Subsysteme der Blöcke 'START', 'Spannfeld + Mast' sowie 'Mast bzw. UW-Erdung' enthalten neben den bereits beschriebenen noch zwei weitere, im Folgenden dokumentierte Subsysteme.

4.1.8.1 Subsystem 'Daten hinzufügen'

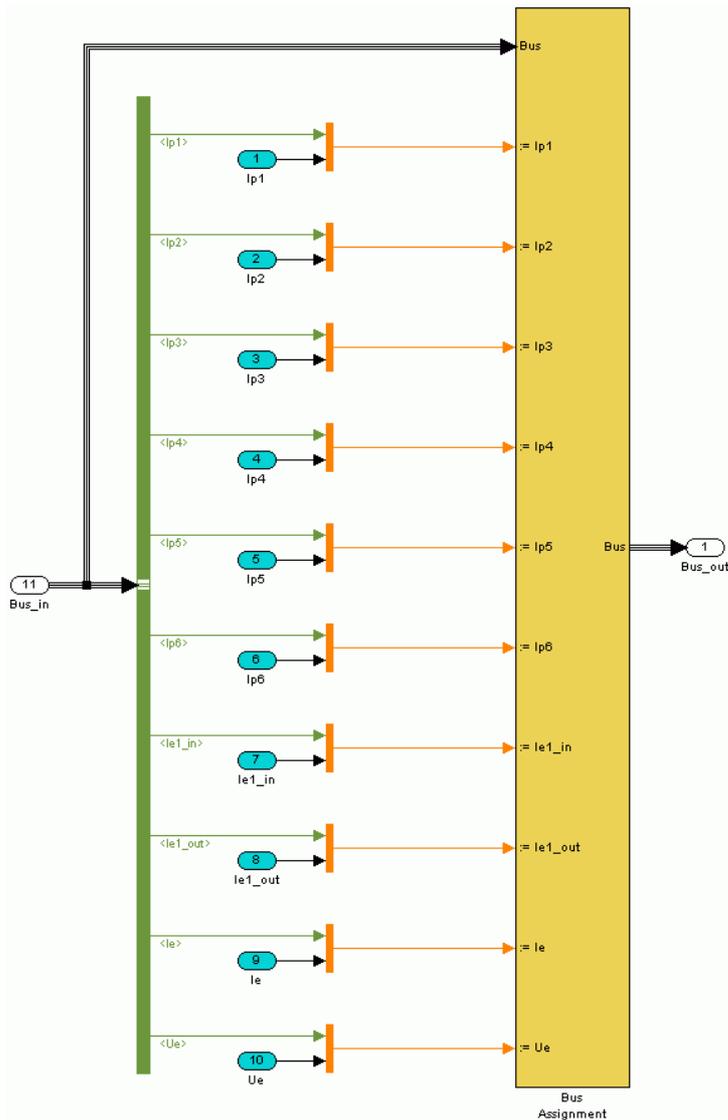


Abbildung 4.8: Subsystem 'Daten hinzufügen'

In diesem Subsystem (siehe Abbildung 4.8) werden die im jeweiligen FLK_library-Block ausgelesenen Werte dem Bus hinzugefügt. Dazu werden zunächst die bereits am Bus vorhandenen Werte, das sind alle Werte von jenen FLK_library-Blöcken deren Adresse kleiner ist als die des aktuellen Blocks, mit Hilfe eines Simulink-Blocks vom Typ 'Bus Selector' (dunkelgrün) ([19]) in separate Simulink-Signale aufgeteilt. Die 'Mux'-Blöcke (orange) ([24]) hängen nun die über die Verbindungsports (cyan) eingeleiteten neuen Werte an die bereits vorhandenen an. Zuletzt wird der nunmehr veraltete Datensatz am Bus mit Hilfe des Blocks 'Bus Assignment' (gelb) ([25]) durch den neuen ersetzt.

4.1.8.2 Subsystem 'Stromquelle'

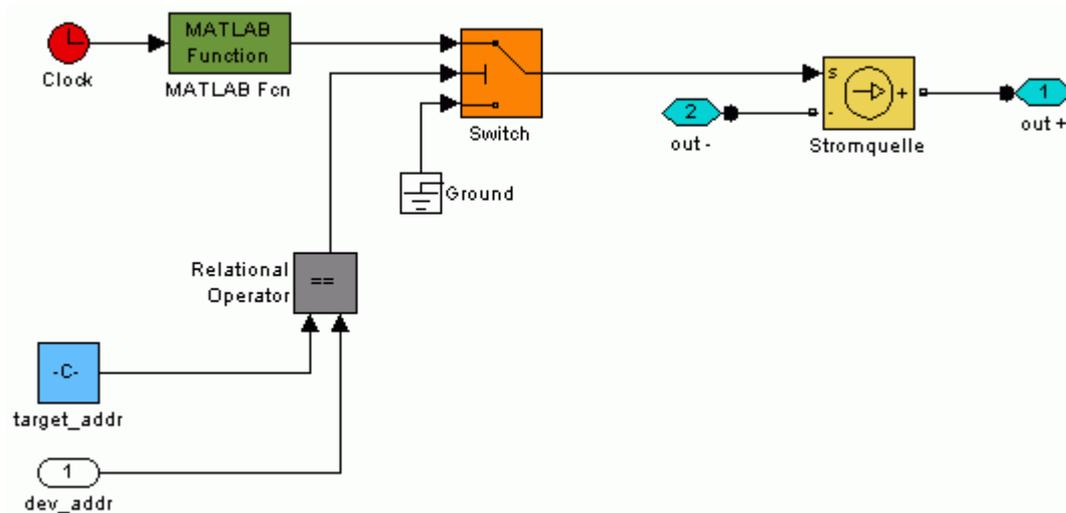


Abbildung 4.9: Subsystem 'Stromquelle'

Dieses Subsystem modelliert eine ideale, steuerbare Stromquelle, welche parallel zur Erdungsimpedanz angeschlossen ist (siehe Abbildungen 4.3 bis 4.5) und für spezielle Aufgabenstellungen, beispielsweise zur Berechnung der Kettenleiterimpedanzen, verwendet werden kann. Sie ist vielseitig parametrierbar und über das Adresssystem des Busses in FLK_library gezielt ansteuerbar.

Der in Abbildung 4.9 zu sehende Block 'Stromquelle' (gelb) ist ein SimPowerSystems-Block vom Typ 'Controlled Current Source' ([26]), dessen Ausgänge über die beiden Verbindungsports (cyan) mit dem restlichen Modell verbunden sind. Das am Port 's' des Blocks anliegende Simulink-Signal bestimmt die Höhe bzw. den Verlauf des von ihm ausgegebenen Stroms. Änderungen an diesem Signal werden exakt und unmittelbar übernommen, wodurch die Ausgabe jedweder Art von Strom realisiert werden kann. Das Steuersignal des hier verwendeten Verlaufs wird unter Zuhilfenahme der vom Block 'Clock' (rot) gelieferten aktuellen Simulationszeit im Block 'MATLAB Fcn' (dunkelgrün) ([27]) generiert. Es handelt sich dabei um ein aus einzelnen Sinusschwingungen zusammengesetztes Signal mit Gleichanteil gemäß Gl. 4.1. Amplitude, Frequenz und Phasenverschiebung jeder einzelnen Schwingung lassen sich dabei jeweils völlig unabhängig voneinander festlegen.

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_i \cdot t + \varphi_i \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (\text{Gl. 4.1})$$

- $I(t)$ vom Block 'Stromquelle' ausgegebener Stromverlauf in A
- I_0 Gleichanteil in A
- I_i Amplituden der Wechselanteile (Spitzenwerte) in A
- f_i Frequenzen der Wechselanteile in Hz
- φ_i Phasenverschiebungen der Wechselanteile in °
- n Anzahl der diskreten Sinusschwingungen
- t Simulationszeit

Um die Stromquelle in einem bestimmten FLK_library-Block zu aktivieren, wird die Busadresse dieses Blocks als Zieladresse definiert (siehe Kapitel 4.2.1.1). Diese ist daraufhin jedem 'Stromquelle'-Subsystem im gesamten Modell dank des Blocks 'target_addr' (hellblau), einem Simulink-Block vom Typ 'Constant' ([28]), bekannt. Zusätzlich wird die vom automatischen Adresssystem vergebene Busadresse über den Verbindungsport 'dev_addr' (weiß) verfügbar gemacht. Beide Werte werden nun mit Hilfe eines 'Relational Operator'-Blocks (grau) ([29]) miteinander verglichen. Im Fall der Übereinstimmung gibt der Block 'true' aus, ansonsten 'false'. Anhand dieser Information wird der Port 's' des Blocks 'Stromquelle' vom 'Switch'-Block (orange) ([30]) mit einem seiner beiden Signaleingänge verbunden. Im Fall von 'true' ist dies der obere Signaleingang, an welchem der 'MATLAB Fcn'-Block angeschlossen ist. Die Stromquelle wird dadurch von diesem Block angesteuert und gibt das eingestellte Signal als äquivalenten Stromverlauf aus. Im Fall von 'false' wird die Stromquelle hingegen mit dem Simulink-Block 'Ground' (weiß) ([31]) verbunden, dessen Ausgabewert konstant 0 beträgt. Dieser Block steht in keinerlei Zusammenhang zum gleichnamigen Block aus SimPowerSystems ([14]). Statt der Verwendung des 'Ground'-Blocks wäre auch der Einsatz eines Simulink-Blocks vom Typ 'Constant' denkbar, dessen Wert 0 beträgt. Dies würde zum selben Ergebnis führen. Da es sich bei der eingesetzten Stromquelle um eine ideale Quelle handelt, ist ihr Innenwiderstand unendlich hoch. Ein eingestellter Strom von 0 A ist daher gleichbedeutend mit der vollständigen Entfernung der Quelle aus dem Modell.

4.1.9 Regeln zur korrekten Anwendung von FLK_library

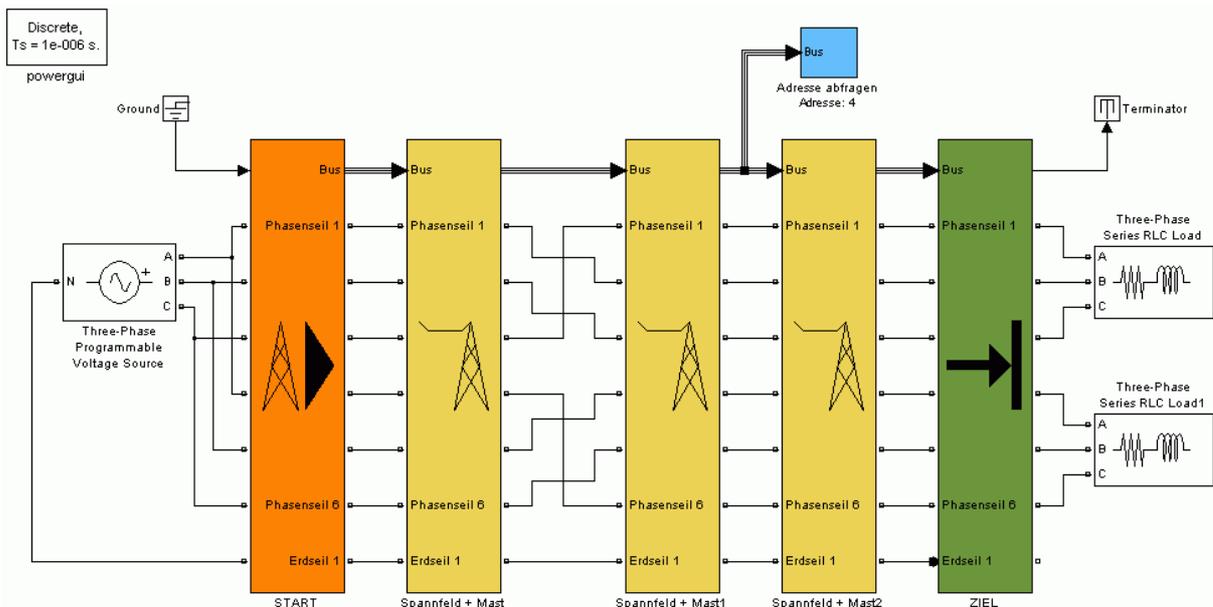


Abbildung 4.10: Einfaches Beispiel eines mit FLK_library erstellten Simulationsmodells

Die FLK_library-Blöcke können in jedem gewöhnlichen Simulink-Modell zusammen mit anderen Blöcken aus Simulink bzw. dessen Toolboxen verwendet werden.

Zu deren korrekter Funktion müssen jedoch einige Regeln beachtet werden. Abbildung 4.10 zeigt ein einfaches Leitungsmodell zur Veranschaulichung derselben, bestehend aus 3 Spannfeldern (gelb) und 4 Masten (orange und gelb). Diese Freileitung wird linksseitig von einer dreiphasigen, geerdeten Spannungsquelle gespeist ([32]), die beide Systeme der Leitung parallel versorgt. Am rechten Endpunkt der Leitung befinden sich 2 jeweils in Dreieckschaltung konfigurierte Lasten ([33]). Zusätzlich werden die Phasenseile beider Leitungen je 1 Mal verdrillt. Dies geschieht am zweiten Mast von links. Die beiden Simulink-Blöcke 'Ground' ([31]) und 'Terminator' ([17]) sind optional. Sie unterdrücken lediglich die standardmäßig von Simulink ausgegebenen Warnmeldungen bezüglich nicht angeschlossener Ports, haben aber sonst keine weitere Funktionalität.

Die Regeln zur korrekten Anwendung von FLK_library lauten wie folgt:

- **Blockanzahl und Verschaltung:** Das Modell kann eine beliebig hohe Anzahl an FLK_library-Blöcken enthalten, begrenzt lediglich durch die Hardware- und Software-Ressourcen des verwendeten Rechners. Diese können über ihre Leiterseilports beliebig miteinander verschaltet und mit SimPowerSystems-Blöcken kombiniert werden (siehe Abbildung 4.10: Quelle und Lasten aus SimPowerSystems, sowie Parallelschaltung und Verdrillung). Dabei sind auch Leitungsunterbrechungen möglich (siehe Abbildung 4.10: Das rechte Ende des Erdseils ist nicht angeschlossen.).
- **Spezielle Blöcke:** Die FLK_library-Blöcke 'START' und 'ZIEL' sowie der SimPowerSystems-Block 'powergui' ([34]) müssen in das Modell integriert werden, dürfen darin aber jeweils nur ein einziges Mal vorkommen. Der 'powergui'-Block muss auf der obersten Ebene der Modellhierarchie positioniert werden, die beiden anderen sind hingegen beliebig platzierbar, also auch in Subsystemen. Durch den 'powergui'-Block wird festgelegt, in welchem Modus die Simulation des erstellten SimPowerSystems-Netzwerks und damit auch die des darauf basierenden FLK_library-Netzwerks durchgeführt wird. Dieser Modus muss auf 'Discrete' gesetzt werden. In den beiden anderen Modi, 'Continuous' und 'Phasor', wurde das korrekte Funktionieren der FLK_library-Blöcke nicht getestet.
- **Der Bus:** Der Bus muss beim Block 'START' beginnen, beim Block 'ZIEL' enden, und in einem einzigen Zug durch alle im Modell vorhandenen FLK_library-Blöcke geführt werden. Verzweigungen dürfen ausschließlich zur Integration von FLK_library-Blöcken des Typs 'Adresse abfragen' erstellt werden, wie in Abbildung 4.10 dargestellt (hellblauer Block).

- **Benennung der Blöcke:** Sämtliche im Modell verwendeten Blöcke dürfen beliebig benannt werden, mit einer Einschränkung: Kein einziger Block im gesamten Modell, egal ob aus FLK_library oder nicht, darf den Term 'Adress-Speicher' als Namen erhalten, da der Präprozessor die FLK_library-Blöcke anhand eines in ihnen enthaltenen Blocks mit dieser Bezeichnung identifiziert (siehe Abbildungen 4.2 und 4.6). Die Nichtbeachtung dieser Einschränkung führt zu Problemen bei der Parametrierung der FLK_library-Blöcke.
- **Wichtiger Hinweis zum 'Adresse abfragen'-Block:** Der von diesem Block angezeigte Adresswert ist nur während des laufenden Simulationsvorgangs korrekt (siehe Kapitel 4.1.7)!

4.2 FLK_library – MATLAB-Skripten und Funktionen

Jeder Simulationsvorgang kann in 3 Hauptarbeitsschritte eingeteilt werden, die nacheinander abgearbeitet werden: dem Präprozessor, dem Prozessor und dem Postprozessor.

4.2.1 Der Präprozessor

Mit Hilfe des Präprozessors werden die Elemente im zu simulierenden Modell parametrisiert und die Umgebungs- und Randbedingungen desselben festgelegt. Oftmals wird unter dem Arbeitsschritt 'Präprozessor' auch der Vorgang der eigentlichen Kreation des Modells verstanden.

Der Präprozessor zu FLK_library kann, je nach Anforderungsprofil, grundsätzlich beliebig realisiert werden, auch zur automatisierten Erstellung des kompletten Modells ([35]). Im Folgenden werden alle notwendigen Elemente eines solchen Präprozessors dargestellt und die Schnittstellen zur Kommunikation mit den FLK_library-Blöcken erklärt.

4.2.1.1 Die Variable 'Input'

Diese Variable stellt den zentralen Speicherort für die von den FLK_library-Blöcken zu verwendenden Parameter dar. Sie muss im MATLAB-Workspace erstellt werden und zumindest die Parameter für die in Kapitel 4.1.8.2 dokumentierte Stromquelle, hier Messquelle genannt, und den in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Dezimationsgrad enthalten. Sämtliche weiteren Parameter können auch in anders lautenden Variablen gespeichert werden. Es ist jedoch zur Erhöhung der Übersichtlichkeit empfehlenswert, diese ebenfalls in Input abzulegen. Ähnlich wie die vom Block 'ZIEL' erstellte Variable 'Output' handelt es sich auch bei Input um eine Strukturvariable. Die nachfolgenden 3 Tabellen beschreiben ihren Aufbau so wie er im Zuge dieser Arbeit verwendet wird. Tabelle 4.3 beschreibt alle Parameter die in Input enthalten sein müssen. Die angeführten Namen müssen dabei jeweils exakt übereinstimmen. Tabelle 4.4 beschreibt alle weiteren Parameter die für das korrekte

Funktionieren der FLK_library-Blöcke essentiell sind, aber nicht unbedingt in der Variable 'Input' gespeichert werden müssen. Diese Parameter können auch in anderen Variablen mit beliebigen Namen abgelegt werden. Tabelle 4.5 beschreibt alle sonstigen Parameter für welche in dieser Arbeit Input als Speicherort dient, die aber keinerlei direkten Zusammenhang zu den FLK_library-Blöcken haben. Lediglich die unter 'Input.Simulation' angeführten Parameter werden zur Konfiguration der Simulationsbedingungen zusätzlich an das Modell übergeben, die Variable 'Input.Messquelle.grundfrequenz' hingegen nicht. Ihr Inhalt wird jedoch vom Präprozessor und vom Postprozessor zur Durchführung einiger Berechnungen verwendet und muss daher korrekt sein, d.h. der Speisefrequenz der Phasenseile entsprechen. Aus der rechten Spalte aller 3 Tabellen ist ersichtlich, in welcher Form (Skalar, Vektor, Matrix) ([36]) die Werte für diesen Parameter an das Modell übergeben werden müssen.

Input.Messquelle		
.zieladresse	Adresse jenes FLK_library-Blocks dessen Stromquelle aktiviert werden soll	Skalar
.DC_ampl	Gleichanteil in Ampere	Skalar
.AC_ampl	Amplituden (Spitzenwerte) der einzelnen Wechselanteile in Ampere	Skalar, Vektor
.AC_freq	Frequenzen der einzelnen Wechselanteile in Hertz	Skalar, Vektor
.AC_phase	Phasenverschiebungen der einzelnen Wechselanteile in Grad	Skalar, Vektor
Input.Simulation		
.dezimationsgrad	Faktor zur Steuerung der vom FLK_library-Block 'ZIEL' ausgegebenen Datenmenge	Skalar

Tabelle 4.3: Verpflichtender Inhalt der Variable 'Input'

Input.Leitung		
.R_matrix	resistive Koppelmatrix eines einzelnen Spannfelds in Ohm pro Kilometer	Matrix
.L_matrix	induktive Koppelmatrix eines einzelnen Spannfelds in Henry pro Kilometer	Matrix
.C_matrix	kapazitive Koppelmatrix eines einzelnen Spannfelds in Farad pro Kilometer	Matrix
.laenge	Länge eines einzelnen Spannfelds (Abstand zwischen 2 Masten) in Kilometer	Skalar
.f_ref	Frequenz in Hertz welche für die Berechnung der 3 Koppelmatrizen verwendet wurde	Skalar
Input.Erdung		
.Re	resistiver Anteil der Erdungsimpedanz in Ohm	Skalar
.Le	induktiver Anteil der Erdungsimpedanz in Henry	Skalar

Tabelle 4.4: Zur korrekten Funktion von FLK_library notwendige, jedoch auslagerbare Parameter

Input.Messquelle		
.grundfrequenz	Grundfrequenz der einzuprägenden Oberschwingungen in Hertz; hier: Speisefrequenz der Phasenseile in Hertz	Skalar
Input.Simulation		
.t_start	Startzeit des Simulationsvorgangs in Sekunden	Skalar
.t_stop	Stoppzeit des Simulationsvorgangs in Sekunden	Skalar
.sampletime	Simulationsschrittweite des Solvers in Sekunden	Skalar

Tabelle 4.5: Weitere in der Variable 'Input' gespeicherte Parameter

4.2.1.2 Grundsätzliche Befehlsfolge der Präprozessorroutine

In diesem Kapitel wird die Grundstruktur eines für FLK_library geeigneten Präprozessors beschrieben. Da er keinerlei Befehle zur Modellkonstruktion enthält, setzt er das Vorhandensein eines bereits fertig gestellten Modells mit FLK_library-Blöcken voraus. Des weiteren ist zu beachten, dass hier nur die unmittelbar für die Parametrierung notwendigen Befehle angeführt werden. Je nach Anforderungsprofil ist die beschriebene Grundstruktur daher um weitere Befehle und Routinen zu ergänzen. Alle hier verwendeten Befehle sind in [37] bzw. [38], [39] und [35] dokumentiert.

Nach dem Start des Präprozessors ist zunächst die Variable 'Input' zu erstellen. Sie muss zumindest die in Tabelle 4.3 angeführten Parameter enthalten. Das Erstellen dieser Parameter kann auf die gleiche Art und Weise erfolgen wie das Erstellen gewöhnlicher Variablen in MATLAB, z.B.:

Input.Messquelle.zieladresse = 3;

Danach wird das automatische Adresssystem von FLK_library aktiviert. Zu diesem Zweck muss der Simulationsvorgang für das zu parametrierende Modell gestartet werden. Es ist hierbei allerdings nicht erforderlich über die gesamte Zeitdauer zu simulieren. Die Simulation eines einzigen Zeitschritts reicht bereits aus. Dies kann mit Hilfe des folgenden Befehls bewerkstelligt werden:

sim('modellname', 0)

Das Argument 'modellname' entspricht dem Dateinamen des Simulink-Modells. Die Erweiterung '.mdl' muss hierbei weggelassen werden. Der Name ist als String, d.h. zwischen den gezeigten einfachen Anführungsstrichen, oder in Form einer Variable die einen String enthält, zu übergeben. Der zweite Parameter (0) spezifiziert die Stoppzeit t_{stop} . Unabhängig von den in der Modelldatei angeführten Start- und Stoppzeiten startet dieser Befehl eine Simulation des angegebenen Modells von $t_{\text{start}} = 0$ s bis t_{stop} . Da der Wert von t_{stop} ebenfalls 0 s beträgt, wird exakt ein Zeitschritt simuliert, nämlich bei $t = 0$ s. Es handelt sich dabei aber dennoch um einen vollwertigen Simulationsvorgang, im Zuge dessen das gesamte Modell komplett kompiliert und initialisiert wird, also auch das automatische Adresssystem von

FLK_library. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Variable 'Output', sofern sie bereits existiert, mit den Werten aus diesem einen Zeitschritt überschrieben wird, schließlich gelangen ja auch die Routinen aus dem FLK_library-Block 'ZIEL' zur Ausführung. Soll dies verhindert werden, ist Output daher vor der Ausführung des Befehls *sim* zu sichern und danach wiederherzustellen.

Da nun alle FLK_library-Blöcke eine eindeutige Adresse besitzen, können sie gezielt parametrisiert werden. Zu diesem Zweck muss der gewünschte Block zunächst unter allen im Modell vorkommenden Blöcken eindeutig identifiziert werden. Dies geschieht über den in ihm enthaltenen Simulink-Block 'Data Store Memory' ([40]). Der folgende Befehl schreibt den gesamten Pfad in der Modellhierarchie bis zu jenem 'Data Store Memory'-Block, welcher den in der Variable 'adresse' angegebenen Wert enthält, in die Variable 'pfad':

```
pfad = find_system('modellname', 'LookUnderMasks', 'all', 'BlockType', ...  
    'DataStoreMemory', 'Name', 'Adress-Speicher', 'InitialValue', int2str(adresse));
```

'modellname' bezieht sich abermals auf den Dateinamen des Modells ohne die Erweiterung '.mdl'. Danach folgen insgesamt 4 Parameterpaare in der Form „Parametername, Wert“, welche die Suchkriterien spezifizieren. 'LookUnderMasks' (Wert: all) weist *find_system* an, auch alle maskierten Subsysteme zu durchsuchen, da es sich bei den FLK_library-Blöcken um solche Subsysteme handelt. Mit den beiden Parametern 'BlockType' (Wert: DataStoreMemory) und 'Name' (Wert: Adress-Speicher) werden nur jene Blöcke im Modell für die Suche in Betracht gezogen, welche vom erwähnten Typ sind bzw. den erwähnten Namen besitzen. Es sind dies die Blöcke, in welchen der Adresswert beim Simulationsstart abgelegt wird. Durch Angabe des Parameters 'InitialValue', dies ist jener Parameter der 'Data Store Memory'-Blöcke welcher die Adresswerte enthält, kann der zu suchende FLK_library-Block schließlich eindeutig identifiziert werden. Sofern die in Kapitel 4.1.9 angeführten Regeln befolgt wurden und die Variable 'adresse' einen Wert enthält, der sich im vergebenen Adressraum befindet, gibt *find_system* exakt einen Treffer zurück.

Mit den folgenden 2 Befehlen wird diese soeben ermittelte Pfadangabe nun für die Verwendung mit den Parametrierbefehlen aufbereitet:

```
pfad = strrep(pfad, '/Adress-Speicher', "");  
pfad = char(pfad);
```

Der erste Befehl entfernt den Term 'Adress-Speicher' aus dem Pfadstring sodass nur mehr der Pfad zum gewünschten FLK_library-Block übrig bleibt. Der zweite Befehl konvertiert den ursprünglich als Cell-Array vorliegenden Pfadstring in ein Character-Array ([41]), welches von den nachfolgenden Befehlen verarbeitet werden kann.

Die Elemente des gewählten FLK_library-Blocks können nun parametrisiert werden. Die Erdungsimpedanz besitzt 2 Parameter (ohmscher Widerstand und Induktivität), deren Werte folgendermaßen manipuliert werden können:

```
set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Resistance', 'Input.Erdung.Re')
```

```
set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Inductance', 'Input.Erdung.Le')
```

Im ersten Argument beider Funktionen wird der zuvor generierte Pfadstring erweitert, sodass er auf jenen SimPowerSystems-Block zeigt der die Erdungsimpedanz modelliert. Das zweite Argument gibt den zu modifizierenden Parameter dieses Blocks an, welcher mit der im dritten Argument angegebenen Zeichenfolge beschrieben wird, in diesem Fall ein Variablenname (vergleiche mit Tabelle 4.4). Sollen Zahlenwerte direkt verwendet werden, so sind diese ebenfalls als String, d.h. zwischen einfachen Anführungsstrichen, zu übergeben.

Zum besseren Verständnis wurde zuvor jeder der beiden Parameter mittels eines separaten `set_param`-Befehls eingestellt. Es ist jedoch auch möglich, alle Parameter für einen Block mittels eines einzigen Aufrufs dieses Befehls zu konfigurieren, indem einfach weitere Parameter-Wert-Paare angehängt werden:

```
set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Resistance', 'Input.Erdung.Re', 'Inductance', ...  
        'Input.Erdung.Le')
```

Die Funktionsweise dieses Befehls ist identisch mit jener der vorher beschriebenen Folge aus 2 einzelnen Befehlen.

Das Leitungsmodell wird auf ähnliche Art und Weise konfiguriert. Es besitzt 5 einstellbare Parameter:

```
set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Frequency', 'Input.Leitung.f_ref')
```

```
set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Resistance', 'Input.Leitung.R_matrix')
```

```
set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Inductance', 'Input.Leitung.L_matrix')
```

```
set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Capacitance', 'Input.Leitung.C_matrix')
```

```
set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Length', 'Input.Leitung.laenge')
```

Wie schon zuvor können auch hier diese separaten Befehle zu einem einzigen zusammengefasst werden. Die Vorgehensweise ist dabei identisch.

Mit den bisher in diesem Kapitel besprochenen Befehlen ist das Grundgerüst eines Präprozessors für FLK_library nun komplett.

4.2.1.3 Erweiterte Routinen

Da ein mit FLK_library erstelltes Simulationsmodell üblicherweise mehrere Blöcke aus dieser Bibliothek enthält, ist die Automatisierung des Parametrierungsvorgangs ein nahe liegender Schritt, der in dieser Arbeit auch implementiert wurde. Weil jeder FLK_library-Block über

seine Busadresse eindeutig angesprochen und vollkommen unabhängig von allen anderen Blöcken konfiguriert werden kann, ist dabei eine sehr hohe Flexibilität bei der Modellierung gegeben.

Die einfachste Möglichkeit zur Parametrierung aller FLK_library-Blöcke in einem Modell besteht in der Implementation einer *for*-Schleife, folgend auf den im vorherigen Kapitel beschriebenen *sim*-Befehl:

```
sim('modellname', 0)
```

```
for adresse = 1:1:Output.max_address(1)  
    pfad = find_system('modellname', ... , 'InitialValue', int2str(adresse));  
    ...  
end
```

Diese Schleife identifiziert sämtliche FLK_library-Blöcke im Modell (je einen pro Iteration). Ihr Index 'adresse' läuft von 1 bis zur größten vorkommenden Busadresse. Diese ist aufgrund der unmittelbar zuvor durchgeführten Initialisierungssimulation bereits korrekt in der Variable 'Output.max_address' enthalten. Mit Hilfe der Indexvariable können nun jedem FLK_library-Block individuelle Werte zugewiesen werden:

```
for adresse = 1:1:Output.max_address(1)  
    ...  
    set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Resistance', ...  
        ['Input.Erdung.Re(' int2str(adresse) ')'])  
    set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Inductance', ...  
        ['Input.Erdung.Le(' int2str(adresse) ')'])  
end
```

Im obigen Codesegment werden den Parametern für den ohmschen Widerstand und der Induktivität der Erdungsimpedanz Variablen zugewiesen, deren Index sich mit der Adresse des Blocks ändert. Die Erdungsimpedanz von Block 1 besitzt die Werte 'Input.Erdung.Re(1)' bzw. 'Input.Erdung.Le(1)', die von Block 2 die Werte 'Input.Erdung.Re(2)' bzw. 'Input.Erdung.Le(2)', usw. Durch Ausführung der Variablen 'Input.Erdung.Re' und 'Input.Erdung.Le' als Vektoren können dadurch jeder Impedanz ihre individuellen (skalaren) Zahlenwerte zugewiesen werden. Eine ähnliche Vorgehensweise kann zur Modellierung unterschiedlicher Mastkopfbilder auch für die Koppelmatrizen des Leitungsmodells umgesetzt werden.

Wie aus den Kapiteln 4.1.2 bis 4.1.4 ersichtlich ist, besitzen zwar alle adressierbaren FLK_library-Blöcke eine Erdungsimpedanz, das Leitungsmodell ist jedoch nur im Block 'Spannfeld + Mast' vorhanden. Der Versuch, auf ein nicht existierendes Element in einem

Simulink-Modell zwecks Parametrierung zuzugreifen, führt zu einer Fehlermeldung. Um dies zu verhindern kann mit einer *if*-Verzweigung zunächst der Typ des aktuell zu parametrierenden Blocks bestimmt werden. Handelt es sich dabei nicht um den Block 'Spannfeld + Mast', werden die Parametrierbefehle für das Leitungsmodell automatisch übersprungen.

```
sim('modellname', 0)
```

```
for adresse = 1:1:Output.max_address(1)
    pfad = find_system('modellname', ... , 'InitialValue', int2str(adresse));
    pfad = strrep(pfad, '/Adress-Speicher', '');
    pfad = char(pfad);

    if strcmp(get_param(pfad, 'MaskType'), 'Spannfeld + Mast') == 1
        set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Frequency', 'Input.Leitung.f_ref')
        set_param([pfad '/Modell/Leitung'], 'Resistance', 'Input.Leitung.R_matrix')
        ...
    end

    set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Resistance', ...
        ['Input.Erdung.Re(' int2str(adresse) ')'])
    set_param([pfad '/Modell/Erdung'], 'Inductance', ...
        ['Input.Erdung.Le(' int2str(adresse) ')'])
end
```

Dieses Codesegment zeigt die gesamte automatisierte Parametrierungsroutine inklusive des vorangehenden Startbefehls für die Initialisierung des Adresssystems. Der Befehl *strcmp* vergleicht 2 Strings miteinander. Der Inhalt des ersten Strings wird vom Befehl *get_param* generiert, der den Wert des Parameters 'MaskType' vom aktuell zu behandelnden FLK_library-Block ausliest. Der zweite String ist fest vorgegeben. Sind beide identisch, gibt *strcmp* den Wert 1 zurück und die Bedingung für die Ausführung der *if*-Verzweigung ist erfüllt. Sind die beiden Strings jedoch unterschiedlich, wird 0 zurückgegeben und die zwischen der *if*-Zeile und dem dazu korrespondierenden *end* befindlichen Befehle werden nicht ausgeführt.

4.2.2 Der Prozessor

Nachdem das Simulationsmodell mit Hilfe des Präprozessors vollständig erstellt und parametrierung wurde, wird es an den Prozessor übergeben. Dieser führt die Simulation entsprechend den Vorgaben durch und gibt die berechneten Werte zurück.

Der Prozessor von Simulink wird entweder durch Aufrufen des 'Start'-Befehls in einem geöffneten Modellfenster oder durch Ausführen des Befehls *sim* ([42]), z.B. über die MATLAB-Konsole (Command Window), gestartet. Seine genaue Funktionsweise ist in [43] beschrieben. Bei der Verwendung von SimPowerSystems- bzw. FLK_library-Blöcken in einem Modell kommt dem 'powergui'-Block ([34]), der in solchen Fällen zwingend vorhanden sein muss, eine wichtige Bedeutung zu. Beim Start der Simulation eines solchen Modells wird zunächst das mit Hilfe der SimPowerSystems- bzw. FLK_library-Blöcke erstellte physikalische Netzwerk in ein äquivalentes Simulink-Netzwerk konvertiert und im 'powergui'-Block gespeichert. Es repräsentiert die mathematischen Zusammenhänge des physikalischen Netzwerks im Zustandsraum und kann vom Simulink-Prozessor verarbeitet werden.

Abhängig von der konkreten Ausführung des Modells bzw. den eingestellten Konfigurationsparametern ([44]) gibt der Prozessor die von ihm berechneten Werte in unterschiedlicher Form und Menge zurück. Im Fall der Werte aus den FLK_library-Blöcken ist dies die in Kapitel 4.1.5 beschriebene Variable 'Output'.

4.2.3 Der Postprozessor

Für gewöhnlich handelt es sich bei den vom Prozessor ausgegebenen Simulationenwerten um Rohdaten, aus denen meist keine sofortige Aussage abgeleitet werden kann. Je nach Anwendungsgebiet müssen diese zuvor oftmals noch aufbereitet werden. Diese Aufgabe kommt dem Postprozessor zu. Er führt an den ihm übergebenen Daten die gewünschten Verarbeitungs-, Analyse- und Visualisierungsschritte durch, um das Formulieren klarer Aussagen über die zu untersuchenden Aspekte zu erleichtern.

Ähnlich wie der Präprozessor kann auch der Postprozessor zu FLK_library beliebig ausgeführt werden. Über die Variable 'Output' stehen ihm alle simulierte Messwerte von allen adressierten FLK_library-Blöcken als separate Zeitverläufe zur Verfügung. In Verbindung mit der ebenfalls aufgezeichneten Simulationszeit ist damit jede Art von Visualisierung oder rechnerischer Verarbeitung in MATLAB oder externen Programmen möglich. Der für diese Arbeit entwickelte Postprozessor wird in Kapitel 4.6 näher beschrieben.

4.3 Das untersuchte Freileitungsmodell

Das zur Durchführung der Untersuchungen erstellte allgemeine Modell einer Freileitung besteht aus insgesamt 30 Spannfeldern, aufgeteilt in 3 Leitungsabschnitte zu je 10 Spannfeldern. Aufgrund der ebenfalls in die Modellierung miteinbezogenen Masten an beiden Endpunkten der Freileitung beträgt die Anzahl derselben somit 31. Wie in der Praxis

üblich werden die Phasenseile beider Systeme am Übergang von einem Leitungsabschnitt auf den nächsten separat verdrillt. Diese so erstellte Freileitung wird an einem ihrer beiden Endpunkte von einer idealen, dreiphasigen Spannungsquelle mit einer Frequenz von 50 Hz gespeist. Als Last sind 3 starre, rein ohmsche Widerstände in Sternschaltung am anderen Endpunkt der Freileitung vorgesehen. Abbildung 4.11 zeigt die oberste Ebene des Modells. Die Blöcke 'Leitungsabschnitt 1', 'Leitungsabschnitt 2' und 'Leitungsabschnitt 3' sind Subsysteme ([4]) und enthalten jeweils 10 Spannfelder bzw. Masten (siehe Abbildung 4.12). Der Block 'START' repräsentiert den 31. Mast. Zu beachten ist, dass die in Abbildung 4.11 dargestellten Leitungsverbindungen lediglich eine von vielen verwendeten Varianten der Verschaltung zeigen. Sie werden abhängig von der gewünschten Parametrierung immer entsprechend modifiziert. Die Leitungsverbindungen innerhalb der einzelnen 'Leitungsabschnitt'-Subsysteme bleiben hingegen immer unverändert.

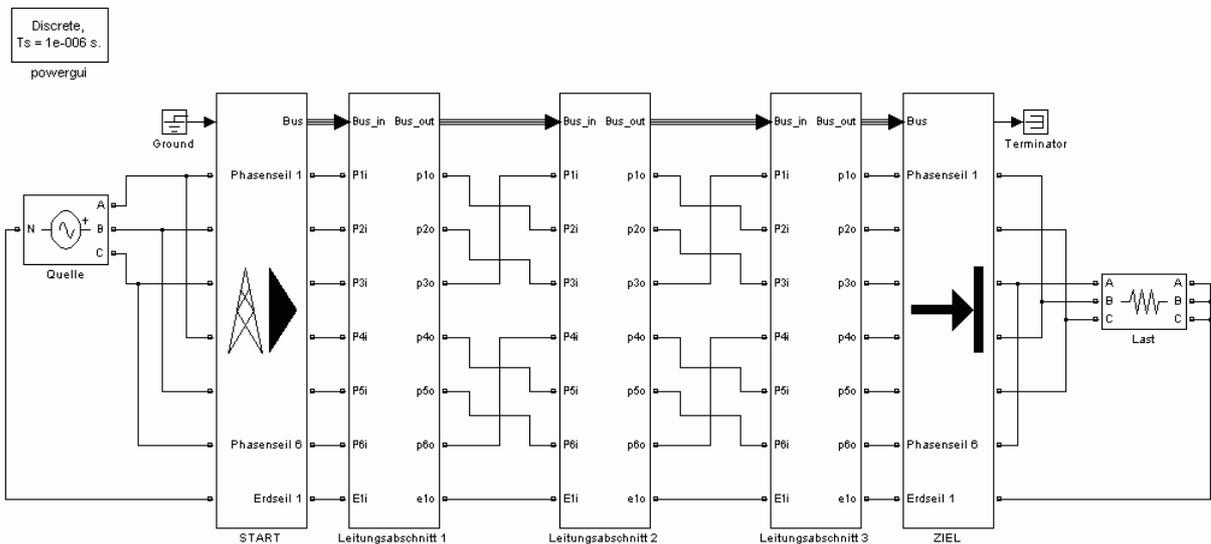


Abbildung 4.11: Struktur des verwendeten allgemeinen Freileitungsmodells (oberste Modellebene)

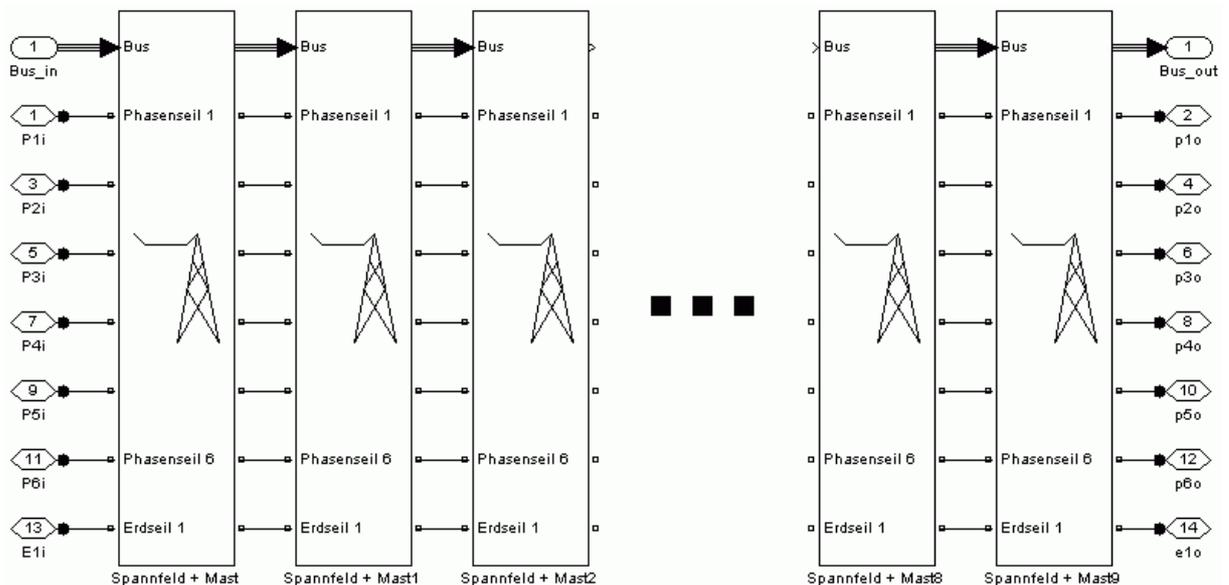


Abbildung 4.12: Inhalt eines 'Leitungsabschnitt'-Subsystems (verkürzte Darstellung)

4.4 Verwendete Parameter und Benennungsstrukturen

Um auch umfangreiche Simulationsreihen unbeaufsichtigt durchführen zu können, wurde ein System geschaffen welches die benötigten Daten und Komponenten vollautomatisch basierend auf den gestellten Vorgaben lädt, die Simulationen durchführt, und die daraus gewonnenen Ergebnisse unter einer eindeutigen Bezeichnung abspeichert. Fundament dieses Systems ist ein Set aus 13 unterschiedlichen Parametern, mit denen jeder einzelne simulierte Fall genau definiert wird. Diese Parameter sind in 3 Kategorien eingeteilt:

- **schaltungsbezogen:** Alle Parameter in dieser Kategorie werden durch die konkrete Verschaltung der in Abbildung 4.11 dargestellten Blöcke festgelegt. Für jede interessierende Kombination dieser Parameter muss daher eine separate Modelldatei existieren, in welcher die Leitungsverbindungen entsprechend realisiert sind.
- **leitungsbezogen:** Die Parameter dieser Kategorie beeinflussen allesamt ausschließlich die 3 Koppelmatrizen (ohmsch, induktiv, kapazitiv), die das elektrische Verhalten der Spannungsfelder bestimmen. Ähnlich wie bei den schaltungsbezogenen Parametern muss auch hier für jede interessierende Kombination ein separates Set dieser 3 Matrizen existieren.
- **betriebsbezogen:** Die Parameter dieser Kategorie werden eingestellt, indem ihren Variablen entsprechende Zahlenwerte zugewiesen werden. Das Anlegen separater Dateien wie bei den anderen beiden Kategorien ist nicht erforderlich.

Jeder der 13 Parameter besitzt ein eigenes Kürzel bestehend aus 2 Buchstaben und eine klar festgelegte Notation seines Werts. Durch Aneinanderreihung derselben werden die Dateinamen zur Speicherung der einzelnen Modellvarianten, Koppelmatrizen und Simulationsergebnisse gebildet (siehe Kapitel 4.4.4). Dadurch ist die zu einer bestimmten Wertekombination gehörende Datei auch unter vielen immer eindeutig identifizierbar. Die Tabellen 4.6 bis 4.8 listen alle 13 Parameter nach Kategorie sortiert auf. Der dort angegebene Datentyp bezieht sich dabei auf jenen Typ, den der jeweilige Parameter im Set besitzen muss, um von der Automatisierungsroutine korrekt verarbeitet werden zu können.

4.4.1 Schaltungsbezogene Parameter

Kürzel	Bezeichnung	mögliche Werte	Datentyp
VD	Verdrillungsmethode	'rverdrillt', 'fverdrillt', 'unverdrillt'	String
PB	Phasenbelegung	'123123', '123132', '123213', ...	String
SY	Betriebsart	'2Sys', '1SysKSErd', '1SysOffen'	String
QL	Endpunktbehandlung	'erd', 'offen'	String

Tabelle 4.6: Auflistung der schaltungsbezogenen Parameter

4.4.1.1 Verdrillungsmethode (VD)

Dieser Parameter bestimmt ob und in welcher Weise die Phasenseile der modellierten Freileitung verdrillt werden. Der Wert 'unverdrillt' ist selbsterklärend. In diesem Fall werden die Phasenseile ohne jegliche Verschiebungen von einem Leitungsabschnitt zum nächsten geführt. Bei vorhandener Verdrillung, diese erfolgt immer separat für jede Masthälfte, gibt es 2 mögliche Fälle, welche anhand der jeweils damit erzielten Ergebnisse noch genauer in Kapitel 5.2 beschrieben werden: „richtige“ Verdrillung (rverdrillt), auch als homogene Verdrillung bezeichnet, und „falsche“ Verdrillung (fverdrillt), auch als inhomogene Verdrillung bezeichnet. Der Unterschied zwischen beiden Methoden liegt in der Phasenopposition, welche bei richtiger Verdrillung im gesamten Verlauf der Freileitung gleich bleibt, sich bei falscher Verdrillung jedoch mit jedem Verdrillungsschritt ändert.

4.4.1.2 Phasenbelegung (PB)

Die elektrischen Phasen R, S und T eines Drehstromsystems, hier mit 1, 2 und 3 bezeichnet, können in unterschiedlicher Kombination auf die Phasenseile einer Freileitung geschaltet werden. In dieser Arbeit werden ausschließlich Masten für 2 Drehstromsysteme untersucht. Dabei erfolgt die Zuteilung der 3 Phasen beider Systeme immer nach Seite getrennt, d.h. die linke bzw. rechte Hälfte des Masts wird jedes Mal nur mit Phasen eines Systems beschaltet. Als Beispiel zeigt Abbildung 4.13 die jeweils selbe Konstellation, 123 312, an allen 3 in dieser Arbeit untersuchten Mastkopfbildern. Beim Blick „in“ die Freileitung, ausgehend vom Mast der im Modell durch den START-Block repräsentiert wird, kennzeichnen die ersten 3 Ziffern des Parameterwerts die Phasenbelegung der in diesem Fall linken Masthälfte, die letzten 3 Ziffern jene der rechten Masthälfte. Anhand der in den Kapiteln 4.4.2 und 4.4.2.1 besprochenen Phasennummern ist die getroffene Zuordnung noch klarer ersichtlicher.

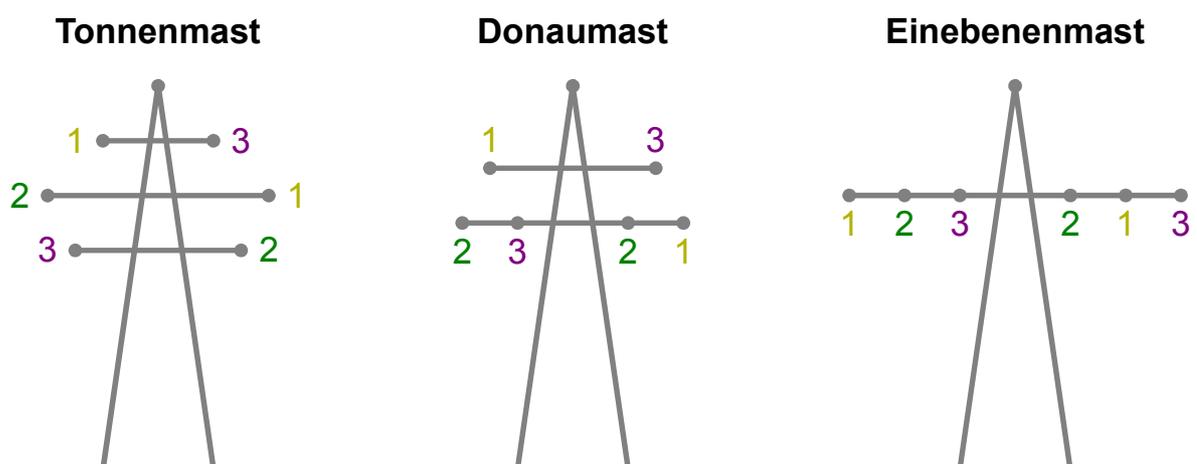


Abbildung 4.13: Veranschaulichung des Parameters 'Phasenbelegung' (zu sehen ist jeweils PB = 123 312)

4.4.1.3 Betriebsart (SY)

Bei einer Freileitung mit 2 Systemen ergeben sich mehrere Möglichkeiten hinsichtlich des Betriebs beider Systeme. Der Parameter 'SY' trägt dem Rechnung. Er kann einen von 3 möglichen Werten besitzen:

- **SY = 2Sys:** beide Systeme der modellierten Freileitung sind in Betrieb, d.h. an Quelle und Last gleichermaßen angeschlossen (siehe Abbildung 4.11).
- **SY = 1SysOffen:** ein System, standardmäßig jenes das im Modell durch die Phasenseile 4 bis 6 repräsentiert wird, ist von Quelle und Last getrennt. Die betreffenden Leiterseile sind an beiden Endpunkten offen (siehe Abbildung 4.14).
- **SY = 1SysKSErd:** wie SY = 1SysOffen, die Leiterseile des ausgeschalteten Systems sind jedoch an beiden Endpunkten kurzgeschlossen und mit dem Erdseil des jeweils nächsten Masts verbunden (siehe Abbildung 4.15).

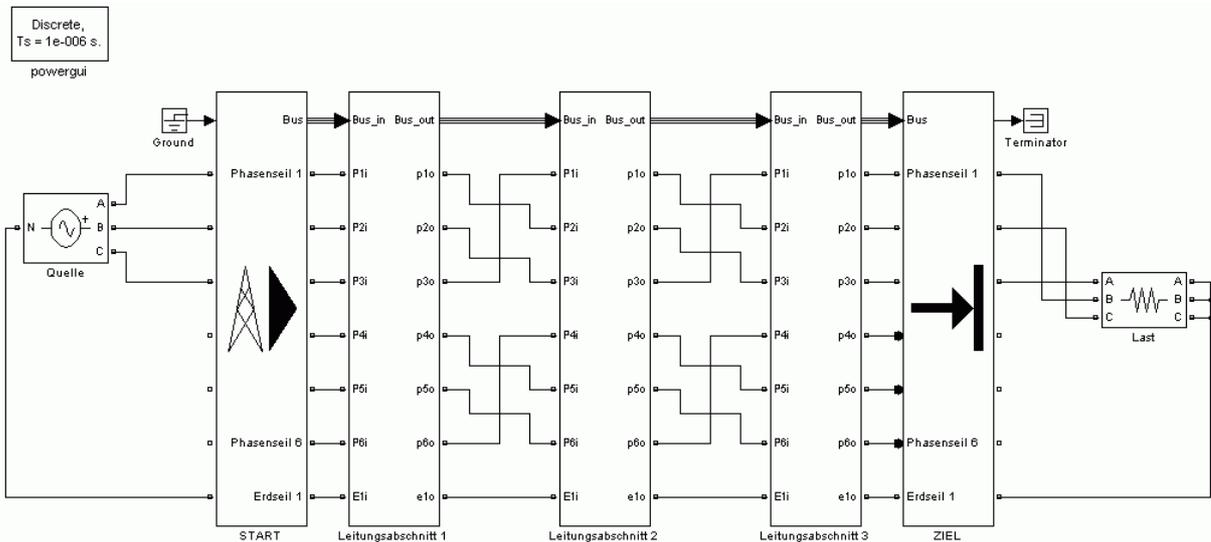


Abbildung 4.14: Verschaltung der Phasenseile 4 bis 6 an den Endpunkten im Fall 'SY = 1SysOffen'

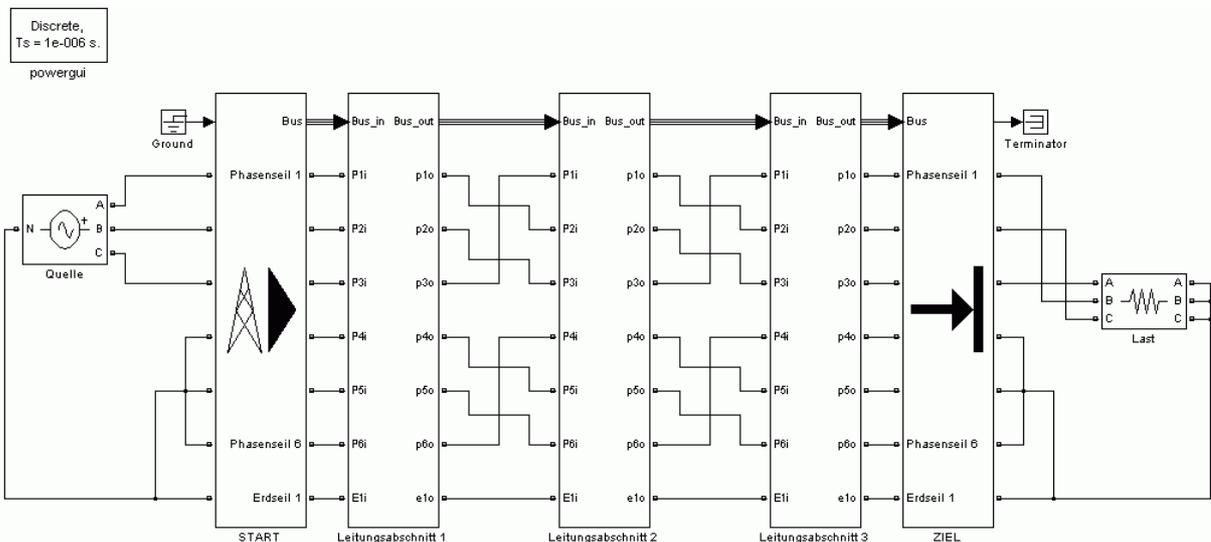


Abbildung 4.15: Verschaltung der Phasenseile 4 bis 6 an den Endpunkten im Fall 'SY = 1SysKSErd'

4.4.1.4 Endpunktbehandlung (QL)

Die an den Endpunkten einer Freileitung befindlichen Betriebsmittel können entweder starr geerdet, über eine Löschspule geerdet oder nicht geerdet sein. Der Fall der Erdung über eine Löschspule wird in dieser Arbeit nicht untersucht. Die beiden anderen Fälle werden vom Parameter 'QL' definiert, welcher die folgenden Werte besitzen kann:

- **QL = erd:** Die Sternpunkte von Quelle und Last sind mit dem jeweiligen Ende des Erdseils der Freileitung verbunden (siehe u.a. Abbildung 4.11).
- **QL = offen:** Die Verbindungen der Sternpunkte von Quelle und Last mit dem Erdseil der Freileitung sind nicht vorhanden.

4.4.2 Leitungsbezogene Parameter

Kürzel	Bezeichnung	mögliche Werte	Datentyp
MG	Mastkopfbild	'110kVTonne', '110kVDonau', ...	String
MH ES	Masthöhe (MH) und Erdseildistanz (ES)	'normal', 'plus03m', 'normal-ESplus02m', ...	String
RB	spezifischer Bodenwiderstand in Ωm	beliebig	Skalar

Tabelle 4.7: Auflistung der leitungsbezogenen Parameter

Die 4 in Tabelle 4.7 angeführten Parameter dienen zur Klassifikation des Koppelmatrizensets, mit welchem das elektrische Verhalten aller Spannungsfelder im Modell bestimmt wird. Ein solches Set besteht aus je einer Matrix zur Beschreibung der ohmschen, induktiven und kapazitiven Verkoppelungen der einzelnen Leiterseile eines Spannungsfelds untereinander und mit dem leitfähigen Boden. In dieser Arbeit wird jedes Set mit einem darauf spezialisierten Werkzeug aus SimPowerSystems erstellt (siehe Abbildung 8.5), aufrufbar über die Schaltfläche 'Compute RLC Line Parameters' in der grafischen Oberfläche des 'powergui'-Blocks oder über den Befehl `power_lineparam` ([45]). Bei dessen Verwendung zusammen mit `FLK_library` müssen die folgenden Regeln beachtet werden:

- Das Erdseil ist wie ein eigenständiges Phasenseil zu behandeln. Die einzutragende Anzahl an Phasenleitern (Number of phase conductors (bundles)) muss daher 7 betragen.
- Alle Leiterseile bzw. Bündelleiter müssen eine separate Phasennummer (Phase number) beginnend mit der Ziffer 1 besitzen, wobei das Erdseil die Nummer 7 erhalten muss. Die 6 Phasenseile müssen demzufolge von 1 bis 6 durchnummeriert werden.

Werden die zuvor genannten Regeln befolgt, berechnet `power_lineparam` die 3 Koppelmatrizen mit einer Größe von jeweils 7×7 Elementen. Nur solche Matrizen können vom 'Distributed Parameters Line'-Element im `FLK_library`-Block 'Spannungsfeld + Mast'

verarbeitet werden. Die Phasennummern stehen dabei für die Leiterseilports des Blocks (Phasennummer 1 = Phasenseil 1, Phasennummer 2 = Phasenseil 2, usw.).

Wichtig bei der Verwendung von *power_lineparam* ist außerdem, dass der unter 'Frequency' angegebene Wert identisch mit dem Wert des Parameters 'Frequency' der 'Distributed Parameters Line'-Blöcke ist. Nur dann werden die Werte in den generierten Koppelmatrizen während der Simulation korrekt interpretiert.

4.4.2.1 Mastkopfbild (MG)

Freileitungsmasten können viele verschiedene Erscheinungsformen, sogenannte Mastkopfbilder, aufweisen. Neben der Anzahl der von ihnen getragenen Phasenseile und Erdseile ist dabei vor allem auch deren räumliche Position zueinander ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden die Mastkopfbilder 'Tonne', 'Donau' und 'Einebene' für jeweils 110 kV Nennspannung herangezogen. Bemaßte Skizzen dieser Bilder sind in Kapitel 8.2, die Daten der verwendeten Seilbelegung in Kapitel 8.3 enthalten. Es ist anzumerken, dass es sich bei den im erstgenannten Kapitel notierten Abmessungen um die Werte von Standardmasten handelt. Winkelabspannmasten und Verdrillungsmasten besitzen andere Abmessungen bei ansonsten identischer Anordnung der Leiterseile. Zur Erzielung möglichst gleichmäßiger Verhältnisse entlang der modellierten Freileitung wird auf den Einsatz dieser Sonderfälle jedoch gänzlich verzichtet.

Abbildung 4.16 zeigt, wie die in Kapitel 4.4.2 erwähnten Phasennummern auf die Leiterseilpositionen der einzelnen Mastkopfbilder verteilt wurden. In Verbindung mit dem in Kapitel 4.4.1.2 dokumentierten Parameter 'Phasenbelegung' ist die Zuweisung der elektrischen Phasen zu den jeweiligen Leiterseilen nun eindeutig durchführbar.

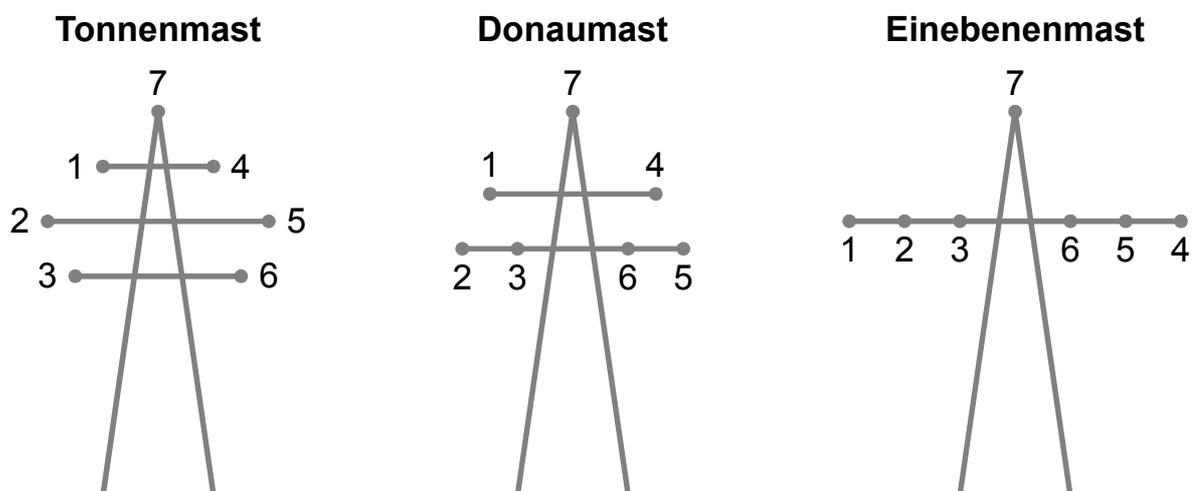


Abbildung 4.16: Gewählte Zuordnung der Phasennummern zu den Leiterseilpositionen

4.4.2.2 Masthöhe (MH) und Erdseildistanz (ES)

Je nach Mastkopfbild bzw. Nennspannung besitzen Freileitungsmasten unterschiedliche Nennhöhen. Geografische oder bauliche Gegebenheiten entlang der Trasse erfordern jedoch manchmal von den Nennwerten abweichende Masthöhen. In dieser Arbeit werden solche Abweichungen immer gleichzeitig auf alle 31 Masten der Freileitung angewandt. Der Wert 'normal' für den Parameter 'MH' bezieht sich auf die Nennhöhe des gewählten Masts, wie in Kapitel 8.2 angegeben. Abweichungen von dieser Höhe werden sinngemäß mit 'plus' bzw. 'minus' samt nachfolgender Angabe der Höhenänderung in Meter notiert. Dadurch ändert sich ausschließlich der Abstand zwischen jedem Leiterseil (inklusive Erdseil) und dem Boden um jeweils diesen Wert. Die Abstände zwischen den Leiterseilen selbst bleiben hingegen unverändert.

Im bereits fortgeschrittenen Stadium der Untersuchungen gerieten dann auch noch die Auswirkungen einer alleinigen Variation des Abstands Erdseil – Boden, d.h. ohne Veränderung der Abstände Phasenseil – Boden, in den Fokus des Interesses. Um die bereits erprobten und stabilen ProgrammROUTINEN nicht ändern zu müssen, wurde der dafür neu geschaffene Parameter 'Erdseildistanz' (Kürzel: ES) nicht als eigenständiger Parameter implementiert, sondern als Unterparameter von MH. Liegt eine Variation dieser Distanz vor, wird sie in Meter hinter dem Wert von MH notiert (z.B.: MH = plus03m-ESplus02m). Liegt keine Variation vor, wird die Angabe weggelassen (z.B.: MH = plus03m).

4.4.2.3 Spezifischer Bodenwiderstand (RB)

Mit Hilfe dieses Parameters wird die elektrische Leitfähigkeit des Bodens in Ohmmeter definiert, über dem sich die Leiterseile der Freileitung befinden. Er steht in keinerlei Zusammenhang zu den in den FLK_library-Blöcken definierbaren Erdungsimpedanzen, sondern wird ausschließlich von *power_lineparam* zur Berechnung der Koppelmatrizen verwendet.

4.4.3 Betriebsbezogene Parameter

Kürzel	Bezeichnung	mögliche Werte	Datentyp
UB	Betriebsspannung in kV	beliebig	Skalar
RM	Mast-Erdungswiderstand in Ω	beliebig	Skalar
RU	UW-Erdungswiderstand in Ω	beliebig	Skalar
IB	Gesamt-Laststrom in A	beliebig	Skalar
SL	Spannfeldlänge in km	beliebig	Skalar

Tabelle 4.8: Auflistung der betriebsbezogenen Parameter

4.4.3.1 Betriebsspannung (UB)

UB gibt den Effektivwert der verketteten Spannung in Kilovolt an, mit welcher die Freileitung von der dreiphasigen Spannungsquelle gespeist wird. Dieser muss nicht notwendigerweise identisch zur Nennspannung sein, für die der verwendete Mast ausgelegt ist.

4.4.3.2 Mast-Erdungswiderstand (RM)

Durch diesen Parameter wird der Wert des Erdungswiderstands in Ohm festgelegt, der allen Masten der modellierten Freileitung mit Ausnahme des ersten und des letzten zugewiesen wird. Der Wert der Erdungsinduktivität wird immer auf 0 Henry gesetzt.

4.4.3.3 UW-Erdungswiderstand (RU)

In Übertragungsnetzen befinden sich an den beiden Endpunkten einer Verbindungsleitung üblicherweise größere bauliche Anlagen wie etwa Umspannwerke oder Kraftwerke. Diese besitzen meist sehr umfangreich ausgeführte Erdungsanlagen, deren Erdungswiderstand geringer ist als jener der einzelnen Masten entlang der Leitung. Aus diesem Grund wurde der Parameter 'RU' eingeführt. Dessen Wert in Ohm wird sowohl dem Mast am Anfangspunkt als auch dem Mast am Endpunkt der modellierten Freileitung als Erdungswiderstand zugewiesen. Damit stehen diese beiden Masten synonym für die Erdungsanlagen der durch die Leitung verbundenen Umspannwerke. Der Wert der Erdungsinduktivität beträgt auch hier immer 0 Henry.

4.4.3.4 Gesamt-Laststrom (IB)

Der Parameter 'IB' gibt die Höhe des Stroms in Ampere an, der über die modellierte Freileitung von der Quelle zur Last fließt. Ist nur ein System der Leitung in Betrieb, führt dieses den gesamten Laststrom. Sind beide Systeme in Betrieb, ist eine Aufteilung des Gesamt-Laststroms zu je 50 % auf jedes System zu erwarten. Im Modell wird der gewünschte Wert für IB durch Setzen der 3 Lastwiderstände auf einen fixen, nach Gl. 4.2 berechneten Wert eingestellt.

$$R_{Last} = \frac{UB \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = \frac{UB \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot IB} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

R_{Last} resistiver Wert jedes der 3 Lastwiderstände in Ω

UB Effektivwert der von der Spannungsquelle ausgegebenen verketteten Spannung in kV

IB gewünschter Gesamt-Laststrom in A

Zu beachten ist hierbei jedoch, dass auch die Phasenseile der Freileitung elektrische Widerstände besitzen, welche in Gl. 4.2 aber nicht berücksichtigt werden. Deren Werte sind stattdessen in den von *power_lineparam* berechneten Koppelmatrizen enthalten. Da die 3 Lastwiderstände über die Phasenseile mit der Quelle verbunden sind, befinden sich diese Leitungswiderstände somit in Serie zu den Lastwiderständen und bewirken dadurch, dass der Wert des sich tatsächlich ergebenden Gesamt-Laststroms kleiner als der Wert des

beabsichtigten Gesamt-Laststroms ist. Die Auswirkungen dieser Abweichung werden jedoch als unwesentlich für die gegenständlichen Untersuchungen eingeschätzt und daher toleriert.

4.4.3.5 Spannfeldlänge (SL)

Der Parameter 'SL' gibt den Abstand zwischen 2 unmittelbar benachbarten Masten der Freileitung in Kilometer an. Er wird ausschließlich von den 'Distributed Parameters Line'-Elementen der Blöcke 'Spannfeld + Mast' verwendet, ist also eigentlich ein leitungsbezogener Parameter. Da er aber sowohl unabhängig von der konkreten Ausführung des Simulink-Modells ist, als auch für die Berechnung der Koppelmatrizen der Spannfelder nicht benötigt wird, ist er den betriebsbezogenen Parametern zugeordnet.

4.4.4 Benennungsstrukturen für die verwendeten Dateien

Um einerseits der Simulationsreihenautomatik das selbstständige Auffinden der benötigten Dateien zu ermöglichen, und andererseits all diese Dateien für den Anwender unmittelbar und eindeutig identifizierbar zu machen, wurden entsprechende Benennungsstrukturen basierend auf dem in den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.3 beschriebenen Parameterset definiert. Diese betreffen die Simulink-Modelldateien (Dateiendung: mdl), die MATLAB-Datendateien mit den Koppelmatrizen (Dateiendung: mat), im Folgenden Leitungsdateien genannt, sowie die Ergebnisdateien (Dateiendung: fig). Für jeden dieser Dateitypen existiert eine eigene Benennungsstruktur, wobei immer nur jene Parameter in den Dateinamen einfließen, die zur Identifikation unbedingt notwendig sind. So sind die Namen der Modelldateien ausschließlich aus den schaltungsbezogenen Parametern aufgebaut, während die Namen der Leitungsdateien ausschließlich leitungsbezogene Parameter enthalten. Die Namen der Ergebnisdateien setzen sich hingegen aus allen 13 Parametern zusammen. In der nachfolgenden Aufzählung geben fett gedruckte Textteile die fixen Bestandteile der Dateinamen wieder. Die in spitzen Klammern geschriebenen Parameterkürzel stellen Platzhalter für die jeweiligen Werte dieser Parameter dar.

- **Modelldateien (*.mdl):** <VD>_<PB>_<SY>_QL<QL>.mdl
- **Leitungsdateien (*.mat):** RLC_<MG>_<MH>_RhoBoden<RB>.mat
- **Ergebnisdateien (*.fig):** VD<VD>_PB<PB>_SY<SY>_QL<QL>_MG<MG>_MH<MH>_RB<RB>_UB<UB>_RM<RM>_RU<RU>_IB<IB>_SL<SL>.fig

Der klar strukturierte Aufbau der Dateinamen ermöglicht die einfache Kreation von Programmroutinen, mit denen beispielsweise ein gewünschtes Set an Ergebnisdateien für bestimmte Wertebereiche einzelner Parameter schnell gefunden werden kann. Dadurch können auch sehr große Projekte mit vielen einzelnen Dateien leicht verwaltet werden.

4.5 Interner Arbeitsablauf einer Simulationsreihe

Ausgangspunkt für die vollautomatische Durchführung einer Simulationsreihe sind die Konfigurationsdaten mit den gewünschten diskreten Wertebereichen für alle 13 Parameter. Die Automatisierungsroutine bildet daraus die Parametersets, indem sie die angegebenen Werte für jeden Parameter so lange austauscht, bis alle möglichen Kombinationen vorgekommen sind. Mit jedem so erstellten Parameterset wird eine Simulation durchgeführt und das Resultat gemäß der im vorigen Kapitel beschriebenen Benennungsstruktur für Ergebnisdateien abgespeichert.

Für die Entwicklung dieses Systems wurden die zur Durchführung einzelner Simulationen erstellten Skripts 'FLK_preprocess.m' (Präprozessor), 'FLK_postprocess.m' (Postprozessor) und 'FLK_batch.m' (Stapelverarbeitungsdatei zum sequentiellen Aufruf von Präprozessor, Prozessor und Postprozessor mit Zeitnehmung des gesamten Vorgangs) entsprechend adaptiert. *FLK_preprocess* wurde dabei in *FLK_init* umbenannt, da dieses Skript hier nur mehr der Initialisierung dient. Es werden mit ihm zwar weiterhin einige Simulationsparameter gesetzt, der weitaus relevantere Teil der Wertzuweisungen wird nun allerdings von *FLK_batch* vorgenommen. Zusätzlich wurde noch eine Skript namens 'givemeresults.m' programmiert, das zum Starten der Simulationsreihen dient. Es ruft zunächst *FLK_batch* im Zählmodus auf und übergibt ihm die angegebenen Konfigurationsdaten. *FLK_batch* berechnet in diesem Modus lediglich die Anzahl aller sich aus diesen Daten ergebenden Kombinationsmöglichkeiten und gibt das Ergebnis zurück, führt aber sonst keine weiteren Aktionen aus. *givemeresults* zeigt daraufhin eine Sicherheitsabfrage an, mit welcher der Anwender über die Gesamtzahl der möglichen Kombinationen informiert wird und den Start der Simulationsreihe nötigenfalls abbrechen kann. Diese Maßnahme wurde eingeführt, da sich selbst bei moderater Wahl der Wertebereiche für die 13 Parameter leicht hunderte bis tausende durchzuführende Simulationen ergeben können. Gibt der Anwender durch entsprechende Beantwortung der Sicherheitsabfrage den Befehl zum Start der Simulationsreihe, werden die Konfigurationsdaten erneut von *givemeresults* eingelesen und *FLK_batch* im Simulationsmodus ausgeführt. Dieser und alle dann folgenden Vorgänge sind in Abbildung 4.17 dokumentiert.

givemeresults:

- Konfigurationsdaten einlesen
- *FLK_batch* im Simulationsmodus ausführen

FLK_batch:

4-fach verschachtelte for-Schleife (schaltungsbezogene Parameter: VD, PB, SY, QL):

- Name der benötigten Modelldatei generieren
- Initialisierungsskript *FLK_init* ausführen

FLK_init:

- benötigte Modelldatei laden
- Variablen in 'Input.Messquelle' und 'Input.Simulation' auf im Skript enthaltene Fixwerte setzen; allen anderen Variablen temporäre Werte zuweisen
- Startzeit, Stoppzeit und Schrittweite des Simulationsvorgangs durch Zuweisen der entsprechenden Variablennamen (Input.Simulation.t_start, Input.Simulation.t_stop, Input.Simulation.sampletime) als Parameterwerte festlegen
- automatisches Adresssystem durch Ausführen von *sim(Modellname, 0)* aktivieren
- alle *FLK_library*-Blöcke durch Zuweisen der entsprechenden Variablennamen als Parameterwerte konfigurieren (Input.Leitung.R_matrix, Input.Erdung.Re(i), usw.)
- Phasennummer jenes Leiterseils am Block mit der Adresse 1 ermitteln, welches mit Phase 1 (= Phase 'R') des linken Systems beschaltet ist (der Postprozessor benötigt diesen Wert für die bezogene Darstellung der Ortskurven)

3-fach verschachtelte for-Schleife (leitungsbezogene Parameter: MG, MH (ES), RB):

- Name der benötigten Leitungsdatei generieren und diese Datei laden
- geladene Koppelmatrizen den entsprechenden Variablen in 'Input.Leitung' zuweisen; Variable 'Input.Leitung.f_ref' auf 50 setzen (Fixwert)

5-fach verschachtelte for-Schleife (betriebsbez. Parameter: UB, RM, RU, IB, SL):

- Variablen 'Ub' und 'Ib' entsprechend den Werten von UB und IB setzen; Variable 'R_last' berechnen und setzen
- Vektor in 'Input.Erdung.Re' entsprechend den Werten von RM und RU setzen; Vektor in 'Input.Erdung.Le' auf 0 setzen (Fixwert)
- Variable 'Input.Leitung.laenge' entsprechend des Werts von SL setzen
- Dateiname generieren unter dem das vom Postprozessor erstellte Ergebnisfenster abgespeichert wird
- Text generieren der vom Postprozessor in die Titelleiste des Ergebnisfensters eingefügt wird
- Simulationsvorgang starten (Prozessor)
- Postprozessor *FLK_postprocess* ausführen

FLK_postprocess:

- Vom Prozessor zurückgegebene simulierte Zeitverläufe rechnerisch verarbeiten und Ergebnisfenster erstellen
- Ergebnisfenster unter dem zuvor generierten Dateinamen abspeichern und für diese Datei das Attribut 'Schreibgeschützt' setzen

- von *FLK_init* geladene Modelldatei schließen

- zur Durchführung der gesamten Simulationsreihe benötigte Zeit ausgeben

Abbildung 4.17: Ablaufplan der Automatisierungsroutine ab dem Startbefehl durch den Anwender

Der in Abbildung 4.17 verwendete Term „verschachtelte *for*-Schleife“ bezieht sich auf die konkrete Methode mit der die Konfigurationsdaten zu Parametersets kombiniert werden. Dazu wird für jede Verschachtelung die benötigte Anzahl an *for*-Schleifen mit jeweils unterschiedlicher Laufvariable unmittelbar ineinander erstellt. Jede der so erstellten Schleifen umfasst die vom korrespondierenden Rahmen eingefassten Befehle. Nachfolgend eine Anführung der dafür relevanten Codesegmente:

```

for count_VD = 1:1:length(config.Verdrillung)
  for count_PB = 1:1:length(config.Phasenbelegung)
    for count_SY = 1:1:length(config.Systeme)
      for count_QL = 1:1:length(config.Erdung_QL)
        % Name der benötigten Modelldatei generieren
        % ...
        for count_MG = 1:1:length(config.Mastgeometrie) % := Mastkopfbild
          for count_MH = 1:1:length(config.Masthoehe)
            for count_RB = 1:1:length(config.Rho_Boden)
              % Name der benötigten Leitungsdatei generieren und diese Datei laden
              % ...
              for count_UB = 1:1:length(config.Ub)
                for count_RM = 1:1:length(config.Ra_Mast) % Ra := Re
                  for count_RU = 1:1:length(config.Ra_UW) % Ra := Re
                    for count_IB = 1:1:length(config.Ib_gesamt)
                      for count_SL = 1:1:length(config.Spannfeldlaenge)
                        % Variablen 'Ub' und 'Ib' setzen
                        % ...
                      end
                    end
                  end
                end
              end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
  % von FLK_init geladene Modelldatei schließen
end
end
end
end

```

4.5.1 Aufbau und Verwendung der Konfigurationsdaten

Die von der Automatisierungsroutine benötigten Konfigurationsdaten werden durch einfache Wertzuweisungen in einer Strukturvariable erstellt. Dies kann sowohl über die MATLAB-Konsole, als auch mit Hilfe eines Skripts oder einer Funktion geschehen. Nachfolgend ein einfaches Beispiel:

```
Batchconfig.Verdrillung = {'rverdrillt'};  
Batchconfig.Phasenbelegung = {'123123' '123132' '123213' '123231' '123312' '123321'};  
Batchconfig.Systeme = {'2Sys'};  
Batchconfig.Erdung_QL = {'erd' 'offen'};  
Batchconfig.Mastgeometrie = {'110kVTonne'}; % Mastgeometrie := Mastkopfbild  
Batchconfig.Masthoehe = {'normal-ESplus02m'};  
Batchconfig.Rho_Boden = 100;  
Batchconfig.Ub = 110;  
Batchconfig.Ra_Mast = [1 3 5]; % Ra := Re  
Batchconfig.Ra_UW = [0.1 1]; % Ra := Re  
Batchconfig.lb_gesamt = [250 500 1000];  
Batchconfig.Spannfeldlaenge = 0.33;
```

Dieses Codesegment speichert die zu verwendenden diskreten Werte aller Parameter des Modells in einer Variable namens 'Batchconfig'. Statt dieser Bezeichnung kann aber auch jeder andere gültige Name gewählt werden, sofern selbiger im Verlauf der Simulationsreihe nicht von anderen Routinen im MATLAB Basis-Workspace verwendet wird. So dürfen etwa die vom Modell benutzten Variablennamen 'Input' und 'Output', die vom FLK_library-Block 'ZIEL' benutzten temporären Variablennamen (siehe Kapitel 4.1.5), sowie der vom Postprozessor benutzte Variablenname 'Auswertung' (siehe Kapitel 4.6) nicht herangezogen werden. Die Namen der Felder innerhalb der Strukturvariable ('Verdrillung', 'Phasenbelegung', usw.) müssen identisch zu den angeführten Bezeichnungen sein. Parameter mit numerischen Werten sind als Vektoren bzw. Skalare auszuführen, während Parameter mit Strings als eindimensionale Cell-Arrays ([46]) zu organisieren sind. In beiden Fällen ist es jedoch gleichgültig, ob die einzelnen diskreten Werte zeilen- oder spaltenweise angeordnet sind.

Die zuvor erstellte Struktur kann nun in einer MATLAB-Datendatei mit beliebigem Dateinamen gesichert werden:

```
save('Konfigurationsdaten.mat', 'Batchconfig')
```

Damit das Skript 'givemeresults.m' diese eben erstellten Daten verwendet, sind der darin vorkommende Befehl *load*, sowie die Befehlszeile zum Aufruf von *FLK_batch* entsprechend anzupassen:

load Konfigurationsdaten.mat **$n = n + FLK_batch(\text{Batchconfig}, \text{doit});$**

Das Argument des Befehls *load* muss dem Dateinamen entsprechen, unter welchem die Konfigurationsdaten abgelegt wurden (hier: Konfigurationsdaten.mat). Das erste Argument des Befehls *FLK_batch* muss hingegen dem Namen der zu Beginn erstellten Strukturvariable entsprechen (hier: Batchconfig).

Es ist möglich, mehrere unterschiedliche Konfigurationsdaten mit nur einem einzigen Aufruf von *givemeresults* zu verarbeiten. Dazu sind mehrere Instanzen der soeben beschriebenen 2 Befehle im Skript unmittelbar untereinander zu schreiben, und deren Argumente entsprechend zu modifizieren.

Des Weiteren ist es möglich, *givemeresults* komplett zu übergehen und die geladenen Konfigurationsdaten stattdessen direkt an *FLK_batch* zu übergeben:

 $FLK_batch(\text{Batchconfig}, 1);$

Dieser Befehl startet die Simulationsreihe sofort ohne jegliche Sicherheitsabfragen (Ausführung von *FLK_batch* im Simulationsmodus). Soll hingegen nur die Anzahl der aus bestimmten Konfigurationsdaten resultierenden Einzelsimulationen berechnet werden, ist folgender Befehl zu verwenden (Ausführung von *FLK_batch* im Zählmodus):

 $FLK_batch(\text{Batchconfig}, 0)$

Bei Verwendung der am Beginn dieses Kapitels angeführten Konfigurationsdaten beträgt der zurückgegebene Zahlenwert beispielsweise 216.

4.6 Aufbau des verwendeten Postprozessors

Der in dieser Arbeit verwendete Postprozessor wird, wie aus Abbildung 4.17 ersichtlich ist, immer nach dem erfolgreichen Abschluss einer Einzelsimulation ausgeführt. Er erstellt mit Hilfe der dafür verwendeten Parameter (Variable 'Input') und Zusatzinformationen (Position der Phase 1; Text für die Titelleiste), sowie den resultierenden Zeitverläufen (Variable 'Output') das Ergebnisfenster. Dabei laufen die folgenden Vorgänge nacheinander ab:

- Beschneidung sämtlicher in Output gespeicherten Zeitverläufe an deren Beginn, sodass nur mehr jeweils eine (phasenverschobene) Periode der Speisefrequenz dargestellt wird. Die Information über die Höhe dieser Frequenz wird der Variable 'Input.Messquelle.grundfrequenz' entnommen. Alle weiteren Verarbeitungsschritte des Postprozessors beziehen sich ausschließlich auf diese gekürzten Verläufe. Damit wird sichergestellt, dass etwaige Einschwingvorgänge der Freileitung unberücksichtigt bleiben und ausschließlich Signale aus dem stationären Zustand zur Auswertung gelangen. In dieser Arbeit wird jede Simulation von $t_{\text{start}} = 0$ ms bis

$t_{\text{stop}} = 30$ ms durchgeführt. Da eine Schwingung der verwendeten Speisefrequenz von 50 Hz jedoch eine Periodendauer $T = 20$ ms aufweist, wird nur der Bereich zwischen $t = 10$ ms und $t = 30$ ms behalten, während der Rest verworfen wird.

- Erstellung eines separaten Grafikenfensters bzw. Löschen eines bereits bestehenden Fensters dieser Art und Plotten der gekürzten Zeitverläufe, die im FLK_library-Block mit der in Input.Messquelle.zieladresse spezifizierten Adresse ausgelesen wurden. Dies dient lediglich etwaigen Überprüfungs Zwecken des Anwenders während der laufenden Simulationsreihe und wird nicht weiter verwendet.
- Berechnung der Effektivwerte (TRMS), sowie des Effektivwert-Frequenzspektrums (Gleichanteil, 1. Harmonische, 2. Harmonische, usw.) aller Zeitverläufe. Letzteres wird in komplexer Form berechnet und weiterverarbeitet.
- Erstellung des Ergebnisfensters bzw. Löschen eines bereits bestehenden Fensters dieser Art und Plotten der berechneten Werte in der festgelegten Form.

Die Endergebnisse aller vom Postprozessor durchgeführten Rechenschritte werden in einer Strukturvariable namens 'Auswertung' abgelegt. Die oberste Ebene dieser Variable ist folgendermaßen eingeteilt:

- **Auswertung.Zeitverlauf:** die an ihrem Beginn beschnittenen Zeitverläufe aller simulierten Messgrößen von allen adressierten FLK_library-Blöcken.
- **Auswertung.t:** die Simulationszeitpunkte als Spaltenvektor. So wie die einzelnen aus 'Output' stammenden Zeitverläufe wird auch der Vektor mit den Zeitpunkten auf dieselbe Art und Weise beschnitten. Seine Elemente und deren Werte korrespondieren somit direkt mit den Werten aus Auswertung.Zeitverlauf.
- **Auswertung.Effektivwert:** die für jeden einzelnen Zeitverlauf separat berechneten wahren Effektivwerte (TRMS).
- **Auswertung.Spektrum:** das für jeden einzelnen Zeitverlauf separat berechnete komplexe Effektivwert-Frequenzspektrum.

Auswertung.Zeitverlauf, Auswertung.Effektivwert und Auswertung.Spektrum sind weiter unterteilt. Die Namen ihrer Unterelemente sind dabei identisch mit den in Output verwendeten Namen. Ihr jeweiliger Inhalt entspricht den mit Hilfe der dazugehörigen Zeitverläufe berechneten Ergebnissen, wie in Tabelle 4.9 dargestellt.

Auswertung.Zeitverlauf / Auswertung.Effektivwert / Auswertung.Spektrum	
.lp1 bis .lp6	Ströme in den Phasenseilen 1 bis 6
.le1_in	zu den Masten hin fließende, d.h. aus der Richtung des Busses kommende Erdseilströme
.le1_out	von den Masten weg fließende, d.h. in die Richtung des Busses gehende Erdseilströme
.le	vom Erdseil in das Erdreich fließende Ströme
.Ue	Spannungsabfälle an den Erdungswiderständen

Tabelle 4.9: Inhaltliche Einteilung der untersten Elemente in der Strukturvariable 'Auswertung'

Die Werte in diesen 10 Elementen sind in jedem Zweig der Variable 'Auswertung' unterschiedlich organisiert. Alle Variablen in Auswertung.Zeitverlauf sind identisch aufgebaut wie die in Output gespeicherten Zeitverläufe, d.h. sie liegen jeweils als Matrix vor (siehe Tabelle 4.2). Die Variablen in Auswertung.Effektivwert besitzen jeweils die Form eines Zeilenvektors. Der Index dieser Vektoren steht für die Adresse des dazugehörigen FLK_library-Blocks. Die Variablen in Auswertung.Spektrum sind ebenfalls Matrizen und besitzen eine Organisation wie in Tabelle 4.10 veranschaulicht.

lp ₀ an Adr. 1	lp ₀ an Adr. 2	lp ₀ an Adr. 3	...	lp ₀ an Adr. n
lp ₁ an Adr. 1	lp ₁ an Adr. 2	lp ₁ an Adr. 3	...	lp ₁ an Adr. n
lp ₂ an Adr. 1	lp ₂ an Adr. 2	lp ₂ an Adr. 3	...	lp ₂ an Adr. n
...
lp _m an Adr. 1	lp _m an Adr. 2	lp _m an Adr. 3	...	lp _m an Adr. n

Tabelle 4.10: Datenstruktur innerhalb der Variable 'Auswertung.Spektrum.lp1'

Der in jeder Spalte von 0 bis m laufende Index gibt die Ordnung der Harmonischen an, deren komplexer Effektivwert sich in diesem Element der Matrix befindet. Index 0 steht für den im jeweiligen Zeitverlauf enthaltenen Gleichanteil, Index 1 für die erste Harmonische (Grundschwingung), Index 2 für die zweite Harmonische (erste Oberschwingung), usw.

4.6.1 Beschreibung der implementierten Algorithmen

Dieses Kapitel dokumentiert die mathematischen Vorschriften, mit denen die vom Prozessor ausgegebenen Zeitverläufe (Rohdaten) verarbeitet werden. Die Erläuterungen beschränken sich dabei ausschließlich auf die verwendeten Rechenfunktionen. Andere Routinen, wie etwa jene zur Erstellung des Ergebnisfensters, werden hier nicht behandelt. Alle verwendeten MATLAB-Befehle sind in [37] bzw. [38] dokumentiert.

Wie in Kapitel 4.6 erwähnt, beschneidet der Postprozessor zunächst den Vektor mit den Simulationszeitpunkten sowie alle Zeitverläufe an deren Beginn. Zusätzlich zu den bereits genannten Gründen für die Durchführung dieses Arbeitsschritts wird so auch die Korrektheit der Frequenzanalyse sichergestellt, da immer nur exakt eine Periode der berechneten Signale zur Auswertung gelangt. Um die Beschneidung durchführen zu können, muss als Erstes berechnet werden aus wie vielen Datenpunkten (Samples) eine Signalperiode besteht. Dies geschieht mit Hilfe von Gl. 4.3.

$$n_{\text{Periode}} = \frac{1}{\frac{f_g}{T_s}} = \frac{1}{f_g \cdot T_s \cdot d} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

n_{Periode} Anzahl der Datenpunkte, die zur Darstellung einer einzelnen Signalperiode benötigt werden
 f_g Grundfrequenz des Signals in Hz
 T_s gewählte Simulationsschrittweite in s
 d gewählter Dezimationsgrad

Der Postprozessor implementiert die erste Variante von Gl. 4.3 mit 3 Divisionen:

```
n_periode = uint32(((1 / Input.Messquelle.grundfrequenz) / ...  
Input.Simulation.sampletime) / Input.Simulation.dezimationsgrad);
```

Die Funktion *uint32* stellt ein ganzzahliges Ergebnis sicher. Mit Hilfe dieses Werts und der Sampleanzahl des gesamten Signals (*n_gesamt*) wird nun die Zahl der zu entfernenden Datenpunkte (*n_differenz*) berechnet:

```
n_gesamt = length(Output.t);  
n_differenz = n_gesamt - n_periode;
```

Die sodann folgende Beschneidung wird indirekt durch Auswahl der zu behaltenden Signalbereiche durchgeführt:

```
Auswertung.Zeitverlauf.lp1 = Output.lp1(1+n_differenz:end, :);  
Auswertung.Zeitverlauf.lp2 = Output.lp2(1+n_differenz:end, :);  
...  
Auswertung.t = Output.t(1+n_differenz:end, :);
```

Für die Berechnung der wahren Effektivwerte aller nunmehr beschnittenen Signale wird der im Abschnitt 'Remarks' in [47] angeführte Algorithmus verwendet. Da selbiger auf jedes einzelne Signal separat angewendet werden muss, wird eine *for*-Schleife implementiert, welche bei jedem Durchlauf die berechneten Signalverläufe aus einem einzelnen FLK_library-Block verarbeitet:

```
for i = 1:1:Output.max_address(1)  
Auswertung.Effektivwert.lp1(i) = norm(Auswertung.Zeitverlauf.lp1(:, i)) / ...  
sqrt(length(Auswertung.Zeitverlauf.lp1(:, i)));  
...  
end
```

Der Algorithmus zur Berechnung der Effektivwert-Frequenzspektren ist von dem im Abschnitt 'Examples' in [48] dargestellten Beispiel abgeleitet:

for $i = 1:1:\text{Output.max_address}(1)$

Auswertung.Spektrum.Ip1(:, i) = fft(Auswertung.Zeitverlauf.Ip1(:, i)) / ...
(length(Auswertung.Zeitverlauf.Ip1(:, i)) / 2);

...

Auswertung.Spektrum.Ip1(1, i) = Auswertung.Spektrum.Ip1(1, i) / 2;

...

end

Auswertung.Spektrum.Ip1 = ...

Auswertung.Spektrum.Ip1(1:ceil(length(Auswertung.Spektrum.Ip1(:, 1)) / 2), :);

...

Auswertung.Spektrum.Ip1(2:end, :) = Auswertung.Spektrum.Ip1(2:end, :) / sqrt(2);

...

Der erste Befehl innerhalb der *for*-Schleife wendet die diskrete Fourier-Transformation (DFT) auf das übergebene Signal an und normiert das Ergebnis per Division mit der halben Sampleanzahl des Signals. Aufgrund der Symmetrieeigenschaften der DFT für reelle Signale genügt es, nur die linke Hälfte des resultierenden Spektrums weiter zu verarbeiten. Die darin enthaltenen Informationen reichen bereits zur vollständigen Rekonstruktion des ursprünglichen Signals aus. Da sich die Spektralampplituden (Fourier-Koeffizienten) jedoch zu gleichen Teilen auf beide Seiten des gesamten Spektrums aufteilen, müssen zumindest die Werte in der weiter zu verarbeitenden Hälfte mit 2 multipliziert werden. Im obigen Codesegment werden alle Koeffizienten verdoppelt, indem das Ergebnis der DFT wie bereits erwähnt nur durch die halbe, statt die ganze Sampleanzahl dividiert wird.

Der zweite Befehl innerhalb der *for*-Schleife macht diese zuvor durchgeführte Verdopplung der Werte für den ersten Fourier-Koeffizienten wieder rückgängig. Dieser verkörpert die Amplitude des Gleichanteils im analysierten Signal. Da er innerhalb einer Periode des Spektrums im Gegensatz zu den anderen Koeffizienten nur einmal vorkommt, besaß er bereits den richtigen Wert, wurde jedoch durch die für alle anderen Koeffizienten notwendige Multiplikation mit 2 verfälscht. Diese Verfälschung wird durch die Halbierung nur dieses einen Werts wieder vollständig korrigiert.

Wie bereits erklärt ist es für reelle Signale ausreichend, nur die linke Hälfte des DFT-Spektrums weiter zu verarbeiten. Durch Auswahl des zu behaltenden Bereichs aus dem gesamten Spektrum führt der unmittelbar auf das Ende der *for*-Schleife folgende Befehl eine Beschneidung desselben durch. Der vierte und letzte Befehl wandelt das nun fertig gestellte Amplitudenspektrum in ein Effektivwertspektrum um. Dazu dividiert er sämtliche Spektralampplituden, mit Ausnahme des Gleichanteils, durch die Quadratwurzel aus 2, dem Scheitelfaktor für reine Sinusschwingungen.

Eine stilistisch etwas optimierte und damit verständlichere Variante des soeben beschriebenen Algorithmus ist im Folgenden angeführt:

% DFT anwenden und resultierende Koeffizienten normieren:

```
Auswertung.Spektrum.Ip1 = fft(Auswertung.Zeitverlauf.Ip1) / ...  
size(Auswertung.Zeitverlauf.Ip1, 1);
```

...

% Koeffizienten der Wechselanteile mit 2 multiplizieren:

```
Auswertung.Spektrum.Ip1(2:end, :) = Auswertung.Spektrum.Ip1(2:end, :) * 2;
```

...

% linke Hälfte des Spektrums auswählen und behalten:

```
Auswertung.Spektrum.Ip1 = ...  
Auswertung.Spektrum.Ip1(1:ceil(size(Auswertung.Spektrum.Ip1, 1) / 2), :);
```

...

% Effektivwerte der Wechselanteile berechnen:

```
Auswertung.Spektrum.Ip1(2:end, :) = Auswertung.Spektrum.Ip1(2:end, :) / sqrt(2);
```

...

Dieses Codesegment ist in seiner Funktion identisch zur vorher beschriebenen Implementation. Die *for*-Schleife kann weggelassen werden, da die Funktion *fft* auch Matrizen als Argument akzeptiert. In einem solchen Fall wird die Transformation für jede Spalte der Matrix separat durchgeführt, was aufgrund der gegenständlichen Organisation der Daten zulässig ist (siehe Tabelle 4.2). Da von dieser Variante im Vergleich zur ersten allerdings keine nennenswerten Leistungssteigerungen oder sonstige Vorteile zu erwarten waren, wurde sie nicht umgesetzt.

Das Ergebnis einer DFT ist immer komplex. MATLAB benutzt zur Kennzeichnung des Imaginärteils solcher Zahlen standardmäßig den Buchstaben 'i' ([49]), die Verwendung des Buchstabens 'j' ist jedoch ebenfalls möglich ([50]). Die Bezeichnungen 'i' und 'j' können aber auch als Namen für beliebige andere Variablen benutzt werden, wie etwa in den zuvor dokumentierten *for*-Schleifen angewendet. Beim manuellen Erzeugen komplexer Zahlen (Beispiel: $z = 2 + i \cdot 3$) kann dies allerdings zu Konflikten führen, da der Inhalt von *i* bzw. *j* dann möglicherweise nicht mehr der imaginären Einheit entspricht. Aus diesem Grund sind *i* bzw. *j* vor der Durchführung solcher Operationen entweder, sofern möglich, zu löschen, oder die Funktion *complex* ([51]) für die Erstellung komplexer Zahlen einzusetzen (im zuvor genannten Beispiel also $z = \text{complex}(2,3)$).

Des weiteren ist beim Einsatz der DFT zu beachten, dass das an den Transformationsalgorithmus übergebene Signal aufgrund der mathematischen Definition der DFT wie ein vollständiges Intervall eines periodischen Signals behandelt wird. Anders

ausgedrückt würde sich bei der Rückgewinnung des Signals aus den berechneten Koeffizienten ein Verlauf ergeben, der einer periodischen Aneinanderreihung des gesamten ursprünglich analysierten Signalintervalls entspricht. Dies hat zur Folge, dass zur Erzielung präziser Ergebnisse immer exakt eine einzige Signalperiode an den DFT-Algorithmus übergeben werden muss. Schon geringe Abweichungen von dieser Regel machen sich durch Ungenauigkeiten im resultierenden Spektrum bemerkbar. Der Postprozessor verwendet, wie bereits erwähnt, den Wert der Variable 'Input.Messquelle.grundfrequenz' zur Definition der Periodendauer des Signals und damit indirekt zur Definition der Grundfrequenz, auf die sich das berechnete Spektrum bezieht. Die Übereinstimmung dieses Werts mit der tatsächlichen Frequenz der speisenden Quelle ist daher Voraussetzung für eine exakte Spektralanalyse.

4.7 Das Ergebnisfenster

Das Ergebnisfenster wird vom Postprozessor nach Abschluss aller Berechnungen erstellt. Es enthält 4 aus jeweils mehreren Datenreihen erstellte zweidimensionale Diagramme zur Darstellung der Ergebnisse aus einer einzelnen Simulation, wie in Abbildung 4.18 gezeigt. Das der Simulation zugrunde liegende Parameterset ist dabei vollständig aus der Titelleiste des Fensters ablesbar.

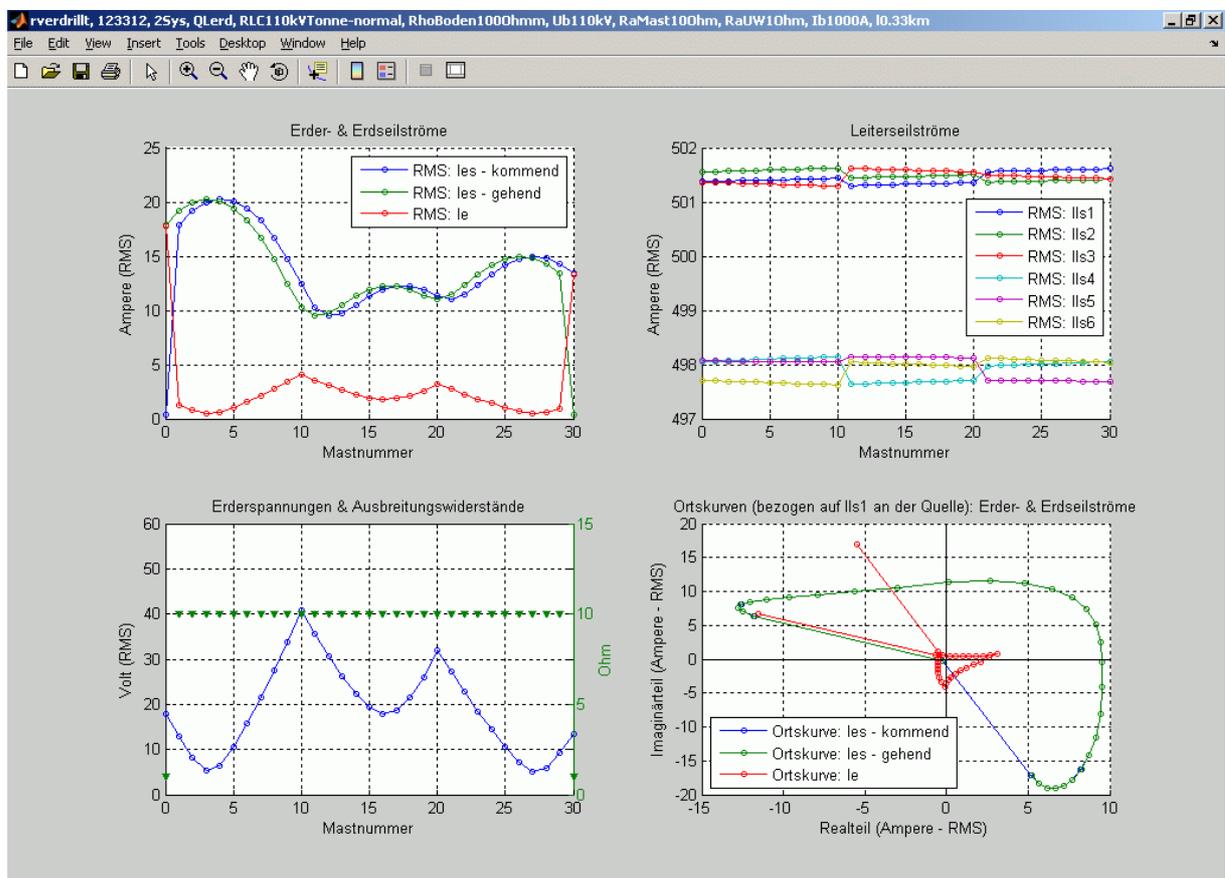


Abbildung 4.18: Vom Postprozessor erstelltes Ergebnisfenster

Die 4 Diagramme enthalten die folgenden Informationen:

- **links oben:** Effektivwerte aller berechneten Erdseil- und Erderströme als Verläufe über die gesamte Freileitung. Hierbei ist anzumerken, dass die Addition bzw. Subtraktion der Beträge zweier zum selben Mast gehörender Ströme (z.B. die Subtraktion des gehenden Erdseilstroms vom kommenden Erdseilstrom) nicht notwendigerweise den Betrag des dritten an diesem Mast vorhandenen Stroms (im genannten Beispiel den Erderstrom) ergeben muss. Wie aus der weiter unten im Text beschriebenen Ortskurvendarstellung entnehmbar ist, können diese Ströme jeweils voneinander unterschiedliche Phasenwinkel besitzen. Dies macht die reine Bildung von Summen zu einem unzureichenden Verfahren, da selbiges Phasengleichheit der betroffenen Signale voraussetzt. Stattdessen müssen die Beträge mittels Vektoraddition berechnet werden. Da der Algorithmus zur Berechnung der Effektivwerte (siehe Kapitel 4.6.1) jede simulierte Größe völlig unabhängig von allen anderen auswertet, setzt er automatisch das letztgenannte Verfahren um und liefert dadurch immer die korrekten Werte als Ergebnis.
- **rechts oben:** Effektivwerte aller berechneten Phasenseilströme (in Abbildung 4.18 als Leiterseilströme bezeichnet) als Verläufe über die gesamte Freileitung. Die in diesem Diagramm zu sehenden sprunghaften Wertänderungen der einzelnen Datenreihen im Bereich von Mast Nr. 10 und Mast Nr. 20 resultieren aus den an diesen Positionen befindlichen Verdrillungsstellen (siehe Abbildung 4.11). Aufgrund der dort durchgeführten Verschiebungen der einzelnen elektrischen Phasen von einem Leiterseil auf ein anderes, zeigt jede Datenreihe in jedem der 3 Leitungsabschnitte (Mast Nr. 0 bis Mast Nr. 10, Mast Nr. 11 bis Mast Nr. 20 und Mast Nr. 21 bis Mast Nr. 30) die Effektivwerte einer jeweils anderen elektrischen Phase.
- **links unten:** Effektivwerte aller berechneten Erderspannungen (linke Skala, kreisförmige Markierungen), sowie berechnete Erdungswiderstände (rechte Skala, dreieckige Markierungen) als Verläufe über die gesamte Freileitung. Letztere werden bei der Erstellung des Diagramms durch Anwendung des ohmschen Gesetzes (Erdungswiderstand = Erderspannung / Erderstrom) aus den jeweils zu einem Mast gehörenden, zuvor ermittelten Effektivwerten beider Parameter berechnet. Diese Vorgehensweise ist zulässig, da sämtliche Erdungen immer als solche mit rein ohmscher Charakteristik modelliert wurden (siehe Kapitel 4.4.3.2 f.). Erderspannung und Erderstrom sind daher jederzeit phasengleich und das Rechenergebnis damit korrekt.

- **rechts unten:** Darstellung aller berechneten Erdseil- und Erderströme auf der komplexen Ebene als Verläufe über die gesamte Freileitung (Ortskurvendarstellung). Jede Markierung repräsentiert die Spitze eines jeweils vom Ursprung der Ebene ausgehenden Zeigers. Dessen Betrag und Winkel entspricht dem Effektivwert bzw. dem Phasenwinkel der Grundschiwingung der jeweiligen simulierten Messgröße an einem bestimmten Mast. Alle 3 Ortskurven sind dabei immer auf den Winkel der Grundschiwingung des im Diagrammtitel angegebenen Phasenseilstroms bezogen (in Abbildung 4.18 mit 'Ils' bezeichnet), d.h. ein Zeiger der exakt auf der positiven reellen Achse der komplexen Ebene liegt, ist phasengleich mit dem angegebenen Phasenseilstrom.

Die Wiedergabe aller Strom- und Spannungsverläufe als Linien dient der besseren visuellen Erfassbarkeit. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Datenpunkten stellen allerdings keine Interpolationen dar. Relevant sind allein die Datenpunkte selbst!

Da, wie in Kapitel 4.4.3.3 beschrieben, der erste und der letzte Mast der modellierten Freileitung als Teil der Erdungsanlagen der an den Endpunkten angenommenen Umspannwerke definiert sind, ist die Nummerierung aller Masten im Ergebnisfenster jeweils um 1 nach unten verschoben. Ziel dieser Maßnahme ist die Erhöhung der Verständlichkeit der Diagramme. Mast Nr. 1 stellt dadurch den tatsächlich ersten Mast der Leitung dar, während Mast Nr. 0 die Erdungsanlage des am linken Endpunkt der Leitung angenommenen Umspannwerks repräsentiert. In Analogie dazu besitzt die Erdungsanlage des am rechten Endpunkt der Leitung angenommenen Umspannwerks die Mastnummer 30. Diese Verschiebung hat jedoch ausschließlich visuellen Charakter. An der internen Nummerierung (Adressen der FLK_library-Blöcke, Indizes von Vektoren und Matrizen, etc.) ändert sich nichts, weswegen der Bereich hier weiterhin von 1 bis 31 läuft.

4.7.1 Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung des Ergebnisfensters

MATLAB bietet dem Anwender verschiedene Möglichkeiten zur Bearbeitung von Grafikfenstern ([52]). Die zur Verfügung stehenden interaktiven Methoden können dabei direkt ohne besondere Vorkehrungsmaßnahmen angewandt werden. Um das Weiterverarbeiten von Ergebnisfenstern auch unter ausschließlicher Verwendung von Kommandozeilenbefehlen einfach zu gestalten, versieht der Postprozessor alle relevanten Inhalte in diesen Fenstern mit einer eindeutigen Bezeichnung. Anhand derselben kann ein gewünschtes Element, wie etwa eine Diagrammfläche, gezielt angesprochen und seine Eigenschaften ausgelesen bzw. verändert werden.

Alle grafischen Objekte in MATLAB sind hierarchisch organisiert und besitzen eine Kennnummer, genannt „handle“, über die sie individuell angesteuert werden können ([53]). Abhängig von seinem Typ besitzt jedes Objekt eine Reihe unterschiedlicher Eigenschaften

(properties), darunter auch eine namens 'Tag'. Diese enthält einen String als Wert, der vom Anwender zwecks Benennung des Objekts frei gewählt werden kann. Dies ermöglicht die Vergabe der erwähnten eindeutigen Bezeichnungen. Fehlen solche, wäre das skript- bzw. funktionsgesteuerte Auffinden der Objekte kompliziert und anfällig für Irrtümer, da MATLAB deren handles dynamisch vergibt.

Tabelle 4.11 listet sämtliche Tags auf, die der Postprozessor den einzelnen Grafikobjekten zuweist. Alle Eigenschaften der in der Tabelle genannten Objekttypen sind in [54], [55], [56] bzw. [57] dokumentiert.

Wert von 'Tag'	Objekttyp	Objektbeschreibung
FLK_result	Figure	das Ergebnisfenster selbst
Axes_RMS_Le	Axes	die Diagrammfläche zur Darstellung der Erdseil- und Erderströme
RMS_Le1_in	Lineseries	die Datenreihe der kommenden Erdseilströme
RMS_Le1_out	Lineseries	die Datenreihe der gehenden Erdseilströme
RMS_Le	Lineseries	die Datenreihe der Erderströme
Axes_RMS_IIs	Axes	die Diagrammfläche zur Darstellung der Phasenseilströme
RMS_IIs1 bis RMS_IIs6	Lineseries	die Datenreihen der Phasenseilströme
Axes_RMS_Ue	Axes	die Diagrammfläche zur Darstellung der Erderspannungen
RMS_Ue	Lineseries	die Datenreihe der Erderspannungen
Axes_Ra	Axes	die Diagrammfläche zur Darstellung der Erdungswiderstände
Ra	Lineseries	die Datenreihe der Erdungswiderstände
Axes_complex_Le	Axes	die Diagrammfläche zur Ortskurvendarstellung der Erdseil- und Erderströme
complex_Le1_in	Lineseries	die Datenreihe der Ortskurve der kommenden Erdseilströme
complex_Le1_out	Lineseries	die Datenreihe der Ortskurve der gehenden Erdseilströme
complex_Le	Lineseries	die Datenreihe der Ortskurve der Erderströme
Line_complex_Le_X	Line	die horizontale Achsenlinie (Nulllinie) im Ortskurvendiagramm
Line_complex_Le_Y	Line	die vertikale Achsenlinie (Nulllinie) im Ortskurvendiagramm

Tabelle 4.11: Vom Postprozessor vergebene Tags zur Kennzeichnung der Objekte im Ergebnisfenster

Um ein bestimmtes Grafikobjekt über ein Skript oder eine Funktion ansprechen zu können, muss dessen handle bekannt sein. Dieser kann mit Hilfe der Funktion *findobj* ([58]) ermittelt werden:

h = findobj('Tag', 'RMS_Le');

Dieser Befehl gibt die handles aller gegenwärtig in MATLAB geladenen Grafikobjekte zurück, deren Eigenschaft 'Tag' den Wert 'RMS_Le' besitzt. Ist nur ein einziges Ergebnisfenster geöffnet, ist das in der Variable 'h' gespeicherte Ergebnis ein skalarer Wert. Sind hingegen mehrere Ergebnisfenster gleichzeitig offen, oder wird der String 'RMS_Le' auch in den Tags fremder Grafikobjekte verwendet, enthält 'h' einen Vektor, dessen Elemente auf jedes der

gefundenen Objekte verweisen. Soll die Suche daher auf ein bestimmtes Fenster beschränkt werden, kann *findobj* folgendermaßen erweitert werden:

```
h = findobj(gcf, 'Tag', 'RMS_Le');
```

Der Befehl *gcf* ([59]) im ersten Argument gibt den handle des derzeit aktiven Grafikfensters zurück. Mit einer solchen Angabe durchsucht *findobj* nur dieses eine Fenster und seine Inhalte. Als Alternative kann der handle des zu durchsuchenden Ergebnisfensters auch anhand des Tags dieses Fensters ermittelt werden:

```
h = findobj(findobj('Tag', 'FLK_result'), 'Tag', 'RMS_Le');
```

Sind mehrere Ergebnisfenster gleichzeitig geladen, gibt der obige Befehl mehrere Treffer zurück – je einen pro Fenster. Dies kann jedoch durchaus erwünscht sein, z.B. zum gleichzeitigen Ändern einer bestimmten Eigenschaft in allen geöffneten Ergebnisfenstern.

Ist der handle des interessierenden Objekts ermittelt, können mit Hilfe der beiden Befehle *get* ([60]) bzw. *set* ([61]) alle zu diesem Objekt gehörenden Eigenschaften ausgelesen bzw. verändert werden:

```
data = get(h, 'YData');
```

```
set(h, 'Marker', 'x', 'MarkerSize', 4.5)
```

Die obigen 2 Befehle können auf Datenreihen angewandt werden, wie etwa der durch einen der vorherigen Befehle identifizierten Datenreihe der Erderströme. Der *get*-Befehl liest die Y-Koordinaten (d.h. die Effektivwerte) aller Datenpunkte dieser Reihe aus und speichert sie in der Variable 'data'. Der *set*-Befehl ändert die Form und die Größe der im Diagramm dargestellten Markierungen dieser Punkte auf die vorgegebenen Werte. Dadurch lässt sich das Erscheinungsbild der Ergebnisfenster nachträglich an bestimmte Vorgaben anpassen, wie in Abbildung 4.19 gezeigt. Die dort verwendeten Farben, Formen und Bezeichnungen werden in den nachfolgenden Kapiteln standardmäßig verwendet.

Bezüglich der soeben demonstrierten Möglichkeit, die zur Erstellung des Diagramms verwendeten Werte wieder auslesen zu können, ist anzumerken, dass hierbei keinerlei Genauigkeitsverluste auftreten. Alle Werte werden mit exakt jener Genauigkeit in den Eigenschaften des Grafikobjekts abgelegt, mit der sie beim Erstellen desselben übergeben wurden, womit eine gesonderte Speicherung nicht notwendig ist. Dies vereinfacht insbesondere den Prozess der Archivierung sehr stark.

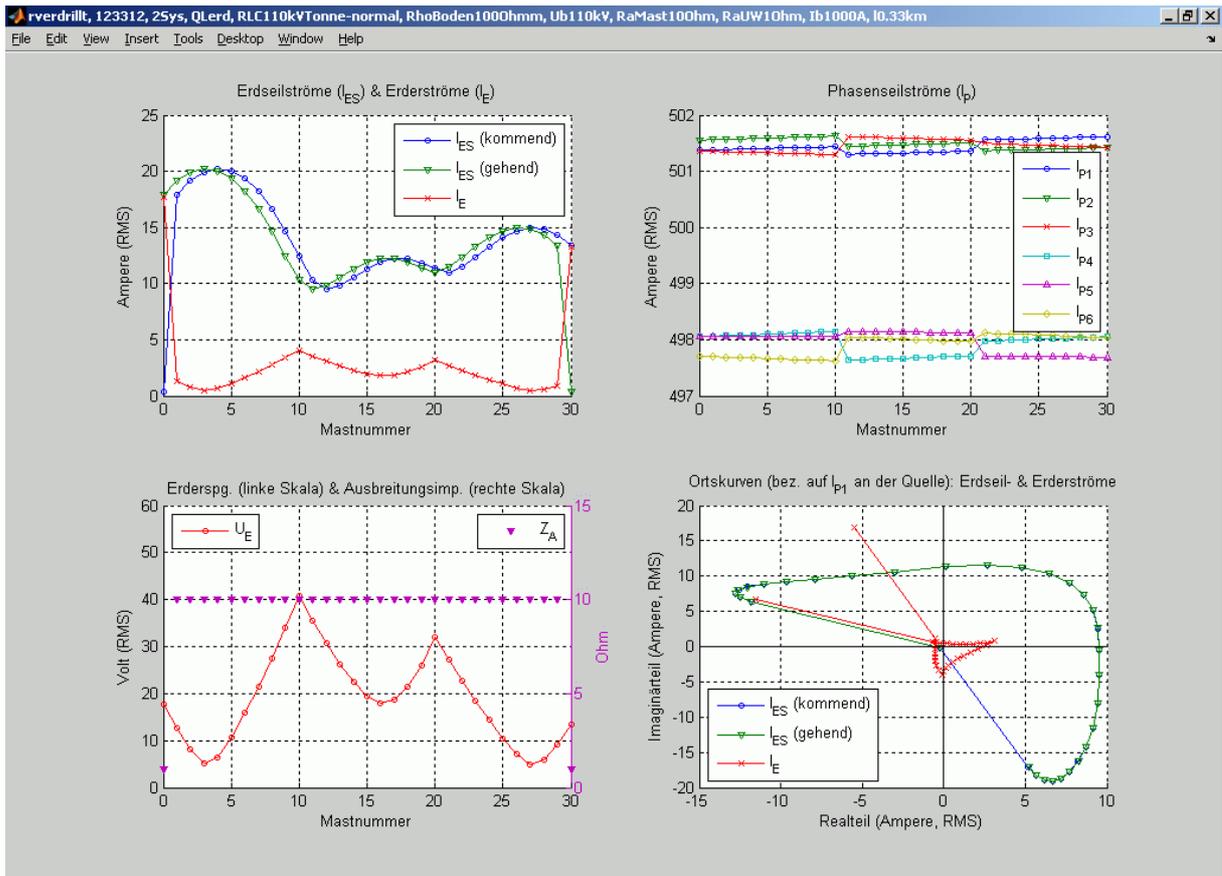


Abbildung 4.19: Nachträglich in seinem Aussehen verändertes Ergebnisfenster

Zudem ist es mit Hilfe des Befehls *copyobj* ([62]) möglich, beliebige Grafikobjekte zu kopieren. Auf diese Weise lassen sich etwa Diagramme aus mehreren Ergebnisfenstern in einem neuen Fenster zusammenfassen, oder bestimmte Diagramme aus einem Ergebnisfenster extrahieren. Ein Beispiel für letzteren Fall zeigt Abbildung 4.20.

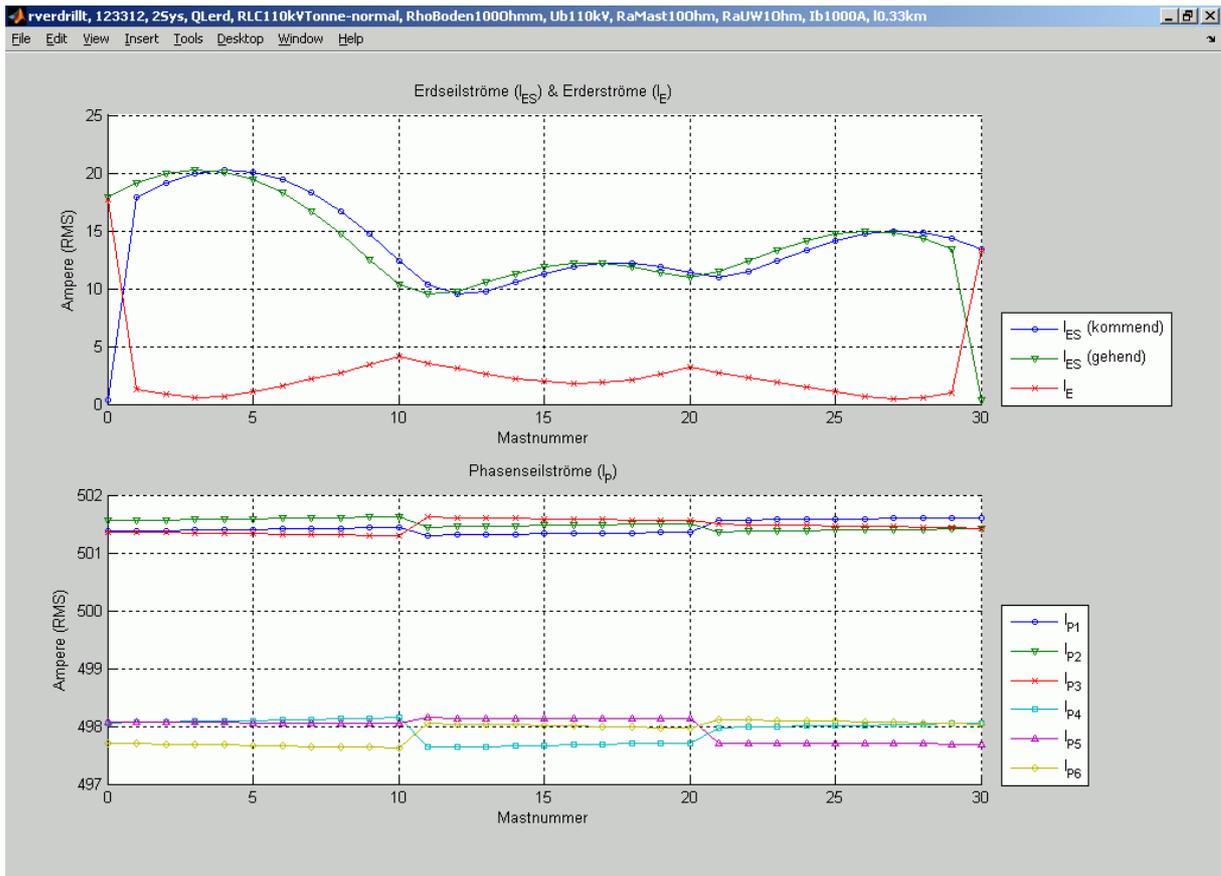


Abbildung 4.20: Herausnahme von Informationen aus einem Ergebnisfenster per *copyobj*

5 Ergebnisse

Wie in Kapitel 4.4 dokumentiert, besitzt das untersuchte Freileitungsmodell 13 Parameter, die völlig unabhängig voneinander verändert werden können. Jeder dieser Parameter übt einen bestimmten elektrischen Einfluss auf die simulierte Leitung aus. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden alle Parameter diskret betrachtet. Das heißt es werden, sofern nicht anders angegeben, immer nur die Ergebnisse von Simulationen miteinander verglichen, die sich ausschließlich im Wert des aktuell behandelten Parameters unterscheiden.

Zur Verbesserung der Lesbarkeit fehlen bei einigen Diagrammen die Markierungen aller Datenpunkte und manchmal zusätzlich auch die Datenreihen der gehenden Erdseilstrombeträge. Diese können allerdings sehr leicht rekonstruiert werden, da sie immer den Verläufen der kommenden Erdseilstrombeträge folgen. Der Wert des gehenden Erdseilstroms an einem bestimmten Mast entspricht immer dem Wert des kommenden Erdseilstroms am darauf folgenden Mast.

5.1 Verwendetes Standard-Parameterset

Sofern bei den einzelnen Ergebnissen keine anders lautenden Angaben vorhanden sind, basieren diese Ergebnisse immer auf den in Tabelle 5.1 als Standard definierten Parameterwerten.

Für den Parameter 'Phasenbelegung' (PB) existiert kein Standard, da er häufig verändert wird. Sein Wert wird daher immer bei jedem Ergebnis genannt.

Parameter	Wert	Beschreibung
VD	rverdrillt	homogene Verdrillung
PB	-	-
SY	2Sys	beide Systeme der Freileitung in Betrieb
QL	erd	Sternpunkte von Quelle und Last starr geerdet
MG	110kVTonne	Tonnenmast für 110 kV Nennspannung
MH	normal	Masthöhe (MH) entspricht dem Nennwert;
ES		keine Variation der Erdseildistanz (ES)
RB	100	spezifischer Bodenwiderstand $\rho = 100 \Omega\text{m}$
UB	110	Betriebsspannung $U_b = 110 \text{ kV}$
RM	10	Mast-Erdungswiderstand $R_e = 10 \Omega$
RU	10	UW-Erdungswiderstand $R_e = 10 \Omega$
IB	1000	Gesamt-Laststrom $I_b \approx 1000 \text{ A}$
SL	0.33	Spannfeldlänge $l = 0.33 \text{ km}$

Tabelle 5.1: Für die Untersuchungen verwendetes Standard-Parameterset

5.2 Einfluss der Verdrillungsmethode (VD)

Bei einer Freileitung befindet sich jedes Phasenseil auf einer anderen geometrischen Position. Aufgrund dieser Tatsache weist jedes Seil unterschiedliche elektromagnetische Verkoppelungen mit den anderen Seilen und dem Boden auf und wird daher auch in jeweils

unterschiedlicher Stärke beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass die Übertragung von dreiphasigem Wechselstrom unsymmetrisch erfolgt, wie nachstehend gezeigt wird.

Abbildung 5.1 zeigt die Verläufe aller berechneten Strombeträge in der untersuchten Freileitung bei Phasenbelegung '123 312', einem Gesamt-Laststrom von 1000 A und nicht vorhandener Verdrillung (Parameter 'VD' auf 'unverdrillt' gesetzt). Die Phasenseilströme bleiben entlang der gesamten Leitung praktisch konstant, ihre Werte weisen jedoch hohe Unterschiede auf, trotz idealer Quelle und symmetrischer Last. Bei separater Betrachtung beider Systeme beträgt die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Phasenstrom innerhalb eines Systems im gegenständlichen Fall jeweils mehr als 42 A (Betragsunterschied zwischen I_{P1} und I_{P2} bzw. I_{P5} und I_{P6}). Das unsymmetrische Verhalten der Leitung zeigt sich außerdem über die erhöhten Sternpunktströme von Quelle und Last (I_{ES} (kommend) an Mast Nr. 0 bzw. I_{ES} (gehend) an Mast Nr. 30). Deren Wert liegt hier jeweils bei ca. 3.6 A.

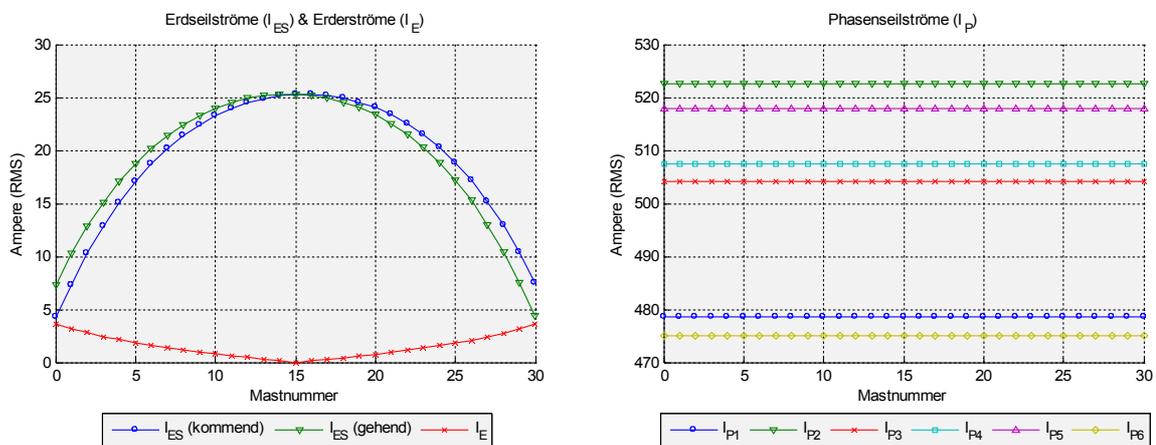


Abbildung 5.1: VD = unverdrillt; PB = 123 312

Um das Übertragungsverhalten der Leitung zu symmetrieren, d.h. die von ihr verursachten Stromdifferenzen zu minimieren, wird diese daher in regelmäßigen Abständen verdrillt. Ziel ist es dabei, jede der 3 elektrischen Phasen eines Drehstromsystems über den gesamten Verlauf der Freileitung mindestens einmal auf jedem der 3 zu diesem System gehörenden Phasenseile zu führen. Durch diese Maßnahme wird jede Drehstromphase allen maßgeblichen Verkoppelungssituationen ausgesetzt und ihr elektrisches Verhalten somit dem der anderen Phasen angeglichen.

Bei zweisystemigen Freileitungen wie der hier untersuchten kann, trotz der in den Kapiteln 4.4.1.1 und 4.4.1.2 getroffenen Einschränkungen, die Verdrillung auf verschiedene Arten erfolgen. Es muss daher noch eine Definition entwickelt werden, welche die Eigenschaften der gewählten Variante widerspiegelt. In diesem Punkt kann zunächst in rein geometrischem Sinn zwischen „gleichem“ und „entgegengesetztem“ Verdrillungsschema unterschieden werden, wie in Abbildung 5.2 am Beispiel des Mastkopfbilds 'Tonne' und der Phasenbelegung '123 123' veranschaulicht. Sofern nicht anders angegeben, wird die

Verdrillung der Phasenseile in dieser Arbeit immer gemäß den hier dargestellten Verdrillungsrichtungen durchgeführt. Auf die Phasennummern angewandt (siehe Abbildung 4.16) bedeutet dies also bei gleichem Verdrillungsschema eine Verschiebung von 1 auf 2, 2 auf 3 und 3 auf 1 für das linke System, sowie 4 auf 5, 5 auf 6 und 6 auf 4 für das rechte System. Bei entgegengesetztem Verdrillungsschema gilt für das rechte System stattdessen: 6 auf 5, 5 auf 4 und 4 auf 6. Die Blickrichtung entspricht dabei immer der in Kapitel 4.4.1.2 getroffenen Definition, also von Mast Nr. 0 (dem START-Block) ausgehend „in“ die Freileitung hinein.

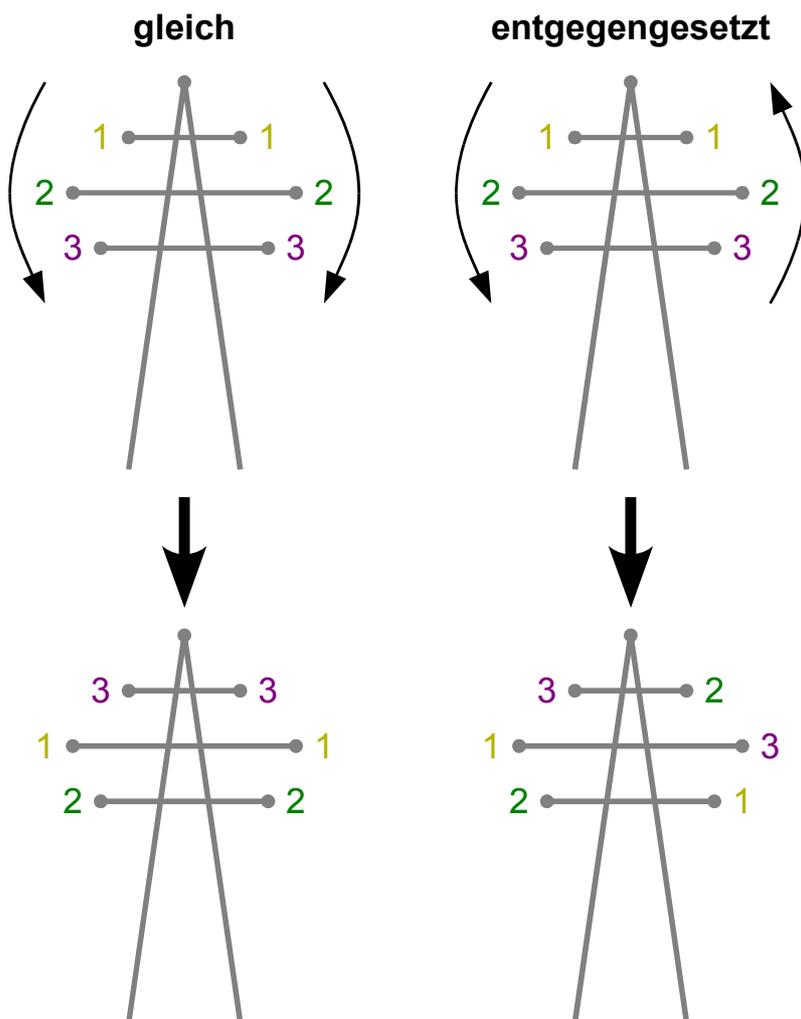


Abbildung 5.2: Definition des Verdrillungsschemas bzw. der verwendeten Verdrillungsrichtungen

Die alleinige Angabe dieses soeben spezifizierten Verdrillungsschemas ist, wie im Folgenden gezeigt wird, ohne Kenntnis der Phasenbelegung jedoch nicht ausreichend, um klare Aussagen formulieren zu können. Vielmehr ist die Frage von Bedeutung, wie sich die jeweils zusammengehörenden elektrischen Phasen beider Systeme vor und nach erfolgter Verdrillung gegenüberstehen.

Bei der in Abbildung 5.3 zu sehenden Methode wird, von der bereits im unverdrillten Fall besprochenen Phasenbelegung '123 312' ausgehend, immer entgegengesetzt verdrillt. Wie anhand der Ziffern sofort nachvollzogen werden kann, gelangt jede Phase im gesamten Verlauf der Freileitung tatsächlich je 1 Mal auf jede Ebene des Masts – die gestellte Anforderung wird somit erfüllt. Anhand der Doppelpfeile, welche die jeweils zueinander gehörenden Phasen beider Systeme verbinden, zeigt sich jedoch auch eine Änderung der Anordnung dieser korrespondierenden Phasen mit jedem Verdrillungsschritt. Diese Variante führt zu dem in Abbildung 5.4 dargestellten Ergebnis. Verglichen mit dem Ergebnis bei nicht vorhandener Verdrillung (siehe Abbildung 5.1) besitzt die Freileitung jetzt ein Übertragungsverhalten mit wesentlich höherer Symmetrie. Die Unterschiede zwischen größtem und kleinstem Phasenstrom innerhalb eines Systems betragen in diesem Fall nur mehr je maximal 1.2 A statt über 42 A, obwohl der Wert des Gesamt-Laststroms weiterhin 1000 A beträgt. Auch die Sternpunktströme von Quelle und Last sind mit jeweils ca. 0.9 A statt 3.6 A nun um einiges geringer. Die Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme weisen allerdings ein inkonsistentes Aussehen auf. So ist beispielsweise das Vorhandensein des ersten Verdrillungsmasts, er besitzt die Mastnummer 10, bei alleiniger Betrachtung des linken Diagramms in Abbildung 5.4 nicht erkennbar, während die zweite Verdrillungsstelle an Mast Nr. 20 anhand des sich ergebenden Maximums des Erderstroms an dieser Stelle sofort gefunden werden kann. Wird die Phasenbelegung geändert und dabei die Verdrillungsmethode mit wechselnder Phasenopposition beibehalten – einige Belegungen erfordern dazu den Wechsel auf das Verdrillungsschema 'gleich' – kann eine starke qualitative Änderung der resultierenden Betragsverläufe in der Erdungsanlage beobachtet werden. Abbildung 5.5 zeigt als Beispiel zur Verdeutlichung dieser Tatsache die Ergebnisse für die Phasenbelegung '123 231' bei sonst identischen Parametern wie zuvor.

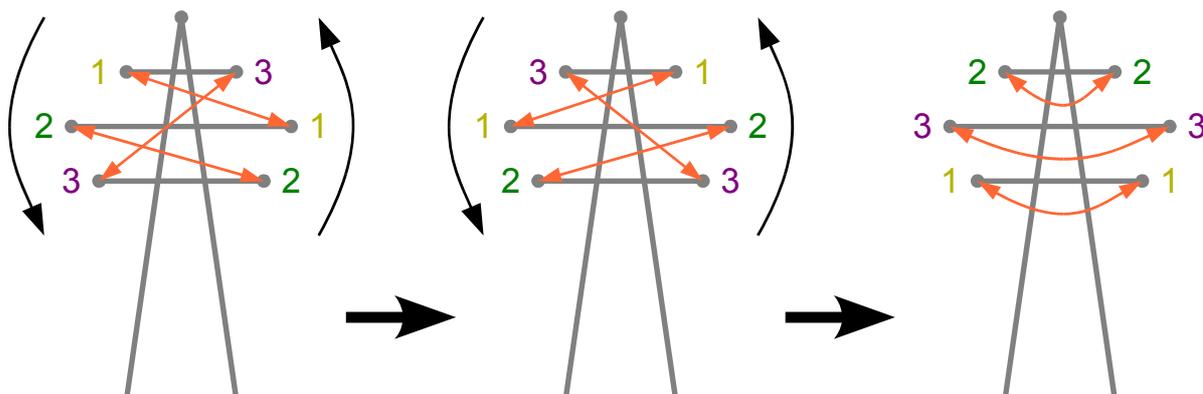


Abbildung 5.3: Verdrillungsmethode mit wechselnder Phasenopposition (inhomogen, „falsch“)

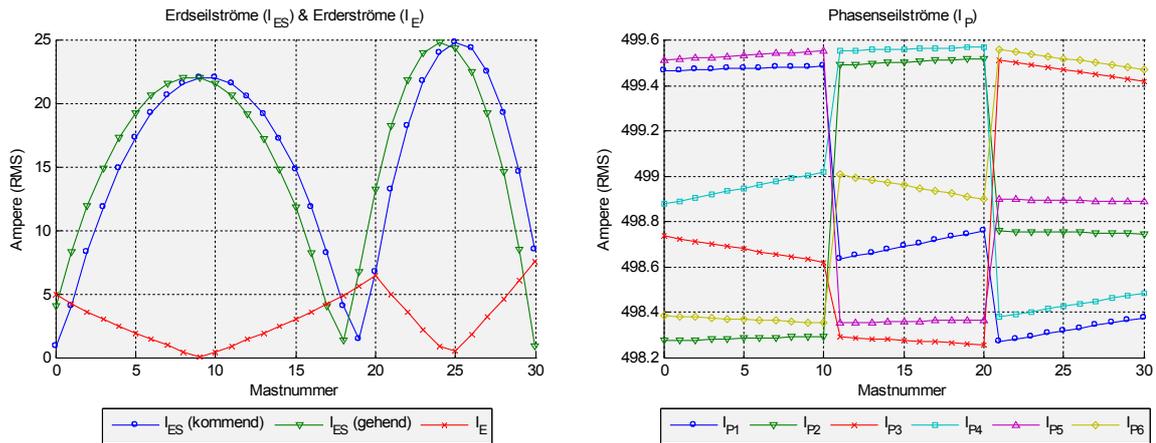


Abbildung 5.4: VD = fverdrillt; PB = 123 312

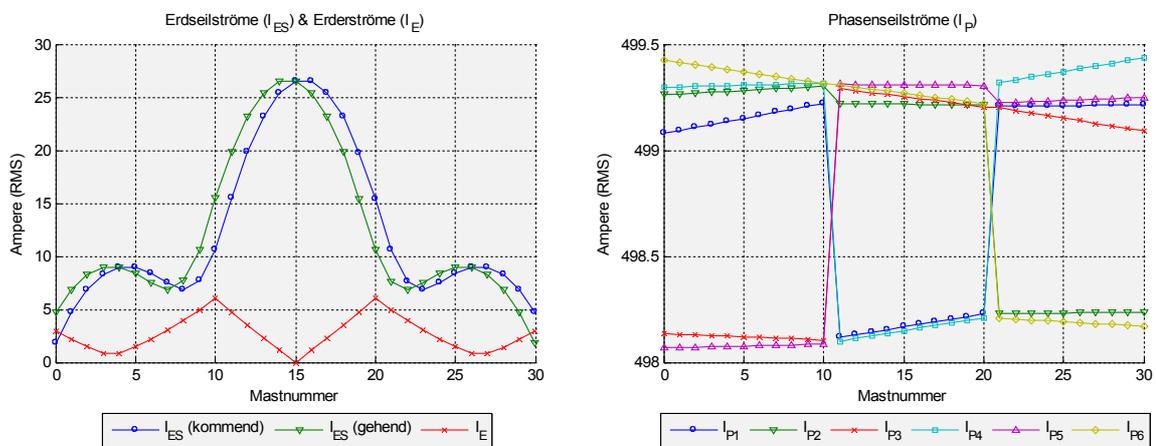


Abbildung 5.5: VD = fverdrillt; PB = 123 231

Im Gegensatz zur Verdrillungsmethode mit wechselnder Phasenopposition nach Abbildung 5.3 bleibt die Anordnung der zueinander gehörenden Phasen bei der in Abbildung 5.6 illustrierten Verdrillungsmethode mit gleich bleibender Phasenopposition immer identisch. Das damit erzielte Ergebnis ist in Abbildung 5.7 dargestellt und weicht von dem in Abbildung 5.4 dargestellten Ergebnis sehr stark ab, obwohl der einzige Unterschied lediglich in der geänderten Verdrillungsmethode besteht. Zwar erfolgt die Aufteilung des Gesamt-Laststroms auf beide Systeme der Leitung nun in geringfügig ungleichem Maß, das symmetrische Übertragungsverhalten ist jedoch weiterhin gegeben und sogar besser als zuvor. So betragen die Unterschiede der Stromstärken innerhalb eines Systems bei diesem Parameterset nur mehr maximal 0.2 A beim linken und 0.5 A beim rechten System, abermals bei einem Gesamt-Laststrom von 1000 A. Die Sternpunktströme von Quelle und Last sind mit jeweils ca. 0.8 A ebenfalls erneut kleiner geworden. Darüber hinaus führt eine Modifikation der Phasenbelegung – wiederum unter Beibehaltung der Verdrillungsmethode – nun nicht mehr zu einer qualitativen, sondern nur mehr zu einer quantitativen Änderung der Betragsverläufe in der Erdungsanlage. Alle dort berechneten Werte unterscheiden sich von den korrespondierenden Werten aus einem Ergebnis mit anderer Phasenbelegung dann nur

mehr um praktisch ein und denselben Multiplikator, wodurch die Formen der Verläufe selbst unverändert bleiben. Kapitel 5.3 befasst sich detaillierter mit dieser Thematik.

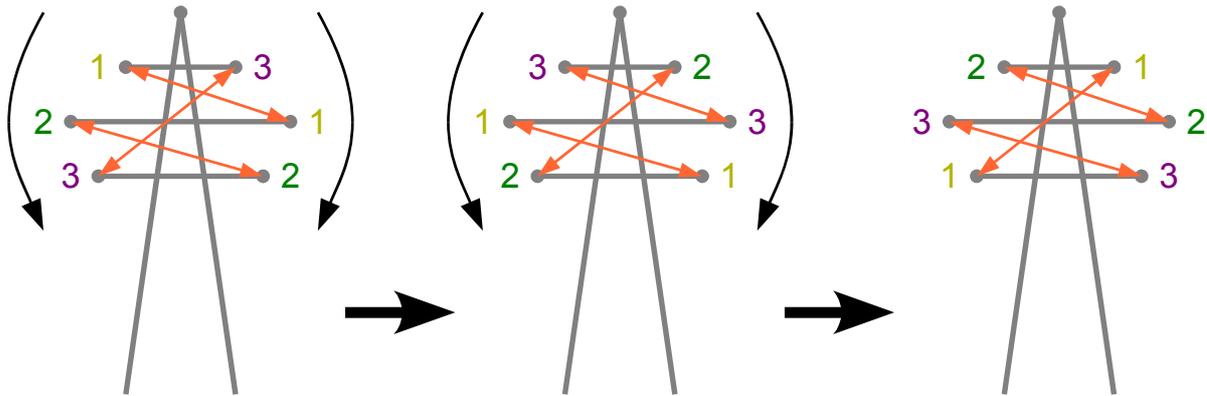


Abbildung 5.6: Verdrillungsmethode mit gleich bleibender Phasenopposition (homogen, „richtig“)

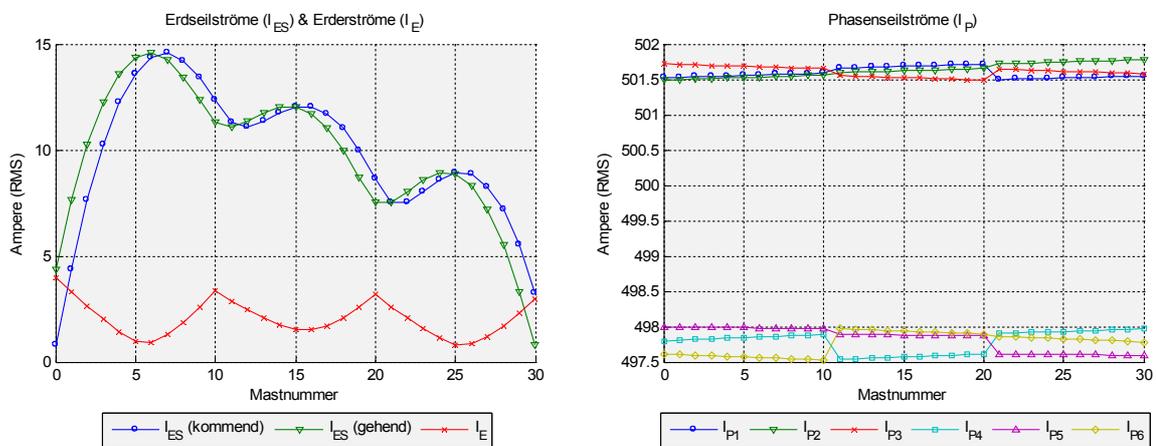


Abbildung 5.7: VD = rverdrillt; PB = 123 312

Die Verdrillungsmethode mit gleich bleibender Phasenopposition ermöglicht somit einen wesentlich einfacheren Vergleich einzelner Ergebnisse. Da auf ihrer Basis zudem auch einige allgemeingültige Aussagen über die Einflüsse der anderen Parameter hergeleitet werden konnten, wurde sie bei der Durchführung der einzelnen Simulationsreihen bevorzugt und als „richtige“ bzw. homogene Verdrillungsmethode bezeichnet. Im Gegensatz dazu erhielt die Verdrillungsmethode mit wechselnder Phasenopposition die Bezeichnung „falsch“ bzw. inhomogen und wurde nicht weiter untersucht.

5.3 Einfluss der Phasenbelegung (PB)

Eine Veränderung der Phasenbelegung wirkt sich neben leichten Änderungen in den Werten der Phasenseilströme vor allem auf die Betragsverläufe der Ströme in der Erdungsanlage aus. Für ein gegebenes Set aus den übrigen Parametern existieren dabei insgesamt maximal 12 verschiedene solcher Verläufe, unterscheidbar nach Phasenopposition (6 Varianten; siehe Kapitel 5.3.1) und Trend (2 Varianten; siehe Kapitel 5.3.2). Jede in Frage kommende Phasenbelegung kann je einem dieser Verläufe eindeutig zugeordnet werden.

5.3.1 Die Phasenoppositions-klasse (POK)

Wie bereits im Kapitel über den Einfluss der Verdrillungsmethode beschrieben wurde, führt eine Modifikation der Phasenbelegung bei homogener Verdrillung zu einer proportionalen Veränderung aller Strombeträge in der Erdungsanlage um denselben Faktor. Entscheidend sind dabei die im genannten Kapitel erwähnten Phasenoppositionen, welche jeweils einer von 5 Phasenoppositions-klassen (POK) angehören (siehe Tabelle 8.1).

Abbildung 5.8 zeigt die höchsten (POK 1) und die niedrigsten (POK 5) erreichbaren Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme für das Standard-Parameterset. Erstere wurden mit $PB = 123\ 123$ erzielt, letztere mit $PB = 123\ 321$. Die berechneten Werte unterscheiden sich jeweils um mehr als das fünffache voneinander.

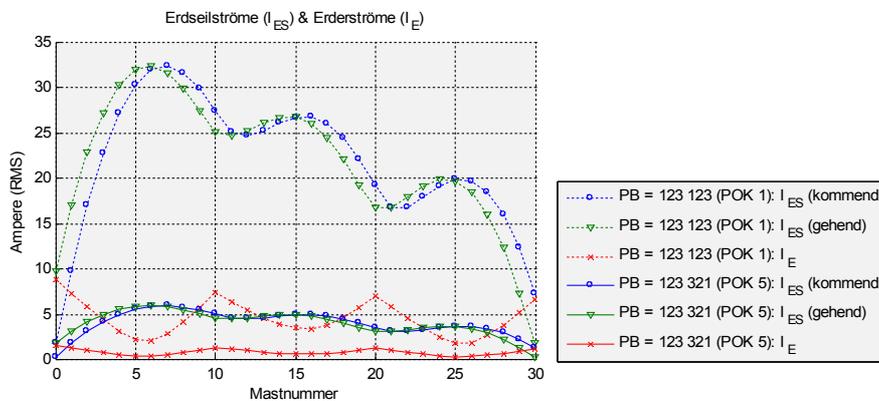


Abbildung 5.8: Gegenüberstellung von POK 1 und POK 5 (Betragsverläufe)

Die zu jedem der beiden Fälle dazugehörenden Ortskurven geben diese Betragsunterschiede ebenfalls wieder (siehe Abbildung 5.9). Je nach Phasenoppositions-klasse ist deren gemeinsame Lage (Winkelposition) in der komplexen Zahlenebene allerdings unterschiedlich, wobei alle Kurven aber immer um den jeweils gleichen Winkel gedreht werden.

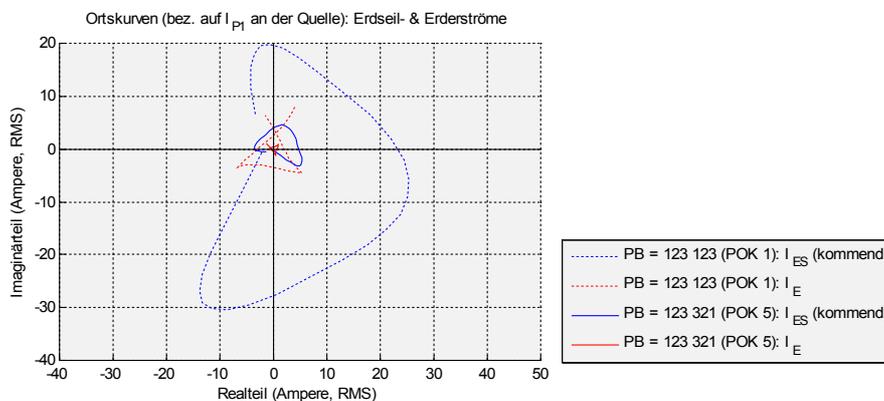


Abbildung 5.9: Gegenüberstellung von POK 1 und POK 5 (Ortskurven)

Die Ergebnisse von 2 der 6 möglichen Phasenoppositionen unterscheiden sich ausschließlich in dieser Verdrehung, sowie in der Tatsache, dass die Aufteilung der Lastströme auf beide Drehstromsysteme in exakt umgekehrter Weise erfolgt (vergleiche Abbildung 5.10 mit Abbildung 5.11). Die Beträge aller Ströme sind jedoch immer identisch zueinander. Aus diesem Grund sind diese beiden Phasenoppositionen als zur selben Phasenoppositionsklasse zugehörig definiert, wodurch es nur 5 statt 6 verschiedene solcher Klassen gibt.

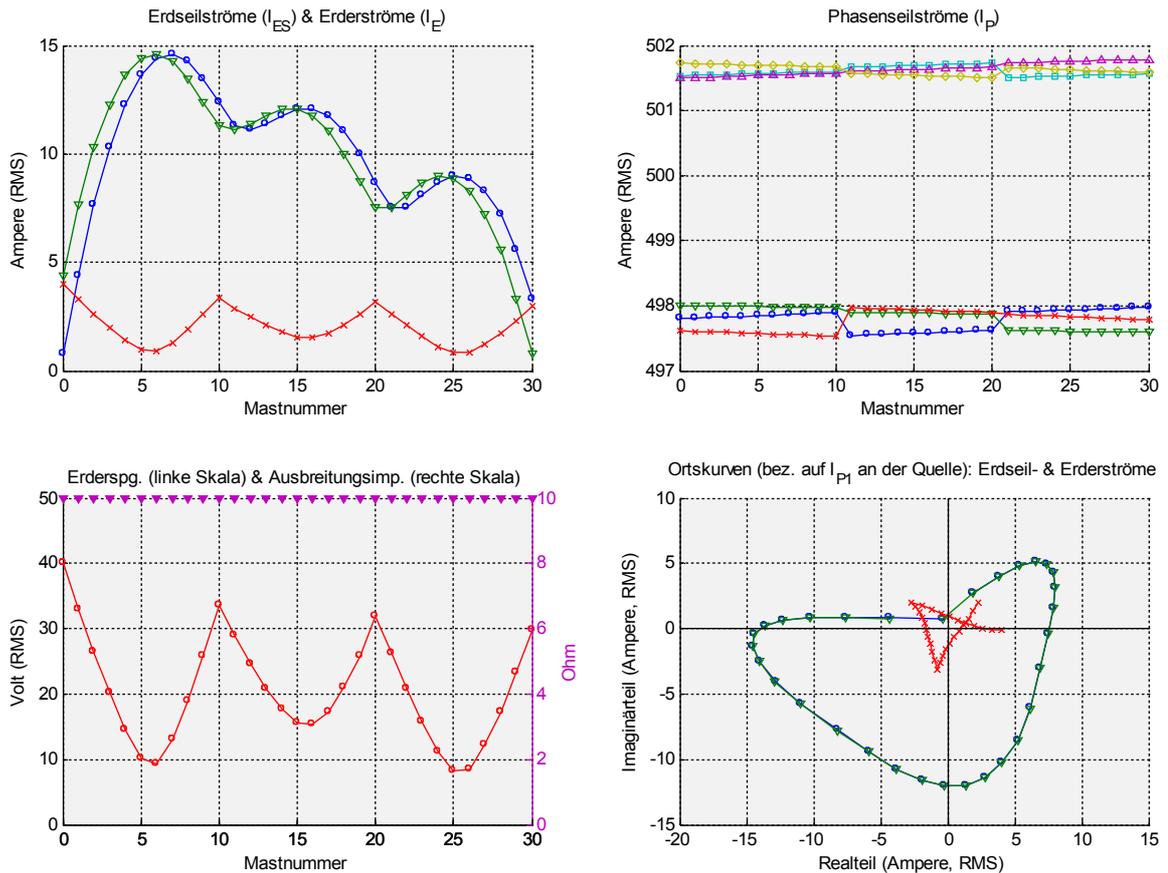


Abbildung 5.10: PB = 123 231 (POK 4; Legenden wie in Abbildung 4.19)

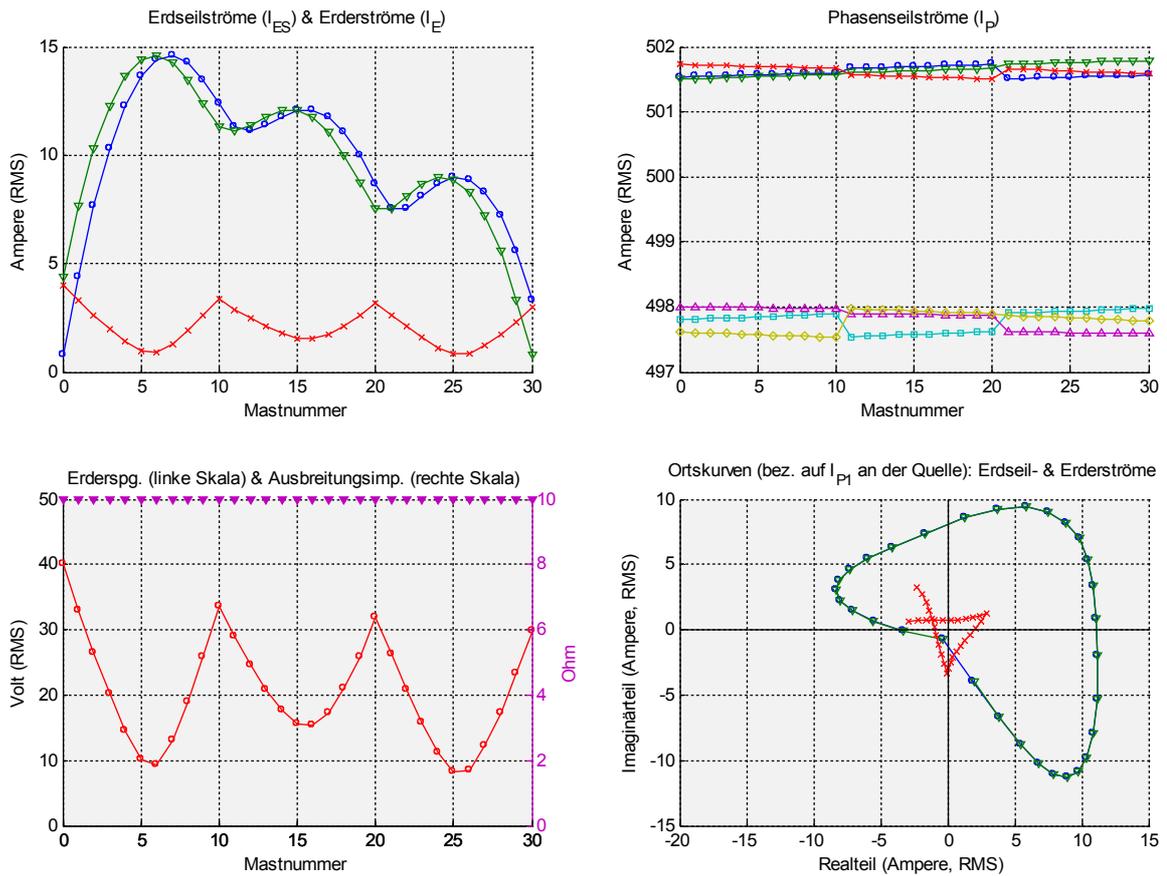


Abbildung 5.11: PB = 123 312 (POK 4; Legenden wie in Abbildung 4.19)

Im Zusammenhang mit den Phasenoppositionsklassen ist auch die Beeinflussung der Laststromaufteilung auf beide Systeme der Freileitung nennenswert. Bei Phasenbelegungen der POK 1 sind die Betragsverläufe der zueinander gehörenden Drehstromphasen beider Systeme exakt deckungsgleich (siehe Abbildung 5.12), der Laststrom verteilt sich somit zu je genau 50 % auf jedes System. In den anderen Klassen erfolgt die Aufteilung zu geringfügig ungleichen Teilen. Für das hier verwendete Standard-Parameterset tritt der größte Unterschied bei POK 4 auf (siehe Abbildungen 5.10 und 5.11).

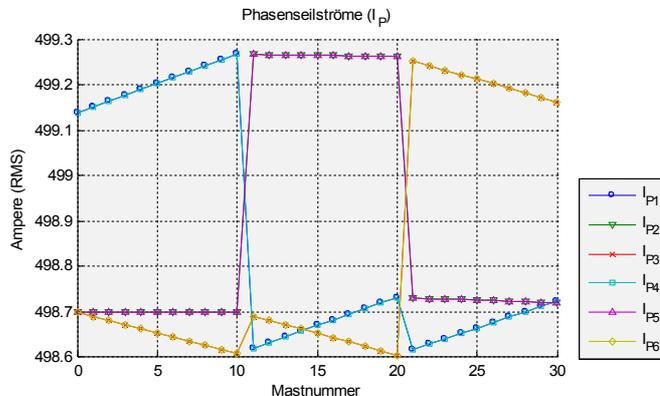


Abbildung 5.12: PB = 123 123 (POK 1)

5.3.2 Der Trend

Bei homogen verdrillten Freileitungen weist der Betragsverlauf der Erderströme in allen Phasenoppositionsklassen charakteristische Maxima an den Leitungsendpunkten und an den Positionen der Verdrillungsmasten auf (siehe Abbildungen 5.7, 5.8, 5.10 und 5.11). Die Betragsverläufe der Erdseilströme verhalten sich mit Maxima im mittleren Bereich jedes Leitungsabschnitts, sowie Minima an den Leitungsendpunkten und Verdrillungsmasten demgegenüber genau umgekehrt. In den genannten Abbildungen fällt auf, dass die Maxima der Erdseilströme in jedem Abschnitt unterschiedlich hoch sind. Die Verbindung der Maxima des ersten und des letzten Leitungsabschnitts durch eine gedankliche Gerade ergibt den Trend (fallend oder steigend), die zweite Kategorie nach der sich die einzelnen Phasenbelegungen einteilen lassen. Verschiedene Belegungen können derselben Phasenoppositionsklasse angehören, sich jedoch in ihrem Trend voneinander unterscheiden, wie der Vergleich von Abbildung 5.13 mit Abbildung 5.14 zeigt. Sofern Gl. 5.1 zutrifft, sind die 3 Betragsverläufe der Ströme in der Erdungsanlage jeweils an einer vertikal durch den Mittelpunkt der Freileitung gehenden Achse gespiegelt, sowie die Verläufe der kommenden und gehenden Erdseilströme vertauscht (siehe Gl. 5.2 bis 5.4). Die Beträge unterscheiden sich mit durchschnittlich 1.5 % und darunter nur sehr geringfügig von ihren Gegenstücken aus dem Ergebnis mit entgegengesetztem Trend. Auf die Ortskurven angewandt bedeutet die erwähnte Spiegelung einen Wechsel des Umlaufsinn. Eine je nach Phasenoppositionsklasse unterschiedliche Verdrehung derselben kann auch hier beobachtet werden. Die Ortskurve der Erderströme weist darüber hinaus jedoch noch eine zusätzliche Drehung um weitere 180 ° auf. Außerdem erfolgt die Aufteilung des Gesamt-Laststroms auf beide Systeme der Freileitung nun in umgekehrter Weise, die dazugehörigen Betragsverläufe ändern dabei allerdings ihre Form.

$$\forall i = 0, 1, \dots, n-1: R_{e,f}(Mast\ Nr.\ i) = R_{e,s}(Mast\ Nr.\ n-i-1) \quad (Gl.\ 5.1)$$

n Gesamtanzahl der Masten bzw. Erdungen (Masterdungen und UW-Erdungen)

$R_{e,f}$ Erdungswiderstände des Parametersets mit fallendem Trend

$R_{e,s}$ Erdungswiderstände des Parametersets mit steigendem Trend

$$\forall i = 0, 1, \dots, n-1: I_{ES(kommend),f}(Mast\ Nr.\ i) \approx I_{ES(gehend),s}(Mast\ Nr.\ n-i-1) \quad (Gl.\ 5.2)$$

$$\forall i = 0, 1, \dots, n-1: I_{ES(gehend),f}(Mast\ Nr.\ i) \approx I_{ES(kommend),s}(Mast\ Nr.\ n-i-1) \quad (Gl.\ 5.3)$$

$$\forall i = 0, 1, \dots, n-1: I_{E,f}(Mast\ Nr.\ i) \approx I_{E,s}(Mast\ Nr.\ n-i-1) \quad (Gl.\ 5.4)$$

n Gesamtanzahl der Masten bzw. Erdungen (Masterdungen und UW-Erdungen)

$I_{ES(kommend),f}$ Beträge der kommenden Erdseilströme des Parametersets mit fallendem Trend

$I_{ES(gehend),f}$ Beträge der gehenden Erdseilströme des Parametersets mit fallendem Trend

$I_{E,f}$ Beträge der Erderströme des Parametersets mit fallendem Trend

$I_{ES(kommend),s}$ Beträge der kommenden Erdseilströme des Parametersets mit steigendem Trend

$I_{ES(gehend),s}$ Beträge der gehenden Erdseilströme des Parametersets mit steigendem Trend

$I_{E,s}$ Beträge der Erderströme des Parametersets mit steigendem Trend

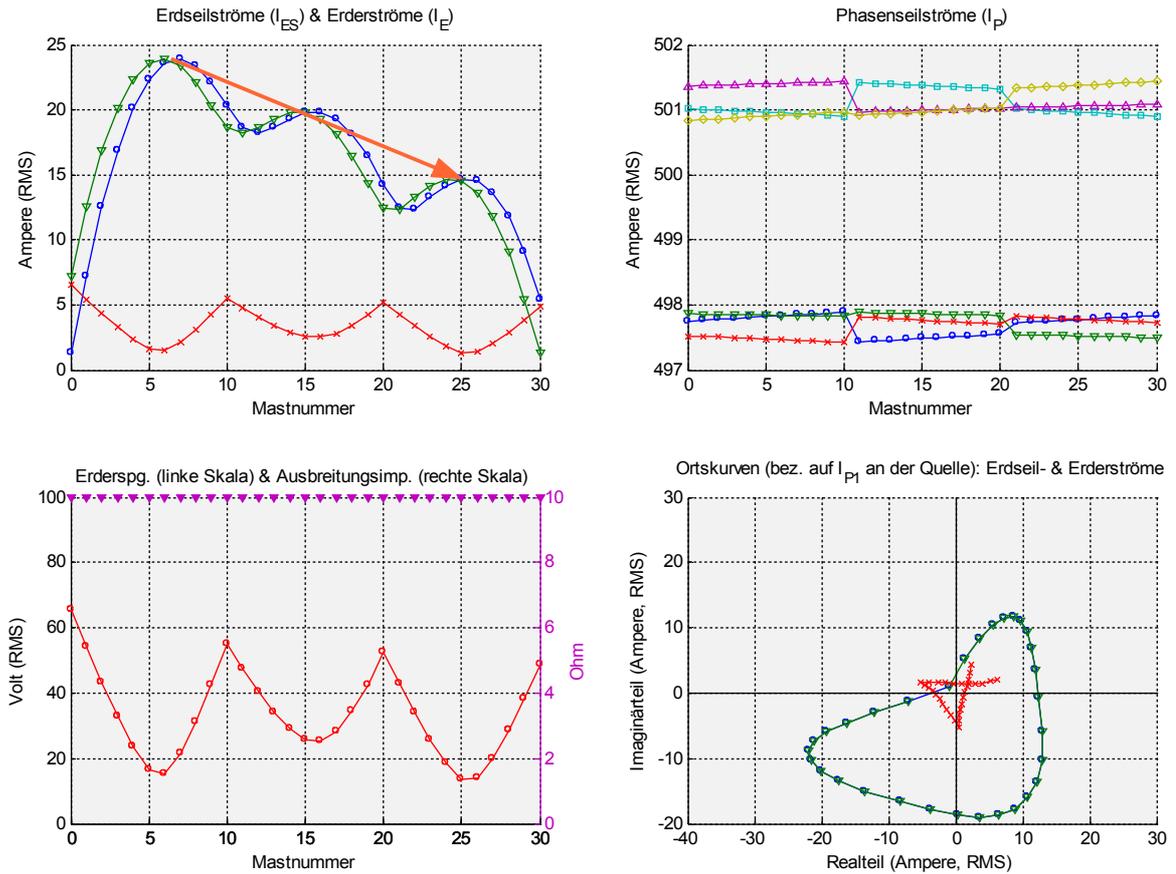


Abbildung 5.13: PB = 123 213 (POK 3; Trend als Pfeil eingezeichnet; Legenden wie in Abbildung 4.19)

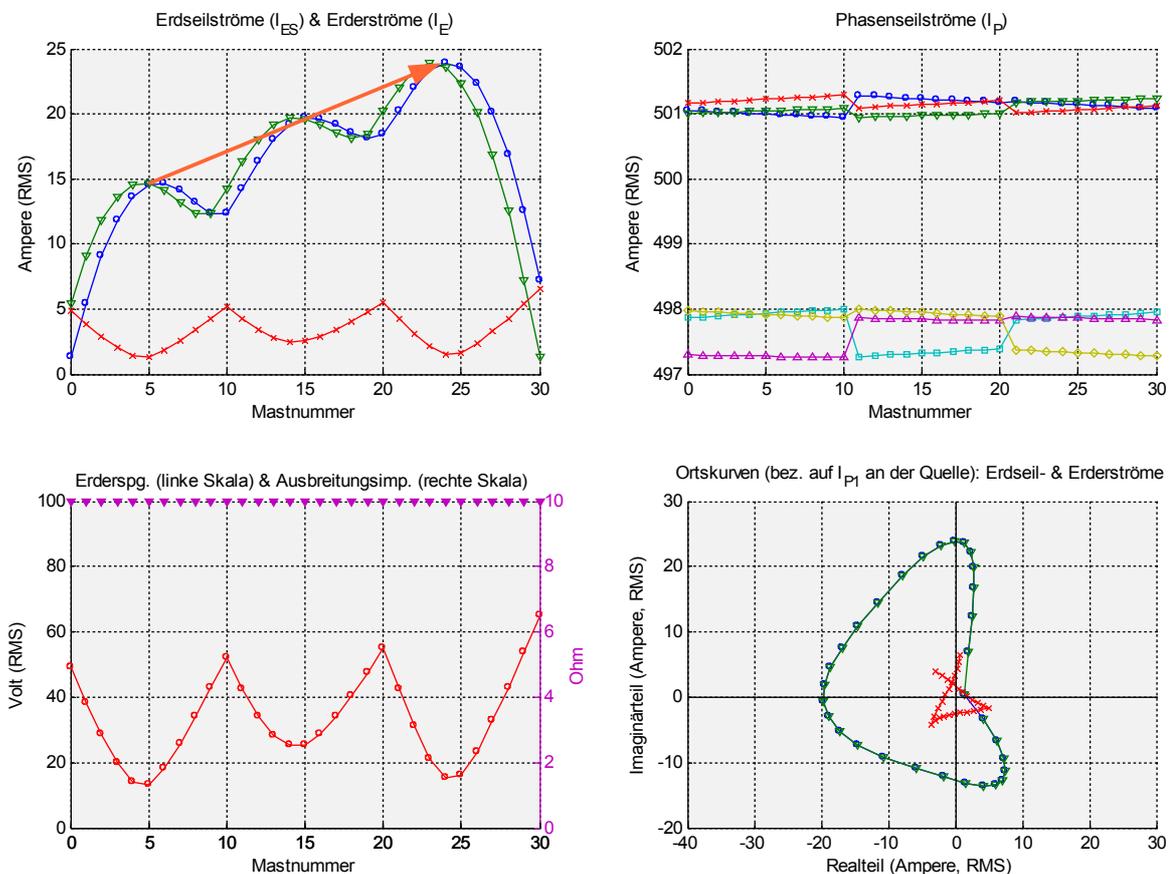


Abbildung 5.14: PB = 132 312 (POK 3; Trend als Pfeil eingezeichnet; Legenden wie in Abbildung 4.19)

Der Trend einer Phasenbelegung ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Umlaufrichtung der Verdrillung und Umlaufrichtung der elektrischen Phasen (siehe Abbildung 5.15). Sind diese 2 Richtungen gleichlaufend (linke Skizze), ist der Trend in Blickrichtung fallend, sind sie gegenläufig (mittlere Skizze), ist er in Blickrichtung steigend. Die Richtung des Lastflusses ist dabei nicht entscheidend. Sind die Umlaufrichtungen auf einer Masthälfte gleich- und auf der anderen gegenläufig (rechte Skizze), ist die Freileitung inhomogen verdrillt.

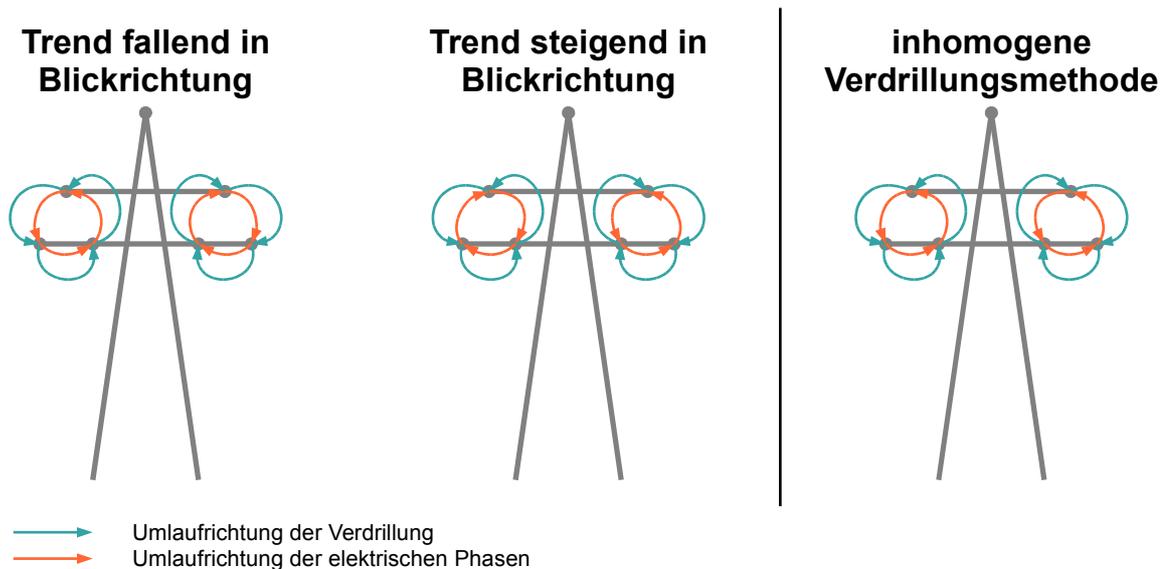


Abbildung 5.15: Herleitung des Trends aus den Umlaufrichtungen (Donaumast)

5.4 Einfluss der Betriebsart (SY)

Die Ergebnisse vom parallelen Betrieb beider Drehstromsysteme ($SY = 2Sys$) wurden in den vorherigen Kapiteln aufgrund der Wahl dieses Parameterwerts als Standardwert (siehe Kapitel 5.1) bereits implizit angeführt. In diesem Abschnitt werden nun die beiden anderen in Kapitel 4.4.1.3 definierten Werte dieses Parameters, $SY = 1SysOffen$ und $SY = 1SysKSErd$, behandelt. In beiden Fällen wird dabei immer eines der beiden Drehstromsysteme der Freileitung von Quelle und Last getrennt. Dadurch übernimmt das jeweils andere System den vollen Laststrom. Abhängig davon, wie das ausgeschaltete System behandelt wird, ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse.

5.4.1 Ausgeschaltetes System wird offen gelassen ($SY = 1SysOffen$)

Wird die Freileitung in der genannten Art betrieben, nehmen die Strombeträge in der Erdungsanlage immer nahezu die Werte der für das jeweilige Parameterset geltenden Phasenoppositionsklasse 1 an. Der Trend ändert sich dabei im Vergleich zu dem beim zweisystemigen Betrieb festgestellten Trend nicht. Beobachtet werden kann allerdings ein Einfluss des verwendeten Verdrillungsschemas (siehe Abbildung 5.2) auf das Ergebnis.

5.4.1.1 Verdrillungsschema 'gleich'

Bei Phasenbelegungen mit diesem Verdrillungsschema spielt es keine Rolle, welches der beiden Systeme ausgeschaltet wird. Es ergibt sich immer dasselbe Ergebnis. Die Beträge der resultierenden Ströme in der Erdungsanlage unterscheiden sich von den beim Betrieb beider Systeme erzielten Beträgen der Phasenoppositionsklasse 1 um nur ca. 0.2 %. Die 3 dazugehörigen Ortskurven sind ebenfalls praktisch identisch zu den sich bei POK 1 und zweisystemiger Betriebsart ergebenden Kurven. Je nachdem, welcher Phasenseilstrom jeweils als Bezugspunkt verwendet wird, herrscht dabei entweder Deckungsgleichheit oder eine Winkeldifferenz von genau 120 °.

Die Abbildungen 5.16 und 5.17 stellen die Ergebnisse des zweisystemigen und des einsystemigen Betriebs der Freileitung, jeweils bei $PB = 123\ 312$, gegenüber. Da es wie bereits erwähnt egal ist, ob die Phasenseile 1 bis 3 (linkes System aus Sicht von Mast Nr. 0) oder die Phasenseile 4 bis 6 (rechtes System aus Sicht von Mast Nr. 0) ausgeschaltet werden, sind die gezeigten Ergebnisse in beiden Fällen gültig. Zur Veranschaulichung der besprochenen nahezu vollständig gegebenen Identität zu den Werten der POK 1 beim zweisystemigen Betrieb, zeigt Abbildung 5.18 die Ergebnisse für dieselbe.

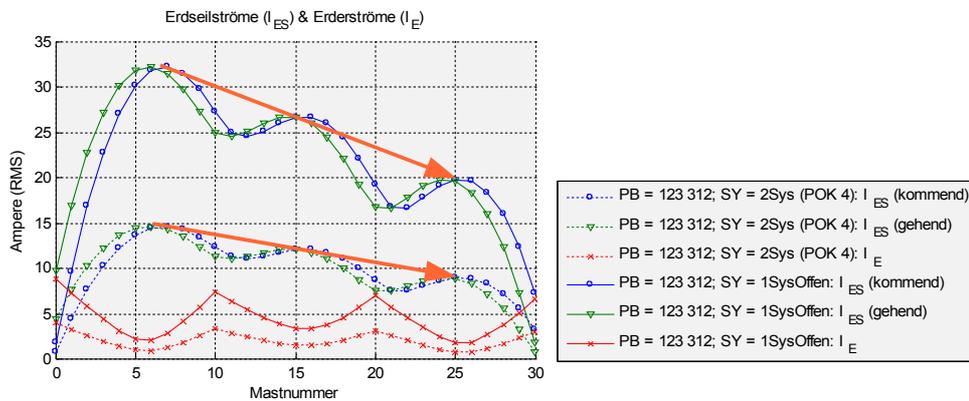


Abbildung 5.16: Gegenüberstellung von SY = 2Sys und SY = 1SysOffen (Betragsverläufe; Trends als Pfeile eingezeichnet)

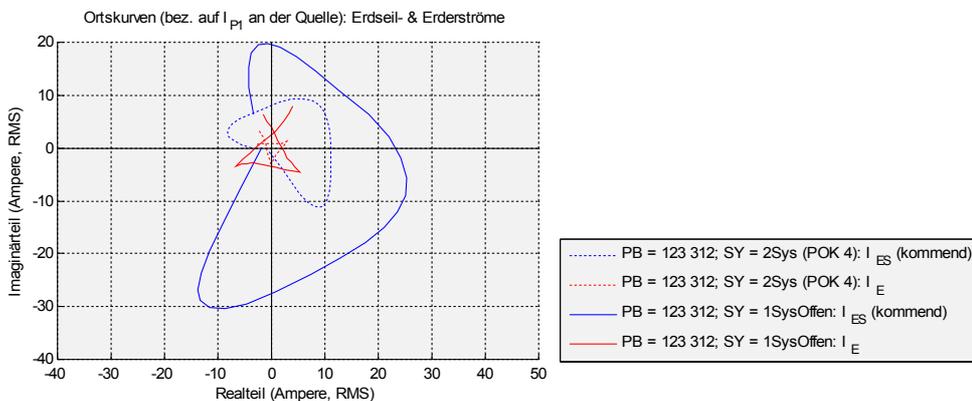


Abbildung 5.17: Gegenüberstellung von SY = 2Sys und SY = 1SysOffen (Ortskurven)

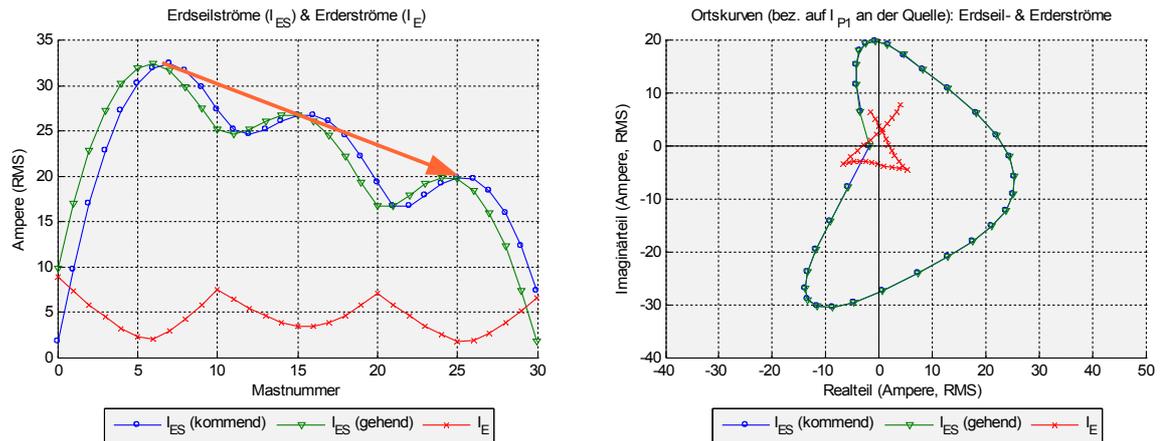


Abbildung 5.18: PB = 123 123; SY = 2Sys (POK 1; Trend als Pfeil eingezeichnet)

5.4.1.2 Verdrillungsschema 'entgegengesetzt'

Während es bei Konstellationen mit gleichem Verdrillungsschema keine Rolle im Ergebnis spielt, welches der beiden Systeme ausgeschaltet wird, ist dies bei Leitungen mit entgegengesetztem Verdrillungsschema relevant, vor allem für die sich ergebende Winkelposition der Ortskurven. Das Eingeschaltet-lassen jenes Systems, welches dieselbe Verdrillungsrichtung besitzt wie die beim Schema 'gleich' gewählte – in den hier vorliegenden Fällen also das linke (siehe Abbildung 5.2) – führt dabei zu denselben Ergebnissen wie im vorherigen Unterkapitel. Wird hingegen das andere System eingeschaltet gelassen, zeigen sich abweichende Ergebnisse in den Strömen der Erdungsanlage (vergleiche Abbildung 5.19 mit Abbildung 5.18). Die Beträge unterscheiden sich etwas stärker von denen der Phasenoppositionsklasse 1 beim zweisystemigen Betrieb, sind mit ca. 1.4 % Differenz jedoch immer noch sehr gut angenähert. Wesentlich stärker zeigt sich die Abhängigkeit hingegen bei den Ortskurven. Die Winkeldifferenz beträgt weder 0° noch 120° , wodurch keine Deckungsgleichheit besteht. Erfolgt der Vergleich hingegen mit dem gespiegelten und vertauschten Ergebnis der Phasenoppositionsklasse 1 bei gegenteiligem Trend (siehe Abbildung 5.20, bzw. Gl. 5.2 bis 5.4), sind die Beträge und Winkel wie im Fall des gleichen Verdrillungsschemas wieder praktisch identisch. Die zusätzliche Drehung der Ortskurve der Erderströme um 180° ist jedoch nicht vorhanden.

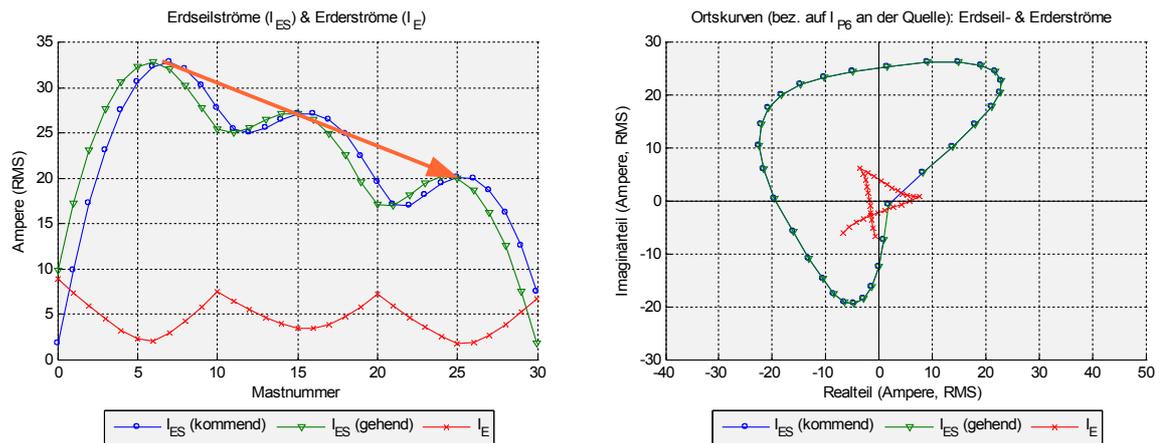


Abbildung 5.19: PB = 123 321; SY = 1SysOffen (linkes System ausgeschaltet; Trend als Pfeil eingezeichnet)

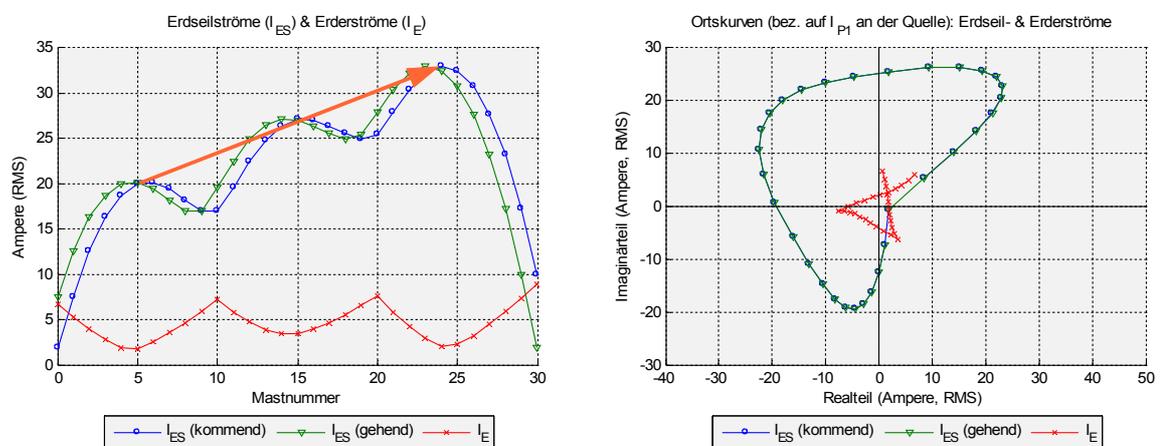


Abbildung 5.20: PB = 132 132; SY = 2Sys (POK 1; Trend als Pfeil eingezeichnet)

5.4.2 Ausgeschaltetes System wird kurzgeschl. und geerdet (SY = 1SysKSErd)

Bei dieser Betriebsart ändern sich, verglichen mit den Fällen 'SY = 2Sys' und 'SY = 1SysOffen', die Formen der Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme signifikant – es findet keine proportionale Veränderung statt (siehe Abbildungen 5.21 und 5.22). Der Trend bleibt jedoch unverändert und ist weiterhin erkennbar. Bezüglich der Auswirkungen von Schaltzustand und Verdrillungsschema auf das Ergebnis können dieselben Aussagen wie im Fall 'SY = 1SysOffen' getätigt werden. Bei gleichem Verdrillungsschema spielt es auch hier keine Rolle, welches der beiden Systeme von Quelle und Last getrennt und stattdessen kurzgeschlossen und geerdet wird. Die Ortskurven beider Fälle sind zueinander identisch. Bei entgegengesetztem Verdrillungsschema entscheidet hingegen abermals die Schaltungsvariante über die Winkelpositionen der Ortskurven.

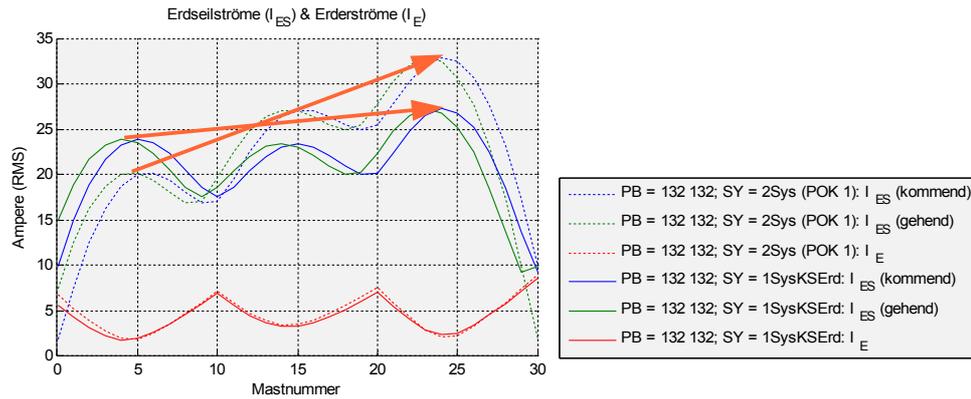


Abbildung 5.21: Gegenüberstellung von SY = 2Sys und SY = 1SysKSErd (Betragsverläufe; Trends als Pfeile eingezeichnet)

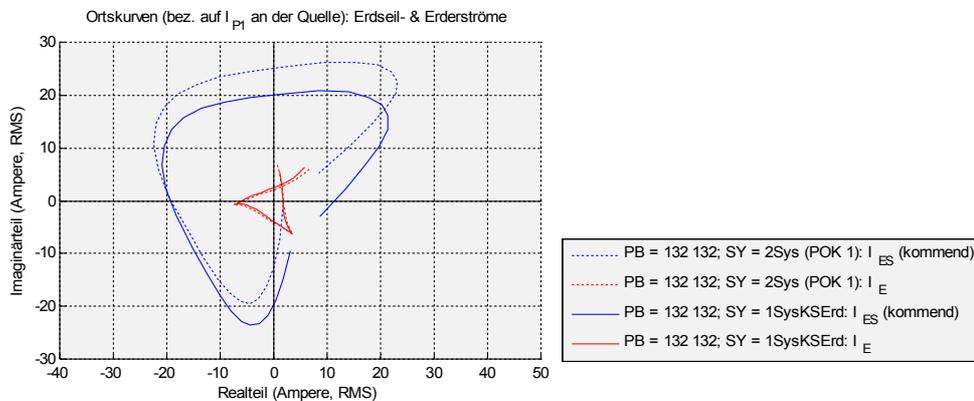


Abbildung 5.22: Gegenüberstellung von SY = 2Sys und SY = 1SysKSErd (Ortskurven)

Die Betrachtung der Ströme im kurzgeschlossenen und geerdeten System zeigt, dass jede elektrische Phase dieses Systems einen unterschiedlich hohen Strom führt, der über den gesamten Verlauf der Freileitung jeweils praktisch konstant bleibt (siehe Abbildung 5.23). Die in diesem Diagramm zu sehenden sprunghaften Änderungen resultieren, wie bereits in Kapitel 4.7 erwähnt, aus den an diesen Stellen befindlichen Verdrillungsmasten. Aufgrund der dort durchgeführten Vertauschungen übernimmt dann immer ein anderes Phasenseil den Strom der betrachteten elektrischen Phase. Das Verdrillungsschema übt auch hier einen Einfluss aus. Im Fall der bisher verwendeten Parametersets bewegen sich die Stromstärken im kurzgeschlossenen und geerdeten System bei Phasenbelegungen mit gleichem Verdrillungsschema im Bereich zwischen 64 A und 71 A, bei solchen mit entgegengesetztem Verdrillungsschema hingegen im Bereich zwischen 50 A und 57 A, jeweils bei einem Laststrom von 1000 A im weiterhin eingeschalteten System.

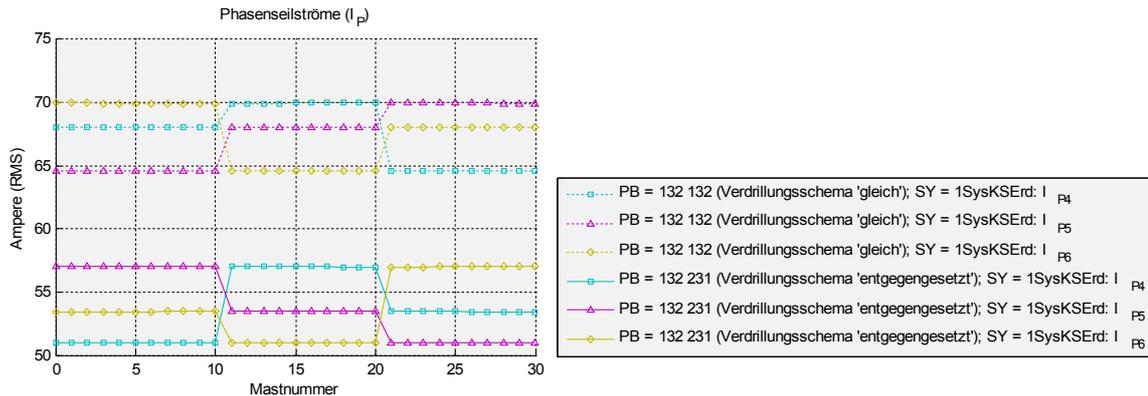


Abbildung 5.23: Gegenüberstellung der bei SY = 1SysKSErd im kurzgeschlossenen System fließenden Ströme bei Phasenbelegungen mit gleichem und entgegengesetztem Verdrillungsschema

5.5 Einfluss der Endpunktbehandlung (QL)

Durch das Entfernen der Erdungsverbindungen von Quelle und Last (QL = offen) sind die Beträge von kommendem Erdseilstrom an Mast Nr. 0 und gehendem Erdseilstrom an Mast Nr. 30 immer Null (siehe Abbildung 5.24), allerdings nur sofern $SY \neq 1\text{SysKSErd}$ ist. Dies bewirkt gegenüber dem Fall 'QL = erd' ein Absinken der Erdseilströme im ersten und letzten Abschnitt der Freileitung um bis zu ca. 5 % bei Erdungswiderständen von 10Ω an jedem Mast. Bei kleineren Werten von RM und RU verringern sich diese Abweichungen und betragen bei 1Ω beispielsweise nur mehr weniger als 0.5 %. Im mittleren Abschnitt der Freileitung kann hingegen ein Ansteigen der Erdseilströme beobachtet werden. Die Abweichungen der Beträge gegenüber dem Fall 'QL = erd' betragen hier bis ca. 3 % bei 10Ω und bis ca. 0.7 % bei 1Ω Erdungswiderstand an jedem Mast.

Die Erderströme zeigen in den meisten Fällen ein konträres Verhalten im ungefähr gleichen Wertebereich, d.h. sie steigen wenn die Erdseilströme sinken, und sinken wenn die Erdseilströme steigen. In der Mitte der Freileitung, im untersuchten Modell ist dies Mast Nr. 15, gehen diese Abweichungen jedoch gegen Null.

Die Ortskurven der Erdseilströme verschieben sich in der komplexen Zahlenebene derart, dass die Punkte von I_{ES} (kommend) an Mast Nr. 0 und I_{ES} (gehend) an Mast Nr. 30 im Nullpunkt zu liegen kommen (siehe Abbildung 5.25; die Kurve von I_{ES} (gehend) wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit aus dem Diagramm entfernt). Die Winkel der übrigen Punkte bleiben in den meisten Fällen nahezu unverändert, lediglich bei höheren Erdungswiderständen zeigen sich geringfügige Abweichungen in den Endbereichen der Leitung.

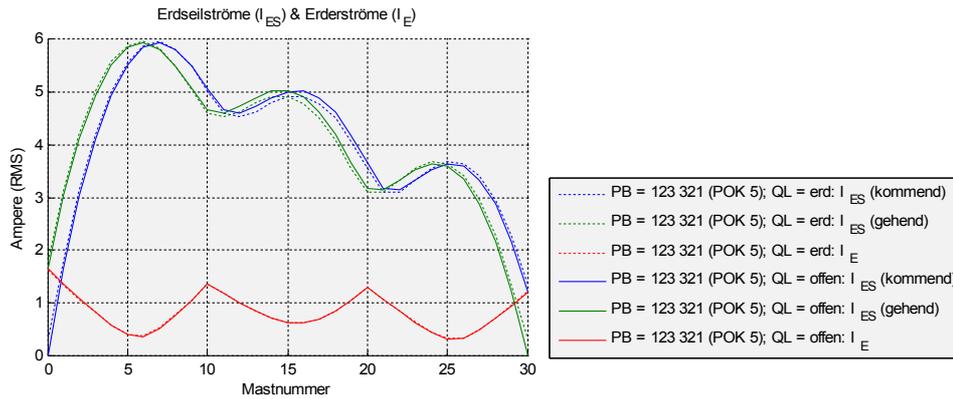


Abbildung 5.24: Gegenüberstellung von QL = erd und QL = offen (Betragsverläufe)

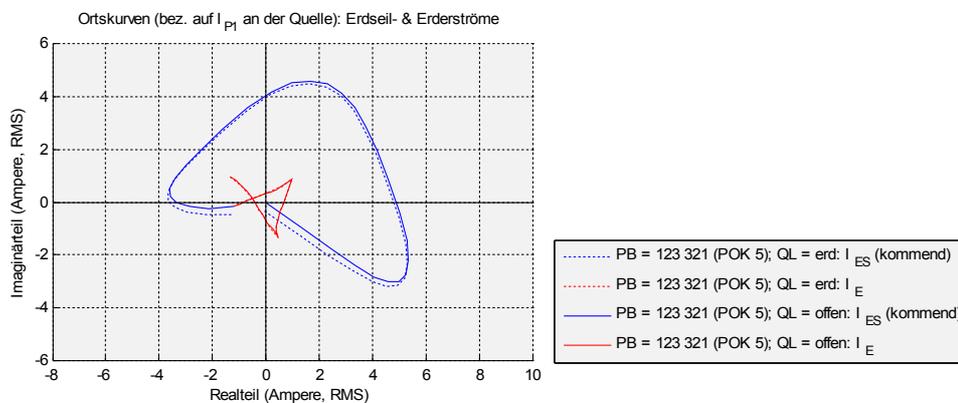


Abbildung 5.25: Gegenüberstellung von QL = erd und QL = offen (Ortskurven)

5.6 Einfluss des Mastkopfbilds (MG)

Das Modifizieren des Mastkopfbilds (Tonne, Donau, Einebene; siehe Abbildung 4.16 bzw. Kapitel 8.2), d.h. der räumlichen Anordnung der Leiterseile, führt aus elektromagnetischer Sicht zu einer Veränderung der 3 Koppelmatrizen (resistiv, induktiv, kapazitiv), welche das elektrische Verhalten der Spannungsfelder charakterisieren. Eine solche Variation wirkt sich im Simulationsergebnis insbesondere auf die Ströme in der Erdungsanlage aus. Gleich wie beim Modifizieren der Phasenbelegung geschieht die Veränderung der dort berechneten Beträge aber auch hier nur im quantitativen Sinn (proportionale Veränderung). Ebenso verändern die dazugehörigen Ortskurven ihre Form nicht, sondern sind erneut lediglich um den jeweils gleichen Winkel gegenüber den Kurven anderer Mastkopfbilder verdreht. Die in den bisherigen Kapiteln getätigten allgemeinen Aussagen besitzen weiterhin ihre Gültigkeit. So lassen sich etwa die Phasenbelegungen nach wie vor in 5 Phasenoppositionsklassen und 2 Trends unterteilen, etc.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die hohe Schwankungsbreite der Beträge der resultierenden Erdseil- und Erderströme, wie die folgenden Abbildungen zeigen. Innerhalb der Phasenoppositionsklasse 1 – also jener Klasse deren Phasenbelegungen hier in den

größtmöglichen Werten resultieren (siehe Kapitel 5.3.1) – hat beispielsweise die alleinige Veränderung des Mastkopfbilds von 'Tonne' auf 'Donau' bereits eine Reduktion der Ströme um mehr als die Hälfte zur Folge (siehe Abbildungen 5.26 und 5.27).

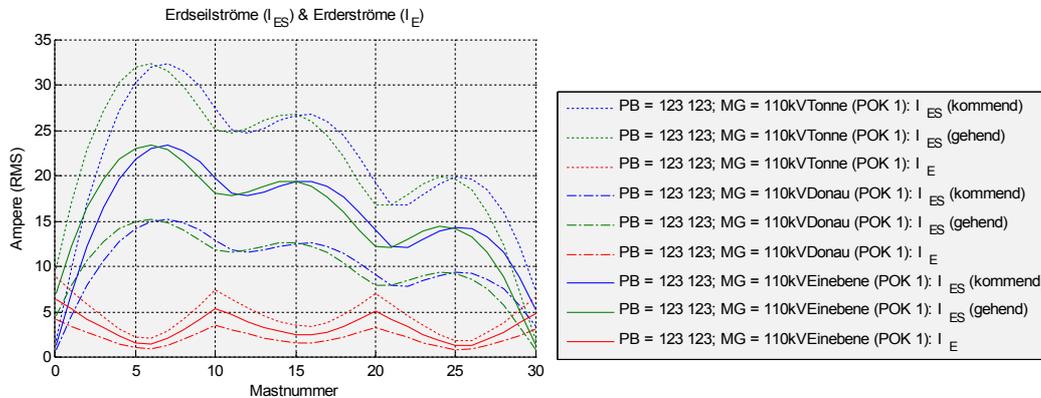


Abbildung 5.26: Gegenüberstellung verschiedener Mastkopfbilder bei POK 1 (Betragsverläufe)

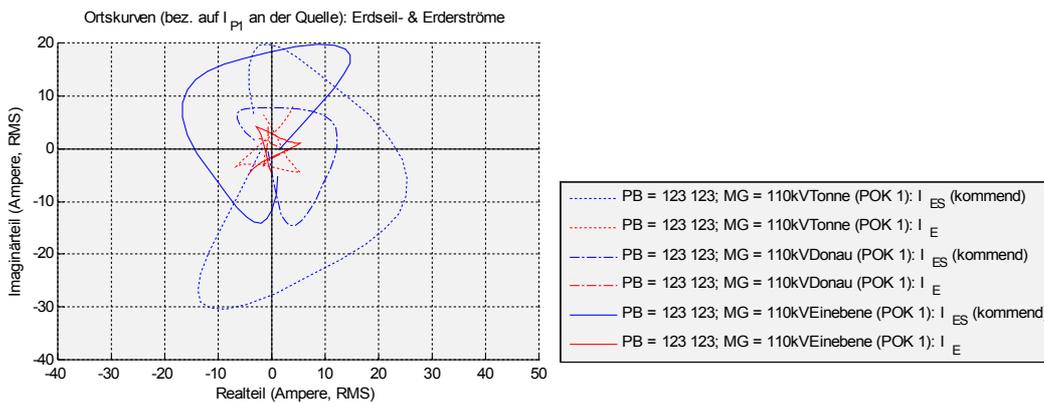


Abbildung 5.27: Gegenüberstellung verschiedener Mastkopfbilder bei POK 1 (Ortskurven)

Eine noch stärkere Schwankung weisen die Ergebnisse der Phasenoppositionsklasse 5 auf – jener Klasse gemäß Definition, deren Phasenbelegungen die kleinstmöglichen Erdseil- und Erderströme im Vergleich zu allen anderen Klassen hervorrufen. Die Werte des Mastkopfbilds 'Einebene' betragen beinahe nur ein Sechstel der Werte die bei Verwendung des Mastkopfbilds 'Tonne' berechnet wurden (siehe Abbildungen 5.28 und 5.29).

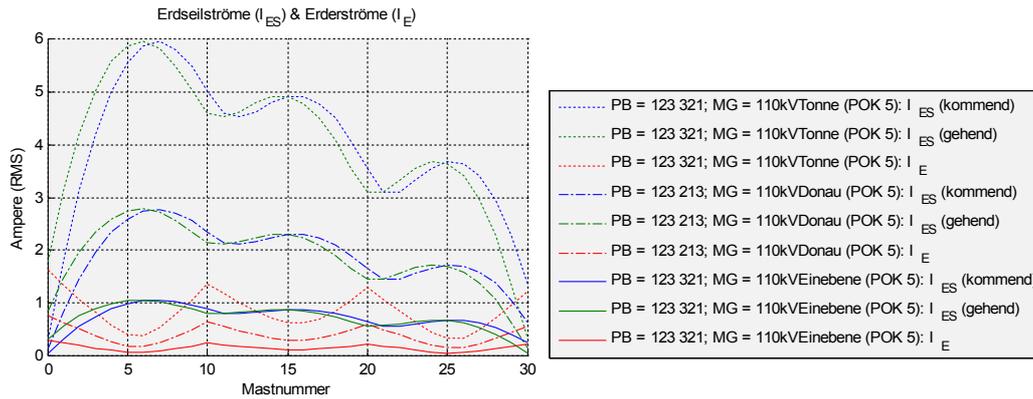


Abbildung 5.28: Gegenüberstellung verschiedener Mastkopfbilder bei POK 5 (Betragsverläufe)

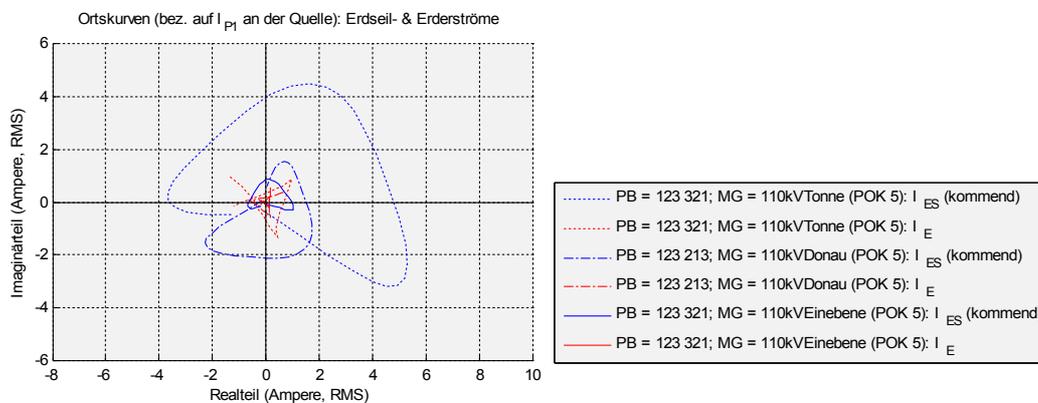


Abbildung 5.29: Gegenüberstellung verschiedener Mastkopfbilder bei POK 5 (Ortskurven)

5.7 Einfluss der Masthöhe (MH)

Abhängig vom verwendeten Mastkopfbild wirkt sich eine Variation der Masthöhe um den jeweils selben Wert unterschiedlich stark aus.

Beim Tonnenmast ist der Einfluss von MH eher gering. Eine Erhöhung aller Masten, beispielsweise um 9 m, bewirkt je nach Phasenoppositionsklasse einen Anstieg der Ströme in der Erdungsanlage um 2 % bis 3,5 %, verglichen mit den Werten bei Nennhöhe. Diese Aussage gilt jedoch nicht für die Phasenoppositionsklasse 5. Wird die Masthöhe bei Phasenbelegungen dieser Klasse vergrößert, kann stattdessen ein Absinken der Ströme im Umfang des genannten Prozentbereichs festgestellt werden. Der Vergleich der Ortskurven zeigt hingegen in allen Klassen praktisch keine Veränderungen in den Winkeln.

Die Variation der Masthöhe bei Verwendung des Mastkopfbilds 'Donau' hat stärkere Auswirkungen. Eine Vergrößerung um 9 m resultiert hier je nach Phasenoppositionsklasse in einem Ansteigen der Ströme in der Erdungsanlage gegenüber den Beträgen bei Nennhöhe im Bereich zwischen 10 % und 15 %. Ergebnisse von Phasenbelegungen der Klasse 5 stellen aufgrund ihres gegenteiligen Verhaltens (Stromabfall statt Stromanstieg) auch hier wieder eine Ausnahme dar. Bei den Ortskurven ist die Winkelgleichheit nicht mehr so stark

gegeben wie im Fall der Verwendung von Tonnenmasten. Es treten hier Differenzen zwischen 1° und knapp über 3° auf.

Kaum merklich sind die Veränderungen in den Strömen der Erdungsanlage beim Einebenenmast. Bei einer Veränderung der Masthöhe um plus 9 m sinken die Ströme hier, jedoch lediglich um 0.3 % bis 0.6 %. Bei den Ortskurven bleiben die Winkel der einzelnen Punkte unverändert. Die Ströme sinken in der Phasenoppositionsklasse 5 ebenfalls, tun dies jedoch mit ca. 1.7 % gegenüber Nennhöhe stärker als in den übrigen Klassen. Dabei erfolgt eine Drehung der Punkte um knapp über 1° .

Die Werte der Erdungswiderstände spielen bei allen 3 untersuchten Mastkopfbildern keine Rolle im Zusammenhang mit einer Veränderung der Masthöhe. Es ergeben sich auch mit Modifikationen an diesen Parametern weiterhin praktisch dieselben Abweichungen wie angegeben.

5.8 Einfluss der Erdseildistanz (ES)

Das Verändern des Abstands zwischen den Phasenseilen und dem Erdseil zeigt sich, ähnlich wie beim Verändern der Masthöhe (Abstand zwischen allen Leiterseilen und dem Boden), bei jedem Mastkopfbild auf verschieden starke Art und Weise im Ergebnis. Resultate von Phasenbelegungen der Phasenoppositionsklasse 5 unterscheiden sich auch hier wieder deutlich von den Resultaten der übrigen 4 Klassen. Die Werte der Erdungswiderstände sind in allen Fällen abermals nicht entscheidend für die sich ergebenden prozentualen Abweichungen. Im Folgenden werden immer die Auswirkungen auf die Ströme in der Erdungsanlage bei einer Vergrößerung der Erdseildistanz um 4 m beschrieben, d.h. es werden die Fälle 'MH = normal' und 'MH = normal-ESplus04m' miteinander verglichen.

Beim Tonnenmast führt die genannte Modifikation in den Phasenoppositionsklassen 1 bis 4 zu einem Abfall der Strombeträge in der Erdungsanlage um ca. 28 %. Die Ortskurven werden dabei um ca. 2° gedreht. In der Phasenoppositionsklasse 5 ergibt sich ein Betragsabfall um ca. 36 % und praktisch keine Verdrehung der Ortskurven.

Beim Donaumast äußert sich die Erhöhung des Abstands zwischen den Phasenseilen und dem Erdseil in den Klassen 1, 2 und 4 in einer Verringerung der Erdseil- und Erderströme um ca. 22 %, in der Klasse 3 in einer Verringerung um ca. 29 %. Auf der komplexen Ebene (Ortskurven) werden alle Punkte dabei je nach Klasse um einen Winkel zwischen 1° und 7° gedreht. In der Phasenoppositionsklasse 5 erfolgt hingegen eine Erhöhung der genannten Ströme um ca. 11 %. Eine Drehung der Punkte findet dabei nicht statt.

Bei der Verwendung von Einebenenmasten resultiert die Variation der Erdseildistanz in den höchsten Veränderungen der Erdseil- und Erderströme verglichen mit den anderen beiden in dieser Arbeit untersuchten Mastkopfbildern. Es treten hier je nach Phasenoppositionsklasse Betragsverminderungen zwischen 42 % und 48 %, sowie Winkeldifferenzen zwischen 1° und 4° auf. Interessant sind die Auswirkungen in der Phasenoppositionsklasse 5. Die Betragsverminderung beträgt hier ca. 39 %. Dabei werden die Ortskurven allerdings um ca. 124° gedreht, trotz unveränderter Wahl des Bezugspunkts (Grundschiwingung von I_{P1} an der Quelle, d.h. an Mast Nr. 0; siehe auch Kapitel 4.7).

5.9 Einfluss des spezifischen Bodenwiderstands (RB)

Die Ströme in der Erdungsanlage der Freileitung sinken, wenn der spezifische Bodenwiderstand erhöht wird, und steigen, wenn er verringert wird. Die dazugehörigen Ortskurven erfahren dabei eine geringe Verdrehung. Die Höhe der Betragsänderung wird darüber hinaus auch vom verwendeten Mastkopfbild, den Werten der Erdungswiderstände, sowie der Phasenoppositionsklasse mitbestimmt, wie den Tabellen 5.2 bis 5.4 entnommen werden kann. Bei dem in Tabelle 5.2 in der Zeile für $RB = 10 \Omega\text{m}$ befindlichen negativen Wert handelt es sich um keinen Schreibfehler. Die Ströme sinken hier tatsächlich.

RB	MG = 110kVTonne; MH = normal			
	RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω		RM = 10 Ω ; RU = 10 Ω	
	POK 1 bis 4	POK 5	POK 1 bis 4	POK 5
10 Ωm	+ 11 %	+ 3 %	+ 6 %	- 1.3 %
50 Ωm	+ 3 %	+ 2 %	+ 2 %	+ 0.6 %
100 Ωm	± 0 %	± 0 %	± 0 %	± 0 %
200 Ωm	- 3 %	- 2 %	- 1 %	- 0.6 %
500 Ωm	- 6 %	- 5 %	- 3 %	- 1.5 %
1000 Ωm	- 8 %	- 6 %	- 4 %	- 2.1 %
2000 Ωm	- 11 %	- 8 %	- 5 %	- 2.8 %

Tabelle 5.2: Veränderung der Ströme in der Erdungsanlage im Vergleich zum Fall 'RB = 100 Ωm ' (Tonnenmast)

RB	MG = 110kVDonau; MH = normal					
	RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω			RM = 10 Ω ; RU = 10 Ω		
	POK 1, 2, 4	POK 3	POK 5	POK 1, 2, 4	POK 3	POK 5
10 Ωm	+ 12 %	+ 8 %	+ 30 %	+ 7 %	+ 2.6 %	+ 24 %
50 Ωm	+ 3 %	+ 2 %	+ 8 %	+ 2 %	+ 0.3 %	+ 7 %
100 Ωm	± 0 %	± 0 %	± 0 %	± 0 %	± 0 %	± 0 %
200 Ωm	- 3 %	- 2 %	- 7 %	- 1 %	- 0.2 %	- 6 %
500 Ωm	- 6 %	- 4 %	- 15 %	- 3 %	- 0.4 %	- 13 %
1000 Ωm	- 8 %	- 5 %	- 21 %	- 4 %	- 0.6 %	- 17 %
2000 Ωm	- 10 %	- 6 %	- 25 %	- 5 %	- 0.9 %	- 21 %

Tabelle 5.3: Veränderung der Ströme in der Erdungsanlage im Vergleich zum Fall 'RB = 100 Ωm ' (Donaumast)

RB	MG = 110kV Ebene; MH = normal			
	RM = 1 Ω; RU = 1 Ω		RM = 10 Ω; RU = 10 Ω	
	POK 1 bis 4	POK 5	POK 1 bis 4	POK 5
10 Ωm	+ 8 %	+ 10 %	+ 3 %	+ 5 %
50 Ωm	+ 2 %	+ 3 %	+ 1 %	+ 2 %
100 Ωm	± 0 %	± 0 %	± 0 %	± 0 %
200 Ωm	- 2 %	- 3 %	- 1 %	- 2 %
500 Ωm	- 5 %	- 6 %	- 2 %	- 3 %
1000 Ωm	- 7 %	- 9 %	- 3 %	- 5 %
2000 Ωm	- 9 %	- 11 %	- 4 %	- 6 %

Tabelle 5.4: Veränderung der Ströme in der Erdungsanlage im Vergleich zum Fall 'RB = 100 Ωm' (Einebenenmast)

5.10 Einfluss der Betriebsspannung (UB)

So wie alle anderen Parameter wurde auch UB vollkommen diskret betrachtet, indem durch entsprechende Anpassung der 3 Lastwiderstände im Modell der Gesamt-Laststrom IB immer konstant gehalten wurde.

Eine Erhöhung der Betriebsspannung hat bei allen untersuchten Mastkopfbildern praktisch nur Auswirkungen auf die Sternpunktströme von Quelle und Last. Verglichen mit deren Werten bei der sonst verwendeten Betriebsspannung $UB = 110 \text{ kV}$, sinken diese bei $UB = 230 \text{ kV}$ um ca. 50 %, bei $UB = 400 \text{ kV}$ um ca. 71 %. Bei Phasenbelegungen der Phasenoppositionsklasse 5 sind diese Verminderungen mit bis zu 59 % bei $UB = 230 \text{ kV}$, bzw. bis zu 82 % bei $UB = 400 \text{ kV}$ noch etwas höher. Sonst ändern sich die Ströme im Rest der Erdungsanlage wie erwähnt jedoch kaum. Die Abweichungen betragen hier nur zwischen 1 % und 3 %, bei $UB = 230 \text{ kV}$ und $RM = RU = 1 \Omega$ meist unter 0.5 %.

Bei den Ortskurven sind praktisch keine Drehungen von Punkten feststellbar, lediglich bei hohen Erdungswiderständen zeigen sich leichte Differenzen in den Leitungsendbereichen.

5.11 Einfluss der Erdungswiderstände (RM, RU)

Wie in Kapitel 4.4.3.3 beschrieben, wurde mit der Einführung des Parameters 'RU' die Möglichkeit vorgesehen, den Masten an beiden Endpunkten der Freileitung (Mast Nr. 0 und Mast Nr. 30) gesonderte Werte für deren Erdungswiderstand zuzuweisen. Daher wurden bei der Untersuchung der Auswirkungen dieser Widerstände auf die elektrische Beeinflussung der Erdungsanlage 2 verschiedene Fälle angenommen.

5.11.1 Fall 1: RM = RU

Bei kleinen Werten von RM und RU sind die Formen der Betragsverläufe in jedem der 3 Leitungsabschnitte stark aneinander angeglichen (siehe Abbildung 5.30). Die Erdseilströme sind im mittleren Bereich jedes Abschnitts jeweils am größten, an den Verdrillungsmasten und den Leitungsendpunkten jeweils am kleinsten. Die Erderströme verhalten sich mit

Maximalwerten an den Verdrillungsmasten und Leitungsendpunkten, sowie Minimalwerten in der Mitte jedes Abschnitts demgegenüber genau umgekehrt.

Werden die Erdungswiderstände an allen Masten erhöht, kann neben einem generellen Absinken aller Ströme in der Erdungsanlage auch eine starke qualitative Veränderung der Ströme im Erdseil beobachtet werden. Die Maximalbeträge in den 3 Leitungsabschnitten differieren mehr und mehr voneinander, wodurch der für die betreffende Schaltung zutreffende Trend immer stärker in Erscheinung tritt (siehe Abbildungen 5.31 und 5.32). Gleichzeitig nähern sich die Maxima innerhalb jedes Abschnitts und die Minima an den Verdrillungsmasten betragsmäßig immer stärker aneinander an.

Bei weiterer Erhöhung von RM und RU konzentrieren sich die Erdseilströme zunehmend im Zentrum der Freileitung, d.h. im mittleren Leitungsabschnitt, während die Maxima der beiden anderen Abschnitte mehr und mehr verschleifen (siehe Abbildungen 5.33 und 5.34). Der Trend ist gemäß der in Kapitel 5.3.2 getroffenen Definition jedoch weiterhin ablesbar und ändert sich nicht.

Die Ortskurven sind, wie die Betragsverläufe, ebenfalls starken Änderungen unterworfen. Bei kleinen Werten von RM und RU haben sie ein eher spitzes Aussehen und insbesondere die Positionen der Strommaxima sind sehr gut zu erkennen. Mit steigenden Erdungswiderständen wird die Form der Erdseilstromkurven zunehmend bauchiger, während sich die Form der Erderstromkurve der eines Dreiecks annähert. Des weiteren erfährt jeder einzelne Punkt auf den Ortskurven neben der Änderung seines Betrags auch eine unterschiedlich starke Änderung seines Winkels gegenüber den anderen Punkten.

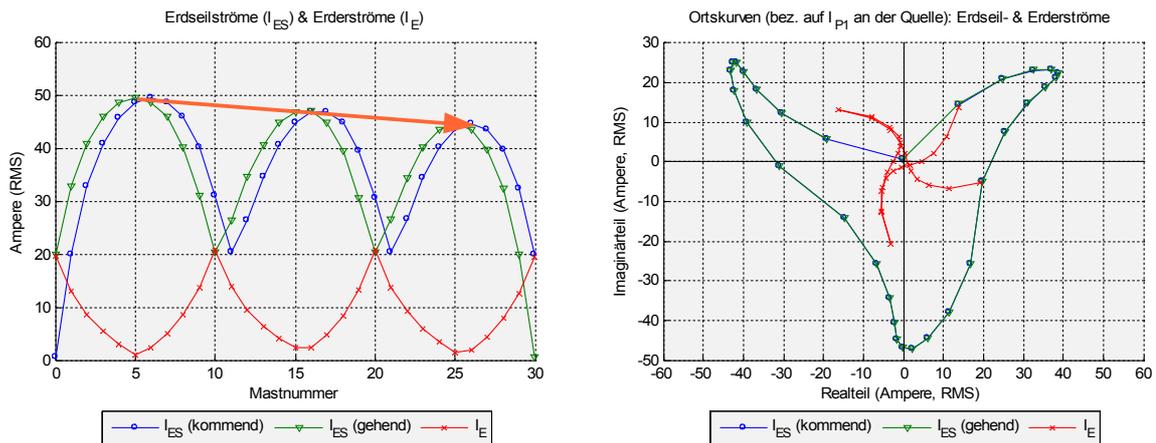


Abbildung 5.30: PB = 123 213; RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

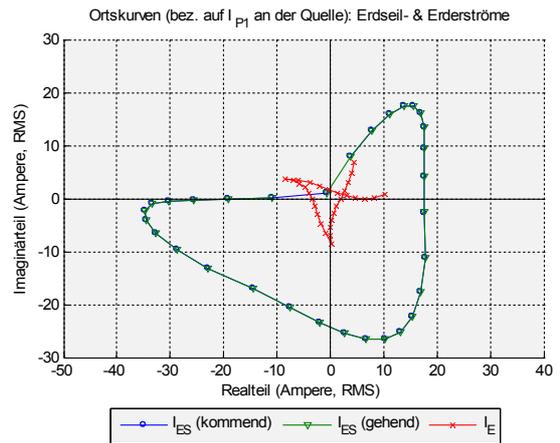
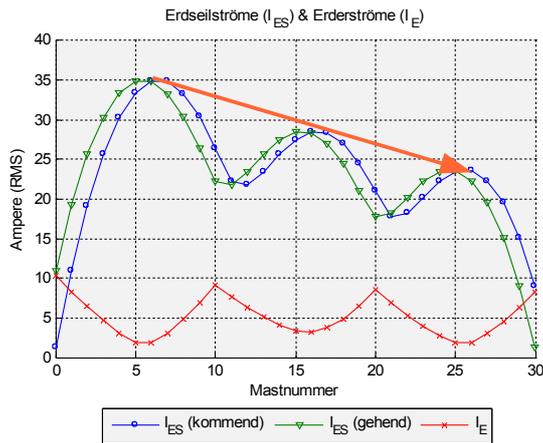


Abbildung 5.31: PB = 123 213; RM = 5 Ω ; RU = 5 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

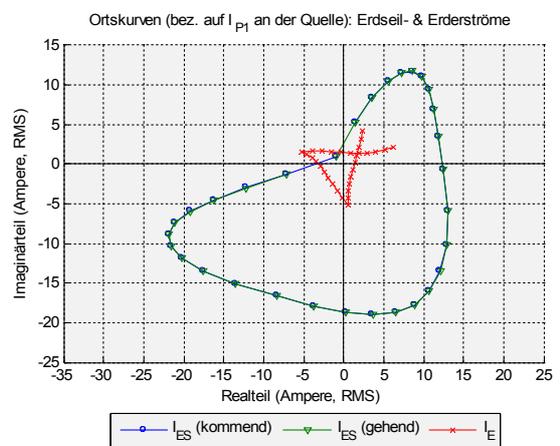
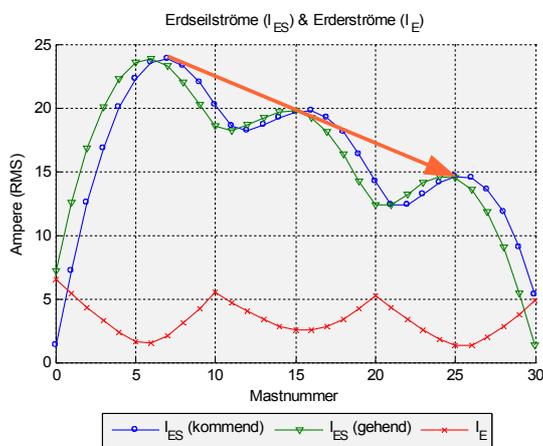


Abbildung 5.32: PB = 123 213; RM = 10 Ω ; RU = 10 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

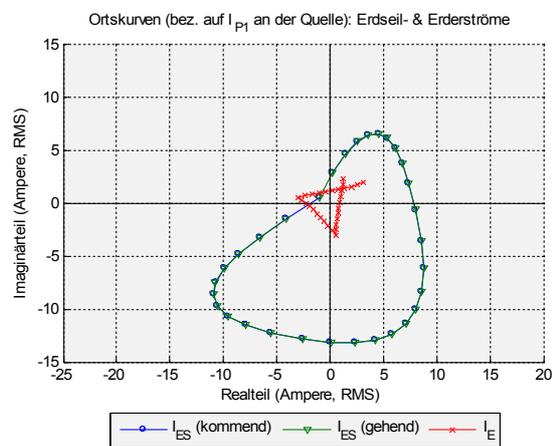
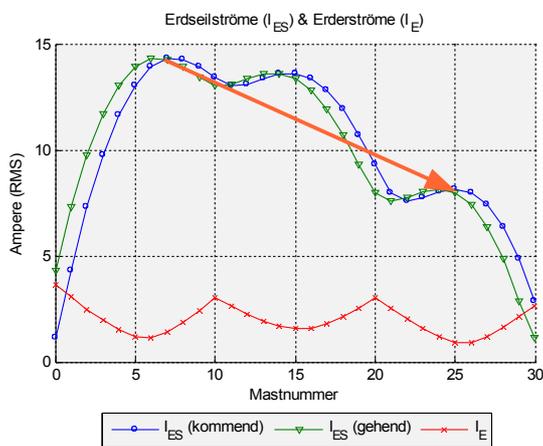


Abbildung 5.33: PB = 123 213; RM = 20 Ω ; RU = 20 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

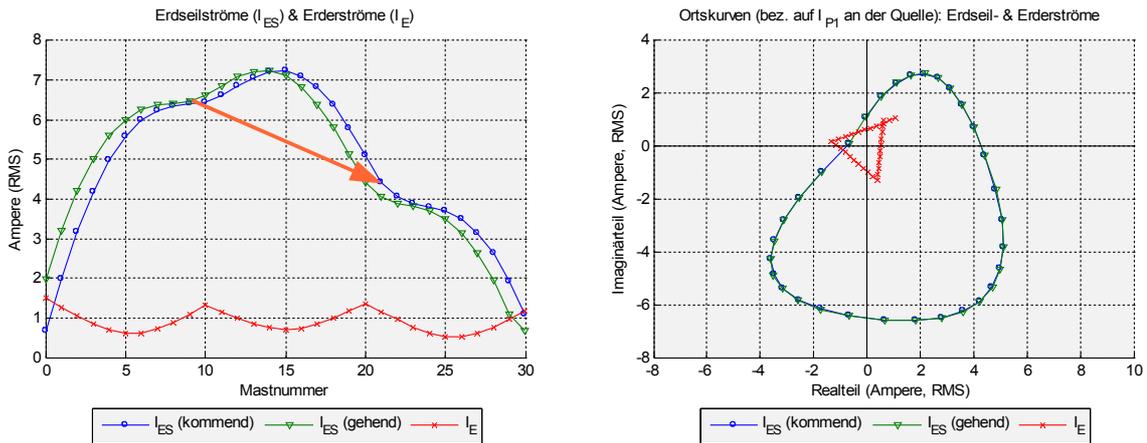


Abbildung 5.34: PB = 123 213; RM = 50 Ω ; RU = 50 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

5.11.2 Fall 2: RM \neq RU

Für diese Untersuchung wurden die Mast-Erdungswiderstände wie im Fall 1 verändert, während die beiden UW-Erdungswiderstände auf einem konstanten Wert von jeweils 0.1 Ω gehalten wurden. Die Resultate verändern sich dadurch gegenüber dem Fall 1 sehr stark.

Die Betragsverläufe der Erdseilströme sehen bei kleinen Werten von RM ähnlich wie die im Fall 1 aus (vergleiche Abbildung 5.35 mit Abbildung 5.30). Durch den höheren Stromfluss ins Erdreich an den als UW-Erdung deklarierten Masten sind die Erdseilströme in den angrenzenden Spannungsfeldern jedoch größer. Eine Erhöhung der Erdungswiderstände führt auch hier zu einer signifikanten Änderung der Verläufe, insbesondere denen der Erdseilströme. Im Gegensatz zu Fall 1 sinken diese nun aber zur Mitte der Freileitung hin ab (siehe Abbildungen 5.36 bis 5.39). Der Trend bleibt dabei jedoch erneut weiterhin ersichtlich, da sich die Strommaxima im ersten und letzten Leitungsabschnitt betragsmäßig voneinander unterscheiden. Das generelle Absinken aller Beträge mit steigendem Wert von RM zeigt sich auch, es fällt allerdings im Vergleich zu Fall 1 weniger stark aus. Für die Ortskurven lassen sich ebenfalls ähnliche Aussagen wie zuvor tätigen. Deutliche Änderungen sind auch hier mit zunehmenden Erdungswiderständen zu verzeichnen.

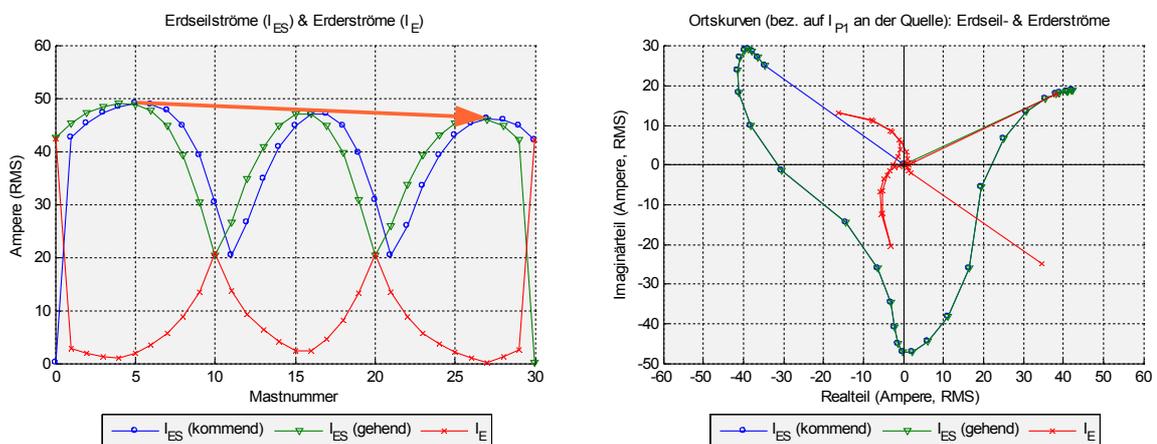


Abbildung 5.35: PB = 123 213; RM = 1 Ω ; RU = 0.1 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

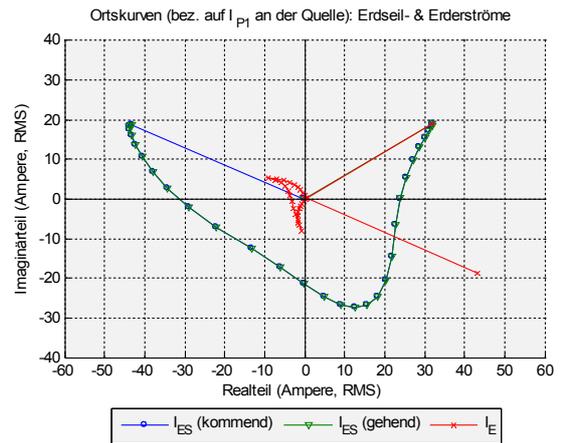
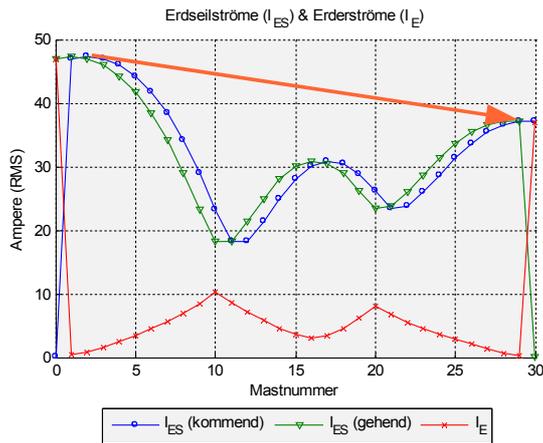


Abbildung 5.36: PB = 123 213; RM = 5 Ω ; RU = 0.1 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

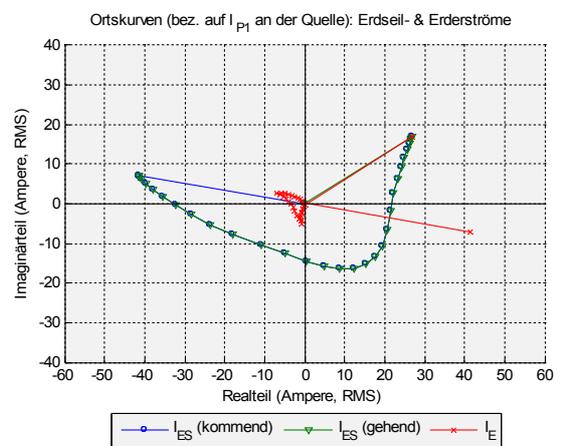
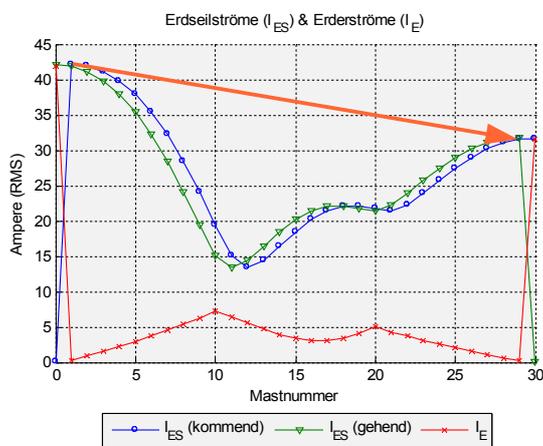


Abbildung 5.37: PB = 123 213; RM = 10 Ω ; RU = 0.1 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

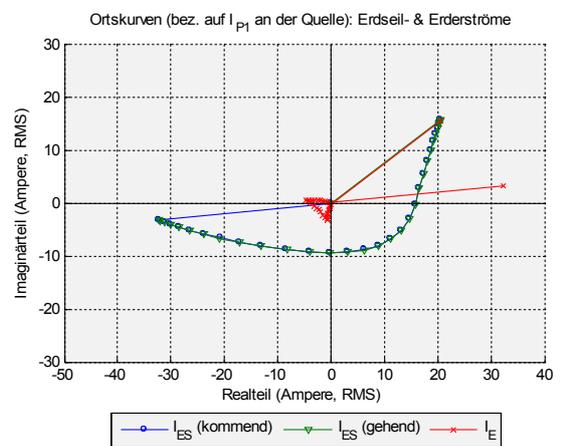
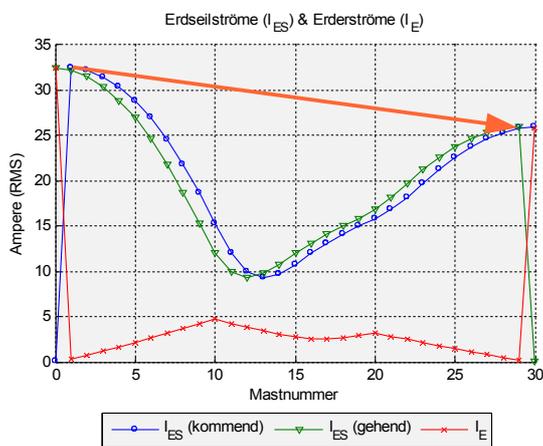


Abbildung 5.38: PB = 123 213; RM = 20 Ω ; RU = 0.1 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

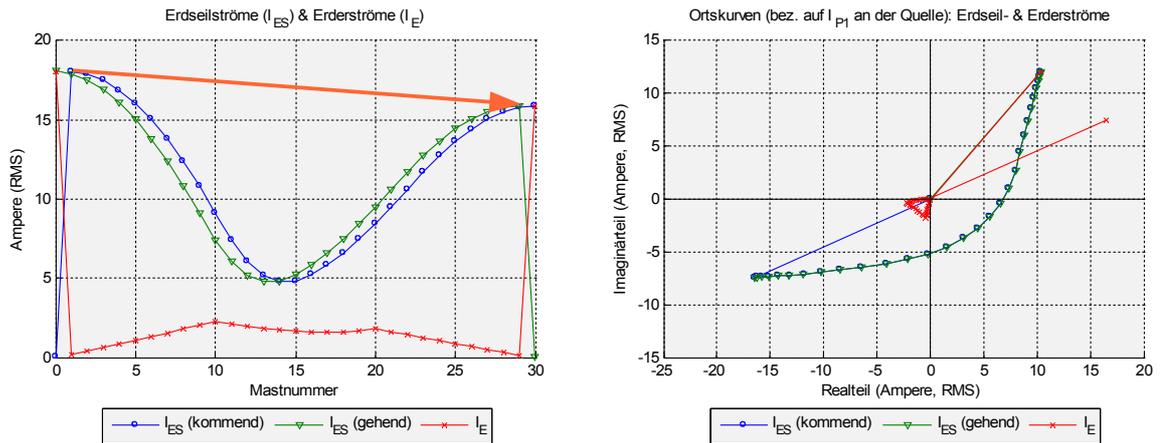


Abbildung 5.39: PB = 123 213; RM = 50 Ω; RU = 0.1 Ω (Trend als Pfeil eingezeichnet)

5.12 Einfluss des Gesamt-Laststroms (IB)

Die Ströme in der Erdungsanlage verhalten sich direkt proportional zur Höhe des Gesamt-Laststroms. Sinkt dieser beispielsweise auf die Hälfte ab, halbieren sich auch alle Erdseil- und Erderströme. Die Schwankungsbreite beträgt dabei weniger als ± 1 % bei RM = RU = 10 Ω und meist weniger als ± 0.2 % bei RM = RU = 1 Ω. Die Sternpunktströme von Quelle und Last zeigen jedoch ein anders geartetes Verhalten gegenüber dem Rest der Leitung. Sie ändern sich wesentlich stärker, wie Tabelle 5.5 entnommen werden kann. Die Höhe dieser Abweichung ist dabei im Wesentlichen unabhängig von der Phasenbelegung, dem Mastkopfbild oder den Werten der Erdungswiderstände.

IB	Erdseil- und Erderströme	Sternpunktströme
1000 A	100 %	100 %
750 A	75 %	57 %
500 A	50 %	26 %
250 A	25 %	6 %
100 A	10 %	1 %

Tabelle 5.5: Beträge der Ströme in der Erdungsanlage in Prozent von den Werten bei IB = 1000 A

Die Ortskurven der Ströme in der Erdungsanlage erfahren praktisch keinerlei Drehung, vor allem bei niedrigen Werten von RM und RU. Höhere Widerstandswerte bewirken eine leichte Drehung der Punkte in den Endbereichen der Leitung, die Winkel der Punkte aus dem restlichen Teil bleiben davon jedoch unberührt.

Die Richtung des Lastflusses ist für das Ergebnis bedeutungslos. Werden die Positionen von Quelle und Last vertauscht, ändern sich die Beträge der Erdseil-, Erder- und Sternpunktströme mit durchschnittlich ± 0.2 % lediglich in vernachlässigbarem Ausmaß. Zudem findet keine Drehung der dazugehörigen Ortskurven statt.

5.13 Einfluss der Spannfeldlänge (SL)

Da die Anzahl der Spannfelder nie verändert wurde, war eine Variation der Spannfeldlänge immer gleichbedeutend mit einer Variation der Gesamtlänge der Freileitung.

Wird der Wert von SL erhöht, steigen die Ströme in der Erdungsanlage generell an, bei einer Verringerung des Werts von SL fallen sie. Das Ausmaß dieser Veränderung wird maßgeblich von den Werten der Erdungswiderstände mitbestimmt, Phasenbelegung und Mastkopfbild üben hingegen keinen Einfluss aus. Es fällt jedoch auf, dass die Ströme an jedem Mast nicht um den jeweils selben Prozentsatz steigen bzw. fallen, sondern dass dieser eine hohe Schwankungsbreite aufweist (nichtproportionale Veränderung der Betragsverläufe). Die Analyse der Ortskurven zeigt darüber hinaus eine unterschiedlich starke Verdrehung der einzelnen Punkte auf der komplexen Ebene über den gesamten Verlauf der Leitung. Der Wert in den nachfolgenden Tabellen gibt das jeweilige Maximum dieser Winkeländerung für jeden Fall an.

Besitzen die Erdungswiderstände R_M und R_U hohe Werte, sind die Schwankungsbreiten der prozentualen Veränderung von Erdseil- und Erderströmen ungefähr gleich (siehe Tabelle 5.6 bzw. Abbildungen 5.40 und 5.41).

SL	Erdseilströme	Erderströme	max. Winkel
0.18 km	- 49 % bis - 23 %	- 41 % bis - 23 %	18 °
0.23 km	- 32 % bis - 13 %	- 26 % bis - 13 %	11 °
0.28 km	- 15 % bis - 6 %	- 13 % bis - 6 %	5 °
0.33 km	± 0 %	± 0 %	0 °
0.38 km	+ 5 % bis + 14 %	+ 5 % bis + 12 %	5 °
0.43 km	+ 8 % bis + 28 %	+ 8 % bis + 23 %	9 °
0.48 km	+ 11 % bis + 40 %	+ 11 % bis + 34 %	12 °

Tabelle 5.6: Veränderung der Ströme in der Erdungsanlage im Vergleich zum Fall 'SL = 0.33 km' ($R_M = R_U = 10 \Omega$)

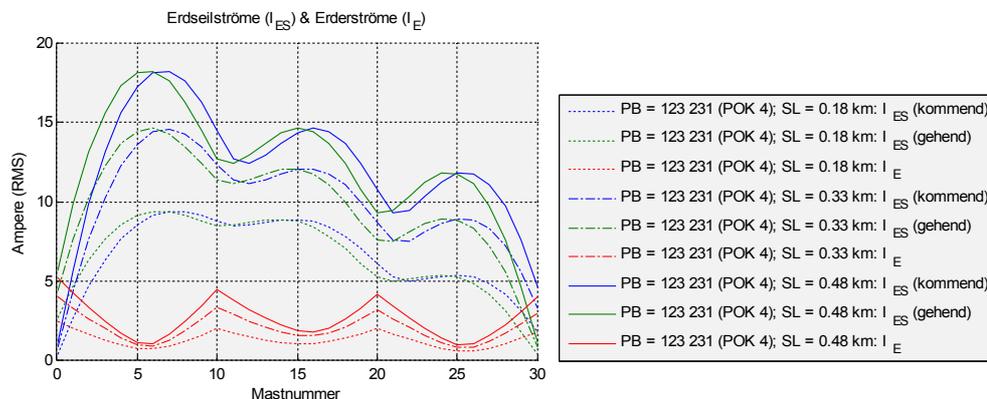


Abbildung 5.40: Gegenüberstellung verschiedener Spannfeldlängen bei $R_M = R_U = 10 \Omega$ (Betragsverläufe)

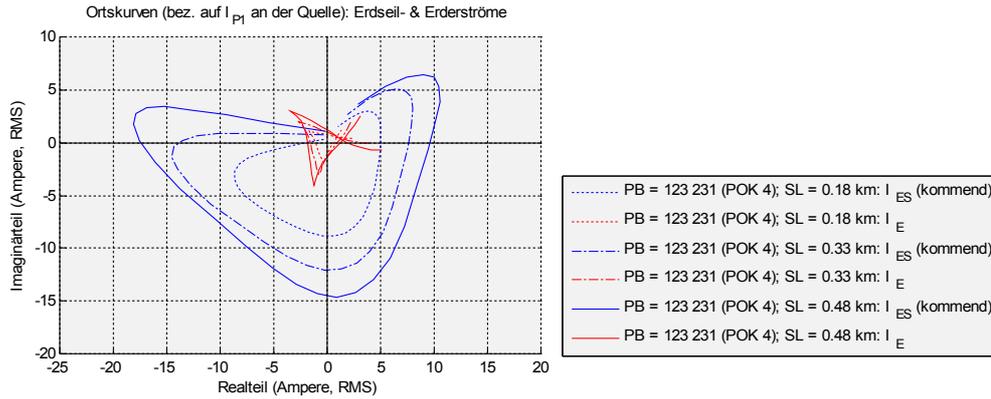


Abbildung 5.41: Gegenüberstellung verschiedener Spannfeldlängen bei $RM = RU = 10 \Omega$ (Ortskurven)

Bei niedrigen Werten von RM und RU sind die Erderströme einer wesentlich stärkeren Schwankung unterworfen als die Erdseilströme. Außerdem verändern sich die Beträge dann nicht nur ausschließlich in eine Richtung, sondern in beide (siehe Tabelle 5.7 bzw. Abbildungen 5.42 und 5.43).

SL	Erdseilströme	Erderströme	max. Winkel
0.18 km	- 23 % bis + 8 %	- 25 % bis + 44 %	30 °
0.23 km	- 14 % bis + 4 %	- 16 % bis + 26 %	18 °
0.28 km	- 6 % bis + 2 %	- 7 % bis + 12 %	8 °
0.33 km	$\pm 0 \%$	$\pm 0 \%$	0 °
0.38 km	- 1 % bis + 5 %	- 10 % bis + 7 %	8 °
0.43 km	- 2 % bis + 10 %	- 19 % bis + 13 %	14 °
0.48 km	- 2 % bis + 14 %	- 26 % bis + 19 %	21 °

Tabelle 5.7: Veränderung der Ströme in der Erdungsanlage im Vergleich zum Fall 'SL = 0.33 km' ($RM = RU = 1 \Omega$)

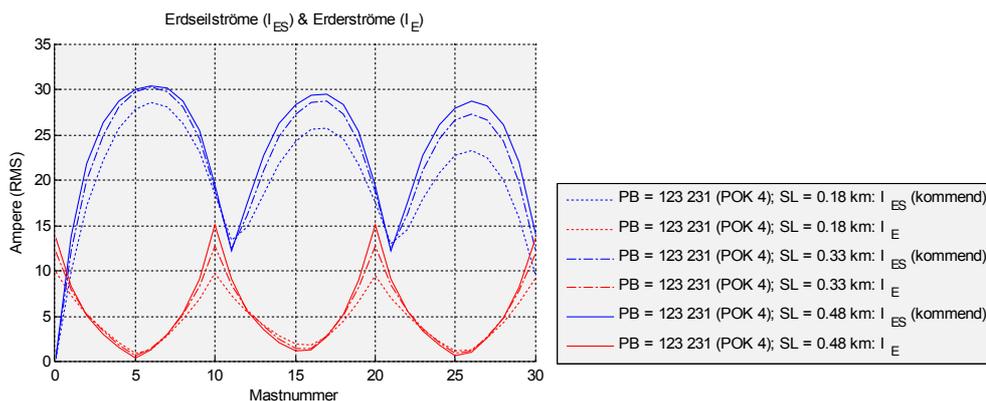


Abbildung 5.42: Gegenüberstellung verschiedener Spannfeldlängen bei $RM = RU = 1 \Omega$ (Betragsverläufe)

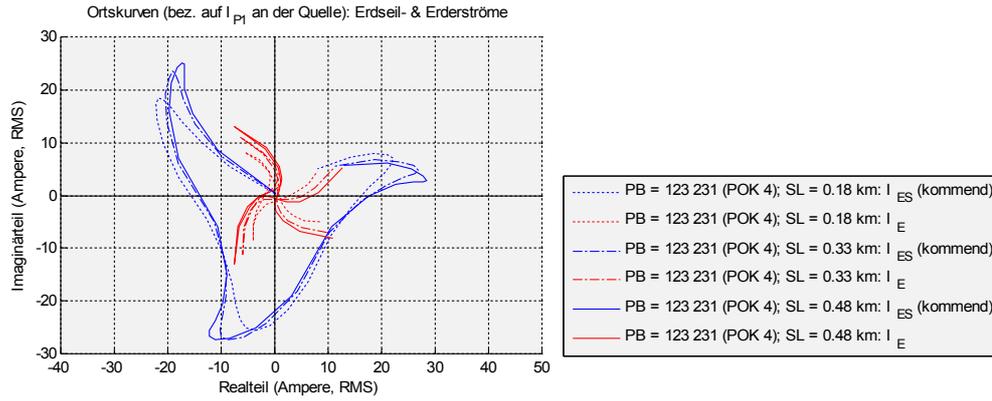


Abbildung 5.43: Gegenüberstellung verschiedener Spannfeldlängen bei $R_M = R_U = 1 \Omega$ (Ortskurven)

6 Diskussion

Kapitel 6.1 widmet sich den Fragen hinsichtlich der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von mit Hilfe der Simulink-Bibliothek 'FLK_library' gewonnenen Ergebnissen. Dabei werden zunächst die diesbezüglichen Eigenschaften dieser Bibliothek aus allgemeiner Sicht besprochen, d.h. im Hinblick auf ihre mögliche Verwendung in anderen Projekten. Danach erfolgt eine Präzisierung der Betrachtungen auf die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, die allesamt mit FLK_library vorgenommen wurden.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde ein Umrechnungsverfahren entwickelt, mit welchem, ausgehend von den aus einem gegebenen Parameterset resultierenden Ergebnissen, die sich bei einem anderen Parameterset einstellenden Werte unkompliziert berechnet werden können. Dieses Verfahren wird in Kapitel 6.2 beschrieben.

Die Kapitel 6.3 und 6.4 beenden die Arbeit mit Schlussfolgerungen und weiterführenden Überlegungen.

6.1 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

6.1.1 FLK_library (allgemeine Aussagen)

Für die Implementierung der zu FLK_library gehörenden Simulink-Bibliothek wurden ausschließlich Blöcke aus Simulink und SimPowerSystems verwendet. Dabei wurden immer jene Elemente bevorzugt, welche die höchstmögliche Präzision unter allen verfügbaren Elementen besitzen, d.h. die Eigenschaften real existierender Freileitungen numerisch am besten wiedergeben (siehe Kapitel 4.1.2). Auch sonst wurden keinerlei Vereinfachungen vorgenommen. Insbesondere in Verbindung mit der Möglichkeit zur sehr genauen Bestimmung der elektrischen Eigenschaften der Spannfelder (siehe Kapitel 4.4.2 bzw. Abbildung 8.5) können die von den FLK_library-Blöcken ausgegebenen Werte daher aus elektrotechnischer Sicht als exakt und zuverlässig angesehen werden.

Da zudem jeder FLK_library-Block, wie in den Kapiteln 4.2.1.2 und 4.2.1.3 besprochen, völlig unabhängig von allen anderen Blöcken parametrisiert werden kann, müssen auch keine Vereinfachungen bei der Modellierung und Simulation praktischer Fälle in Kauf genommen werden. Jedem einzelnen Spannfeld und jedem einzelnen Mast lassen sich unterschiedliche Werte zuweisen. Dadurch können praktisch alle real existierenden Freileitungen sowie theoretische Sonderfälle präzise virtuell nachgebildet werden. Zusammen mit der im vorigen Absatz diskutierten Genauigkeit der Berechnungen lassen sich somit Ausgabewerte erzielen, die der Wirklichkeit sehr genau entsprechen.

Die spätere Reproduzierbarkeit dieser Werte ist problemlos möglich, da jeder benötigte Parameter klar definiert ist und es in den FLK_library-Blöcken keine vom Zufall abhängenden Vorgänge gibt. Zwei mit identischen Parametern durchgeführte Simulationen resultieren daher immer in identischen Ausgabewerten.

Schlussendlich ist noch hervorzuheben, dass, wie bereits in Kapitel 4.1.5 erwähnt, auch keine Einschränkungen bei der Analyse der so gewonnenen Werte in Kauf genommen werden müssen. Die in den adressierten FLK_library-Blöcken ausgelesenen Werte werden vollständig und direkt, ohne jegliche Manipulationen, als separate Zeitverläufe ausgegeben. Dadurch können alle Arten von rechnerischer Verarbeitung bzw. Visualisierung umgesetzt werden.

6.1.2 Untersuchtes Freileitungsmodell (spezielle Aussagen)

Das untersuchte Freileitungsmodell wurde, Quelle und Last ausgenommen, ausschließlich aus FLK_library-Blöcken aufgebaut, womit die in Kapitel 6.1.1 getätigten Aussagen vollständig Anwendung finden. Der Einfluss von jedem der 13 in Kapitel 4.4 definierten Parameter kann immer exakt zurückverfolgt werden, da sich die Parameter im Modell gegenseitig nicht beeinflussen. So bewirkt beispielsweise eine Veränderung des spezifischen Bodenwiderstands (Parameter 'RB') nicht automatisch eine gleichzeitige Veränderung der Erdungswiderstände (Parameter 'RM' und 'RU').

Die einzige Vereinfachung wurde beim Parameter 'Gesamt-Laststrom' (IB) getroffen (siehe Kapitel 4.4.3.4). Dieser wurde immer indirekt über den Wert der 3 Lastwiderstände eingestellt, wobei die zusätzlichen Leitungswiderstände der Phasenseile jedoch jedes Mal ignoriert wurden. Wie die Betragsverläufe der Phasenseilströme allerdings zeigen, beispielsweise in den Abbildungen 5.10 bis 5.14, liegt der tatsächliche Gesamt-Laststrom (Summe aus den dreiphasigen Lastströmen beider Systeme der Freileitung) wie vermutet jeweils nur sehr geringfügig unterhalb des beabsichtigten Gesamt-Laststroms. Das Vernachlässigen der Leitungswiderstände beim Berechnen der Last kann bei Freileitungen mit der in dieser Arbeit untersuchten Länge (ca. 10 km) bzw. Seilbelegung (Zweierbündel) daher als vertretbar angesehen werden.

Auf die exakte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hat die im vorigen Absatz besprochene Vereinfachung keinen Einfluss, da die Werte der Leitungswiderstände immer eindeutig durch die leitungsbezogenen Parameter festgelegt werden (siehe Kapitel 4.4.2).

6.1.2.1 Genauigkeit der angegebenen prozentualen Abweichungen

Bei den in Kapitel 5 dokumentierten Ergebnissen wurden meist die Erdseil- und Erderströme zweier sich bei unterschiedlichen Parametersets ergebender Resultate miteinander verglichen. Die in diesem Zusammenhang angegebenen prozentualen Abweichungen ihrer

Beträge wurden ermittelt, indem der Betrag jedes einzelnen Erdseil- und Erderstroms aus einem Simulationsergebnis durch den korrespondierenden Betrag aus dem Bezugsergebnis dividiert, und die Resultate dieser Berechnung grafisch als Verläufe über die Mastnummer ausgegeben wurden. Aus diesen wurde sodann ein Mittelwert abgelesen, der anschließend mit Hilfe von Gl. 6.1 in eine prozentuale Abweichung umgerechnet wurde. Für die Bestimmung der Winkeldifferenzen wurden die Winkel der beiden jeweils zueinander gehörenden Punkte auf den Ortskurven beider Simulationsergebnisse voneinander subtrahiert und die erhaltenen Resultate – nach Umrechnung in Grad und anschließender Normierung auf den Wertebereich zwischen 0° und 360° – ebenfalls als Verläufe über die Mastnummer grafisch ausgegeben.

$$k' = (k - 1) \cdot 100 \quad (\text{Gl. 6.1})$$

k' prozentuale Abweichung („Betragsänderung im Vergleich zu den Bezugsbeträgen um k' Prozent“)
 k abgelesener Mittelwert der Divisionsergebnisse („abweichender Fall dividiert durch Bezugsfall“)

Die Abbildungen 6.1 bis 6.4 zeigen exemplarisch einige Ergebnisse solcher Vergleiche. Selbst wenn in den einzelnen Unterabschnitten von Kapitel 5 von einer proportionalen Veränderung der Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme die Rede ist, bewegen sich die Verhältnisse dieser Beträge (linke Diagramme in den genannten Abbildungen) trotzdem immer innerhalb einer gewissen Schwankungsbreite, was in weiterer Folge die mögliche Genauigkeit der ermittelbaren prozentualen Abweichung entsprechend einschränkt. Bei den Verhältnissen der Sternpunktströme von Quelle und Last (I_{ES} (kommend) an Mast Nr. 0 bzw. I_{ES} (gehend) an Mast Nr. 30) fällt auf, dass diese abhängig von den jeweils miteinander verglichenen Parametersets oftmals weit außerhalb der Schwankungsbreite der übrigen Punkte liegen (siehe Abbildung 6.2). Ausreißer dieser Art wurden bei der Mittelwertberechnung immer ignoriert. War es allerdings möglich, hier einen eindeutigen Zusammenhang zu den Werten des gerade untersuchten Parameters herzustellen, wurde dies gesondert hervorgehoben, so etwa in den Kapiteln 5.10 und 5.12.

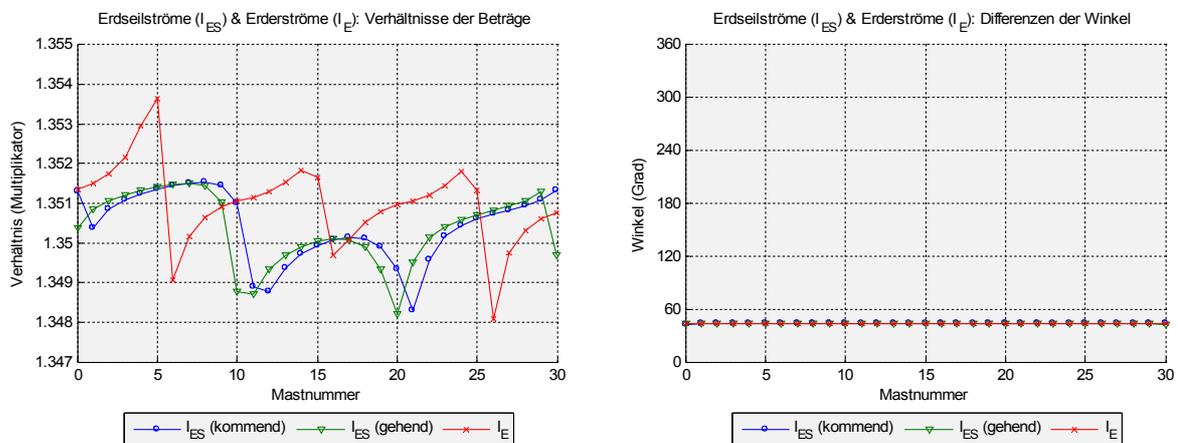


Abbildung 6.1: Fall 'PB = 123 123 (POK 1); RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω ', verglichen mit dem Fall 'PB = 123 213 (POK 3); RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω '

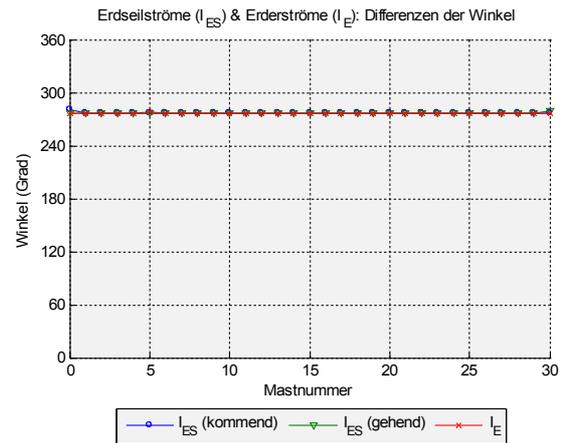
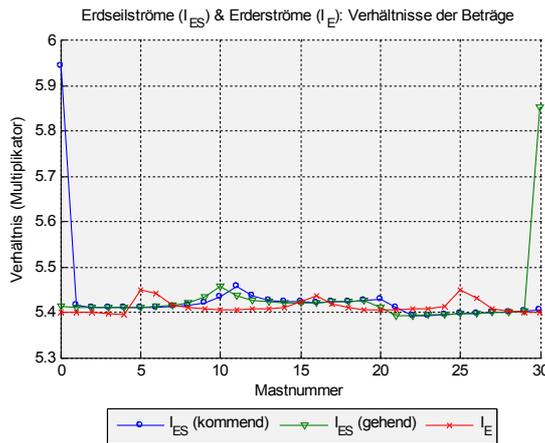


Abbildung 6.2: Fall 'PB = 123 123 (POK 1); RM = 1 Ω; RU = 1 Ω', verglichen mit dem Fall 'PB = 123 321 (POK 5); RM = 1 Ω; RU = 1 Ω'

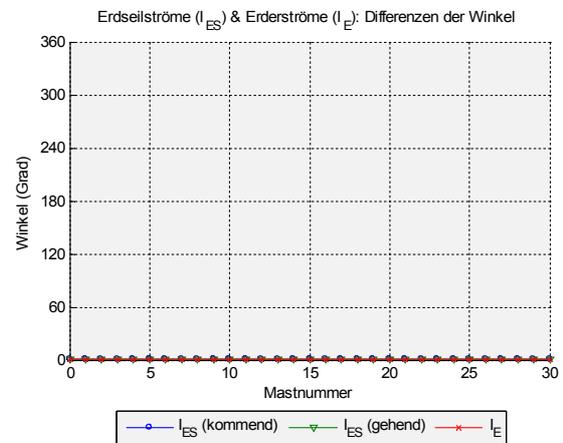
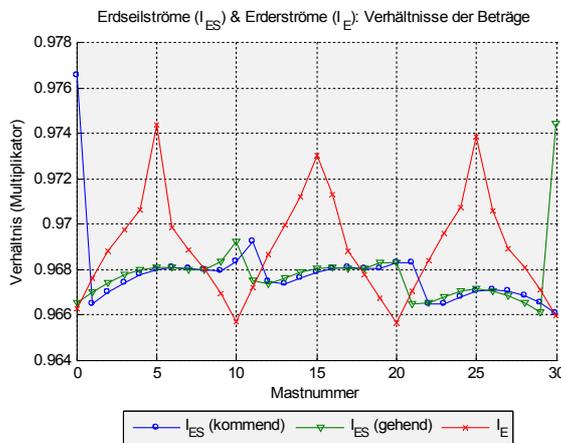


Abbildung 6.3: Fall 'PB = 123 321 (POK 5); MH = plus09m; RM = 1 Ω; RU = 1 Ω', verglichen mit dem Fall 'PB = 123 321 (POK 5); MH = normal; RM = 1 Ω; RU = 1 Ω'

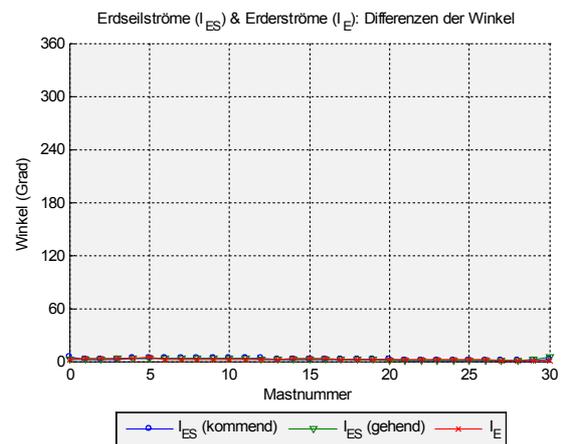
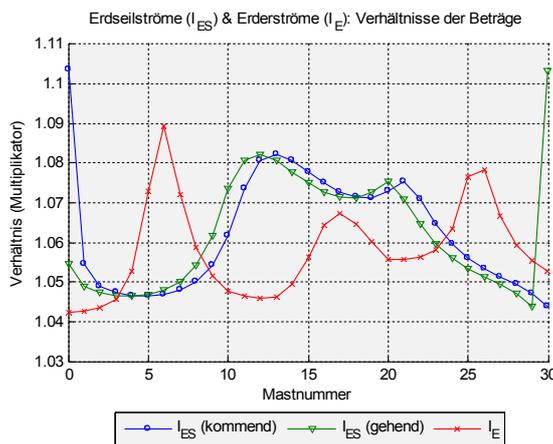


Abbildung 6.4: Fall 'PB = 123 213 (POK 3); RB = 10 Ωm', verglichen mit dem Fall 'PB = 123 213 (POK 3); RB = 100 Ωm'

6.2 Verfahren zur Umrechnung zwischen verschiedenen Parametersets

Die Tatsache, dass die Beträge der Erdseil- und Erderströme vieler unterschiedlicher Ergebnisse zueinander proportional sind, erlaubt die unkomplizierte Umrechnung derselben ohne die Notwendigkeit zur Durchführung neuerlicher Simulationen. Das im Folgenden

vorgestellte Verfahren basiert auf der Multiplikation der bei einem bestimmten Parameterset ermittelten Beträge dieser Ströme (gegebene Freileitung) mit verschiedenen Faktoren nach Gl. 6.2 zum Erhalt der sich bei einem anderen Parameterset ergebenden Beträge (gesuchte Freileitung). Die Herleitung dieser Faktoren wird in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

$$I_{ES, E(ges.)} = I_{ES, E(geg.)} \cdot \left(k_G \cdot \frac{k_{\rho(ges.)}}{k_{\rho(geg.)}} \cdot \frac{IB_{(ges.)}}{IB_{(geg.)}} \right) \quad (\text{Gl. 6.2})$$

$I_{ES, E(ges.)}$	Beträge der Erdseil- und Erderströme der <u>gesuchten</u> Freileitung
$I_{ES, E(geg.)}$	Beträge der Erdseil- und Erderströme der <u>gegebenen</u> Freileitung
k_G	Geometriefaktor
$k_{\rho(ges.)}$	Bodenwiderstandsfaktor der <u>gesuchten</u> Freileitung
$k_{\rho(geg.)}$	Bodenwiderstandsfaktor der <u>gegebenen</u> Freileitung
$IB_{(ges.)}$	Gesamt-Laststrom der <u>gesuchten</u> Freileitung
$IB_{(geg.)}$	Gesamt-Laststrom der <u>gegebenen</u> Freileitung

6.2.1 Der Geometriefaktor k_G

Dieser Multiplikator dient zum Umlegen von Mastgeometrie und Phasenoppositionsklasse der gegebenen Freileitung auf die gesuchte Freileitung, wobei mit dem Begriff 'Mastgeometrie' festgelegte Wertekombinationen der 3 Parameter 'Mastkopfbild' (MG), 'Masthöhe' (MH) und 'Erdseildistanz' (ES) bezeichnet werden.

Der Wert von k_G ist unabhängig von der Höhe der Erdungswiderstände (Parameter 'RM' und 'RU'), der Spannfeldlänge (Parameter 'SL'), sowie der Spannfeldanzahl. Voraussetzung ist allerdings, dass alle soeben genannten Parameter jeweils dieselben Werte bei der gegebenen und der gesuchten Freileitung aufweisen, da sie, wie in den entsprechenden Unterabschnitten von Kapitel 5 dokumentiert, eine nichtproportionale Veränderung der Beträgsverläufe der Erdseil- und Erderströme bewirken.

Während die Werte der Erdungswiderstände keinen Einfluss auf den Geometriefaktor ausüben, tut dies hingegen der spezifische Bodenwiderstand (Parameter 'RB'). k_G ist somit immer auf einen bestimmten Wert von RB bezogen. Mit Hilfe der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Bodenwiderstandsfaktoren kann diese Einschränkung jedoch aufgehoben werden, wodurch die gegebene und die gesuchte Freileitung beliebige, auch voneinander unterschiedliche spezifische Bodenwiderstände aufweisen dürfen.

6.2.1.1 Berechnungsverfahren für k_G

Wie aus der allgemeinen Beschreibung des Umrechnungsverfahrens in Kapitel 6.2 hervorgeht, werden die Beträge der Erdseil- und Erderströme der gegebenen Freileitung mit den einzelnen Umrechnungsfaktoren multipliziert um die entsprechenden Beträge der gesuchten Freileitung zu erhalten. Unterscheiden sich beide Leitungen ausschließlich in ihrer Mastgeometrie (Parameter 'MG', 'MH' und 'ES') bzw. Phasenoppositionsklasse (Parameter 'PB'), und entspricht ferner der Wert ihrer spezifischen Bodenwiderstände (Parameter 'RB')

dem Wert auf welchen der zutreffende Geometriefaktor bezogen ist, fallen die beiden Brüche in Gl. 6.2 weg und die Berechnung vereinfacht sich zu der in Gl. 6.3 gezeigten. Gemäß der dort vorgenommenen Umformung müssen für die Berechnung von k_G beide Ergebnisse eines zueinander passenden Paares aus gegebener und gesuchter Freileitung bekannt sein.

$$I_{ES, E(ges.)} = I_{ES, E(geg.)} \cdot k_G \Rightarrow k_G = \frac{I_{ES, E(ges.)}}{I_{ES, E(geg.)}} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

$I_{ES, E(ges.)}$ Beträge der Erdseil- und Erderströme der gesuchten Freileitung
 $I_{ES, E(geg.)}$ Beträge der Erdseil- und Erderströme der gegebenen Freileitung
 k_G Geometriefaktor

Eine komfortable Methode zur Berechnung aller Geometriefaktoren, die für einen festgelegten Satz aus interessierenden Mastgeometrien bzw. Phasenoppositionsklassen existieren, ergibt sich durch deren Organisation in Form einer sogenannten „Geometrie-Umrechnungstabelle“ (siehe Kapitel 8.4). Jede Zeile und jede Spalte einer solchen Tabelle ist einer Mastgeometrie bzw. Phasenoppositionsklasse zugeordnet, wobei Zeilen und Spalten mit gleichem Index jeweils zusammengehören. Um den Geometriefaktor für eine bestimmte Kombination aus gegebener und gesuchter Freileitung zu ermitteln, muss die für die gegebene Freileitung zutreffende Spalte und die für die gesuchte Freileitung zutreffende Zeile gesucht werden. Der am Schnittpunkt von Zeile und Spalte befindliche Wert ist der für diese Kombination gültige Geometriefaktor k_G (siehe dazu auch die in Kapitel 6.2.3 enthaltenen Rechenbeispiele).

Um eine Geometrie-Umrechnungstabelle zu erstellen ist folgendermaßen vorzugehen:

- Festlegen der Mastgeometrien (Parameter 'MG', 'MH' und 'ES') und Phasenoppositionsklassen (Parameter 'PB') für welche die Geometriefaktoren berechnet werden sollen.
- Festlegen des Werts für den spezifischen Bodenwiderstand (Parameter 'RB') auf den alle Faktoren bezogen sein sollen. Der Wert dieses Parameters darf während des gesamten Erstellungsvorgangs der Tabelle nicht geändert werden.
- Festlegen der Werte für die übrigen Parameter (RM, RU, IB, SL, Spannungszahl). Diese können beliebig gewählt werden, da k_G nicht von ihnen abhängig ist, dürfen jedoch während des gesamten Erstellungsvorgangs der Tabelle ebenfalls nicht geändert werden. Bezüglich der noch verbleibenden Parameter 'VD', 'SY', 'QL' und 'UB' wird auf die Erläuterungen in Kapitel 6.2.4 verwiesen.
- Durchführen je einer Simulation für jede der festgelegten Kombinationen aus Mastgeometrie und Phasenoppositionsklasse; berechnen der Beträge der Erdseil- und Erderströme aus dem Ergebnis dieser Simulation.

- Berechnen der Geometriefaktoren einer beliebigen Zeile oder Spalte der Tabelle gemäß der umgewandelten Formel in Gl. 6.3. In den in Kapitel 8.4 enthaltenen Tabellen ist diese Zeile bzw. Spalte jeweils farblich hervorgehoben. Erklärungen zur genauen Vorgehensweise bei der Durchführung dieses Arbeitsschritts, sowie zur dabei erzielbaren Genauigkeit, wurden bereits in Kapitel 6.1.2.1 gegeben.
- Anwenden von Gl. 6.4 falls die Werte einer Zeile berechnet wurden, bzw. Gl. 6.5 falls die Werte einer Spalte berechnet wurden. Die einzelnen Elemente der Zeile bzw. Spalte sind dabei entsprechend der zutreffenden Formel als Vektoren anzuschreiben und als solche zu multiplizieren. Die aus dieser Berechnung resultierende quadratische Matrix repräsentiert den gesuchten Inhalt der gesamten Geometrie-Umrechnungstabelle.

$$K_G = \begin{pmatrix} \frac{1}{K_{G\,il}} \\ \vdots \\ \frac{1}{K_{G\,in}} \end{pmatrix} \cdot (K_{G\,il} \quad \cdots \quad K_{G\,in}) \quad (\text{Gl. 6.4})$$

K_G Geometrie-Umrechnungstabelle als quadratische Matrix
 i Index der für die Berechnung gewählten Zeile
 n Anzahl der Elemente in der Zeile

$$K_G = \begin{pmatrix} K_{G\,1k} \\ \vdots \\ K_{G\,nk} \end{pmatrix} \cdot \left(\frac{1}{K_{G\,1k}} \quad \cdots \quad \frac{1}{K_{G\,nk}} \right) \quad (\text{Gl. 6.5})$$

K_G Geometrie-Umrechnungstabelle als quadratische Matrix
 k Index der für die Berechnung gewählten Spalte
 n Anzahl der Elemente in der Spalte

Wie aus den beiden obigen Formeln hervorgeht, kann jede Geometrie-Umrechnungstabelle „aus sich selbst“ berechnet werden. Jedes Element der gesamten Tabelle kann aus jeweils 2 Elementen einer beliebigen Zeile oder Spalte derselben hergeleitet werden. Entsprechende Routinen zur Erstellung solcher Tabellen sind somit sehr einfach implementierbar, beispielsweise in MATLAB oder in gewöhnlichen Tabellenkalkulationsprogrammen.

6.2.2 Die Bodenwiderstandsfaktoren k_p

Mit Hilfe dieser Faktoren werden die Einflüsse der spezifischen Bodenwiderstände von gegebener und gesuchter Freileitung in die Umrechnung miteinbezogen. Im Gegensatz zum Geometriefaktor k_G besteht bei den Bodenwiderstandsfaktoren neben der Abhängigkeit von der Mastgeometrie und der Phasenoppositionsklasse auch eine Abhängigkeit von den

Werten der Erdungswiderstände. Dies wurde bereits in Kapitel 5.9 dokumentiert. In einer während der Entwicklung des Umrechnungsverfahrens stichprobenartig durchgeführten Erhebung konnte darüber hinaus noch eine Abhängigkeit von der Spannfeldlänge und der Spannfeldanzahl nachgewiesen werden. Dadurch ist, anders als bei k_G , jeder Bodenwiderstandsfaktor nur für jeweils einen bestimmten Wert der Parameter 'Erdungswiderstand', 'Spannfeldlänge' und 'Spannfeldanzahl' gültig. Es ist allerdings nicht ausgeschlossen, dass hier weitere Multiplikatoren berechnet werden können, welche die Bodenwiderstandsfaktoren im Fall abweichender Werte dieser Parameter entsprechend korrigieren. Genauere diesbezügliche Untersuchungen waren jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

6.2.2.1 Berechnungsverfahren für k_p

Jeder Bodenwiderstandsfaktor k_p wird, ähnlich dem Geometriefaktor k_G , aus den per Simulation ermittelten Beträgen der Erdseil- und Erderströme zweier Parametersets berechnet. Dabei wird allerdings nicht wie bei k_G zwischen „gegebener“ und „gesuchter“ Freileitung unterschieden, sondern zwischen „Bezugsfall“ und „abweichendem Fall“.

Um einen einzelnen Bodenwiderstandsfaktor zu berechnen ist folgendermaßen vorzugehen:

- Festlegen von Mastgeometrie (Parameter 'MG', 'MH' und 'ES'), Phasenoppositionsklasse (Parameter 'PB'), Erdungswiderständen (Parameter 'RM' und 'RU'), Spannfeldlänge (Parameter 'SL') und Spannfeldanzahl. All diese Parameter dürfen während des Durchführens der beiden benötigten Simulationen nicht geändert werden. Der resultierende Bodenwiderstandsfaktor ist nur für die gewählten Werte gültig.
- Festlegen weiterer Parameterwerte. Die Höhe von IB kann beliebig gewählt werden, darf jedoch während des Durchführens der beiden benötigten Simulationen ebenfalls nicht geändert werden. Bezüglich der Parameter 'VD', 'SY', 'QL' und 'UB' wird auf die Erläuterungen in Kapitel 6.2.4 verwiesen.
- Festlegen des spezifischen Bodenwiderstands (Parameter 'RB') für den Bezugsfall. Soll der zu berechnende Bodenwiderstandsfaktor zusammen mit einem Geometriefaktor verwendet werden (siehe Gl. 6.2), so ist RB für den Bezugsfall auf jenen Wert zu setzen, auf den auch der Geometriefaktor bezogen ist (siehe Kapitel 6.2.1).
- Durchführen einer Simulation für das soeben festgelegte Parameterset (Bezugsfall); berechnen der Beträge der Erdseil- und Erderströme aus dem Ergebnis dieser Simulation.

- Ändern des spezifischen Bodenwiderstands (Parameter 'RB') auf einen gewünschten Wert für den abweichenden Fall, d.h. einen Wert den dieser Parameter bei der gegebenen bzw. der gesuchten Freileitung besitzt.
- Durchführen einer Simulation für das soeben geänderte Parameterset (abweichender Fall); berechnen der Beträge der Erdseil- und Erderströme aus dem Ergebnis dieser Simulation.
- Berechnen des Bodenwiderstandsfaktors gemäß Gl. 6.6. Erklärungen zur genauen Vorgehensweise bei der Durchführung dieses Arbeitsschritts, sowie zur dabei erzielbaren Genauigkeit, wurden bereits in Kapitel 6.1.2.1 gegeben.

$$k_{\rho} = \frac{I_{ES,E(abw.)}}{I_{ES,E(bez.)}} \quad (\text{Gl. 6.6})$$

k_{ρ} Bodenwiderstandsfaktor

$I_{ES,E(abw.)}$ Beträge der Erdseil- und Erderströme des abweichenden Falls

$I_{ES,E(bez.)}$ Beträge der Erdseil- und Erderströme des Bezugsfalls

Für die Organisation der so berechneten Faktoren empfiehlt sich die Verwendung von halblogarithmischen Diagrammen (siehe Kapitel 8.5). Auf der logarithmisch skalierten X-Achse werden die Werte der gewählten spezifischen Bodenwiderstände RB aufgetragen, auf der linear skalierten Y-Achse die dazugehörigen Bodenwiderstandsfaktoren k_{ρ} . Mittels Interpolation kann k_{ρ} dann für beliebige Werte von RB berechnet werden.

Die in Kapitel 8.5 befindlichen Grafiken enthalten sämtliche im Zuge dieser Arbeit berechneten Bodenwiderstandsfaktoren. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit werden sie getrennt nach Mastgeometrie und Erdungswiderstand in separaten Diagrammen dargestellt. All diese Faktoren sind in Form prozentualer Abweichungen auch in den Tabellen 5.2 bis 5.4 aufgelistet (Umrechnung gemäß Gl. 6.1). Die in beiden Darstellungsformen vorgenommene Zusammenfassung von Phasenoppositionsclassen erschien zulässig, da die Schwankungsbreite innerhalb derer sich die Verhältnisse der einzelnen Erdseil- und Erderstrombeträge bewegten (siehe Kapitel 6.1.2.1) größer als die wertmäßigen Unterschiede der daraus berechneten Bodenwiderstandsfaktoren war.

6.2.3 Rechenbeispiele

Anhand der in den folgenden Unterkapiteln besprochenen Beispiele wird die korrekte Anwendung des beschriebenen Umrechnungsverfahrens Schritt für Schritt erklärt und dessen Möglichkeiten und Genauigkeit betrachtet.

6.2.3.1 Beispiel 1

Tabelle 6.1 enthält die Parametersets von gegebener und gesuchter Freileitung. Werte die sich voneinander unterscheiden sind hervorgehoben. Der für diese Kombination zutreffende Gesamt-Umrechnungsfaktor k soll berechnet werden.

Parameter	gegebene Freileitung	gesuchte Freileitung
VD	rverdrillt	rverdrillt
QL	erd	erd
Spannfeldanzahl	30	30
SL	0.33 km	0.33 km
SY	2Sys	2Sys
MG	110kVDonau	110kVEinebene
MH (ES)	normal	normal
POK	5 (PB = 123 213)	4 (PB = 123 312)
RB	500 Ω m	50 Ω m
RM	1 Ω	1 Ω
RU	1 Ω	1 Ω
UB	110 kV	110 kV
IB	720 A	900 A

Tabelle 6.1: Parametersets von gegebener und gesuchter Freileitung (Beispiel 1)

Um das Umrechnungsverfahren überhaupt anwenden zu können, müssen, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, die Werte der Parameter 'Spannfeldanzahl', 'SL', 'RM' und 'RU' bei der gegebenen und der gesuchten Freileitung jeweils gleich sein. Die beiden vorliegenden Parametersets erfüllen diese Bedingung.

Da die Werte der spezifischen Bodenwiderstände (Parameter 'RB') unterschiedlich sind, ist der Einsatz von Bodenwiderstandsfaktoren erforderlich. Diese Faktoren können jedoch nur angewendet werden, wenn die Werte der Parameter 'Spannfeldanzahl', 'SL', 'RM' und 'RU' beider Freileitungen den Werten entsprechen für welche die Faktoren gültig sind (siehe Kapitel 6.2.2 bzw. Kapitel 8.5). Die aus den Diagrammen in Abbildung 8.6 ablesbaren Bodenwiderstandsfaktoren wurden für die Werte der fraglichen Parameter berechnet, sodass deren Benutzung in diesem Beispiel möglich ist.

Damit Geometrie- und Bodenwiderstandsfaktoren in Kombination verwendet werden können, müssen sie auf denselben Wert des spezifischen Bodenwiderstands bezogen sein. Sämtliche in dieser Arbeit berechneten Faktoren sind auf $RB = 100 \Omega\text{m}$ bezogen (siehe Kapitel 8.4 und 8.5), wodurch auch diese Bedingung erfüllt ist.

Der Parameter 'SY' besitzt bei der gegebenen und der gesuchten Freileitung den Wert '2Sys', daher ist für die Ermittlung des Geometriefaktors Tabelle 8.2 heranzuziehen. Aus dieser Tabelle ergibt sich für die vorliegende Kombination ein Wert für k_G von 4.059.

Die beiden benötigten Bodenwiderstandsfaktoren $k_{p(\text{geg.})}$ und $k_{p(\text{ges.})}$ können wie bereits erwähnt aus den Diagrammen in Abbildung 8.6 oder alternativ aus den in Kapitel 5.9 enthaltenen Tabellen abgelesen werden. Für das gegenständliche Rechenbeispiel ergeben sich die folgenden Werte:

- **gegebene Freileitung:** Datenreihe 'POK 5' des mittleren Diagramms in Abbildung 8.6, bzw. Spalte 'RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω ; POK 5' in Tabelle 5.3:
 $k_{p(\text{geg.})}(500 \Omega\text{m}) = 0.85$

- **gesuchte Freileitung:** Datenreihe 'POK 1 bis 4' des unteren Diagramms in Abbildung 8.6, bzw. Spalte 'RM = 1 Ω; RU = 1 Ω; POK 1 bis 4' in Tabelle 5.4:
 $k_{\rho(\text{ges.})}(50 \Omega\text{m}) = 1.02$

Zusammen mit den beiden Werten des Gesamt-Laststroms (Parameter 'IB') kann nun die Berechnung des Gesamt-Umrechnungsfaktors k vorgenommen werden:

$$I_{ES, E(\text{ges.})} = I_{ES, E(\text{geg.})} \cdot \underbrace{\left(k_G \cdot \frac{k_{\rho(\text{ges.})}}{k_{\rho(\text{geg.})}} \cdot \frac{IB_{(\text{ges.})}}{IB_{(\text{geg.})}} \right)}_k$$

$$k = 4.059 \cdot \frac{1.02}{0.85} \cdot \frac{900 [A]}{720 [A]}$$

$$k = 6.089$$

Zur Verifikation dieses Ergebnisses wird je eine Simulation mit dem gegebenen und dem gesuchten Parameterset durchgeführt und die daraus resultierenden Beträge der Erdseil- und Erderströme (siehe Abbildung 6.5) gemäß dem in Kapitel 6.1.2.1 beschriebenen Verfahren in Relation gesetzt. Abbildung 6.6 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs. Der berechnete Faktor k ist als horizontale, gestrichelte Linie zusätzlich eingezeichnet. Es ist gut zu erkennen, dass k innerhalb der Schwankungsbreite der per Simulation berechneten Faktoren liegt, wodurch die Korrektheit der Berechnung bestätigt ist.

Auf das ebenfalls in Abbildung 6.6 zu sehende Phänomen der sehr stark abweichenden Multiplikatoren für die Sternpunktströme von Quelle und Last ($I_{ES}(\text{kommend})$ an Mast Nr. 0 bzw. $I_{ES}(\text{gehend})$ an Mast Nr. 30) wurde bereits in Kapitel 6.1.2.1 eingegangen. Einer der Gründe für den hohen Unterschied liegt bei diesem Beispiel in den unterschiedlichen Werten der Gesamt-Lastströme von gegebener und gesuchter Freileitung (siehe dazu auch Kapitel 5.12). Der berechnete Gesamt-Umrechnungsfaktor k kann somit ausschließlich für die Umrechnung der Erdseil- und Erderströme der Freileitung verwendet werden, nicht jedoch für die Umrechnung der Sternpunktströme von Quelle und Last!

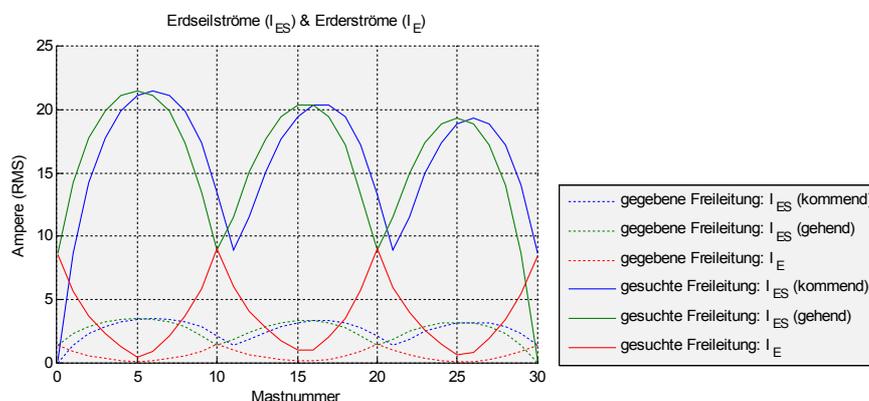


Abbildung 6.5: Gegenüberstellung von gegebener und gesuchter Freileitung (Betragsverläufe; Bsp. 1)

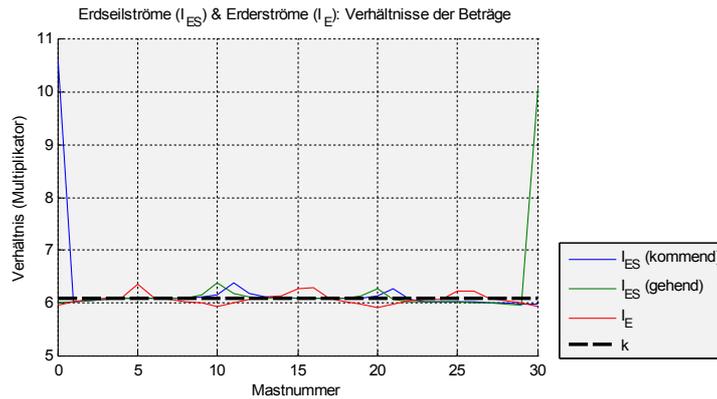


Abbildung 6.6: Verifikation des berechneten Gesamt-Umrechnungsfaktors k (Beispiel 1)

6.2.3.2 Beispiel 2

Parameter	gegebene Freileitung	gesuchte Freileitung
VD	rverdrillt	rverdrillt
QL	erd	erd
Spannfeldanzahl	30	30
SL	0.33 km	0.33 km
SY	2Sys	2Sys
MG	110kVDonau	110kVDonau
MH (ES)	normal	normal
POK	5 (PB = 123 213)	3 (PB = 123 321)
RB	1000 Ω m	1000 Ω m
RM	1 Ω	1 Ω
RU	1 Ω	1 Ω
UB	110 kV	110 kV
IB	1000 A	1000 A

Tabelle 6.2: Parametersets von gegebener und gesuchter Freileitung (Beispiel 2)

Die gegebene und die gesuchte Freileitung unterscheiden sich hier nur in ihrer Phasenoppositionsklasse (siehe Tabelle 6.2). Der Einsatz des entsprechenden Geometriefaktors k_G allein ist jedoch nicht ausreichend, da die Werte des spezifischen Bodenwiderstands R_B nicht dem Wert entsprechen auf den k_G bezogen ist. Es müssen daher also auch Bodenwiderstandsfaktoren k_p in der Berechnung verwendet werden. Die Werte der Parameter 'Spannfeldanzahl', 'SL', 'RM' und 'RU' sind jeweils identisch zu den Werten, für welche die in Abbildung 8.6 dargestellten Bodenwiderstandsfaktoren berechnet wurden. Folglich können diese herangezogen werden:

- **gegebene Freileitung:** Datenreihe 'POK 5' des mittleren Diagramms in Abbildung 8.6, bzw. Spalte 'RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω ; POK 5' in Tabelle 5.3:
 $k_{p(\text{geg.})}(1000 \Omega\text{m}) = 0.79$
- **gesuchte Freileitung:** Datenreihe 'POK 3' des mittleren Diagramms in Abbildung 8.6, bzw. Spalte 'RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω ; POK 3' in Tabelle 5.3:
 $k_{p(\text{ges.})}(1000 \Omega\text{m}) = 0.95$

Der Geometriefaktor wird, da SY = 2Sys beträgt, aus Tabelle 8.2 abgelesen: $k_G = 4.045$.

Damit ergibt sich der folgende Wert für den Gesamt-Umrechnungsfaktor k :

$$I_{ES, E(ges.)} = I_{ES, E(geg.)} \cdot \underbrace{\left(k_G \cdot \frac{k_{\rho(ges.)}}{k_{\rho(geg.)}} \cdot \frac{IB_{(ges.)}}{IB_{(geg.)}} \right)}_k$$

$$k = 4.045 \cdot \frac{0.95}{0.79} \cdot \frac{1000 [A]}{1000 [A]}$$

$$k = 4.864$$

Die Verifikation dieser Berechnung per Simulation (Beträge: siehe Abbildung 6.7; Faktoren: siehe Abbildung 6.8) zeigt, dass k erneut innerhalb der Schwankungsbreite der für jeden Mast separat berechneten Multiplikatoren liegt. Die Kalkulation ist daher korrekt.

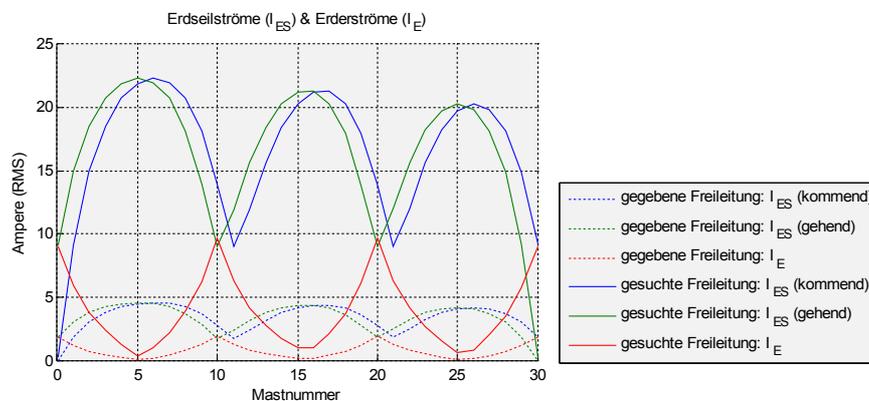


Abbildung 6.7: Gegenüberstellung von gegebener und gesuchter Freileitung (Betragsverläufe; Bsp. 2)

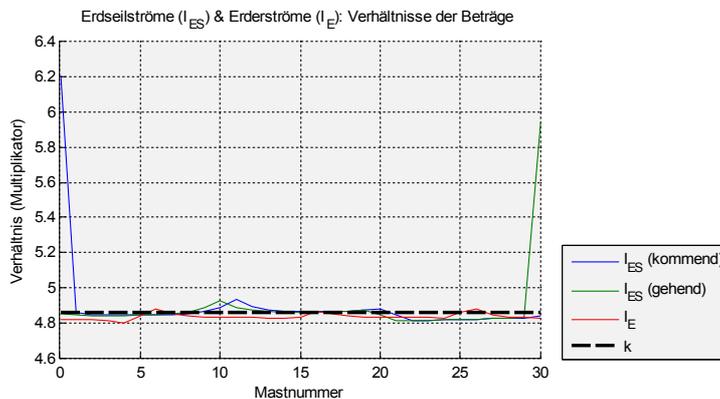


Abbildung 6.8: Verifikation des berechneten Gesamt-Umrechnungsfaktors k (Beispiel 2)

6.2.3.3 Beispiel 3

Parameter	gegebene Freileitung	gesuchte Freileitung
VD	rverdrillt	rverdrillt
QL	erd	erd
Spannfeldanzahl	60	60
SL	0.4 km	0.4 km
SY	2Sys	2Sys
MG	110kVEinebene	110kVTonne
MH (ES)	normal	normal
POK	1 (PB = 123 123)	2 (PB = 123 132)
RB	100 Ωm	100 Ωm
RM	3 Ω	3 Ω
RU	0.5 Ω	0.5 Ω
UB	110 kV	110 kV
IB	1200 A	800 A

Tabelle 6.3: Parametersets von gegebener und gesuchter Freileitung (Beispiel 3)

Bei diesem Beispiel (siehe Tabelle 6.3) besitzen die Parameter 'Spannfeldanzahl', 'SL', 'RM' und 'RU' Werte, für die in dieser Arbeit keine Bodenwiderstandsfaktoren berechnet wurden. Die spezifischen Bodenwiderstände (Parameter 'RB') betragen allerdings jeweils 100 Ωm. Da die Geometriefaktoren auf diesen Wert bezogen und des weiteren unabhängig von den 4 erstgenannten Parametern sind (siehe Kapitel 6.2.1), müssen keine Bodenwiderstandsfaktoren eingesetzt werden. Der entsprechende Term kommt daher in der Berechnung nicht vor.

Weil SY = 2Sys beträgt, gelten die in Tabelle 8.2 enthaltenen Geometriefaktoren. Für die beiden hier betrachteten Mastgeometrien und Phasenoppositionsklassen weist k_G einen Wert von 1.29 auf.

Durch den Wegfall der Bodenwiderstandsfaktoren erfolgt die Berechnung von k nun folgendermaßen:

$$I_{ES, E(ges.)} = I_{ES, E(geg.)} \cdot \underbrace{\left(k_G \cdot \frac{IB_{(ges.)}}{IB_{(geg.)}} \right)}_k$$

$$k = 1.29 \cdot \frac{800 [A]}{1200 [A]}$$

$$k = 0.86$$

Auch dieses Ergebnis weist eine hohe Korrektheit auf, wie der Vergleich mit den per Simulation berechneten Werten zeigt (Beträge: siehe Abbildung 6.9; Faktoren: siehe Abbildung 6.10). Vor allem die Faktoren der Erdseilströme entsprechen sehr genau dem Resultat für k .

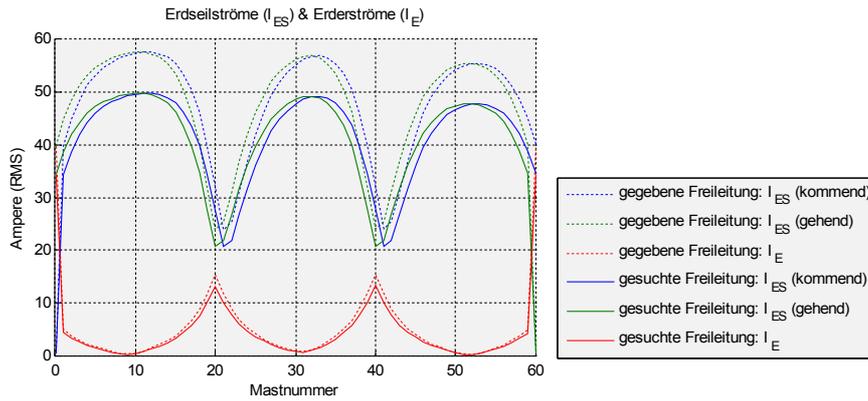


Abbildung 6.9: Gegenüberstellung von gegebener und gesuchter Freileitung (Betragsverläufe; Bsp. 3)

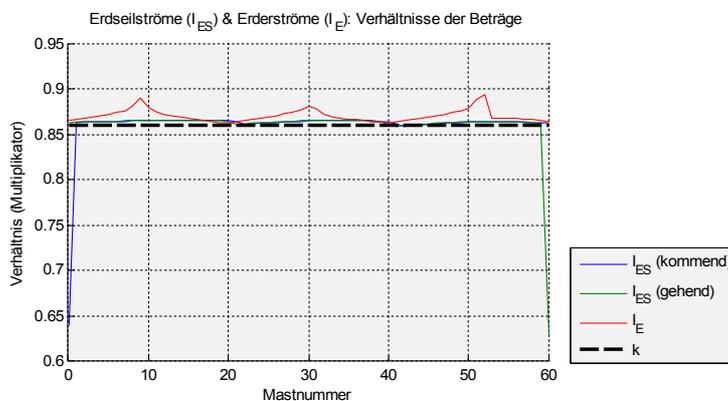


Abbildung 6.10: Verifikation des berechneten Gesamt-Umrechnungsfaktors k (Beispiel 3)

6.2.3.4 Beispiel 4

Dieses Beispiel (siehe Tabelle 6.4) unterstreicht die Praxistauglichkeit des Umrechnungsverfahrens. Anstatt jedem Mast den gleichen Erdungswiderstand zuzuweisen, werden hier unterschiedliche Werte verwendet (siehe Tabelle 6.5). Diese stammen aus einem von einer real existierenden 110-kV-Freileitung erstellten Erdungsprotokoll. Der UW-Erdungswiderstand wird mit 0.8 Ω an der Quelle und 0.5 Ω an der Last festgelegt.

Parameter	gegebene Freileitung	gesuchte Freileitung
VD	rverdrillt	rverdrillt
QL	erd	erd
Spannfeldanzahl	30	30
SL	0.33 km	0.33 km
SY	2Sys	2Sys
MG	110kVTonne	110kVDonau
MH (ES)	normal	normal
POK	3 (PB = 123 213)	2 (PB = 123 132)
RB	100 Ωm	100 Ωm
RM, RU	siehe Tabelle 6.5	siehe Tabelle 6.5
UB	110 kV	110 kV
IB	1000 A	750 A

Tabelle 6.4: Parametersets von gegebener und gesuchter Freileitung (Beispiel 4)

Mastnr.	Widerstand	Mastnr.	Widerstand	Mastnr.	Widerstand
0	0.8 Ω	11	2.5 Ω	21	1.85 Ω
1	5.0 Ω	12	2.75 Ω	22	1.45 Ω
2	3.0 Ω	13	3.7 Ω	23	1.9 Ω
3	4.0 Ω	14	2.2 Ω	24	2.2 Ω
4	5.0 Ω	15	5.0 Ω	25	1.15 Ω
5	1.65 Ω	16	4.7 Ω	26	2.1 Ω
6	2.0 Ω	17	1.9 Ω	27	1.5 Ω
7	2.6 Ω	18	3.25 Ω	28	2.5 Ω
8	2.6 Ω	19	3.2 Ω	29	4.2 Ω
9	1.5 Ω	20	1.55 Ω	30	0.5 Ω
10	2.5 Ω				

Tabelle 6.5: Zuweisung der verwendeten Erdungswiderstände zu den einzelnen Masten

Ähnlich wie beim Beispiel aus Kapitel 6.2.3.3 können die in dieser Arbeit berechneten Bodenwiderstandsfaktoren auch hier nicht verwendet werden. Da die gegebene und die gesuchte Freileitung allerdings erneut einen spezifischen Bodenwiderstand von 100 Ωm aufweisen, lässt sich der Gesamt-Umrechnungsfaktor k abermals ausschließlich mit Hilfe des Geometriefaktors und der Werte der Gesamt-Lastströme berechnen.

In diesem Beispiel besitzt k_G – aufgrund von $SY = 2Sys$ wiederum aus Tabelle 8.2 abgelesen – einen Wert von 0.584.

Für k ergibt sich daher:

$$I_{ES, E(ges.)} = I_{ES, E(geg.)} \cdot \underbrace{\left(k_G \cdot \frac{IB_{(ges.)}}{IB_{(geg.)}} \right)}_k$$

$$k = 0.584 \cdot \frac{750 [A]}{1000 [A]}$$

$$k = 0.438$$

Selbst mit sich von Mast zu Mast ändernden Erdungswiderständen führen Modifikationen, wie die hier vorgenommenen, weiterhin nur zu einer proportionalen Veränderung der Erdseil- und Erderströme (Beträge: siehe Abbildung 6.11; Faktoren: siehe Abbildung 6.12).

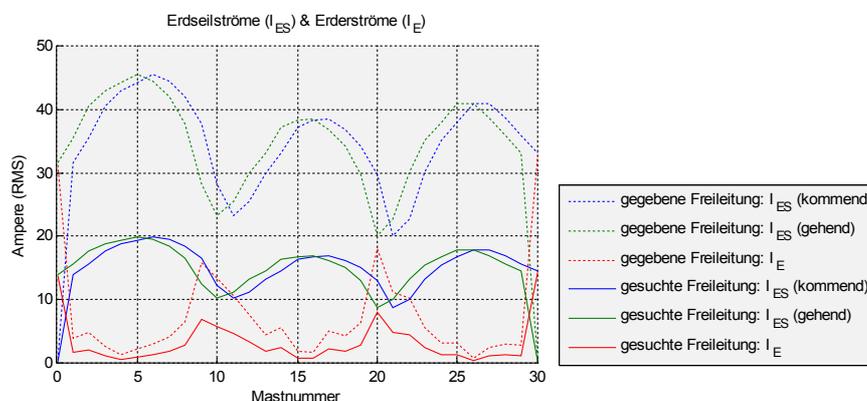


Abbildung 6.11: Gegenüberstellung von gegebener und gesuchter Freileitung (Betragsverläufe; Bsp. 4)

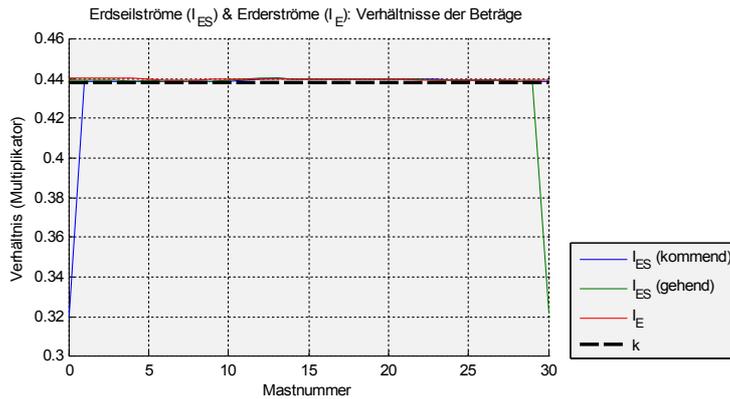


Abbildung 6.12: Verifikation des berechneten Gesamt-Umrechnungsfaktors k (Beispiel 4)

6.2.4 Ergänzende Hinweise

In diesem Unterkapitel werden die Auswirkungen der restlichen Parameter auf die Genauigkeit des Umrechnungsverfahrens analysiert, sowie zusätzliche Anforderungen, Möglichkeiten und Empfehlungen dargelegt.

- Verdrillungsmethode (VD):** Für die Berechnung der Geometrie- und Bodenwiderstandsfaktoren sowie für die Rechenbeispiele in Kapitel 6.2.3 wurden immer homogen verdrillte Freileitungen herangezogen ($VD = r_{\text{verdrillt}}$). Wie die Rechenbeispiele zeigen, weist das Umrechnungsverfahren eine sehr hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit für diesen Parameterwert auf. Sein Einsatz bei unverdrillten Leitungen ($VD = \text{unverdrillt}$) ist grundsätzlich ebenfalls möglich, allerdings mit weitaus geringerer Genauigkeit. Zwar lassen sich die einzelnen Phasenbelegungen zwecks Berechnung der Geometriefaktoren auch hier eindeutig den 5 definierten Phasenoppositionsklassen zuordnen, die Multiplikatoren der Erdseilströme weichen jedoch meist deutlich von denen der Erderströme ab (vergleiche Abbildung 6.13 mit Abbildung 6.2). Ferner ist die Schwankungsbreite innerhalb derer sich die Multiplikatoren bewegen wesentlich höher als bei homogen verdrillten Freileitungen. Bei inhomogen verdrillten Leitungen ($VD = f_{\text{verdrillt}}$) führen Modifikationen der Phasenbelegung zu massiven nichtproportionalen Veränderungen der Betragsverläufe in der Erdungsanlage, wie der Vergleich der Abbildungen 5.4 und 5.5 zeigt. Die Berechnung präziser Geometriefaktoren ist hier bereits aufgrund der mit jedem Verdrillungsschritt wechselnden Phasenopposition praktisch unmöglich. Die Auswirkung der Fälle ' $VD = \text{unverdrillt}$ ' und ' $VD = f_{\text{verdrillt}}$ ' auf die Bodenwiderstandsfaktoren wurde in dieser Arbeit nicht untersucht. Da selbige allerdings ebenfalls von der Phasenoppositionsklasse abhängen, ist das Auftreten ähnlicher Effekte wie bei den Geometriefaktoren nicht ausgeschlossen.

- **Positionen der Verdrillungsmasten:** Wie aus den Erklärungen am Beginn von Kapitel 5.3.2 hervorgeht, wird die Lage der Minima und Maxima innerhalb der Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme durch die Positionen der Verdrillungsmasten festgelegt. Damit alle aus der Umrechnung resultierenden Ströme für das gesuchte Parameterset korrekt sind, müssen daher zusätzlich zu den in Kapitel 6.2.1 gestellten Anforderungen an die Gleichheit von Erdungswiderständen, Spannfeldlänge und Spannfeldanzahl auch die Positionen der Verdrillungsmasten bei der gegebenen und der gesuchten Freileitung jeweils gleich sein.
- **Betriebsart (SY):** Freileitungen deren Parameter 'SY' den Wert '1SysOffen' besitzt, können in der Umrechnung wie solche mit $SY = 2Sys$ und POK 1 behandelt werden (siehe Kapitel 5.4.1). Im Fall 'SY = 1SysKSErd' sind die in Tabelle 8.2 befindlichen Geometriefaktoren für die POK 1 hingegen nicht exakt. Stattdessen sind dann die in Tabelle 8.3 aufgelisteten Multiplikatoren zu verwenden. Der Frage, ob die in den Diagrammen von Kapitel 8.5 enthaltenen Bodenwiderstandsfaktoren auch hier verwendbar sind, wurde in dieser Arbeit nicht nachgegangen. Werden Parametersets mit $SY = 1SysKSErd$ betrachtet, müssen beide Freileitungen (gegebene und gesuchte) diesen Wert aufweisen, da die resultierenden Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme nichtproportional zu den sich bei $SY = 2Sys$ bzw. $SY = 1SysOffen$ ergebenden Verläufen sind (siehe Kapitel 5.4.2).
- **Endpunktbehandlung (QL):** Sind die Werte der Erdungswiderstände niedrig, nimmt die Endpunktbehandlung kaum Einfluss auf die Beträge der Erdseil- und Erderströme (siehe Kapitel 5.5). QL kann in diesem Fall unterschiedliche Werte bei der gegebenen und der gesuchten Freileitung aufweisen. Bei hohen Erdungswiderständen ist der Einfluss dieses Parameters stärker. Wird eine große Genauigkeit bei der Verarbeitung solcher Konfigurationen gewünscht, ist die Verwendung einheitlicher Werte für QL empfehlenswert.
- **Betriebsspannung (UB):** Wie in Kapitel 5.10 beschrieben, verändern sich durch eine Modifikation der Betriebsspannung hauptsächlich die Beträge der Sternpunktströme von Quelle und Last. Im Rest der Erdungsanlage treten hingegen kaum Abweichungen auf. UB kann daher ohne weiteres unterschiedliche Werte bei der gegebenen und der gesuchten Freileitung besitzen. Sind die von diesem Parameter verursachten Betragsänderungen allerdings störend für die Untersuchungen, sollten einheitliche Werte verwendet werden.

- **Trend:** Weisen die gegebene und die gesuchte Freileitung gegenteilige Trends auf, können die einzelnen Werte der Erdseil- und Erderströme trotzdem berechnet werden, sofern Gl. 5.1 zutrifft (siehe Kapitel 5.3.2). Dazu sind die entsprechenden Betragsverläufe der gegebenen Freileitung jeweils an einer vertikal durch den Mittelpunkt der Leitung gehenden Achse zu spiegeln, sowie die Verläufe der kommenden und gehenden Erdseilstrome zu vertauschen (siehe Gl. 5.2 bis 5.4). Die Multiplikation dieses Resultats mit dem berechneten Gesamt-Umrechnungsfaktor k ergibt schließlich die Beträge für die gesuchte Freileitung. Selbst wenn sich zwei Parametersets ausschließlich in ihrem Trend unterscheiden, weichen die jeweils zueinander gehörenden Strombeträge in ihren Erdungsanlagen voneinander ab. Dieser Unterschied kann je nach Konfiguration verschieden hoch sein. Im Zweifelsfall sollten die beiden in der Umrechnung verwendeten Leitungen daher denselben Trend besitzen. Das Vorhandensein dieser soeben besprochenen Variation ist auch in Fällen mit identischem Trend relevant. Ist das Verdrillungsschema einer Freileitung nämlich entgegengesetzt (siehe Abbildung 5.2) und $S_Y \neq 2S_{\text{Sys}}$, nehmen die Strombeträge in der Erdungsanlage je nach ausgeschaltetem System entweder die Werte der POK 1 für den vorliegenden Trend oder jene der POK 1 für den gegenteiligen Trend an (siehe Kapitel 5.4.1.2). Dieser Verlust an Genauigkeit kann jedoch kompensiert werden, indem die Höhe der vom Trend verursachten Betragsabweichung ermittelt wird und selbige in Form eines Korrekturfaktors zusätzlich zu den anderen Multiplikatoren in der Umrechnung angewandt wird.
- **Sternpunktströme:** Abhängig von den miteinander verglichenen Parametersets unterscheiden sich die Multiplikatoren der Sternpunktströme von Quelle und Last oftmals signifikant von den übrigen Multiplikatoren (siehe linke Diagramme in den Abbildungen 6.1 bis 6.4, sowie die entsprechenden Abbildungen in den Kapiteln 6.2.3.1 bis 6.2.3.4). Die im Zuge des Umrechnungsverfahrens zur Anwendung gelangenden Faktoren – dazu zählt auch das Verhältnis der Gesamt-Lastströme I_B – berücksichtigen jedoch ausschließlich die Erdseil- und Erderströme der Freileitung und sind daher auch nur für diese gültig bzw. korrekt.
- **Bezugspunkte der Umrechnungsfaktoren:** Da die Geometriefaktoren k_G unabhängig von den Werten der Erdungswiderstände, der Spannfeldlänge und der Spannfeldanzahl sind, können sie wesentlich flexibler als die Bodenwiderstandsfaktoren k_p benutzt werden (siehe Kapitel 6.2.3.3 und 6.2.3.4). Zur Umgehung notwendiger Einsätze von k_p ist es daher sehr empfehlenswert, alle Faktoren auf jenen Wert von R_B zu beziehen, der für den größtmöglichen Teil der zu untersuchenden Freileitungen zutrifft.

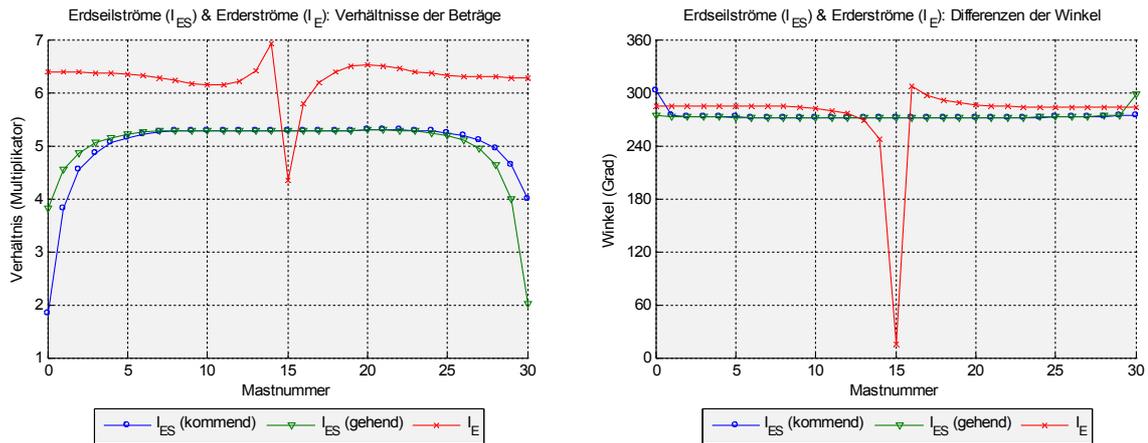


Abbildung 6.13: Fall 'VD = unverdrillt; PB = 123 123 (POK 1); RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω ', verglichen mit dem Fall 'VD = unverdrillt; PB = 123 321 (POK 5); RM = 1 Ω ; RU = 1 Ω '

6.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde mittels numerischer Verfahren analysiert, wie die aus Erdseil und Masterdungen bestehende Erdungsanlage von Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen durch die über solche Leitungen fließenden Lastströme elektrisch beeinflusst wird. Ziel war es dabei, die konkreten Ausprägungen dieser Beeinflussung gezielt auf die baulichen und betrieblichen Kenngrößen der Freileitung zurückzuführen, d.h. den individuellen Beitrag jeder dieser Größen zur Gesamtbeeinflussung festzustellen.

Wie die erhaltenen Ergebnisse zeigen, ist eine für alle Leitungsvarianten gültige Aussage bezüglich der Beeinflussungshöhe in Abhängigkeit von der Höhe des Laststroms praktisch nicht formulierbar. Bereits eine einfache Vertauschung der elektrischen Phasen bei einem der beiden Drehstromsysteme (Modifikation der Phasenbelegung) führt zu signifikanten Änderungen der Ströme in der Erdungsanlage (siehe Abbildung 5.8).

Sind die Erderströme gering, müssen für den Normalbetrieb auch keine hohen Anforderungen an die Erdungswiderstände gestellt werden. Dennoch ist es nicht ratsam, die einzelnen Masterdungen ausschließlich auf die optimale Schaltungsvariante (Phasenoppositionsklasse 5) auszulegen. Muss nämlich aus betrieblichen Gründen eines der beiden Systeme ausgeschaltet werden, und dadurch das verbleibende System den gesamten Laststrom führen, verhält sich die Freileitung wie im schlechtesten Schaltungsfall (Phasenoppositionsklasse 1). Dies führt beispielsweise beim Einebenenmast zu einem Anstieg aller Ströme in der Erdungsanlage um das mehr als Zwanzigfache, wodurch in weiterer Folge auch die vorherrschenden Erderspannungen um diesen Faktor angehoben werden.

Neben der Phasenbelegung bzw. der daraus resultierenden Phasenoppositionsklasse (POK) nimmt auch das Mastkopfbild einen erheblichen Einfluss auf die betrachteten Ströme. So sind diese etwa bei der Verwendung von Tonnenmasten immer ungefähr doppelt so hoch

wie bei der Verwendung von Donaumasten, bei jeweils gleicher POK (siehe Abbildungen 5.26 und 5.28). Die Erdseildistanz ist für die elektrische Beeinflussung der Erdungsanlage ebenfalls signifikant mitbestimmend. Außer beim nach POK 5 beschalteten Donaumast, führt eine Steigerung dieses Abstands zu deutlichen Verringerungen der Erdseil- und Erderströme. Eine Veränderung der Masthöhe fällt am ehesten noch beim Donaumast ins Gewicht, bei den anderen untersuchten Mastkopfbildern ist die Bedeutung dieses Parameters jedoch kaum relevant.

Der Einfluss des spezifischen Bodenwiderstands auf die Ströme in der Erdungsanlage ist je nach Mastkopfbild und Phasenoppositionsklasse unterschiedlich. Am stärksten ist er beim nach POK 5 beschalteten Donaumast, am schwächsten bei der Beschaltung dieses Masts nach POK 3 sowie beim nach POK 5 beschalteten Tonnenmast.

Unabhängig von der genauen Leitungskonfiguration spielen die Werte der Erdungswiderstände immer eine wesentliche Rolle. Je kleiner sie sind, desto höher sind die in der Erdungsanlage auftretenden Ströme. Selbige können zwar durch Vergrößern der Widerstandswerte gesenkt werden, die Erderspannungen steigen dadurch jedoch an. Um die geltenden Bestimmungen zum Schutz vor gefährlichen Berührungs- bzw. Schrittspannungen einzuhalten, sollten die Erdungswiderstände daher trotz allem möglichst niedrig gehalten werden.

Kaum bedeutend sind die Beeinflussungen durch die Endpunktbehandlung und die Betriebsspannung. Für letzteren Parameter gilt dies allerdings nur im direkten Sinn, d.h. wenn der Gesamt-Laststrom der Freileitung unverändert bleibt. Wird die Betriebsspannung erhöht und dabei der Wert der übertragenen elektrischen Leistung konstant gehalten, sinkt der Laststrom dementsprechend und mit ihm – aufgrund des direkt proportionalen Zusammenhangs – auch die Erdseil- und Erderströme. Die Betriebsspannung beeinflusst die Erdungsanlage somit nur indirekt über ihre Beziehung zu den beiden zuvor genannten Größen.

Je länger die Freileitung ist, desto höher sind die Ströme in ihrer Erdungsanlage. Spannfeldlänge und Spannfeldanzahl üben diesbezüglich einen merklichen Einfluss aus. Durch Verkürzen der Spannfeldlänge muss die Spannfeldanzahl erhöht werden und umgekehrt, damit die benötigte Gesamtlänge der Freileitung erhalten bleibt. Ob sich aus der Variation des Verhältnisses von Spannfeldlänge zu Spannfeldanzahl Optimierungspotentiale ergeben, wurde in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht.

Ebenfalls nicht untersucht wurden die Fragen, wie sich die Verwendung von mehr als 2 Verdrillungsmasten auswirkt, bzw. welche Folgen ein Versatz derselben hat (ungleiche Spannfeldanzahl in jedem Leitungsabschnitt). Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass die in

dieser Arbeit getätigten Aussagen und das in Kapitel 6.2 vorgestellte Umrechnungsverfahren auch hier Gültigkeit besitzen.

Entscheidend für die elektrische Beeinflussung der Erdungsanlage ist schließlich auch der letzte noch verbleibende Parameter, die Verdrillungsmethode. Hier erweist sich allerdings nur eine Variante als praktikabel, nämlich die homogene Verdrillung. Bei unverdrillten Freileitungen erfolgt die Übertragung der elektrischen Energie deutlich unsymmetrisch (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 5.1). Inhomogen verdrillte Freileitungen weisen in diesem Punkt zwar ein wesentlich besseres Verhalten auf, die Betragsverläufe der Erdseil- und Erderströme sind jedoch nichtproportional zu den korrespondierenden Verläufen anderer Konfigurationen (vergleiche Abbildung 5.4 mit Abbildung 5.5). Dies macht entsprechende Vergleiche und Umrechnungen praktisch undurchführbar. Die homogene Verdrillungsmethode besitzt keinen dieser Nachteile und ist daher am empfehlenswertesten.

6.4 Weiterführende Überlegungen

Mit der Simulink-Bibliothek 'FLK_library' wurde ein vielseitiges Werkzeug zur Analyse des elektrischen Verhaltens von Freileitungen geschaffen. Dank seiner sehr detaillierten Konfigurationsmöglichkeiten lassen sich bereits existierende Leitungen, ebenso wie in Planung befindliche, exakt modellieren. Weil jeder Parameterwert unabhängig von allen anderen eingestellt werden kann, sind Ermittlungen nach dem Ursache-Wirkung-Prinzip besonders gut durchführbar. Dies ermöglicht die akkurate Evaluierung maßgeschneiderter Optimierungen, aber auch die genaue Vorhersage der Auswirkungen interessierender Betriebs- bzw. Fehlerzustände. Basierend auf diesen Vorhersagen können dann für die betrachtete Freileitung individuelle Überwachungs- und Schutzmaßnahmen konzipiert werden.

Die Ergebnisse der mit Hilfe von FLK_library durchgeführten Untersuchungen dieser Arbeit bilden ein solides Fundament zum besseren Verständnis elektrischer Beeinflussungen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse erlauben es, zukünftige Studien effizienter und zielgerichteter zu planen und umzusetzen. So bestehen weitere Forschungsmöglichkeiten etwa in der Analyse der Auswirkungen variabler, voneinander unterschiedlicher Lastflüsse in beiden Systemen der Freileitung. Die Erkundung unsymmetrischer Beschaltungen, d.h. Phasenbelegungen bei denen jedem Drehstromsystem Phasenseile auf beiden Seiten des Masts zugewiesen werden, stellt ebenfalls ein Beispiel eines zusätzlichen Betrachtungsfelds dar.

Das basierend auf den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit entwickelte Umrechnungsverfahren gestattet den schnellen und unkomplizierten Vergleich verschiedener Leitungskonfigurationen. Beste und schlechteste Fälle sind mit ihm sofort

auffindbar und die Auswirkungen von Parametermodifikationen direkt kalkulierbar. Damit stellt es ein nützliches Hilfsmittel in Bereichen wie etwa der Verfassung von Datenblättern oder Normen dar. Um die Beträge der Erdseil- und Erderströme für eine Konfiguration aus einer anderen Konfiguration berechnen zu können, müssen die Werte einiger Parameter jedoch bei beiden Konfigurationen identisch sein. Dies liegt darin begründet, da sich die Verläufe der genannten Beträge zur durchgehenden Sicherstellung der Genauigkeit nur in einer Proportionalitätskonstante, dem Gesamt-Umrechnungsfaktor k , unterscheiden dürfen. Ist das Aussehen der Verläufe hingegen nicht von Interesse, sondern beispielsweise nur der Wert des größten vorkommenden Stroms, lassen sich Unterschiede in diesen Parameterwerten möglicherweise in Form weiterer Multiplikatoren in das Umrechnungsverfahren integrieren. Dadurch würde selbiges noch universeller und flexibler einsetzbar werden.

7 Literatur

- [1] The MathWorks, Inc.: „Dot-Dot-Dot (Ellipsis) - ... :: Basic Program Components (MATLAB Programming)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [2] The MathWorks, Inc.: „ver :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [3] The MathWorks, Inc.: „About Masks :: Creating Masked Subsystems (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [4] The MathWorks, Inc.: „Creating Subsystems :: Creating a Model (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [5] The MathWorks, Inc.: „Signal Basics :: Working with Signals (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [6] The MathWorks, Inc.: „Interfacing the Electrical Circuit with Simulink :: Getting Started (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [7] The MathWorks, Inc.: „Connection Port :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [8] The MathWorks, Inc.: „Inport :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [9] The MathWorks, Inc.: „Outport :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [10] The MathWorks, Inc.: „Distributed Parameter Line :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [11] The MathWorks, Inc.: „PI Section Line :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [12] The MathWorks, Inc.: „Current Measurement :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [13] The MathWorks, Inc.: „Series RLC Branch :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [14] The MathWorks, Inc.: „Ground :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [15] The MathWorks, Inc.: „Voltage Measurement :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [16] The MathWorks, Inc.: „Bus Creator :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [17] The MathWorks, Inc.: „Terminator :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser

- [18] The MathWorks, Inc.: „Structures :: Data Types (MATLAB Programming)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [19] The MathWorks, Inc.: „Bus Selector :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [20] The MathWorks, Inc.: „To Workspace :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [21] The MathWorks, Inc.: „Clock :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [22] The MathWorks, Inc.: „Gain :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [23] The MathWorks, Inc.: „Using Callback Functions :: Creating a Model (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [24] The MathWorks, Inc.: „Mux :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [25] The MathWorks, Inc.: „Bus Assignment :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [26] The MathWorks, Inc.: „Controlled Current Source :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [27] The MathWorks, Inc.: „MATLAB Fcn :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [28] The MathWorks, Inc.: „Constant :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [29] The MathWorks, Inc.: „Relational Operator :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [30] The MathWorks, Inc.: „Switch :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [31] The MathWorks, Inc.: „Ground :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [32] The MathWorks, Inc.: „Three-Phase Programmable Voltage Source :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [33] The MathWorks, Inc.: „Three-Phase Series RLC Load :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [34] The MathWorks, Inc.: „Powergui :: Blocks (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [35] The MathWorks, Inc.: „Model Construction Commands (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [36] The MathWorks, Inc.: „Creating Matrices :: Matrices and Linear Algebra (Mathematics)“, MATLAB R2006b Help Browser

- [37] The MathWorks, Inc.: „Functions - By Category (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [38] The MathWorks, Inc.: „Functions - Alphabetical List (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [39] The MathWorks, Inc.: „Simulation Commands (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [40] The MathWorks, Inc.: „Data Store Memory :: Blocks (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [41] The MathWorks, Inc.: „Characters and Strings :: Data Types (MATLAB Programming)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [42] The MathWorks, Inc.: „sim :: Simulation Commands (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [43] The MathWorks, Inc.: „Simulating Dynamic Systems :: How Simulink Works (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [44] The MathWorks, Inc.: „Configuration Parameters Dialog Box :: Running Simulations (Simulink)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [45] The MathWorks, Inc.: „power_lineparam :: Commands (SimPowerSystems)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [46] The MathWorks, Inc.: „Cell Arrays :: Data Types (MATLAB Programming)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [47] The MathWorks, Inc.: „norm :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [48] The MathWorks, Inc.: „fft :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [49] The MathWorks, Inc.: „i :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [50] The MathWorks, Inc.: „j :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [51] The MathWorks, Inc.: „complex :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [52] The MathWorks, Inc.: „Editing Plots :: Plots and Plotting Tools (Graphics)“, MATLAB R2006b Help Browser

- [53] The MathWorks, Inc.: „Organization of Graphics Objects :: Handle Graphics Objects (Graphics)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [54] The MathWorks, Inc.: „Figure Properties :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [55] The MathWorks, Inc.: „Axes Properties :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [56] The MathWorks, Inc.: „Lineseries Properties :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [57] The MathWorks, Inc.: „Line Properties :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [58] The MathWorks, Inc.: „findobj :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [59] The MathWorks, Inc.: „gcf :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [60] The MathWorks, Inc.: „get :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [61] The MathWorks, Inc.: „set :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser
- [62] The MathWorks, Inc.: „copyobj :: Functions (MATLAB Function Reference)“, MATLAB R2006b Help Browser

8 Anhang

8.1 Tabelle der Phasenoppositionsclassen

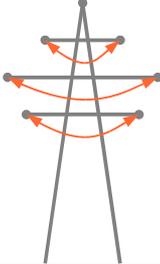
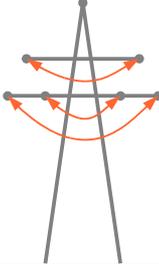
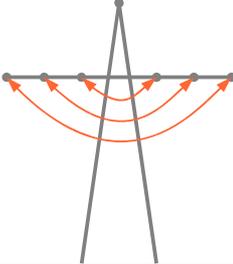
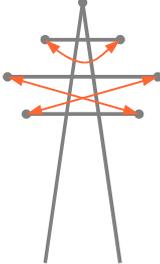
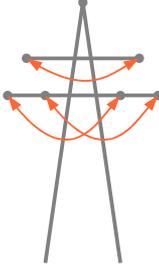
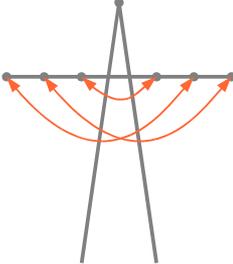
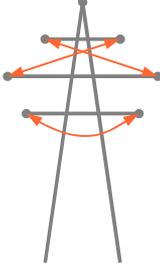
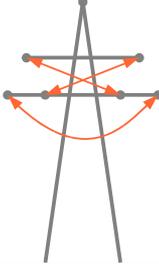
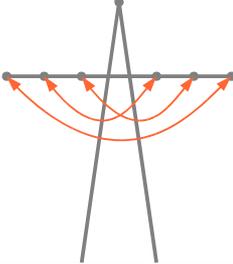
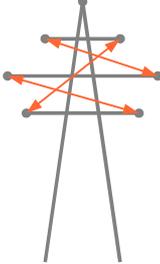
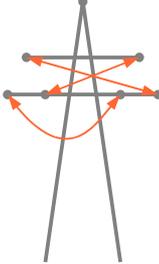
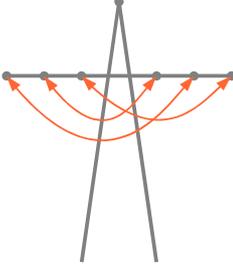
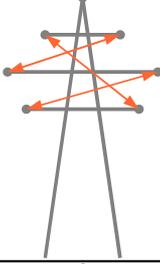
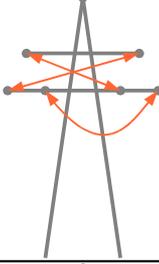
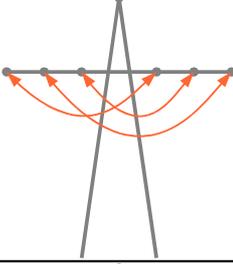
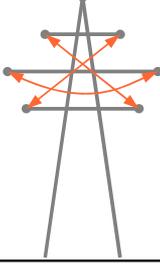
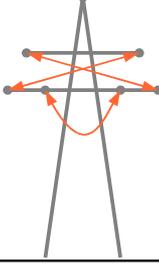
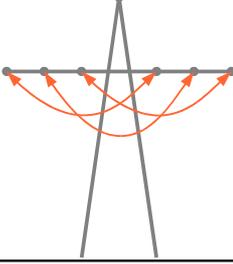
POK	Tonnenmast	Donaumast	Einebenenmast
1			
2			
3			
4			
			
5			

Tabelle 8.1: Zuordnung der Phasenoppositionen zu den Phasenoppositionsclassen

8.2 Skizzen der untersuchten Mastkopfbilder

Sämtliche Maße der in den folgenden Unterabschnitten enthaltenen Skizzen sind in Meter angegeben. Wie in den Kapiteln 4.4.2.1 und 4.4.2.2 erwähnt, handelt es sich dabei um die Werte von Standardmasten bei Nennhöhe, d.h. bei $MH = \text{normal}$.

Die vertikalen Abmessungen beschreiben die am Mast vorherrschenden Abstände der einzelnen Leiterseile – genauer: deren Mittelpunkte – zum Boden. Die mit diesen Seilen in Zusammenhang stehenden geometrischen und elektrischen Parameter sind in Kapitel 8.3 angegeben.

8.2.1 Mastkopfbild 'Tonne'

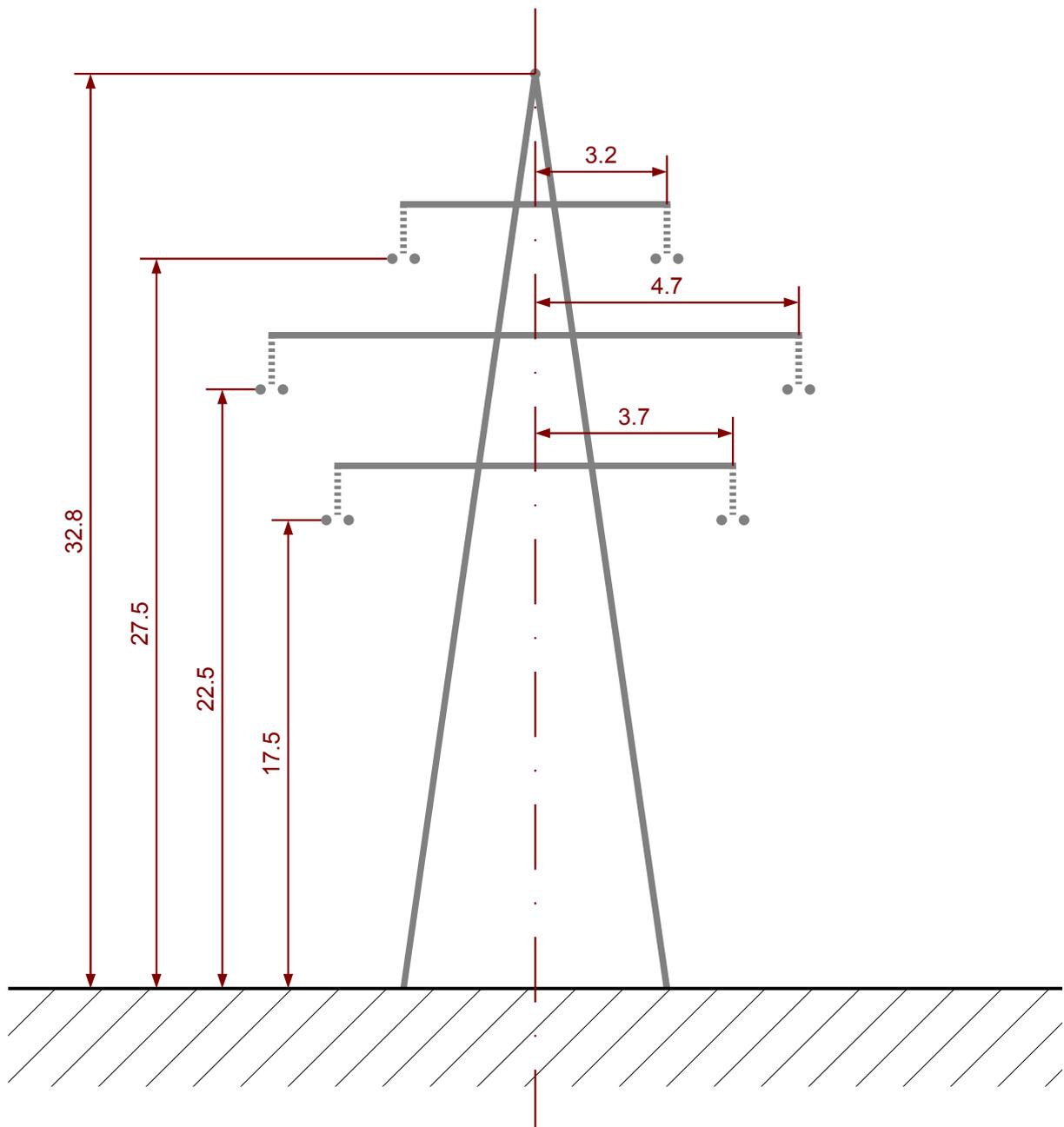


Abbildung 8.1: Bemaßte Skizze des Mastkopfbilds 'Tonne' (MG = 110kVTonne; MH = normal)

8.2.2 Mastkopfbild 'Donau'

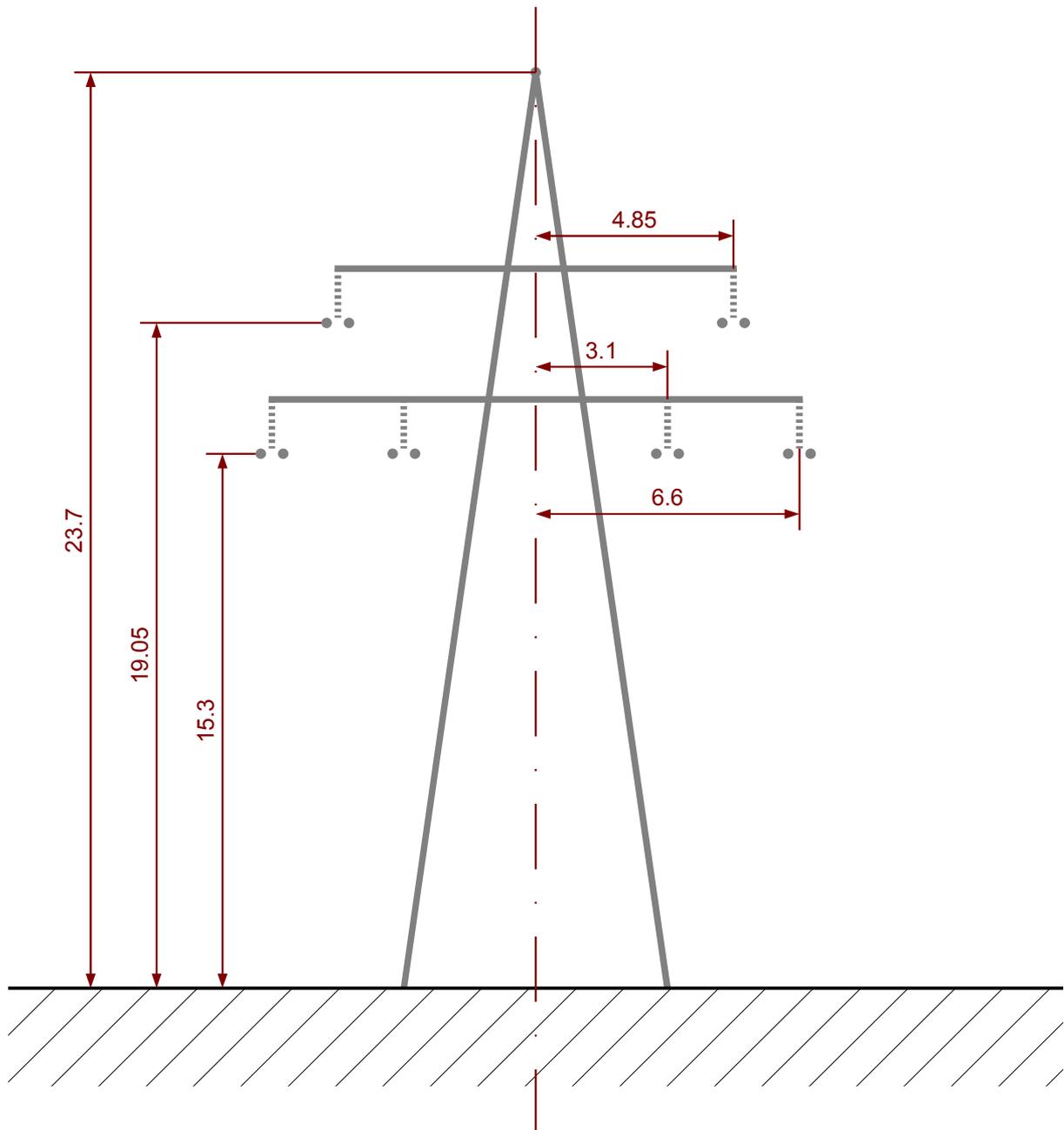


Abbildung 8.2: Bemaßte Skizze des Mastkopfbilds 'Donau' (MG = 110kVDonau; MH = normal)

Der Parameter 'Conductor T/D ratio' gibt das Verhältnis von der Dicke 'T' des leitfähigen Teils zum Gesamtdurchmesser 'D' des Leiterseils an.

Der Leiterseildurchhang (Unterschied zwischen den Werten von 'Y tower (m)' und 'Y min (m)' im Bereich 'Line Geometry' in Abbildung 8.5) wird immer einheitlich mit 9.8 m festgelegt.

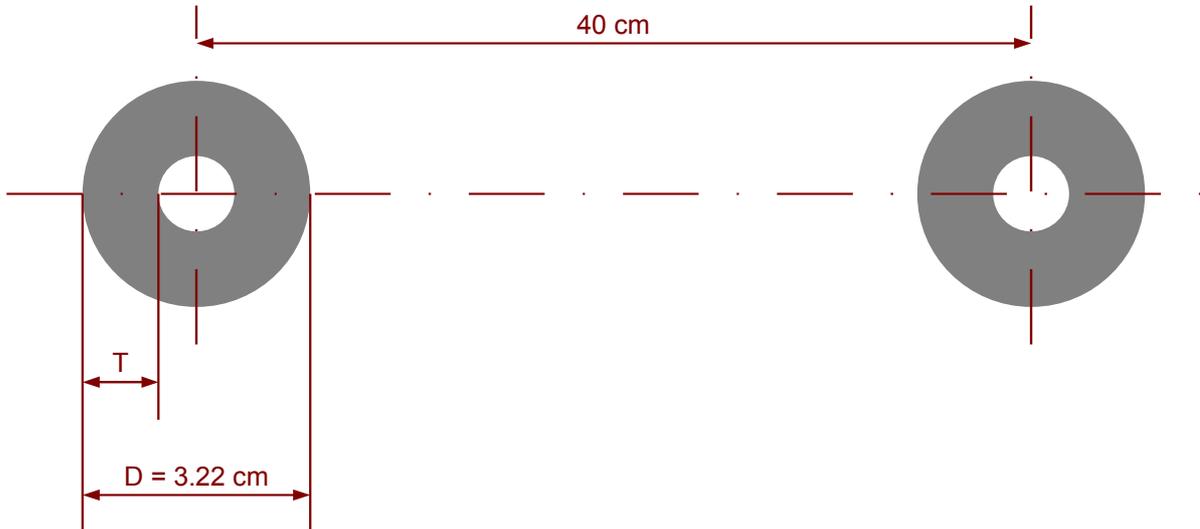


Abbildung 8.4: Bemaßte Skizze des für die Phaseleine verwendeten Leiterseilbündels

Power_lineparam. Line Data of 110kV_Tonne.mat

Units: metric
 Frequency (Hz): 50
 Ground resistivity (ohm.m): 100

Comments:
 Seilbelegung:
 2x3x2 STALU 560/50
 1 STALU 95/34
 Seildurchhang in Spannungsfeldmitte: 9.8 m
 Das Erdseil wird wie ein eigenständiges (siebtes) Phaseileil behandelt.

Line Geometry

Number of phase conductors (bundles): 7
 Number of ground wires (bundles): 0

Conductor (bundle)	Phase number	X (m)	Y tower (m)	Y min (m)	Conductor (bundle) type
p 3	3	-3.7	17.5	7.7	1
p 4	4	3.2	27.5	17.7	1
p 5	5	4.7	22.5	12.7	1
p 6	6	3.7	17.5	7.7	1
p 7	7	0	32.8	23	2

Conductor and Bundle Characteristics

Number of conductor types or bundle types: 2
 Conductor internal inductance evaluated from: T/D ratio
 Include conductor skin effect

Conductor (bundle) type	Conductor outside diameter (cm)	Conductor T/D ratio	Conductor GMR (cm)	Conductor DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability	Number of conductors per bundle	Bundle diameter (cm)	Angle of conductor 1 (degrees)
1	3.22	0.36	1.29907	0.05	1	2	40	180
2	1.48	0.25	0.630378	0.297	1	1	0	0

Load Save Compute RLC line parameters Help Close

Abbildung 8.5: In SimPowerSystems integriertes Werkzeug power_lineparam ([45]) mit geladener Konfiguration (MG = 110kVTonne; MH = normal; RB = 100 Ωm)

8.4 Erstellte Geometrie-Umrechnungstabellen K_e

Faktoren bezogen auf $R_B = 100 \Omega_m$		GEGEBENE Freileitung														
		MG = 110kVTonne MH = normal					MG = 110kVDonau MH = normal					MG = 110kVEinebene MH = normal				
		POK 1	POK 2	POK 3	POK 4	POK 5	POK 1	POK 2	POK 3	POK 4	POK 5	POK 1	POK 2	POK 3	POK 4	POK 5
POK 1	1	1.07	1.35	2.22	5.43	2.13	2.31	2.87	4.44	11.61	1.60	1.38	1.69	2.86	30.15	
POK 2	0.935	1	1.262	2.075	5.075	1.991	2.159	2.682	4.150	10.851	1.495	1.290	1.579	2.673	28.178	
POK 3	0.741	0.793	1	1.644	4.022	1.578	1.711	2.126	3.289	8.600	1.185	1.022	1.252	2.119	22.333	
POK 4	0.451	0.482	0.608	1	2.446	0.960	1.041	1.293	2.000	5.230	0.721	0.622	0.761	1.288	13.581	
POK 5	0.184	0.197	0.249	0.409	1	0.392	0.425	0.529	0.818	2.138	0.295	0.254	0.311	0.527	5.553	
POK 1	0.470	0.502	0.634	1.042	2.549	1	1.085	1.347	2.085	5.451	0.751	0.648	0.793	1.343	14.155	
POK 2	0.433	0.463	0.584	0.961	2.351	0.922	1	1.242	1.922	5.026	0.693	0.597	0.732	1.238	13.052	
POK 3	0.348	0.373	0.470	0.774	1.892	0.742	0.805	1	1.547	4.045	0.558	0.481	0.589	0.997	10.505	
POK 4	0.225	0.241	0.304	0.500	1.223	0.480	0.520	0.646	1	2.615	0.360	0.311	0.381	0.644	6.791	
POK 5	0.086	0.092	0.116	0.191	0.468	0.184	0.199	0.247	0.382	1	0.138	0.119	0.146	0.246	2.597	
POK 1	0.725	0.775	0.978	1.609	3.935	1.544	1.674	2.080	3.217	8.413	1.159	1	1.225	2.073	21.848	
POK 2	0.625	0.669	0.844	1.388	3.394	1.331	1.444	1.794	2.775	7.256	1	0.863	1.056	1.788	18.844	
POK 3	0.592	0.633	0.799	1.314	3.213	1.260	1.367	1.698	2.627	6.870	0.947	0.817	1	1.692	17.840	
POK 4	0.350	0.374	0.472	0.776	1.899	0.745	0.808	1.004	1.552	4.059	0.559	0.483	0.591	1	10.542	
POK 5	0.033	0.036	0.045	0.074	0.180	0.071	0.077	0.095	0.147	0.385	0.053	0.046	0.056	0.095	1	

Tabelle 8.2: Geometrie-Umrechnungstabelle für die Fälle 'SY = 2Sys' und 'SY = 1SysOffen'

Faktoren bezogen auf RB = 100 Ωm	GEGEBENE Freileitung		
	MG = 110kVTonne MH = normal	MG = 110kVDonau MH = normal	MG = 110kVEinebene MH = normal
MG = 110kVTonne MH = normal	1	1.94	1.32
MG = 110kVDonau MH = normal	0.516	1	0.680
MG = 110kVEinebene MH = normal	0.758	1.470	1

Tabelle 8.3: Geometrie-Umrechnungstabelle für den Fall 'SY = 1SysKErd'

8.5 Diagramme der berechneten Bodenwiderstandsfaktoren k_p

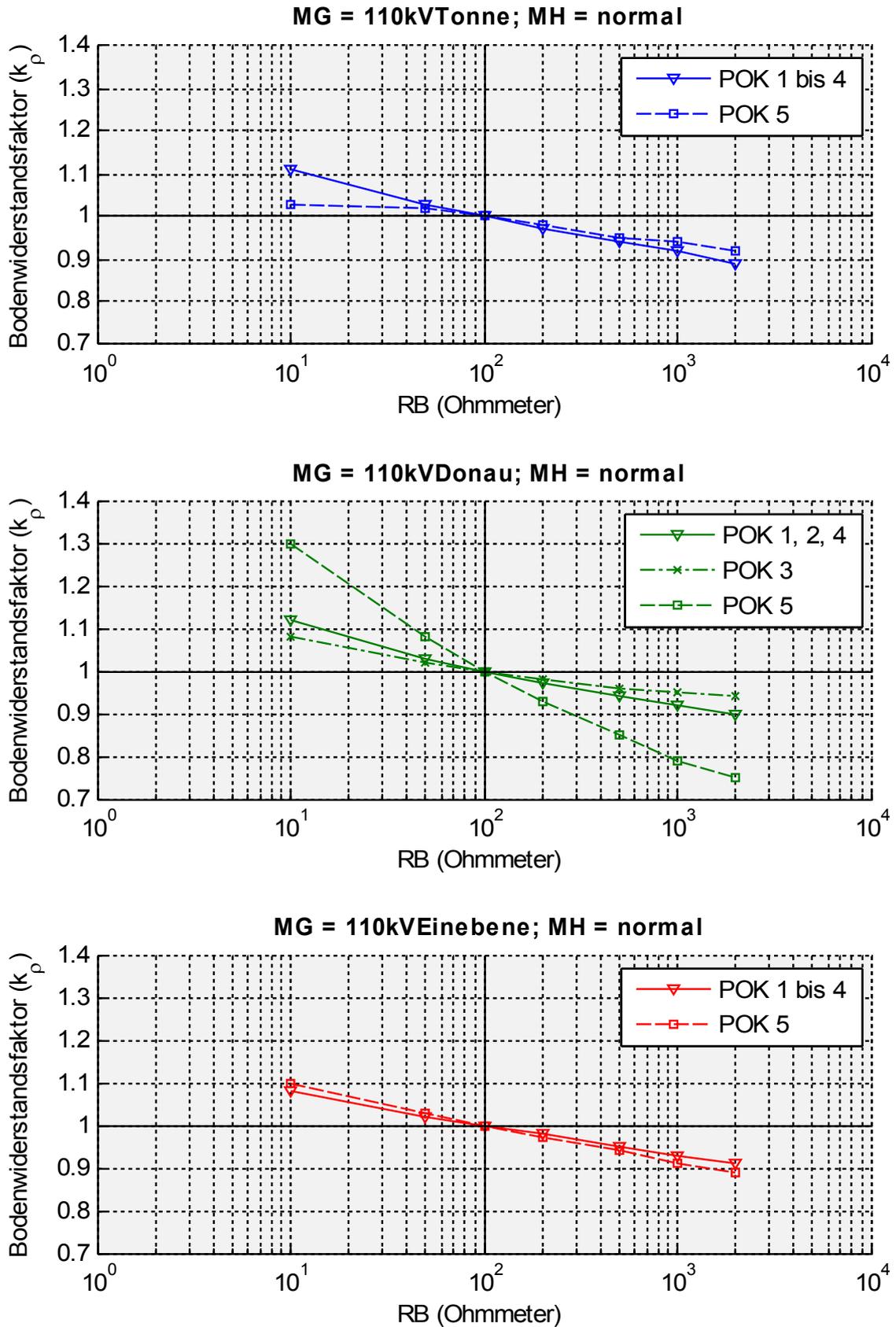


Abbildung 8.6: Auf $RB = 100 \Omega m$ bezogene Bodenwiderstandsfaktoren für den Fall $'RM = 1 \Omega; RU = 1 \Omega; SL = 0.33 \text{ km}; \text{Spannfeldanzahl} = 30'$

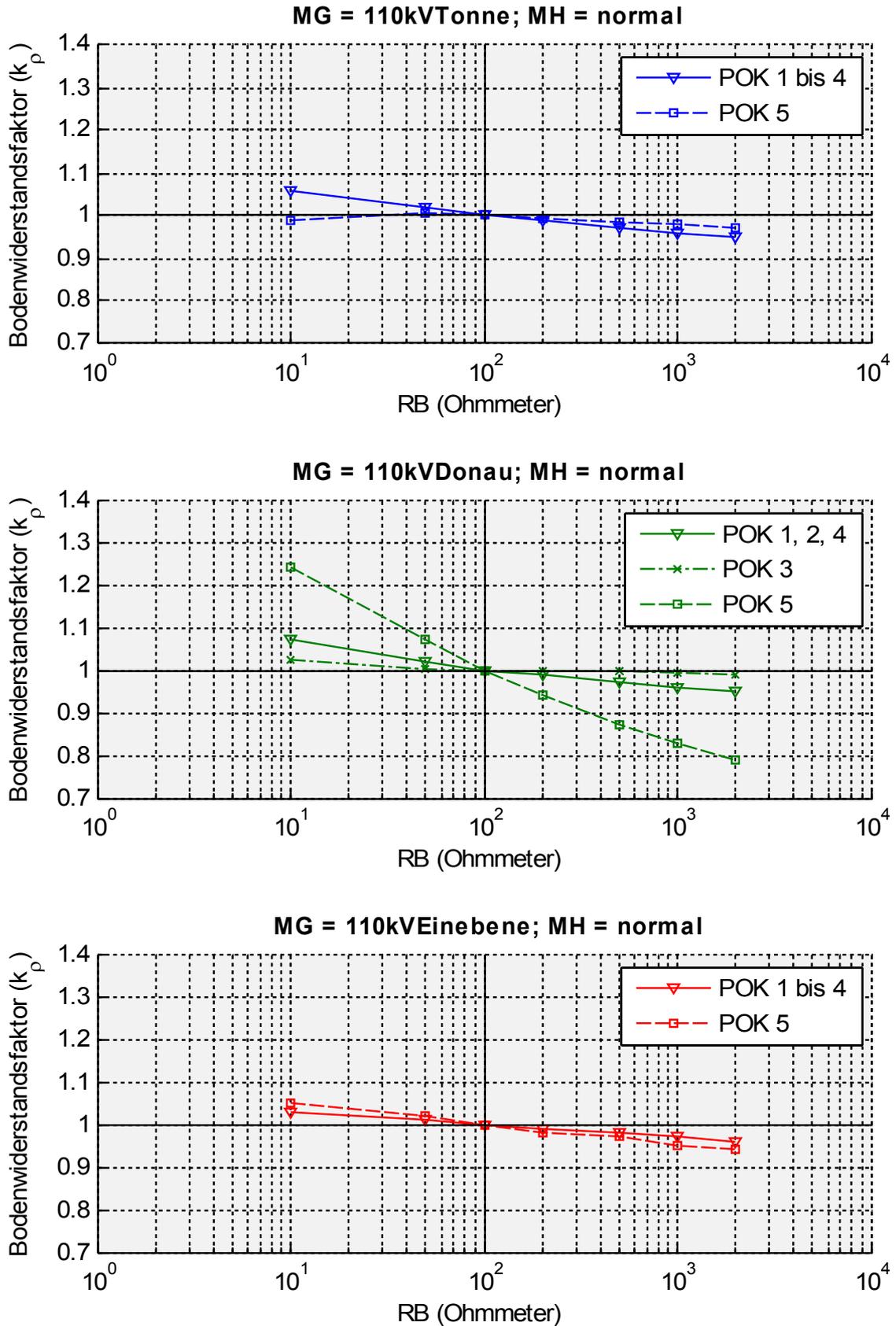


Abbildung 8.7: Auf $RB = 100 \Omega$ bezogene Bodenwiderstandsfaktoren für den Fall 'RM = 10 Ω ; RU = 10 Ω ; SL = 0.33 km; Spannfeldanzahl = 30'