
DISSERTATION

VEREINFACHTE KURZSCHLUSSTROMBERECHNUNG FÜR MITTEL- UND NIEDERSpannungSGLEICH- STROMNETZE

Raphael Bleilevens

Vereinfachte Kurzschlussstromberechnung für Mittel- und Niederspannungsgleich- stromnetze

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Master of Science
Raphael Bleilevens
aus Geilenkirchen

Berichter:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Albert Moser
Universitätsprofessor Antonello Monti, Ph.D.

Tag der mündlichen Prüfung:
30. Oktober 2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek
online verfügbar

AACHENER BEITRÄGE ZUR ENERGIEVERSORGUNG

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser

Bleilevens, Raphael:
Vereinfachte Kurzschlussstromberechnung für Mittel- und Niederspannungs-
gleichstromnetze

1. Auflage Aachen:
printproduction, 2020
(Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 203)

ISBN 978-3-941704-98-5

© 2020 Raphael Bleilevens

printproduction M.Wolff GmbH
Theaterstrasse 82
52062 Aachen
Telefon: 0241 / 47014 0
Email: info@printproduction.de

Druck: printproduction M. Wolff GmbH, Aachen

„D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)“

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft sowie dessen Nachfolger, dem Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft, der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule in Aachen.

Die Anregung zu dieser Arbeit gab Herr Professor Albert Moser, der ebenfalls durch zahlreiche Ratschläge und Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Hierfür, für das entgegengebrachte Vertrauen sowie die Förderung meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung danke ich Herrn Professor Albert Moser sehr herzlich. Für die freundliche Übernahme des Korreferates danke ich herzlichst Herrn Professor Antonello Monti.

Allen ehemaligen Kollegen des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft und insbesondere der ehemaligen Forschungsgruppe „Systemstabilität und Versorgungssicherheit“ sowie allen ehemaligen und derzeitigen Kollegen des Instituts für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft danke ich für die stets angenehme und produktive Zusammenarbeit. Ohne die fachlichen Diskussionen und die sich dabei ergebende wertvolle, konstruktive Kritik wäre diese vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen.

Weiterhin danke ich den Kollegen im Rahmen des Forschungscampus Flexible Elektrische Netze für die fachliche Unterstützung sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Projektes FKZ 03SF0488.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und in besonderem Maße meinen Eltern, die mir meinen gesamten Ausbildungsweg ermöglicht, mich auf diesem zu jeder Zeit unterstützt und bei den damit verbundenen Entscheidungen bestärkt und motiviert haben.

Meiner Verlobten Corinna danke ich von ganzem Herzen für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und ihren Rückhalt, was zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen	vii
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Stand der Normung	2
1.3 Stand der Forschung	5
1.4 Fragestellungen und Ziel der Arbeit	6
2 Analyse	9
2.1 Fragestellungen der Analyse	9
2.2 Aufbau von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze	10
2.2.1 Funktionsweise	10
2.2.2 Einbindung in das heutige Elektrizitätsversorgungssystem	11
2.2.3 Umrichterstation	13
2.2.4 Gleichspannungswandlerstation	14
2.2.5 Leistungselektronische Wandler	14
2.2.6 Netzstruktur	29
2.2.7 Stromführende Betriebsmittel	30
2.2.8 Netzkonzepte für Gleichstromnetze	31
2.2.9 Neutralpunktbehandlung	36

2.3	Bewertung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode	37
2.3.1	Vergleichsdaten zur Bewertung	37
2.3.2	Bewertungsgrößen	38
2.4	Schutz vor Kurzschlussströmen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen	41
2.4.1	Schutzkonzepte für Gleichstromnetze	42
2.4.2	Einfluss des Schutzes auf die Kurzschlussstromberechnung	42
2.5	Kurzschlüsse in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze	43
2.5.1	Relevante Kurzschlussarten	43
2.5.2	Relevante Kurzschlusspositionen	45
2.6	Verhalten von Betriebsmittel im Kurzschlussfall	46
2.6.1	Netzinterne Kurzschlussstromquellen	47
2.6.2	Verhalten von Umrichtern bei Kurzschlüssen auf der Gleichstromseite	49
2.6.3	Verhalten von Gleichspannungswandlern bei Kurzschlüssen auf den Gleichstromseiten	55
2.6.4	Netzexterne Kurzschlussstromquellen	59
2.6.5	Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom	59

3 Transiente Vergleichsrechnung 63

3.1	Modellierung von Kondensatoren	63
3.2	Modellierung von Leitungen	64
3.3	Modellierung von Spulen	65
3.4	Modellierung von leistungselektronischen Wandlern	65
3.4.1	Modellierung der leistungselektronischen Schaltelemente	66
3.4.2	Modellierung von Umrichtern	66
3.4.3	Modellierung von Gleichspannungswandlern	67
3.5	Modellierung von netzexternen Kurzschlussstromquellen	69

3.5.1	Modellierung von elektrisch nahen netzexternen Kurzschlussstromquellen	69
3.5.2	Modellierung von elektrisch fernen netzexternen Kurzschlussstromquellen	70
3.6	Modellierung von Betriebsmitteln mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom	71
3.6.1	Modellierung von Betriebsmittel im Drehstromnetz mit dämpfendem Einfluss	71
3.6.2	Modellierung von Betriebsmitteln im Gleichstromnetz mit dämpfendem Einfluss	71
3.6.3	Modellierung von weiteren kurzschlussstromführenden Stromleitern	72
4	Vereinfachte Kurzschlussstromberechnung	73
4.1	Berechnungsansatz Superposition von approximierten Stromverläufen	73
4.2	Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Kurzschlussstromquellen	74
4.2.1	Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzinternen Kurzschlussstromquellen	74
4.2.2	Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen Kurzschlussstromquellen über Umrichter	79
4.2.3	Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen Kurzschlussstromquellen über Gleichspannungswandlern	87
4.2.4	Modellierung des Gleichstromsystems für die Approximation der Kurzschlussstrombeiträge	89
4.2.5	Berechnungsmethode zur Bestimmung der stationären Kurzschlussströme	91
4.3	Superponieren der approximierten Stromverläufe	92
5	Untersuchungen	95
5.1	Vorgehensweise und Untersuchungsprogramm	95

5.2	Bewertung der Berechnung von Kurzschlussstromkenngrößen beliebiger Teilkurzschlussströme	97
5.2.1	Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen	98
5.3	Bewertung der Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen	102
5.3.1	Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen	103
5.3.2	Radiale 13-Knoten-Anordnung	120
5.3.3	Vermaschte 14-Knoten-Anordnung	123
5.4	Einordnung und Diskussion	128
6	Zusammenfassung	131
7	Literaturverzeichnis	135
8	Abbildungsverzeichnis	147
9	Tabellenverzeichnis	153
10	Veröffentlichungen	155
11	Studentische Arbeiten	157
A	Anhang zur Analyse	159
A.1	Klassifizierung von leistungselektronischen Wandlern	160
A.2	Definition elektrisch naher und ferner netzexterner Kurzschlussstromquellen	161
B	Anhang zur Transienten Vergleichsrechnung	163
B.1	Parameter des Kondensatormodells	164
B.2	Parameter des Leitungsmodells	166
B.3	Ermittlung der notwendigen Anzahl an Kettengliedern von Leitungen	168
B.4	Parameter des Spulenmodells	173
B.5	Parameter des Umrichterregelung	174

B.6	Parameter des Modells für Sammelschienen und Abgangsfelder	176
C Anhang zur vereinfachten Kurzschlussstromberechnung		177
C.1	Datenbedarf zu netzinternen Kondensatoren	178
C.2	Datenbedarf zu Gleichstromleitungen	180
C.3	Standardmodelle für Umrichter	182
C.4	Datenbedarf zu Typ 1-Umrichtern	185
C.5	Datenbedarf zu Typ 2-Umrichtern	187
C.6	Datenbedarf zu Typ 3-Umrichtern	190
C.7	Standardmodellen für Gleichspannungswandler	193
C.8	Datenbedarf zu Gleichspannungswandlern	195
C.9	Datenbedarf zu Sammelschienen und Abgangsfeldern	197
C.10	Datenbedarf zu Kurzschlussstrombegrenzern	199
C.11	Bestimmung der Thévenin-Äquivalente für das iterative Verfahren aus Kapitel 4.2.5	201
D Anhang zu den Untersuchungen		205
D.1	Exemplarische Ergebnisse zu Kapitel 5.2.1.2	206
D.2	Eingangsdaten der 2-Knoten-Anordnungen	209
D.3	Exemplarische Ergebnisse zu Kapitel 5.3.1.2	242
D.4	Eingangsdaten der 13-Knoten-Anordnung (Mittelspannung)	248
D.5	Eingangsdaten der 13-Knoten-Anordnung (Niederspannung)	249
D.6	Eingangsdaten der 14-Knoten-Anordnung (Mittelspannung)	250
D.7	Eingangsdaten der 14-Knoten-Anordnung (Niederspannung)	252
E Lebenslauf		255

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

1P	Einphasig
2L	Zwei-Level
3P	Dreiphasig
AC	Drehstrom
ACCSM	Asymmetric Cross Connected Submodul
AF	Abgangsfeld
B6-Gleichrichter	Sech-Puls-Diodengleichrichter
BT	Bipolartransistor
CSC	Current Source Converter
DAB	Dual-Active-Bridge-Gleichspannungswandler
DC	Gleichstrom
DC-FRT	DC-Fehlerdurchfahrt
DCM	Diode-Clamped-Multilevel
DC-P2P	Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindung
DCSM	Double Clamp Submodul
DFIG	Doppelt Gespeiste Asynchronmaschine
EMT	Elektromagnetische Transiente Ausgleichsvorgänge
FCM	Flying-Capacitor-Multilevel
GTO	Gate-Turn-Off Thyristor
HBSM	Halbbrückensubmodul
HS	Hochspannung
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor

KSS-Begrenzer	Kurzschlussstrombegrenzer
KSSB	Kurzschlussstrombegrenzer
LCC	Line Comutated Converter
MMC	Modularer Multilevel Converter
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PWM	Pulsweitenmodulation
RMS	Effektivwert, quadratische Mittelwert
SCCSM	Symmetric Cross Connected Submodul
SM	Submodul
SS	Sammelschiene
SVBSM	Semi-Vollbrückensubmodul
SVM	Raumzeigermodulation
VBSM	Vollbrückensubmodul
VSC	Voltage Source Converter

Formelzeichen

a	Abstand (geometrisch)
\vec{A}	gewichtete Adjazenzmatrix
B	Suszeptanz
C	Kapazität
Δ	Absolute Abweichung
e	Prozentuale Abweichung/Fehler
E	Energie (bspw. Wärmeenergie)
F	Kraft
f	Frequenz
G	Konduktanz
\vec{G}	Konduktanzmatrix
I	Stationärer Strom
i	transienter Strom
k	(Korrektur-)Faktor
κ	Stoßfaktor
l	Länge (geometrisch)
L	Induktivität
μ_0	Vakuumpermeabilität
P	Wirkleistung
Q	Blindleistung

R	Widerstand
S	Scheinleistung
$t / T / \tau$	Zeit
ϑ	Spannungswinkel
U	Stationäre Spannung
x	Verhältnis

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Durch die Entwicklungen auf dem Gebiet der Leistungselektronik [1] und dem etablierten Einsatz der Hochspannungsgleichstromübertragung in Anwendungsfeldern der Elektrizitätsversorgung [2–5] rücken nun auch Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze zunehmend in den Fokus der Forschung [6–10]. Diesen Trend bezeugt eine Vielzahl an Forschungsprojekten und Veröffentlichungen von Forschungsergebnissen hinsichtlich Mittelspannungs- [11–17] und Niederspannungsgleichstromnetzen [18, 19].

Wie in heutigen Drehstromsystemen rufen auftretende Ströme im Fall von Kurzschlüssen in Gleichstromnetzen in der Regel die stärksten Beanspruchungen für stromführende Betriebsmittel hervor [20]. Somit ist die Kenntnis über mögliche Kurzschlussströme zur sicheren und dennoch wirtschaftlich angemessenen Auslegung der stromführenden Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen zwingend erforderlich. Aus diesem Grund hat die Kurzschlussstromberechnung eine große Bedeutung für die Planung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen. So müssen bei der Auslegung von stromführenden Betriebsmitteln die mechanischen und thermischen Beanspruchungen durch Kurzschlussströme berücksichtigt werden, um eine teilweise oder gar vollständige Zerstörung betroffener Betriebsmittel und somit die Gefährdung des zuverlässigen Betriebs zu verhindern [21].

Für Mittel- und Niederspannungsdrehstromnetze stehen heute zur Berechnung der maximal möglichen Kurzschlussströme und Belastungen vereinfachte Approximationsansätze oder transiente Berechnungen zur Verfügung [22]. Für die Praxis ist ein vereinfachter Approximationsansatz zur Berechnung der maximal mög-

lichen Kurzschlussströme und Belastungen gewünscht, da aufgrund der Linearisierungen und Vereinfachungen der Datenbedarf reduziert und dadurch die Nutzung von Standardmodellen für Betriebsmittelgruppen ermöglicht wird. Zusätzlich weist ein vereinfachter Approximationsansatz zur rechnergestützten Kurzschlussstromberechnung den Vorteil geringerer Rechenzeiten im Vergleich zu transienten Berechnungen auf. Nichtsdestotrotz ist es zwingend erforderlich, dass ein vereinfachter Approximationsansatz eine möglichst hohe Ergebnisgenauigkeit aufweist, damit sowohl der sicherheitstechnische als auch der wirtschaftliche Aspekt der Anforderungen an eine Kurzschlussstromberechnung erfüllt werden. [21, 22]

Aus denselben, oben genannten Gründen ist eine Kurzschlussstromberechnung basierend auf einem vereinfachten Approximationsansatz auch für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze wünschenswert.

1.2 Stand der Normung

Für Drehstromsysteme hat sich die Kurzschlussstromberechnung nach DIN EN 60909 (in Deutschland auch VDE 0102 genannt) bewährt. Dabei stellt die DIN EN 60909 zwei Methoden zur vereinfachten Kurzschlussstromberechnung mittels eines Approximationsansatzes zur Verfügung: [23]

- ❖ Methode der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle
- ❖ Überlagerungsverfahren

Aufgrund der unterschiedlichen Stromverläufe und Wirkungsweisen von Kurzschlüssen in Dreh- und Gleichstromsystemen lassen sich beide Methoden nicht auf Gleichstromsysteme anwenden oder übertragen. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen Kurzschlussströmen in Dreh- und Gleichstromsystemen ist eine vergleichende Gegenüberstellung von schematischen Kurzschlussströmen in Dreh- und Gleichstromsystemen in Abbildung 1.1 dargestellt.

Abbildung 1.1 verdeutlicht, dass sich die Stromverläufe der Kurzschlussströme in Dreh- und Gleichstromsystemen grundlegend unterscheiden. Während der Kurzschlussstrom in Drehstromsystemen im Wesentlichen durch Synchrongeneratoren geprägt ist und dadurch auch im Kurzschlussfall einen Wechselstrom darstellt, wird der Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen durch unterschiedliche Quellen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten gespeist. Mit dem Auftreten des Kurzschlusses speisen die sich im Gleichstromsystem befindenden (netzinternen) Quellen, in Form von kapazitiv wirkenden Betriebsmitteln, den Kurzschlussstrom. Anschließend tragen die über leistungselektronische Wandler an das

Gleichstromsystem angeschlossenen (netzexternen) Quellen zum Kurzschlussstrom bei. Aufgrund dieser veränderten Wirkungsmechanismen ist eine Verwendung der DIN EN 60909 für Gleichstromsysteme offenkundig nicht geeignet.

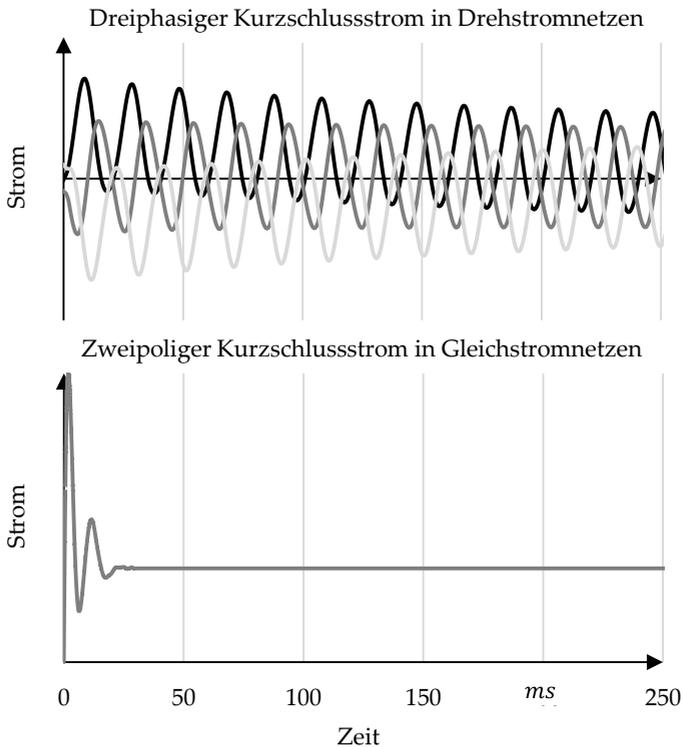


Abbildung 1.1: Vergleichende Gegenüberstellung von schematischen Kurzschlussströmen in Dreh- und Gleichstromsystemen

Für die Kurzschlussstromberechnung in HGÜ- aber auch in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen existieren bis heute keine vereinfachten, standardisierten Kurzschlussstromberechnungsmethoden. Hinsichtlich einer Berechnung von Kurzschlussströmen in Gleichstromsystemen existiert lediglich eine vereinfachte, standardisierte Berechnungsmethode zur Kurzschlussstromberechnung für Gleichstromerigenbedarfsanlagen in Kraftwerken und Schaltanlagen. Diese Berechnungsmethode nach DIN EN 61660 verwendet den Berechnungsansatz der

Superposition von approximierten Stromverläufen. Dieser Berechnungsansatz lässt sich vereinfacht in zwei Schritte unterteilen. Im ersten Schritt werden die Stromverläufe aller Kurzschlussstromquellen angenähert bzw. approximiert. Die berücksichtigten Kurzschlussstromquellen sind dabei: [24]

- ❖ Drehstromsysteme, angeschlossen über passive Diodengleichrichter oder thyristorbasierte Gleichrichter
- ❖ Bleisäurebatterien, die direkt (d.h. ohne leistungselektronische Betriebsmittel) an das Gleichstromsystem angeschlossen sind
- ❖ Kondensatoren, die direkt an das Gleichstromsystem angeschlossen sind
- ❖ Gleichstrommotoren, die direkt an das Gleichstromsystem angeschlossen sind

Anschließend werden die approximierten Stromverläufe unter Berücksichtigung des Netzes superponiert und korrigiert, um die Kurzschlussströme der stromführenden Betriebsmittel zu ermitteln [24].

Im Allgemeinen ist die Berechnungsmethode der DIN EN 61660 nur für radiale Gleichstromsysteme anwendbar [24]. Nach [25], in der die Anwendbarkeit der Berechnungsmethode nach DIN EN 61660 für die Berechnung von Kurzschlussströmen in radialen Niederspannungsgleichstromnetzen überprüft wurde, ist eine Anwendbarkeit der DIN EN 61660 für die Kurzschlussstromberechnung in radialen Niederspannungsgleichstromnetzen nur sehr beschränkt gegeben. Es wurde festgestellt, dass die Berechnung des quasistationären Kurzschlussstroms ausreichend genau ist. Anders verhält es sich bei den transienten Kurzschlussstromkenngrößen, die deutlich überschätzt werden [25]. Darüber hinaus sind keine Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von modernen leistungselektronischen Betriebsmitteln, insbesondere der Mittel- und Niederspannungsebene, vorhanden. Daraus lässt sich folgern, dass die Berechnungsmethode nach DIN EN 61660 nicht für eine Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen geeignet ist. Nichtsdestotrotz erscheint der verwendete Berechnungsansatz der Berechnungsmethode nach DIN EN 61660 zur Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze als potentiell geeignet und wird aus diesem Grund im Rahmen dieses Forschungsvorhabens detaillierter betrachtet.

1.3 Stand der Forschung

Im Rahmen zurückliegender Forschung war die vereinfachte Berechnung von Kurzschlussströmen in Gleichstromsystemen bereits häufiger Gegenstand der Forschung. Auf die wesentlichen Arbeiten wird im Folgenden in chronologischer Reihenfolge detaillierter eingegangen.

In der Dissertation von Nietsch aus dem Jahr 1991 wurde die Berechnungsmethode der DIN EN 61660 hergeleitet. Dies geschah durch Messungen an einer Modellanlage, einer Notstromversorgungsanlage mit passivem Gleichrichter, Glättungskondensatoren, Bleisäurebatterien und motorischer Gleichstromlast. Zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags dieser Betriebsmittel wurde eine Näherungsfunktion vorgestellt. Durch eine Superposition der approximierten Stromverläufe der vorhandenen Kurzschlussstromquellen lassen sich die Ströme auf jedem Zweig bestimmen. Abhängig vom Aufbau der Anlage ist eine Korrektur durchzuführen. Dabei wurde festgestellt, dass eine Bestimmung der Korrekturfaktoren alleine auf Basis der ohmschen Werte ausreichend ist. [26]

In der Veröffentlichung von Feng aus dem Jahr 2014 wird eine Erweiterung der Berechnungsmethode der DIN EN 61660 für vermaschte Gleichstromsysteme vorgestellt. Zudem wird eine Erweiterung für reale Synchrongeneratoren vorgeschlagen. Alles in allem wird die erweiterte Methode jedoch nur für kleine Niederspannungsgleichstromnetze validiert. Zudem werden keine Modelle für moderne leistungselektronische Betriebsmittel vorgestellt. [27]

In der Veröffentlichung von Lai aus dem Jahr 2014 wird eine Kurzschlussstromberechnung mithilfe der Laplace-Transformation für einen exemplarischen Anschluss einer Niederspannungsgleichstromkundenanlage durch eine Niederspannungsgleichstromleitung vorgestellt. Dabei wird der Kurzschlussstrom sehr schnell durch leistungselektronische Leistungsschalter abgeschaltet. [28]

In der Dissertation von Bucher aus dem Jahr 2014 werden grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich der transienten einpoligen Fehlerströme und Fehlerspannungen in Multiterminal-HGÜ-Netzen abgeleitet. Darüber hinaus wird eine analytische Approximation der einpoligen Fehlerströme in HGÜ-Netzen vorgestellt, wobei der Beitrag von einem modularen Multilevel-Umrichter mit Halbbrückensubmodulen und der Beitrag durch die Kondensator- und Leitungsentladung getrennt approximiert werden. Die vorgestellte Approximation für die Kondensator- und Leitungsentladung basiert auf der Wanderwellentheorie und wird durch eine Laplace-Transformation hergeleitet. Die Approximation des Beitrags des Umrichters basiert auf der Berechnung von Kenngrößen. [29]

In der Dissertation von Wasserrab aus dem Jahr 2016 werden Berechnungsansätze zur Kurzschlussstromberechnung für HGÜ-Netze vorgestellt. Dabei wird sich im Wesentlichen auf die Bestimmung des Beitrags von Umrichtern und die geeignete Korrektur der Kurzschlussstrombeiträge der Umrichter fokussiert. [20]

In der Veröffentlichung von Li aus dem Jahr 2017 wird eine Kurzschlussstromberechnungsmethode zur Auslegung von Leistungsschaltern und Kurzschlussstrombegrenzern in HGÜ-Netzen vorgeschlagen. Diese Kurzschlussstromberechnung bestimmt den Kurzschlussstromverlauf der ersten 10 ms durch eine numerische Berechnung der Kondensatorentladung. [30]

In den Veröffentlichungen nach von Saciak aus den Jahren 2018 und 2019 wird eine Kurzschlussstromberechnungsmethode zur Berechnung des stationären Kurzschlussstroms vorgestellt. Dabei wird die stationäre Spannungs-Strom-Kennlinie der Umrichter linearisiert. Anschließend werden aus der Linearisierung unterschiedliche Thevenin-Äquivalente bestimmt, die in einem iterativen Verfahren solange angepasst werden, bis der Kurzschlussstrombeitrag jedes Umrichters zur berechneten stationären Kurzschlussspannung passt. [31, 32]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Rahmen der getätigten Forschung keine für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze validierte, vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode zur Abschätzung der relevanten Belastungen entwickelt wurde, die alle relevanten Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen berücksichtigt.

1.4 Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Ausgehend von der DIN EN 61660 und der zurückliegenden Forschung auf dem Gebiet einer vereinfachten Kurzschlussstromberechnung für Gleichstromsysteme lautet die übergeordnete Fragestellung dieser Arbeit:

- ▲ Ist eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnung mithilfe des Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze möglich?

Dabei kann die übergeordnete Fragestellung in zwei spezifische Fragen unterteilt werden:

- ▲ Ist die vereinfachte Berechnung von beliebigen Teilkurzschlussströmen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen mithilfe des Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* möglich?

- ♣ Ist die vereinfachte Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussströme mithilfe des Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* für stromführende Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen möglich?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen ist die Entwicklung einer vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode basierend auf dem Berechnungsansatz *Superposition von approximierten Stromverläufen* für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze erforderlich. Somit stellt die Entwicklung dieser vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode das Ziel dieser Arbeit dar.

2 Analyse

In diesem Kapitel werden zu Beginn die Fragestellungen der Analyse identifiziert. Anschließend werden die identifizierten Fragestellungen der Analyse durch Literaturrecherchen und gegebenenfalls Voruntersuchungen beantwortet.

2.1 Fragestellungen der Analyse

Mit Blick auf das Ziel dieser Arbeit – der Entwicklung einer vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze basierend auf dem Berechnungsansatz *Superposition von approximierten Stromverläufen* – ergeben sich verschiedene, offensichtliche Fragenstellungen, die es durch Literaturrecherchen und Voruntersuchungen zu beantworten gilt. Diese lauten:

1. Wie können Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze der Zukunft aussehen?
2. Wie kann die Anwendbarkeit der zu entwickelnde Berechnungsmethode validiert und bewertet werden?
3. Welchen Einfluss hat der Schutz vor Kurzschlussströmen auf die zu entwickelnde Berechnungsmethode?
4. Welche Kurzschlüsse gilt es bei der zu entwickelnde Berechnungsmethode zu berücksichtigen?
5. Wie verhalten sich die Betriebsmittel bei einem Kurzschluss in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen?

Die aufgelisteten Fragestellungen der Analyse werden in den nachfolgenden Unterkapiteln in der aufgezählten Reihenfolge behandelt und durch Literaturrecherchen und Voruntersuchungen beantwortet.

2.2 Aufbau von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze

In diesem Unterkapitel wird die erste Fragestellung der Analyse behandelt. Diese lautet:

1. Wie können Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze der Zukunft aussehen?

Dabei kann die Fragestellung wie folgt konkretisiert werden:

- ▲ Wie funktionieren elektrische Netze basierend auf Gleichstrom?
- ▲ Wie können Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze in das bestehende Elektrizitätsversorgungssystem integriert werden?
- ▲ Wie sind Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze aufgebaut und welche stromführenden Betriebsmittel sind notwendig?

Zur Beantwortung dieser konkretisierten Fragestellungen der Analyse wird in einem ersten Schritt die allgemeine Funktionsweise von Gleichstromnetzen vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Einordnung in das heutige Elektrizitätsversorgungssystem sowie die Vorstellung möglicher Betriebsmittel zur Anbindung an andere Dreh- und Gleichstromsysteme. Abschließend wird der systemische Aufbau von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen präsentiert.

2.2.1 Funktionsweise

Gleichstromnetze unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer allgemeinen Funktionsprinzipien von heutigen Drehstromnetzen. Dazu gehört zum einen das Prinzip der Leistungsübertragung, aber auch das Prinzip der Leistungsbilanzierung.

In konventionellen Drehstromnetzen erfolgt die Leistungsübertragung von Wirk- und Blindleistung über eine Leitung entsprechend der Leistungsflussgleichungen. Die Wirkleistungsübertragung kann nach (2.1) und die Blindleistungsübertragung nach (2.2) bestimmt werden. [33]

$$P_{ik} = |U_i| \cdot |U_k| \cdot (G_{ik} \cdot \cos \vartheta_{ik} + B_{ik} \cdot \sin \vartheta_{ik}) \quad (2.1)$$

$$Q_{ik} = |U_i| \cdot |U_k| \cdot (G_{ik} \cdot \sin \vartheta_{ik} - B_{ik} \cdot \cos \vartheta_{ik}) \quad (2.2)$$

Es ist zu erkennen, dass die Leistungsübertragung durch die RMS-Spannungen der Knoten i und k sowie durch die Spannungswinkeldifferenz ϑ_{ik} bestimmt

wird. Anders verhält es sich bei Gleichstromnetzen, bei denen die Wirkleistungsübertragung von der Spannungsdifferenz der Knoten i und k bestimmt wird (siehe Formel (2.3)). Zudem existiert in Gleichstromnetzen keine Blindleistungsübertragung. [34]

$$P_{ik} = I_{ik} \cdot U_k = (U_i - U_k) \cdot G_{ik} \cdot U_k \quad (2.3)$$

Zur Leistungsbilanzierung in Drehstromnetzen wird die Frequenz als Führgröße der Systemregelung (Stichwort: Leistungs-Frequenz-Regelung) herangezogen [33]. Dabei kann die Frequenz in Drehstromsystemen vereinfacht als globale Größe angesehen werden [33]. Die Führungsgröße zur Leistungsbilanzierung in Gleichstromsystemen stellt die Spannung dar [35]. Wird weniger Leistung in ein Gleichstromnetz eingespeist als ausgespeist, so werden die im Gleichstromnetz vorhandenen Energiespeicher in Form von Kondensatoren und anderen kapazitiv wirkenden Betriebsmitteln entladen und die Spannung sinkt. Wird hingegen mehr Leistung in das Gleichstromsystem eingespeist als ausgespeist, so steigt die Spannung an. Um Gleichstromsysteme betreiben zu können, ist dementsprechend eine Spannungsregelung zur Gewährleistung des Leistungsgleichgewichts erforderlich [35]. Dabei ist festzuhalten, dass die Spannung in Gleichstromsystemen eine lokale Größe darstellt, da eine Leistungsübertragung nur über Spannungsdifferenzen erfolgen kann, sodass für Gleichstromsysteme eine koordinierte Spannungsregelung erforderlich ist [35].

2.2.2 Einbindung in das heutige Elektrizitätsversorgungssystem

Eine Einbindung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen in das heutige Elektrizitätsversorgungssystem ist schematisch in Abbildung 2.1 aufgezeigt.

Die Mittelspannungsebene beginnt bei einer Betriebsspannung von größer 1 kV für Wechselspannung bzw. $1,5 \text{ kV}$ für Gleichspannung [36] und zieht sich entsprechend [33] heute bis zu einer Betriebsspannung von 52 kV . Mittelspannungsgleichstromnetze werden wie heutige Mittelspannungsdrehstromnetze über sogenannte Umspannwerke an die Hochspannungsebene angeschlossen. Während heutige Umspannwerke zur Anbindung von Mittelspannungsdrehstromnetzen an Hochspannungsdrehstromnetze als Transformatorstation mit 50-Hz-Transformatoren ausgestaltet sind [33], sind Umspannwerke zur Anbindung von Mittelspannungsgleichstromnetzen an Hochspannungsdrehstromnetze als Umrichterstation (vgl. Kapitel 2.2.3) auszuführen [37].

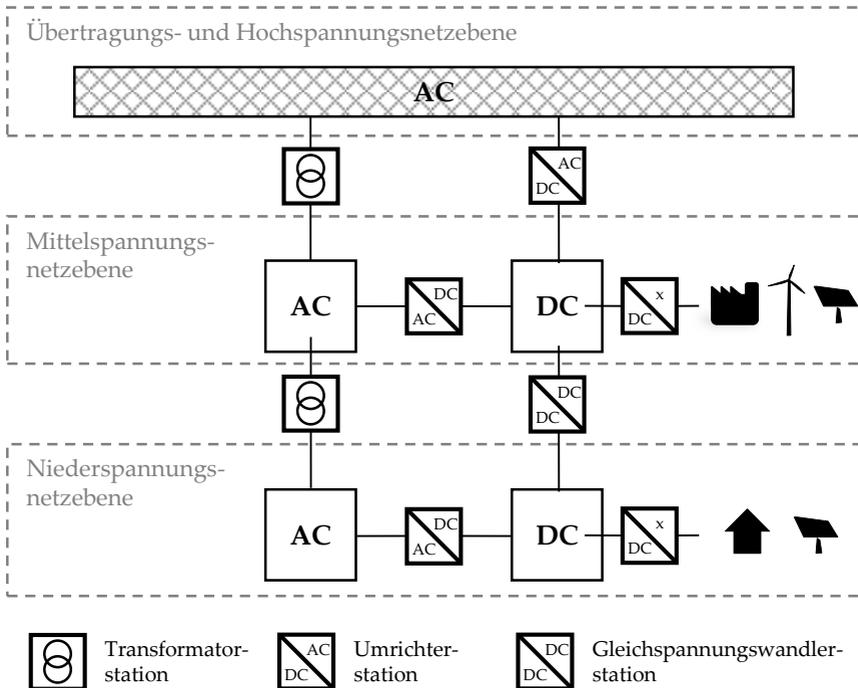


Abbildung 2.1: Schematische Übersicht zur Einbindung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen in das heutige Elektrizitätsversorgungssystem

Nach [36] wird die Niederspannung durch eine Betriebsspannung kleiner oder gleich 1 kV für Wechselspannung und kleiner oder gleich $1,5\text{ kV}$ für Gleichspannung definiert. Niederspannungsgleichstromnetze werden wie heutige Niederspannungsdrehstromnetze über sogenannte Ortsnetzstationen an die Mittelspannungsebene angeschlossen. Während heutige Ortsnetzstationen zur Anbindung von Niederspannungsdrehstromnetzen an Mittelspannungsdrehstromnetze als Transformatorstation mit 50-Hz-Transformatoren ausgestaltet sind [33], sind Ortsnetzstationen zur Anbindung von Niederspannungsgleichstromnetzen an Mittelspannungsgleichstromnetze als Gleichspannungswandlerstation (vgl. Kapitel 2.2.4) auszuführen [1].

Die Anbindung von Netzkunden in Form von Erzeugungsanlagen, Letztverbrauchern oder von anderen Dreh- oder Gleichstromnetzen an die Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze erfolgt, abhängig von ihrem internen Aufbau, eben-

falls über Umrichter- oder Gleichspannungswandlerstationen. Anders als bei heutigen Niederspannungsdrehstromnetzen erscheint es als sehr unwahrscheinlich, dass Verbraucher in Form von Haushaltsgleichstromnetzen direkt, d.h. ohne Gleichspannungswandler, an Niederspannungsgleichstromnetze angeschlossen werden, da im Falle eines direkten Anschlusses und eines Kurzschlusses im Haushaltsgleichstromnetz das gesamte Niederspannungsnetz einen signifikanten Spannungseinbruch erfahren würde.

2.2.3 Umrichterstation

In Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen haben Umrichterstationen die Aufgabe, Drehstromnetze der öffentlichen Elektrizitätsversorgung oder private Drehstromkundenanlagen anzuschließen. Der Aufbau von Umrichterstationen ist exemplarisch in Abbildung 2.2 aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass eine Umrichterstation aus den obligatorischen Umrichtern, Transformatoren und gegebenenfalls aus Filteranlagen und Strombegrenzern besteht [38].

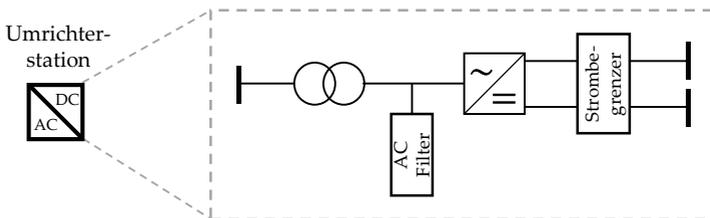


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau von Umrichterstationen [38]

Der Umrichter ist ein leistungselektronischer Wandler, welcher die Aufgabe der Strom- und Spannungsformwandlung zwischen Dreh- und Gleichstromsystemen hat. Die Funktionsweise und der Aufbau von Umrichtern wird in Kapitel 2.2.5.2 genauer behandelt. Die Transformatoren haben die Aufgabe die überspannungsseitige Spannung auf ein durch den Umrichter verwertbares Spannungsniveau zu transformieren. Die Filteranlagen der Drehstromseite sind insbesondere zur Reduktion der Oberschwingungen im Drehstromnetz, die durch die Umrichter entstehen, vorhanden. Häufig wird hierfür ein LC-Tiefpassfilter zur Unterdrückung von hochfrequenten Oberschwingungen verwendet. Der Strombegrenzer hat die Aufgabe, im Falle eines DC-seitigen Kurzschlusses den Stromanstieg zu begrenzen. Dazu wird der Strombegrenzer in der Regel als für jeden Pol längsgeschaltete Spule ausgeführt. [38]

2.2.4 Gleichspannungswandlerstation

Gleichspannungswandlerstationen haben in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen die Aufgabe, andere Gleichstromnetze der öffentlichen Elektrizitätsversorgung oder private Gleichstromkundenanlagen anzuschließen [39]. Der Aufbau von Gleichspannungswandlerstationen ist exemplarisch in Abbildung 2.3 aufgezeigt. Dadurch ist zu erkennen, dass eine Gleichspannungswandlerstation im Wesentlichen aus einem Gleichspannungswandler und gegebenenfalls Strombegrenzern besteht.

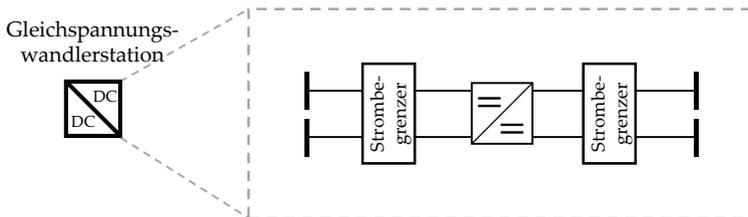


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau von Gleichspannungswandlerstationen

Der Gleichspannungswandler hat die Aufgabe, die Höhe der Gleichspannung zu wandeln. Die Funktionsweise und der Aufbau von verschiedenen Gleichspannungswandlern wird in Kapitel 2.2.5.3 detailliert behandelt. Die möglichen Strombegrenzer haben die gleiche Aufgabe wie die entsprechenden Komponenten der Umrichterstation und werden deshalb in der Regel entsprechend ausgeführt.

2.2.5 Leistungselektronische Wandler

Alle leistungselektronischen Wandler (engl. converter) haben gemein, dass ihnen ihre Funktionalität durch leistungselektronische Schaltelemente gegeben werden [40, 41]. Die unterschiedlichen Schaltelemente werden nachfolgend vorgestellt. Des Weiteren lassen sich leistungselektronische Wandler in unterschiedliche Klassen hinsichtlich ihrer ein- und ausgangseitigen Spannungs- und Stromformen unterteilen:

- ❖ Unidirektionale AC/DC-Wandler (i.F. Gleichrichter)
- ❖ Bidirektionale AC/DC-Wandler (i.F. Umrichter)
- ❖ DC/DC-Wandler (i.F. Gleichspannungswandler)
- ❖ AC/AC-Wandler (i.F. Frequenzwandler)

Mit Blick auf den Aufbau von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen (vgl. Abbildung 2.1) sind die relevanten Klassen an leistungselektronischen Wandlern für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze die Umrichter und die Gleichspannungswandler [37], die nach den relevanten leistungselektronischen Schaltelementen gesondert analysiert werden.

2.2.5.1 Leistungselektronische Schaltelemente

Abhängig von ihren Materialien und dem genauen Aufbau der Halbleiter sind leistungselektronische Schaltelemente mit unterschiedlichem charakteristischem Verhalten möglich [40]. Die wichtigsten leistungselektronischen Schaltelemente sind nachfolgend aufgelistet:

- ❖ Diode:
Dioden werden in dieser Arbeit zu den leistungselektronischen Schaltelementen gezählt, auch wenn sie wegen des einfachen pn-Übergangs nicht aktiv ein- oder ausgeschaltet werden können. Vereinfacht betrachtet erlaubt eine Diode einen Stromfluss in Durchlassrichtung und verhindert einen Stromfluss in Sperrrichtung [40].
- ❖ Thyristor:
Thyristoren sind einschaltbare Schaltelemente, die nicht aktiv abgeschaltet werden können. Die Ausschaltung eines Thyristors erfolgt in einem Stromnulldurchgang. [40]
- ❖ Bipolartransistor:
Bipolartransistoren (BT) sind aktive ein- und ausschaltbare Schaltelemente. Die Ansteuerung eines Bipolartransistors erfolgt stromgesteuert, was einen hohen Ansteueraufwand zur Folge hat [40].
- ❖ MOSFET:
Der Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (engl. metal-oxid-semiconductor field-effect transistor, kurz MOSFET) ist wie der Bipolartransistor ein ein- und ausschaltbares Schaltelement. Die Ansteuerung eines MOSFETs erfolgt anders als beim Bipolartransistor durch ein elektrisches Feld [40].
- ❖ IGBT:
Bei dem IGBT (engl. insulated gate bipolar transistor) handelt es sich wie beim MOSFET um ein feldgesteuertes ein- und ausschaltbares Schaltelement. Der IGBT und der MOSFET unterscheiden sich hinsichtlich ihres internen Aufbaus in unterschiedlichen pn-Übergängen [40].

❖ GTO:

Der gateseitig abschaltbare Thyristor (engl. Gate-Turn-Off Thyristor, kurz GTO) ist eine Weiterentwicklung des herkömmlichen Thyristors um die Fähigkeit einer aktiven Ausschaltung [40].

❖ IGCT:

Der IGCT (engl. integrated gate-commutated Thyristor) stellt eine Weiterentwicklung des GTO hinsichtlich Schalleistung und -geschwindigkeit dar. Wie der GTO besitzt der IGCT ebenfalls die Fähigkeit des aktiven Ein- und Ausschaltens [40].

Für die aufgelisteten Schaltelemente sind typische Anhaltspunkte für die Schaltelementgrenzwerte nach [40] in Tabelle 1 dargestellt. Über die gezeigten Schaltelementgrenzwerte hinaus unterschieden sich die Schaltelemente auch in ihrer Ansteuerung, ihren Leitverlusten und ihrem transienten Ein- und Ausschaltverhalten [40].

Typ	U	I_{DC}	t_{off}	Typ	U	I_{TQM}	I_{AV}	t_{off}
	[V]	[A]	[μ s]		[V]	[A]	[A]	[μ s]
MOSFET	800	25	0,15	GTO	4500	4000	1000	100
	100	300	0,7	IGCT	4500	4000	2100	11
IGBT	6500	600	1-4	Thyristor	8500	-	2400	-
BT	1200	300	15-25	Diode	5000	-	3800	-

Tabelle 1: Anhaltspunkte der Schaltelementgrenzwerte nach [40] (I_{DC} : permanenter Gleichstrom, t_{off} : Ausschaltdauer, I_{TQM} : maximal abschaltbarer Strom, I_{AV} : Mittelwert)

2.2.5.2 Umrichter

Umrichter sind unverzichtbarer Bestandteil der Umrichterstationen (vgl. Kapitel 2.2.3) zur Anbindung von Drehstromnetzen und -anlagen an Gleichstromsysteme. Dabei stellt der Umrichter die Grundfunktion der bidirektionalen Strom- und Spannungsformwandlung zwischen Drehstrom- und Gleichstromsystemen bereit. Diese Grundfunktionalität kann generell durch den Einsatz von Thyristoren oder ein- und ausschaltbarer Schaltelemente erfolgen. [38, 42, 43]

Aufgrund der Eigenschaft von Thyristoren, nur aktiv eingeschaltet werden zu können, wird bei thyristorbasierten Umrichtern von netzgeführten Umrichtern

(engl. line comutated converter, kurz LCC) gesprochen [38]. Der DC-seitige Ausgang bei LCCs wird als Stromzwischenkreis in Form von Spulen realisiert [38, 42]. Aus diesem Grund werden LCC häufig auch als Current Source Converter (CSC) bezeichnet [38, 43]. Wegen der eingeschränkten Steuerbarkeit der Thyristoren ist die CSC-Technologie nicht für den Einsatz in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen mit einer Vielzahl an Stationen geeignet [37]. Deshalb wird die CSC-Technologie im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Ein- und ausschaltbare Schaltelemente erlauben den Aufbau von selbstgeführten Umrichtern mit Spannungszwischenkreis in Form von am DC-seitigen Ausgang verbauten Kondensatoren. Aus diesem Grund werden selbstgeführte Umrichter häufig auch als Voltage Source Converter (VSC) bezeichnet. Aufgrund der guten Steuerbarkeit der leistungselektronischen Schaltelemente ist die VSC-Technologie für den Einsatz in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen mit einer Vielzahl an Stationen geeignet. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit die VSC-Technologie berücksichtigt. [38, 42, 43]

Das generelle Funktionsprinzip von VSC basiert auf der Nachbildung einer Wechselspannung an den AC-Verknüpfungspunkten des Umrichters. Zur Verdeutlichung wird das Funktionsprinzip kurz anhand von Abbildung 2.4 erläutert.

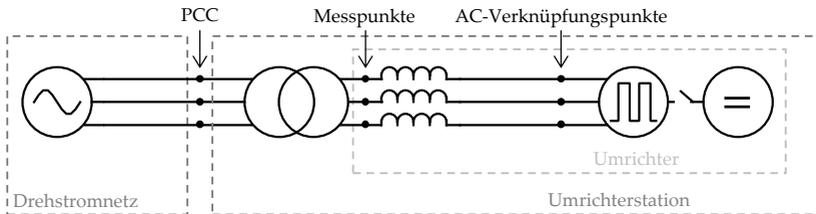


Abbildung 2.4: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise von Umrichtern

Im ersten Schritt wird durch Messung der Wechselspannungen an den Messpunkten des VSC die einzustellenden Wechselspannungen an den AC-Verknüpfungspunkten ermittelt, die den gewünschten Wirk- und Blindleistungsfluss über die im Umrichter verbauten Spulen hervorruft. Die Ermittlung der einzustellenden Wechselspannung am AC-Verknüpfungspunkt erfolgt dabei durch die Regelung des Umrichters und basiert grundsätzlich auf den Formeln zur Bestimmung des Wirk- und Blindleistungsflusses über eine Induktivität. [38, 42, 43]

Die lokale Umrichterregelung wird in der Literatur häufig in zwei Stufen eingeteilt, die primäre Regelstufe und die sekundäre Regelstufe. In der sekundären Regelstufe wird eine Anpassung der Sollwerte entsprechend eines übergeordneten Ziels, bspw. der Leistungsfrequenzregelung des Drehstromsystems, durchgeführt. In der primären Regelstufe erfolgt hingegen die eigentliche Regelung auf den ermittelten Sollwert. Der schematische Aufbau der primären Regelung ist in Abbildung 2.5 dargestellt. [44–46]

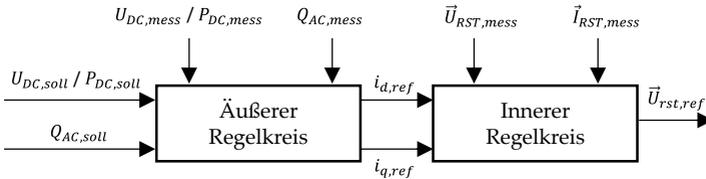


Abbildung 2.5: Vereinfachte Darstellung der Umrichterregelung

In der Literatur wird die primäre Umrichterregelung häufig durch einen äußeren und einen inneren Regelkreis gebildet. Der äußere Regelkreis besitzt dabei die Aufgabe der Regelung des Wirk- und Blindleistungsaustauschs und der innere Regelkreis hat die Aufgabe der Ermittlung der einzustellenden Wechselspannungen am AC-Verknüpfungspunkt ($\vec{U}_{rst,ref}$). Für die Regelung des Wirkleistungsaustauschs innerhalb des äußeren Regelkreises sind generell zwei Regelungsmodi möglich, die Konstant-Leistungs-Regelung, die den Leistungsfluss über den Umrichter auf einen konstanten Wert regelt, und die Konstant-Spannungs-Regelung, die die DC-seitige Spannung auf einen konstanten Wert regelt. Für den inneren Regelkreis wird in der Literatur häufig ein entkoppelter Stromregler im dq-System vorgeschlagen. [38]

Anschließend erfolgt die Nachbildung der einzustellenden Spannungen über ein geschicktes Schalten der leistungselektronischen Schaltelemente. Zur Generierung der benötigten Schaltsignale können Herangehensweisen wie beispielsweise die Pulsweitenmodulation (engl. pulse width modulation, PWM) oder die Raumvektormodulation (engl. space vector modulation, SVM) verwendet werden. [47]

Neben den bereits vorgestellten Schaltelementen und Spulen setzen sich VSC aus weiteren Bauelementen zusammen. Generell besteht ein VSC aus ein- und ausschaltbaren Schaltelementen, Dioden, Kondensatoren und Spulen. Abhängig von der Anordnung dieser Bauelemente lassen sich verschiedene VSC-Topologien realisieren. Eine Übersicht der verbreiteten VSC-Topologien ist in Tabelle 2 gegeben.

VSC-Topologien	Referenz
Zwei-Level-VSC (2L-VSC)	[38]
Diode-Clamped-Multilevel-VSC (DCM-VSC)	[38, 43]
Flying-Capacitor-Multilevel-VSC (FCM-VSC)	[38, 43]
Modularer-Multilevel-VSC (MMC)	[38]

Tabelle 2: Übersicht üblicher VSC-Topologien

Die vorgestellten VSC-Topologien lassen sich darüber hinaus in verschiedene VSC-Topologievarianten unterteilen. Die Topologievarianten bestimmen den generellen Aufbau und dementsprechend im Wesentlichen die Anzahl an Leveln. Dabei entspricht die Anzahl an Leveln der Anzahl verschiedener Spannungen, die an den AC-Verknüpfungspunkten des Umrichters angelegt werden können (siehe exemplarisch den Spannungsverlauf aus Abbildung 2.6). Die genaue Ausgestaltung eines VSC kann sich darüber hinaus auch innerhalb einer Topologievariante unterscheiden. Bspw. können zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit bzw. der Sperrspannung parallele bzw. in Reihe geschaltete Schaltelemente, die alle im selben Takt geschaltet werden, verwendet werden. Eine Übersicht der verwendeten Definitionen zur Klassifizierung von Umrichtern kann Anhang A.1 entnommen werden. [38, 42, 43]

Für den Einsatz in Umrichterstationen von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen eignen sich tendenziell alle VSC-Topologievarianten der vier vorgestellten VSC-Topologien. Da die genaue Ausgestaltung eines Umrichters innerhalb einer Topologievariante keinen relevanten Einfluss auf das Verhalten des Umrichters im DC-Kurzschlussfall hat, werden im Rahmen dieser Arbeit die Standardausgestaltungen der jeweiligen Topologievarianten als Repräsentanten für alle möglichen Ausgestaltungen berücksichtigt. Zudem wird aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Topologievarianten je Topologie im Folgenden der funktionale Aufbau der verschiedenen VSC-Topologien durch die Vorstellung von Standardausgestaltungen exemplarischer Topologievarianten erläutert. [37, 38, 42, 43]

Zwei-Level-Umrichtertopologie

Bei der Zwei-Level-Umrichtertopologie erfolgt die Nachbildung der Wechselspannung an den AC-Verknüpfungspunkten mithilfe zweier Spannungen, die an

den AC-Verknüpfungspunkten angelegt werden können. Die Standardausgestaltung eines Zwei-Level-Umrichters (2L-VSC) ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Standardausgestaltung aus sechs Schaltelementen mit jeweils antiparalleler Freilaufdiode, drei AC-seitigen Spulen und einem DC-seitigen Kondensator besteht [38, 47].

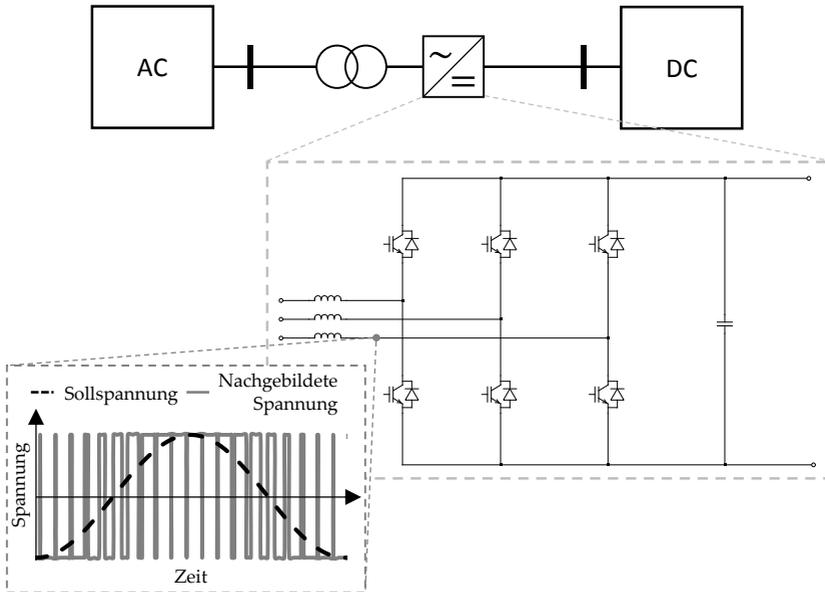


Abbildung 2.6: Aufbau eines Zwei-Level-Umrichters

Diode-Clamped Multilevel-Umrichtertopologie

Bei der Diode-Clamped Multilevel (DCM) VSC-Topologie erfolgt die Nachbildung der Wechselspannung an den AC-Verknüpfungspunkten mithilfe von mehr als zwei Leveln. Die Anzahl möglicher Level ist dabei abhängig von der Topologievariante. Exemplarisch ist die Standardausgestaltung der Drei-Level-DCM- und der Fünf-Level-DCM-Topologievariante in Abbildung 2.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der betrachtete Drei-Level-DCM-Umrichter im Vergleich zur Zwei-Level-Umrichtertopologie die doppelte Anzahl an Schaltelementen sowie sechs zusätzliche Dioden benötigt. Generell ist zu sehen, dass wenn man die Anzahl an Level weiter steigert, der Bedarf an Schaltelementen proportional und der Bedarf an Dioden überproportional ansteigt. [38, 48, 49]

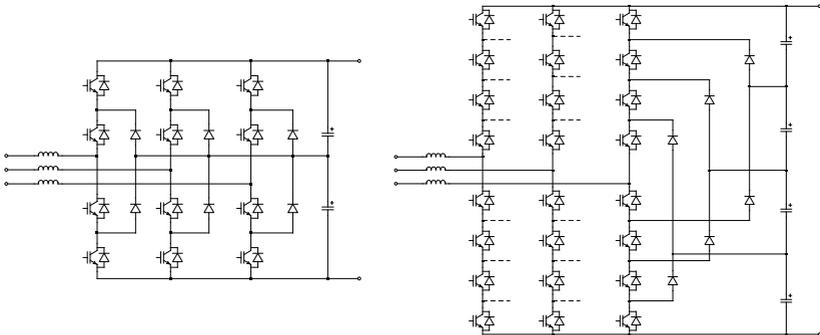


Abbildung 2.7: Aufbau eines Drei-Level-DCM- und eines Fünf-Level-DCM-Umrichters

Flying-Capacitor Multilevel-Umrichtertopologie

Bei der Flying-Capacitor Multilevel (FCM) VSC-Topologie erfolgt die Nachbildung der Wechselspannung an den AC-Verknüpfungspunkten wie für die DCM-VSC-Topologie mithilfe von mehr als zwei Leveln. Die Anzahl möglicher Level ist dabei abhängig von der Topologievariante. Exemplarisch ist die Standardausgestaltung der Drei-Level-FCM- und der Fünf-Level-FCM-Topologievariante in Abbildung 2.8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Drei-Level-FCM-Umrichter im Vergleich zum Zwei-Level-Umrichter die doppelte Anzahl an Schaltelementen sowie zusätzliche Kondensatoren benötigt. Generell ist zu sehen, dass wenn man die Anzahl an Level weiter steigert der Bedarf an Schaltelementen und Kondensatoren proportional ansteigt. [38, 50, 51]

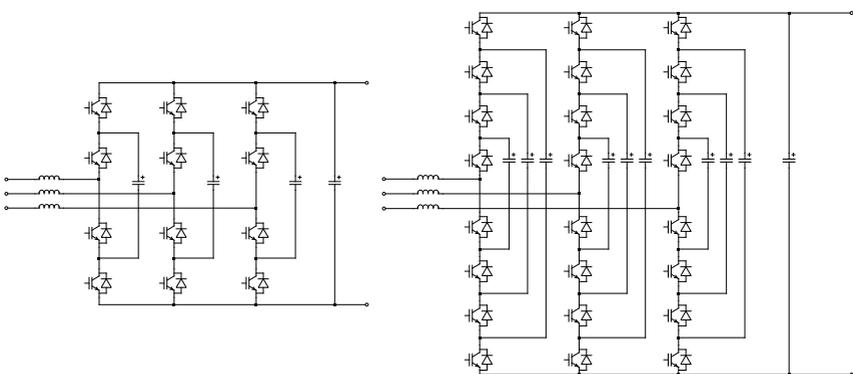


Abbildung 2.8: Aufbau eines Drei-Level-FCM- und eines Fünf-Level-FCM-Umrichters

Modulare Multilevel-Umrichter

Die modulare Multilevel VSC-Topologie (MMC-Topologie) erlaubt die Nachbildung der Wechselspannung an den AC-Verknüpfungspunkten mithilfe mehrerer Level durch in Reihe geschaltete Submodule (SM). Der Aufbau der MMC-Topologie ist schematisch in Abbildung 2.9 dargestellt. Die SM können dabei vereinfacht als ein- und ausschaltbare Gleichspannungsquellen angesehen werden, sodass die Anzahl an SM die möglichen Level bestimmt. Durch den modularen Aufbau von MMCs ist eine Erweiterung um weitere Level durch das in Reihe Schalten weiterer Submodule möglich. Zusätzlich wird bei der MMC-Topologie in jeden Umrichterarm eine Spule verbaut, um auftretende Kreisströme zu dämpfen. [38, 42]

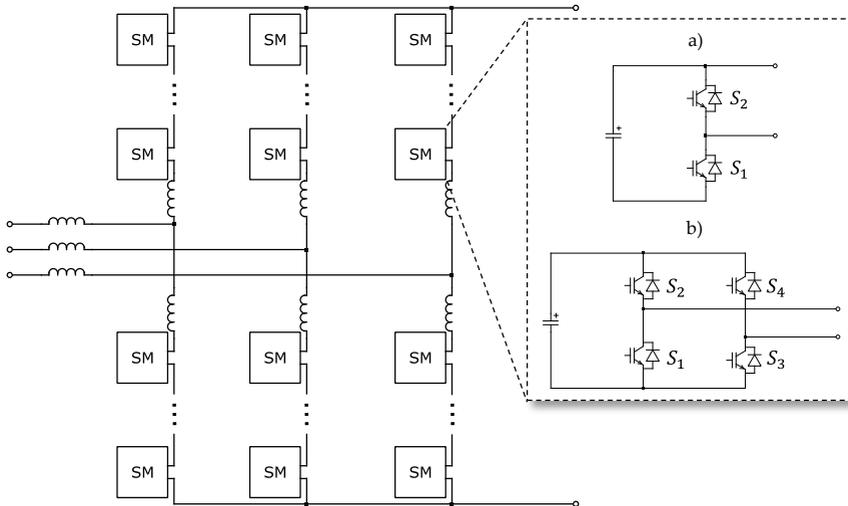


Abbildung 2.9: Aufbau von modularen Multilevel-Umrichtern und Aufbau des Halbbrückensubmoduls (a) und des Vollbrückensubmoduls (b)

Um das Verhalten einer ein- und ausschaltbaren Gleichspannungsquellen hinsichtlich der SM zu erreichen, sind verschiedene interne Aufbauten der SM möglich. Die gängigen SM-Typen sind das Halbbrückensubmodul (HBSM) und das Vollbrückensubmodul (VBSM). Das HBSM besteht aus einem Kondensator, der als Gleichspannungsquelle fungiert, sowie zwei leistungselektronischen Schaltelemente mit antiparalleler Freilaufdiode. Diese beiden Schaltelemente erlauben das Einbinden des Kondensators in den Strompfad durch Einschalten des Schaltelements S_1 (eingeschalteter SM-Zustand), bzw. das Kurzschließen des Kondensators

durch Einschalten des Schaltelements S_2 (ausgeschalteter SM-Zustand). Das VBSM besteht wie bereits das HBSM aus einem Kondensator. Anders als das HBSM besteht das VBSM aus vier leistungselektronischen Schaltelementen mit antiparalleler Freilaufdiode. Diese vier Schaltelemente erlauben zusätzlich zum ein- und ausgeschalteten SM-Zustand das Einbinden des Kondensators in den Strompfad mit invertierter Spannungspolarität (Gegenspannungszustand). Dieser Gegenspannungszustand gewährt MMCs bestehend aus VBSM die Fähigkeit der DC-Fehlerdurchfahrt (engl. DC fault ride through, kurz DC-FRT), die besagt, dass der Umrichter bei einem DC-seitigen Kurzschluss steuerbar bleibt. [52–54]

Neben den HBSM und den VBSM wurden in der nahen Vergangenheit weitere mögliche SM-Typen diskutiert. Diese SM-Typen basieren grundsätzlich auf dem VBSM. Das Ziel dieser SM-Typen ist es, dem MMC weiterhin die Fähigkeit der DC-FRT zu ermöglichen und gleichzeitig die Anzahl der benötigten Schaltelemente zu reduzieren. Exemplarische SM-Typen sind in Abbildung 2.10 aufgezeigt. [52, 53]

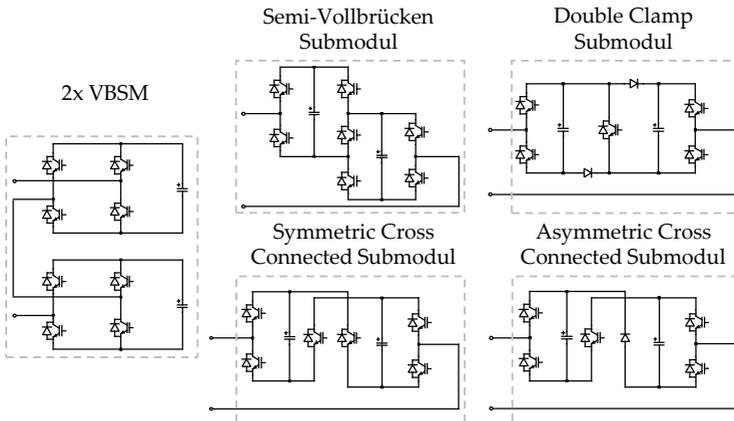


Abbildung 2.10: Weitere Submodultypen für den Einsatz in modularen Multilevel-Umrichtern

Um die Einsparpotentiale der einzelnen aufgezeigten Submodule bewerten zu können, müssen diese zwei in Reihe geschalteten VBSM gegenübergehalten werden. Bei den Semi-Vollbrückensubmodulen (SVBSM) ist eine Einsparung von einem Schaltelement möglich. Bei den Symmetric Cross Connected Submodulen (SCCSM) erfolgt hingegen eine Einsparung von zwei Schaltelementen. Bei den Asymmetric Cross Connected (ACCSM) und den Double Clamp Submodulen

(DCSM) ist sogar eine Einsparung von drei Schaltelementen möglich, wobei zusätzliche Dioden verbaut werden müssen. Jedoch schränkt jede Reduktion an Schaltelementen die Flexibilität des Umrichters ein und erschwert gleichzeitig die Regelung der restlichen Schaltelemente. [52, 53, 55, 56]

Neben dem Einsatz eines einheitlichen SM-Typen bei einem VSC ist auch eine Mischung verschiedener Submodule je Arm möglich. Hierbei ist erneut das Ziel, Schaltelemente einzusparen und damit die Verluste zu reduzieren. Nichtsdestotrotz ist die zentrale Nebenbedingung beim Design solcher MMCs, dass der MMC weiterhin die Fähigkeit der DC-FRT besitzen muss. [57, 58]

2.2.5.3 Gleichspannungswandler

Gleichspannungswandler sind unverzichtbarer Bestandteil der Gleichspannungswandlerstationen (vgl. Kapitel 2.2.7) zur Anbindung von Gleichstromnetzen und -anlagen an andere Gleichstromsysteme. Dabei hat der Gleichspannungswandler die Grundfunktion der Wandlung der Spannungshöhe zwischen unterschiedlichen Gleichstromsystemen. [39]

Alle Gleichspannungswandler basieren auf ein- und ausschaltbaren leistungselektronischen Schaltelementen, die die Aufgabe der Wandlung der Spannungshöhe zwischen Gleichstromsystemen ermöglichen. Darüber hinaus setzen sich die Gleichspannungswandler potentiell aus weiteren Bauelementen zusammen. Generell besteht ein Gleichspannungswandler zusätzlich aus Dioden, Kondensatoren, Spulen und gegebenenfalls Transformatoren. Abhängig von der Anordnung dieser Bauelemente lassen sich verschiedene Topologien von Gleichspannungswandlern mit teils unterschiedlichen Eigenschaften realisieren. Die Gleichspannungswandler topologien lassen sich beispielsweise hinsichtlich ihrer Eigenschaften in galvanisch gekoppelte und galvanisch getrennte Topologien unterteilen. Eine weitere Einteilung der Eigenschaften ist hinsichtlich der möglichen Leistungsflussrichtung, unidirektional oder bidirektional, möglich. Ein Auszug verschiedener, vielfach verwendeter Gleichspannungswandler topologien ist in Tabelle 3 dargestellt. [47, 59]

Topologien	Galvanische Trennung?	Bidirektional?	Referenz
Abwärtswandler	Nein	Nein	[40, 47, 59]
Aufwärtswandler	Nein	Nein	[40, 47, 59]
Inverswandler	Nein	Nein	[40, 59]
Synchronwandler	Nein	Ja	[47]
Halbbrückenwandler	Nein	Nein	[47]
Vollbrückenwandler	Nein	Ja	[59]
Cuk-Wandler	Nein	Nein	[59]
Kaskardierter Ab-Aufwärts- wandler	Nein	Nein	[47]
Sperrwandler	Ja	Nein	[40, 47]
Eintaktwandler	Ja	Nein	[40, 47]
Gegentaktwandler	Ja	Nein	[40, 47]
Vollbrückenwandler	Ja	Nein	[40, 47]
Dual-Active-Bridge	Ja	Ja	[47, 60]

Tabelle 3: Übersicht klassischer Gleichspannungswandlertopologien

Wie bereits in Abbildung 2.1 verdeutlicht wurde, werden Gleichspannungswandler (bzw. -stationen) zum einen zur Kopplung der Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze benötigt. In dieser Hinsicht wird vom Gleichspannungswandler häufig als Analogon zum Transformator gesprochen [1, 39]. Bezüglich der benötigten Leistungsflussrichtung ist davon auszugehen, dass aufgrund von Erzeugungsanlagen basierend auf Erneuerbaren Energien ein bidirektionaler Leistungsfluss möglich sein muss. Hinsichtlich der galvanischen Trennung wird in der Forschung der Einsatz von galvanisch getrennten Gleichspannungswandlern vorgeschlagen, um wie bereits bei heutigen Drehstromnetzen eine galvanische Entkopplung der Netze zu gewährleisten [1, 39, 61]. Ein weiterer Grund, der für die Nutzung von galvanisch getrennten Gleichspannungswandlern spricht, ist, dass durch die interne Nutzung von Transformatoren große Differenzen in den Be-

triebsspannungen der Netze besser zu realisieren sind als durch galvanisch gekoppelte Gleichspannungswandler. Somit lässt sich für die Kopplung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen festhalten, dass bidirektionale, galvanisch getrennte Gleichspannungswandler zur Kopplung von verschiedenen Spannungsebenen benötigt werden. Zum einen kann ein bidirektionaler Leistungsfluss durch die antiparallele Nutzung der unidirektionalen, galvanisch getrennten Gleichspannungswandler erfolgen. Jedoch ist auch die Nutzung der Dual-Active-Bridge-Topologie (DAB-Topologie) möglich, wobei die DAB im Vergleich zur antiparallelen Nutzung unidirektionaler Gleichspannungswandler Einsparungen hinsichtlich der eingesetzten Materialien und eine bessere Performance bietet. Aus diesem Grund stellt die DAB die angemessenste Möglichkeit zur Kopplung von unterschiedlichen Spannungsebenen dar, sodass im Rahmen dieser Arbeit einzig die DAB-Topologie als bidirektionaler, galvanisch getrennter Gleichspannungswandler berücksichtigt wird. [1, 39, 62]

Zum anderen werden Gleichspannungswandler zum Anschluss von privaten Gleichstromkundenanlagen an die Mittel- oder Niederspannungsgleichstromnetze benötigt. Bezüglich der benötigten Leistungsflussrichtung ist festzuhalten, dass diese den individuellen Anforderungen der Netzkunden anzupassen sind. Hinsichtlich der galvanischen Trennung ist festzuhalten, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit galvanisch getrennte Gleichspannungswandler den galvanisch gekoppelten Gleichspannungswandlern bevorzugt werden. Das liegt in der Eigenschaft der galvanischen Trennung begründet, da diese eine Übertragung von Fehlern innerhalb der Kundenanlage ins Mittel- oder Niederspannungsgleichstromnetz auch bei Fehlfunktionen der Schaltelemente verhindern kann [47, 59]. Aus diesem Grund werden im Zuge dieser Arbeit nur galvanisch getrennte Gleichspannungswandler topologien berücksichtigt, da diese mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Anbindung von Gleichstromkundenanlagen an Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze der öffentlichen Elektrizitätsversorgung verwendet werden.

Für den Einsatz in Gleichspannungswandlerstationen von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen können somit prinzipiell alle galvanisch getrennte Gleichspannungswandler topologien zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund werden exemplarische Topologievarianten der verschiedenen, in Tabelle 3 aufgezählten galvanisch getrennten Gleichspannungswandler topologien nachfolgend vorgestellt.

Unidirektionale Gleichspannungswandlertopologien

Galvanisch entkoppelte, unidirektionale Gleichspannungswandler werden durch eine aktive Eingangsseite mit ein- und ausschaltbaren Schaltelementen, einen Transformator und eine passive Ausgangsseite mit Dioden charakterisiert. Abhängig von der Umsetzung der Eingangsseite, des Transformators und der Ausgangsseite sind verschiedene Topologievarianten realisierbar [40, 47, 59]. Der schematische Aufbau von exemplarischen Topologievarianten ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

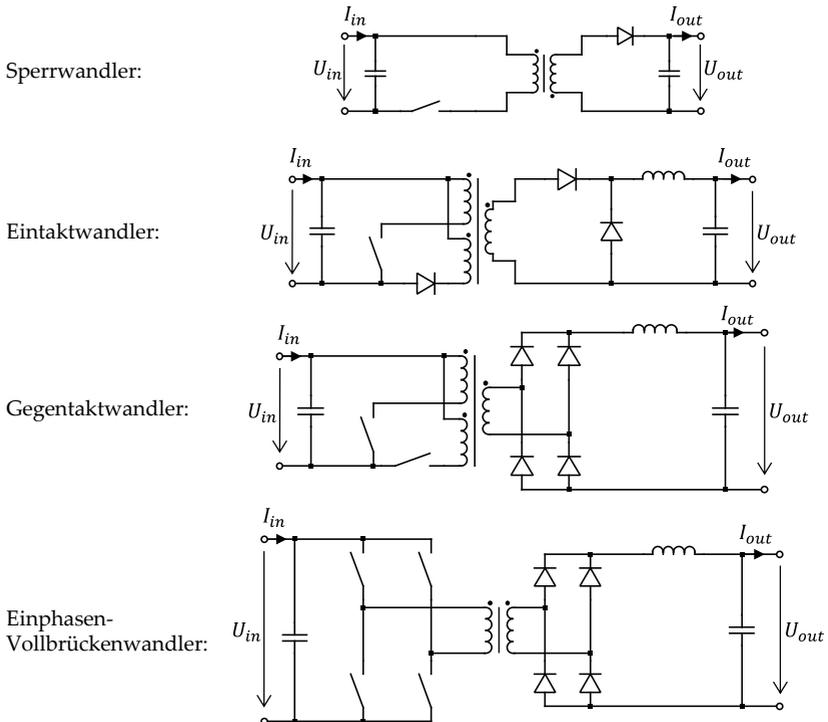


Abbildung 2.11: Aufbau exemplarischer galvanisch getrennter, unidirektionaler DC/DC-Wandler [47]

Die Wandlung der Gleichspannung der verschiedenen Topologievarianten basiert auf demselben generellen Funktionsprinzip. Auf der Eingangsseite wird die Gleichspannung durch das getaktete Schalten der Schaltelemente in eine ansatz-

weise rechteckförmige Wechselspannung überführt, sodass eine Leistungsübertragung über den Transformator erfolgen kann. Anschließend wird die Wechselspannung auf der Ausgangsseite durch Dioden gleichgerichtet und durch Kondensatoren und ggf. Spulen geglättet. Die Regelung der ausgangsseitigen Spannung bzw. Leistung erfolgt dabei über die Einstellung des Tastgrads (engl. duty cycle), der angibt, wie lange der Schalter innerhalb einer Schaltperiode angeschaltet wird. [47, 59, 63]

Dual-Active-Bridge-Wandler

Bei der DAB-Topologie handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Vollbrückenwandlertopologie. Bei der DAB-Topologie wird die passive Ausgangsseite durch eine oder mehrere aktive Vollbrücken ersetzt, um einen bidirektionalen Leistungsfluss zu gewährleisten [39, 60]. Der exemplarische Aufbau der Standardausgestaltung der einphasigen (1P) und der dreiphasigen (3P) Zwei-Level-DAB-Topologievariante ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

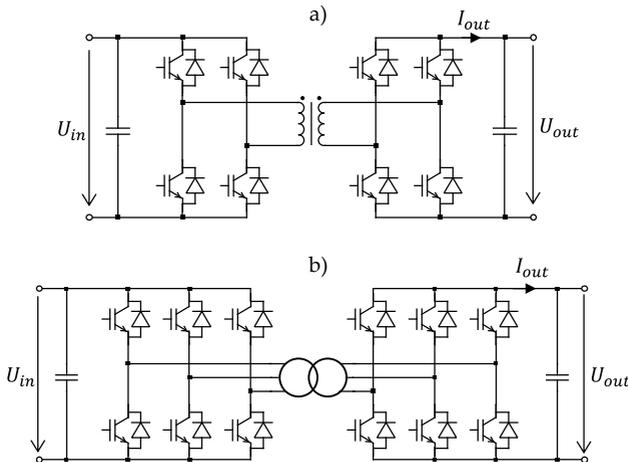


Abbildung 2.12: Aufbau eines einphasigen Zwei-Level-Dual-Active-Bridge-Wandlers (a) und eines dreiphasigen Zwei-Level-Dual-Active-Bridge-Wandlers (b)

Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen DAB-Topologievarianten aus ein- und ausschaltbaren Schaltelementen mit in der Regel antiparallelen Dioden, Kondensatoren und Transformatoren bestehen. Dabei werden die Transformatoren als Mittelfrequenztransformator ausgeführt, wodurch der Platzbedarf im Vergleich zu 50-Hz-Transformatoren deutlich reduziert werden kann [1, 39]. Des Weiteren

ist anzumerken, dass die Verschaltung der Schaltelemente und Dioden je Seite einem Umrichter nachempfunden ist. Demzufolge sind neben dem Einsatz von zwei Leveln auch Multilevel-DAB-Topologievarianten realisierbar [64].

Die Wandlung der Gleichspannung aller DAB-Topologievarianten basiert auf demselben generellen Funktionsprinzip. Auf der Eingangs- als auch auf der Ausgangsseite wird die Gleichspannung durch das getaktete Schalten der Schaltelemente in eine ansatzweise rechteckförmige Wechselfspannung überführt. Die Leistungsübertragung von einer zur anderen Seite über den Transformator erfolgt dabei durch einen Phasenversatz der generierten Wechselfspannungen der Ein- und Ausgangsseite. Demzufolge erfolgt die Regelung der ausgangsseitigen Spannung bzw. Leistung über die Einstellung des Phasenversatzes. Somit kann festgehalten werden, dass die Funktionsweise und damit einhergehend die Regelung sich von der Funktionsweise/Regelung der unidirektionalen Gleichspannungswandler unterscheidet. [39, 60]

2.2.6 Netzstruktur

Nach [37] ist davon auszugehen, dass zukünftige Mittelspannungsgleichstromnetze vermaschte Netzstrukturen aufweisen werden. Dies liegt darin begründet, dass durch die Verbindung von mehreren Umspannwerken mit ihren Umrichtern die Leistungsflüsse im Mittelspannungsgleichstromnetz beeinflusst und aktive gesteuert werden können.

Hinsichtlich zukünftiger Niederspannungsgleichstromnetze ist noch keine zu bevorzugende Netzstruktur in Kombination mit vermaschten Mittelspannungsgleichstromnetzen ermittelt worden. Aus Zuverlässigkeitssicht macht ebenfalls eine Vermaschung der Niederspannungsgleichstromnetze Sinn, wobei diese in Form von Strang- oder Ringnetzen als radiale Netze betrieben werden könnten [65]. Nichtsdestotrotz ist bisher keine allgemeine Aussage hinsichtlich der Struktur von Niederspannungsgleichstromnetzen möglich, da zusätzliche Kriterien zu berücksichtigen sind. Somit soll im Rahmen dieser Arbeit eine Validierung der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für verschiedene Niederspannungsgleichstromnetze mit unterschiedlicher Struktur erfolgen.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze festgehalten werden, dass eine Anwendbarkeit für radiale, aber auch für vermaschte Netzstrukturen zu gewährleisten ist.

2.2.7 Stromführende Betriebsmittel

Die zentralen stromführenden Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen sind wie bei Drehstromsystemen Leitungen, Sammelschienen, Abgangsfelder und ggf. Schaltgeräte von Abgangsfeldern. Diese Betriebsmittel werden im Folgenden vorgestellt und wesentliche Unterschiede zwischen Dreh- und Gleichstromausführungen aufgezeigt.

2.2.7.1 Leitungen

Leitungen können generell als Freileitung oder Kabel ausgeführt werden [33]. Heute sind rund 73 % der Leitungen in der Mittel- und Niederspannungsebene als Kabelsystem ausgeführt, wobei aufgrund sinkender Akzeptanz von Freileitungen der Anteil an Kabeln vermutlich weiter zunehmen wird [66]. Somit kann für zukünftige Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze davon ausgegangen werden, dass Leitungen ausschließlich als Kabel ausgeführt werden. Bezüglich Kabeln kann festgehalten werden, dass sich keine wesentlichen Unterschiede, hinsichtlich der zu benutzenden Leiter- und Isolationsmaterialien, zu in Drehstromsystemen eingesetzten Kabeln ergeben [66–69]. Jedoch wurde festgestellt, dass für Muffen und Endverschlüsse ggf. eine andere Bauweise erforderlich ist [16]. Zusätzlich kann sich die Anzahl der benötigten Phasen, bzw. im Bereich der Gleichstromtechnik Pole genannt, gegenüber Drehstromsystemen verändern [38, 42]. Hierauf wird in Kapitel 2.2.8 im Detail eingegangen.

2.2.7.2 Sammelschienen

In der öffentlichen Elektrizitätsversorgung werden Knoten mit einer Vielzahl an Abzweigungen in der Regel als Sammelschienen ausgeführt, wobei die Sammelschiene häufig als elektrisch leitfähige Metallschiene gebaut werden [33]. Für Sammelschienen kann festgehalten werden, dass sich ähnlich zum Leitermaterial bei Kabeln keine wesentlichen Unterschiede, hinsichtlich der zu benutzenden Materialien, zu in Drehstromsystemen eingesetzten Sammelschienen ergeben.

2.2.7.3 Abgangsfelder

Wie in Drehstromsystemen erfolgt das Anschließen von Leitungen oder spannungswandelnden Betriebsmitteln an Sammelschienen über Abgangsfelder. Besitzen diese Abgangsfelder Mess-, Schalt- und Schutzgeräte, werden diese häufig auch als Schaltfelder bezeichnet. Die wesentlichen stromführenden Komponenten eines Schaltfeldes stellen somit Trennschalter und Leistungsschalter dar.

Trennschalter

Trennschalter ermöglichen eine sichtbare Längsisolation zur Gewährleistung einer nachhaltigen und sicheren Trennung von Betriebsmitteln vom restlichen spannungsführenden System [33]. Dabei können Trennschalter in der Regel nur im stromlosen Zustand geschaltet werden [33]. Aus diesem Grund lassen sich für Trennschalter keine wesentlichen Veränderungen zu in Drehstromsystemen eingesetzten Trennschaltern ableiten.

Leistungsschalter

Durch gestiegene Anforderungen hinsichtlich der gewünschten Abschalt Dauern von Leistungsschaltern für Gleichstromsysteme und den veränderten Kurzschlussstromverlauf ohne natürlichen Stromnulldurchgang können heutige Vakuum- oder SF₆-Leistungsschalter für Drehstromsysteme nicht ohne deutliche Anpassungsmaßnahmen für Gleichstromsysteme verwendet werden [38, 42]. Die Entwicklung von Leistungsschaltern für Gleichstromsysteme ist aktueller Forschungsgegenstand. Generell existieren drei Konzepte für Gleichstromleistungsschalter [38]:

- ❖ Rein mechanische Gleichstromleistungsschalter
- ❖ Rein leistungselektronische Gleichstromleistungsschalter
- ❖ Kombination aus mechanischen und leistungselektronischen Gleichstromleistungsschaltern (Hybride Gleichstromleistungsschalter)

Erste Prototypen von mechanischen Gleichstromleistungsschaltern [70] und hybriden Gleichstromleistungsschaltern [71] für Mittelspannungsgleichstromnetze wurden bereits erfolgreich getestet.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze festgehalten werden, dass die in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Kurzschlussstromkenngrößen für die aufgeführten stromführenden Betriebsmittel ermittelt werden müssen, um diese für die maximal auftretenden Belastungen auslegen zu können.

2.2.8 Netzkonzepte für Gleichstromnetze

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kombination aus Stationsaufbau (nachfolgend als Stationskonfiguration definiert) und Leitungsaufbau (nachfolgend als Leitungskonfiguration definiert) als Netzkonzept für Gleichstromnetze definiert. Im

Folgenden werden demzufolge die möglichen Stationskonfigurationen und Leitungskonfigurationen für Gleichstromnetze vorgestellt, bevor die möglichen Netzkonzepte für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze präsentiert werden.

2.2.8.1 Stationskonfigurationen für Gleichstromnetze

Die Stationskonfiguration befasst sich mit dem Aufbau der Umrichter- und Gleichspannungswandlerstationen. In der Literatur lassen sich drei verschiedene Stationskonfigurationen finden [38, 42, 43]. Diese sind die:

- ❖ Asymmetrisch monopolare Stationskonfiguration
- ❖ Symmetrisch monopolare Stationskonfiguration
- ❖ Bipolare Stationskonfiguration

Der DC-seitige Aufbau der Stationen der drei verschiedenen Stationskonfigurationen ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

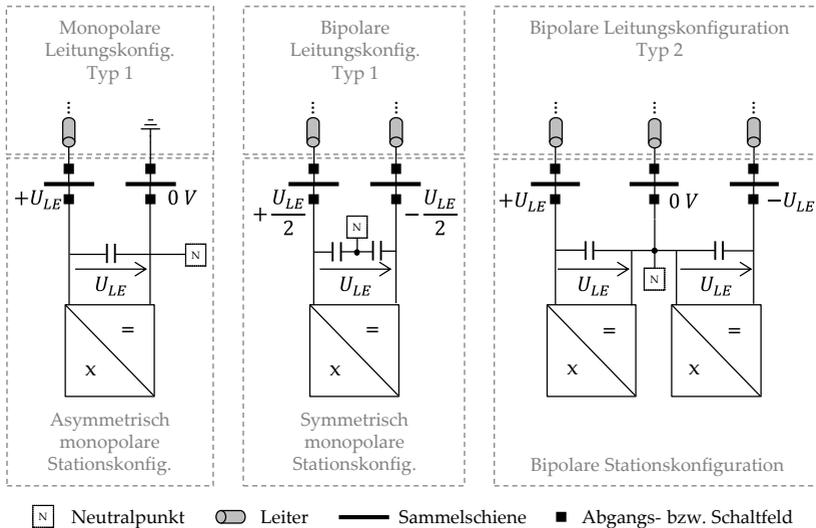


Abbildung 2.13: Stations- und Leitungskonzepte für Gleichspannungsnetze

Es ist zu erkennen, dass bei den monopularen Stationskonfigurationen zwei Pole zur Leistungsübertragung genutzt werden. Zur Generierung der zwei Pole ist dabei mindestens ein leistungselektronisches Wandlersystem notwendig, wobei

auch zusätzliche parallele Wandler-Systeme zur Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit möglich sind [72]. Innerhalb der monopolen Stationskonfigurationen unterscheiden sich diese insbesondere hinsichtlich der Platzierung des Neutralpunkts und damit verbunden der Pol-Erde-Spannung der Pole. [38]

Bei der asymmetrisch monopolen Stationskonfiguration befindet sich der Neutralpunkt an einem der beiden Pole. In Kombination mit einer starren Neutralpunktbehandlung im Gleichstromsystem (vgl. Kapitel 2.2.9) weist der entsprechende Pol im Normalbetrieb eine Pol-Erde-Spannung in der Größenordnung von 0 V auf. Der andere Pol weist im Normalbetrieb eine Pol-Erde-Spannung in der Größenordnung von entweder $+U_{LE}$ oder $-U_{LE}$ auf, wobei es sich bei U_{LE} um die ausgangsseitige Betriebsspannung des Wandler-Systems handelt. [38]

Bei der symmetrisch monopolen Stationskonfiguration wird der Neutralpunkt durch zwei gleich dimensionierte Kondensatoren gebildet. Dadurch befindet sich die Pol-Erde-Spannung der beiden Pole im Normalbetrieb in der Größenordnung von $+U_{LE}/2$ bzw. $-U_{LE}/2$. [38]

Bei der bipolaren Stationskonfiguration werden drei Pole zur Leistungsübertragung genutzt. Zur Generierung der drei Pole sind dabei mindestens zwei leistungselektronische Wandler-Systeme notwendig, wobei der erste Pol dem positiven Pol des ersten Wandler-Systems entspricht. Die Pol-Erde-Spannung dieses ersten Pols liegt im Normalbetrieb in der Größenordnung von $+U_{LE}$. Der zweite Pol ist der negative Pol des zweiten Wandler-Systems und weist eine Pol-Erde-Spannung im Normalbetrieb in der Größenordnung von $-U_{LE}$ auf. Der dritte Pol wird durch die Verbindung des negativen Pols des ersten Wandler-Systems mit dem positiven Pol des zweiten Wandler-Systems generiert. An diesem dritten Pol befindet sich der Neutralpunkt, wodurch bei einer starren Neutralpunktbehandlung im Gleichstromsystem eine Pol-Erde-Spannung in der Größenordnung von 0 V auftritt. Entsprechend kann die bipolare Stationskonfiguration als eine Parallelschaltung zweier asymmetrisch monopolarer Stationskonfigurationen mit entgegengesetzter Polarität und einem geteilten Neutralpunkt angesehen werden, wobei die installierten Wandler-Systeme unabhängig voneinander eingesetzt werden können. [38]

2.2.8.2 Leitungskonfigurationen für Gleichstromnetze

Die Leitungskonfiguration befasst sich mit dem Aufbau der Leitungen. In der Literatur sind vier unterschiedliche Leitungskonfigurationen für Gleichstromnetze zu finden [38, 42, 43]. Diese sind in dieser Arbeit definiert zu:

- ❖ Monopolare Leitungskonfiguration Typ 1
- ❖ Monopolare Leitungskonfiguration Typ 2
- ❖ Bipolare Leitungskonfiguration Typ 1
- ❖ Bipolare Leitungskonfiguration Typ 2

Wie in Abbildung 2.13 zu erkennen ist, erfolgt die elektrische Leistungsübertragung bei der monopolaren Leitungskonfiguration Typ 1 mit einem metallischen Leiter und der Erde, die als Rückleitung zum Schließen des Stromkreises verwendet wird. Dabei muss der verwendete metallische Leiter für die volle Betriebsspannung isoliert werden. [38]

Bei der monopolaren Leitungskonfiguration Typ 2 erfolgt die Übertragung der elektrischen Leistung mithilfe von zwei metallischen Leitern. Dabei wird einer der metallischen Leiter für die volle Betriebsspannung isoliert, während der andere Leiter für eine deutlich geringere Spannung isoliert wird. [38]

Bei der bipolaren Leitungskonfiguration Typ 1 erfolgt die elektrische Leistungsübertragung durch zwei metallische Leiter (siehe Abbildung 2.13). Dabei sind beide metallische Leiter für die volle Betriebsspannung zu isolieren. [38]

Bei der bipolaren Leitungskonfiguration Typ 2 erfolgt die Übertragung elektrischer Leistung mithilfe von drei metallischen Leitern (siehe Abbildung 2.13). Dabei werden zwei der metallischen Leiter für die volle Betriebsspannung isoliert, während der dritte Leiter für eine deutlich geringere Spannung zu isolieren ist. [38]

2.2.8.3 Mögliche Netzkonzepte für Mittel- und Niederspannungs-gleichstromnetze

Basierend auf den verschiedenen Stations- und Leitungskonzepten lassen sich verschiedene Netzkonzepte realisieren. Mögliche Netzkonzepte sind:

- ❖ Asymmetrisch monopolarer Netzkonzept mit Erdrückleitung
- ❖ Asymmetrisch monopolarer Netzkonzept mit metallischer Rückleitung
- ❖ Symmetrisch monopolarer Netzkonzept
- ❖ Bipolarer Netzkonzept mit Erde als Neutralleiter
- ❖ Bipolarer Netzkonzept mit metallischem Neutralleiter
- ❖ Hybride Netzkonzepte

Beim asymmetrisch monopolen Netzkonzept mit Erdrückleitung wird für alle sich im Netz befindenden Stationen die asymmetrisch monopole Stationskonfiguration verwendet. Zusätzlich wird für alle Leitungen im Netz die monopole Leitungskonfiguration Typ 1 benutzt.

Beim asymmetrisch monopolen Netzkonzept mit metallischer Rückleitung wird für alle sich im Netz befindenden Stationen die asymmetrisch monopole Stationskonfiguration verwendet. Zusätzlich wird für alle Leitungen im Netz die monopole Leitungskonfiguration Typ 2 benutzt.

Beim symmetrisch monopolen Netzkonzept wird für alle sich im Netz befindenden Stationen die symmetrisch monopole Stationskonfiguration und für alle Leitungen die bipolare Leitungskonfiguration Typ 1 verwendet.

Beim bipolaren Netzkonzept mit Erde als Neutralleiter wird für alle sich im Netz befindenden Stationen die bipolare Stationskonfiguration und für alle Leitungen die bipolare Leitungskonfiguration Typ 1 verwendet.

Beim bipolaren Netzkonzept mit metallischem Neutralleiter wird für alle sich im Netz befindenden Stationen die bipolare Stationskonfiguration und für alle Leitungen die bipolare Leitungskonfiguration Typ 2 verwendet. Tendenziell kann das bipolare Netzkonzept mit metallischem Neutralleiter als zwei parallel betriebene, weitestgehend unabhängige asymmetrische monopole Netze mit entgegengesetzter Polarität und einem gemeinsamen metallischem Neutralleiter betrachtet werden. Dabei ist das Ziel des bipolaren Netzkonzepts mit metallischem Neutralleiter die Verbesserung der Zuverlässigkeit des Systems, da auch bei Ausfall eines der asymmetrisch monopolen Netze noch die Hälfte an Leistung über das verbleibende asymmetrisch monopole Netz übertragen werden kann.

Bei den hybriden Netzkonzepten werden innerhalb des Netzes keine einheitlichen Stations- und Leitungskonzepte verwendet. Ein exemplarisches hybrides Netzkonzept wird in [65] vorgestellt. Dort wird die Nutzung der bipolaren Leitungskonfiguration Typ 2 in Kombination mit der bipolaren Stationskonfiguration für die Umspannwerke und die monopole Stationskonfiguration für die Ortsnetzstationen vorgeschlagen, wobei für die Ortsnetzstationen eine Umschaltmöglichkeit zwischen den beiden asymmetrischen monopolen Systemen der bipolaren Leitungskonfiguration besteht.

Aufgrund von möglichen negativen Effekten auf andere sich im Erdreich befindende Infrastrukturen gilt es einen konstanten elektrischen Stromfluss durch die Erde zu verhindern [29]. Auf Grund des sich einstellenden konstanten Stromflusses durch das Erdreich sind das asymmetrische Netzkonzept mit Erdrückleitung

und das bipolare Netzkonzept mit Erde als Neutralleiter nicht erlaubt. Aus diesem Grund werden diese Netzkonzepte im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Zusätzlich haben Voruntersuchungen veröffentlicht in [65] ergeben, dass aus Sicht der Versorgungszuverlässigkeit der Einsatz des bipolaren Netzkonzepts mit metallischem Neutralleiter und des exemplarisch vorgestellten hybriden Netzkonzepts für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze nicht angemessen erscheint. Das liegt darin begründet, dass Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze, wie bereits der Großteil heutiger Mittel- und Niederspannungsdrehstromnetze, aufgrund der öffentlichen Akzeptanz verkabelt ausgeführt werden. Da in verkabelten Systemen häufig alle Leiter einer Leitung aufgrund der räumlichen Nähe von einem Ausfall betroffen sind, ist zusätzlich Redundanz durch andere Leitungen bereitzustellen, um das Kriterium der (N-1)-Zuverlässigkeit einzuhalten. Das hat zur Folge, dass die zusätzliche Redundanz durch das bipolare Netzkonzept bzw. durch ein hybrides Netzkonzept keinen bedeutenden Mehrwert bei gleichzeitig gestiegenen Kosten im Vergleich zu den monopolaren Netzkonzepten bietet. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur das asymmetrisch monopolarer Netzkonzept mit metallischer Rückleitung und das symmetrisch monopolarer Netzkonzept berücksichtigt.

2.2.9 Neutralpunktbehandlung

Analog zur Sternpunktbehandlung von Transformatoren in Drehstromsystemen ist eine Behandlung der gleichstromseitigen Neutralpunkte von leistungselektronischen Wandlerstationen für Gleichstromsysteme notwendig, nachfolgend als Neutralpunktbehandlung definiert. Mithilfe der Neutralpunktbehandlung kann ähnlich zur Sternpunktbehandlung in Drehstromsystemen der Erdkurzschlussstrom beeinflusst werden, weshalb eine Berücksichtigung der Neutralpunktbehandlung bei Kurzschlüssen mit Erdberührung notwendig ist. [29]

Ähnlich zur Behandlung der Sternpunkte von Transformatoren in Drehstromsystemen werden zur Behandlung der Neutralpunkte von leistungselektronischen Wandlerstationen gegenüber Erde in der Literatur verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen: [29]

- ❖ **Starre Neutralpunktbehandlung:**
Bei der starren Neutralpunktbehandlung wird der Neutralpunkt mit möglichst kleinem Widerstand geerdet.

- ❖ Resistive Neutralpunktbehandlung:
Bei der resistiven Neutralpunktbehandlung wird der Neutralpunkt mit einem Widerstand geerdet.
- ❖ Induktive Neutralpunktbehandlung:
Bei der induktiven Neutralpunktbehandlung wird der Neutralpunkt mit einer Spule geerdet.
- ❖ Isolierte Neutralpunktbehandlung:
Bei der isolierten Neutralpunktbehandlung wird der Neutralpunkt nicht geerdet.

Hinsichtlich der Neutralpunktbehandlung muss zur Verhinderung von konstanten Erdströmen im Normalbetrieb darauf geachtet werden, dass höchstens eine Wandlerstation über eine starre, resistive oder induktive Neutralpunktbehandlung verfügt. Alle anderen Wandlerstationen müssen entsprechend mit einer isolierten Neutralpunktbehandlung ausgeführt werden. [29]

2.3 Bewertung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode

In diesem Unterkapitel wird die zweite aufgeworfene Fragestellung der Analyse behandelt. Diese lautet:

2. Wie kann die Anwendbarkeit der zu entwickelnde Berechnungsmethode validiert und bewertet werden?

Dabei kann diese Fragestellung wie folgt konkretisiert werden:

- ▲ Mit welchen Daten bzgl. Kurzschlussströmen (Vergleichsdaten) können die Ergebnisse der zu entwickelnden Berechnungsmethode verglichen werden?
- ▲ Anhand welcher Bewertungsgrößen kann ein Vergleich der Ergebnisse der vereinfachten Berechnungsmethode mit den Vergleichsdaten erfolgen?

Zur Beantwortung dieser konkretisierten Fragestellungen der Analyse werden nachfolgend mögliche Vergleichsdaten und Bewertungsgrößen analysiert.

2.3.1 Vergleichsdaten zur Bewertung

Zur Herleitung einer vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode ist im Zuge der Validierung ein Vergleich der berechneten Kurzschlussströme mit repräsentativen realen Vergleichsdaten erforderlich. Wünschenswerterweise wäre

ein Vergleich der errechneten Kurzschlussströme mit gemessenen, in Realität auftretenden Kurzschlussströmen durchzuführen. Jedoch sind aufgrund der fehlenden Realisierung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen keine entsprechenden Messdaten verfügbar, sodass keine realen Vergleichsdaten herangezogen werden können.

Aus diesem Grund müssen realitätsnahe Vergleichsdaten in Form von Kurzschlussstromverläufen generiert und zur Validierung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode herangezogen werden. Dabei bieten sich zur Generierung von realitätsnahen Kurzschlussstromverläufen transiente Kurzschlussstromberechnungen an, da sich die transiente Kurzschlussstromberechnung in Form von numerischer Zeitverlaufssimulationen als Stand der Technik für HGÜ-Systeme etabliert hat [29, 73–75]. Deshalb wird für diese Arbeit die Verwendung von numerischen Zeitverlaufssimulationen zur Generierung von realitätsnahen Kurzschlussstromverläufen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen verwendet. Die Vorstellung der Modelle zur numerischen Zeitverlaufssimulation werden in Kapitel 3 vorgestellt.

2.3.2 Bewertungsgrößen

Zur Bewertung der Anwendbarkeit der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze werden in einem ersten Schritt, analog zur vereinfachten Kurzschlussstromberechnung in Drehstromsystemen, Kurzschlussstromkenngrößen identifiziert, mithilfe derer Belastungen während eines Kurzschlusses abgeschätzt werden können. Anschließend werden auf Basis der identifizierten Kurzschlussstromkenngrößen die verwendeten Bewertungskenngrößen abgeleitet.

2.3.2.1 Kurzschlussstromkenngrößen

In Drehstromsystemen werden Kurzschlussströme nach DIN EN 60909 mithilfe von Kurzschlussstromkenngrößen charakterisiert. Mit diesen Kurzschlussstromkenngrößen lassen sich die Folgen, bspw. in Form von erhöhten Belastungen, für stromdurchflossene Betriebsmittel bestimmen. Die wesentlichen Belastungen hinsichtlich der Auslegung von stromführenden Betriebsmitteln stellen dabei die mechanische und die thermische Belastung dar. [21]

Aufgrund der guten Erfahrungen mit Kurzschlussstromkenngrößen im Bereich der Kurzschlussstromberechnung von Drehstromsystemen wird im Zuge dieser Arbeit die Nutzung von Kurzschlussstromkenngrößen für die Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen angestrebt. Die

im Zuge der zu entwickelnden Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze zu bestimmenden Kurzschlussstromkenngrößen werden im Folgenden identifiziert.

Mechanische Belastung stromführender Betriebsmittel

Basierend auf den physikalischen Gegebenheiten des Elektromagnetismus üben stromdurchflossene Leiter aufgrund der magnetischen Felder mechanische Kräfte aufeinander aus [21]. Die Kräfte eines Zwei-Leitersystems mit parallelem Hin- und Rückleiter, das einem Gleichstromsystem ähnelt, lassen sich entsprechend Formel (2.4) bestimmen [76]. Hierbei stellt l die Länge der parallel zueinander laufenden Leiter, a den Abstand zwischen den Leitern, $i(t)$ den Stromverlauf und μ_0 die Vakuumpermeabilität dar.

$$F(t) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{a} \cdot i(t)^2 \quad (2.4)$$

Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit vom Strom, treten die maximalen Kräfte beim maximalen Stromwert auf. Da die größten Ströme sowohl in Dreh- als auch Gleichstromsystemen in der Regel im Kurzschlussfall auftreten, sind erhöhte mechanische Belastungen im Falle eines Kurzschlusses zu erwarten.

Nach [23] wird die mechanische Beanspruchung von stromführenden Betriebsmitteln in Drehstromsystemen mithilfe des Stoßkurzschlussstroms i_p und der geometrischen Anordnung der Leiter ermittelt. Aufgrund der mindestens drei Leiter eines Drehstromsystems ist festzuhalten, dass nicht zwangsläufig der maximale mögliche Stoßkurzschlussstrom $i_{p,max}$ einer der drei Phasen zwingend die maximale mechanische Belastung hervorruft. Vielmehr ist die räumliche Überlagerung der verschiedenen magnetischen Felder entscheidend. [21]

Für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze ist aufgrund der Verwendung von zumeist Zwei-Leiter-Systemen (vgl. Kapitel 2.2.8) die Abschätzung der mechanischen Beanspruchung durch die Berechnung des maximal möglichen Stoßkurzschlussstroms $i_{p,max}$ möglich. Aus diesem Grund ist im Zuge der zu entwickelnde vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode die Berechnung des Stoßkurzschlussstroms i_p jedes stromführenden Betriebsmittels notwendig.

Thermische Belastung stromführender Betriebsmittel

Zusätzlich zu mechanischen Kräften weisen stromdurchflossene Betriebsmittel eine thermische Beanspruchung durch die Erhitzung in Folge von Stromwärmeverlusten auf. Übersteigt die Leitertemperatur eine gegebene Obergrenze, so sind negative Auswirkungen hinsichtlich Isolations- und mechanischer Festigkeit

möglich, die im schlimmsten Fall zur Zerstörung des Betriebsmittels führen können. Die Veränderung der Leitertemperatur hängt im Wesentlichen von der zugeführten Wärmeenergie, hervorgerufen durch Stromwärmeverluste, und der abgeführten Wärmeenergie ab. Die zugeführte Wärmeenergie lässt sich im Allgemeinen entsprechend Formel (2.5) bestimmen. [21]

$$E_{zu} = \int_0^T R(t) \cdot i(t)^2 \cdot dt \quad (2.5)$$

Wie aus Formel (2.5) ersichtlich wird, hängt die zugeführte Wärmeenergie vom Stromverlauf, der Dauer des Stromflusses sowie vom elektrischen Widerstand ab, wobei der Widerstand aufgrund der Temperaturabhängigkeit zeitveränderlich ist.

Nach [23] wird die thermische Belastung von stromführenden Betriebsmittel in Drehstromsystemen durch einen thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom I_{th} abgeschätzt. Dabei wird zur Abschätzung zur sicheren Seite die abgeführte Wärmeenergie vernachlässigt [21]. Ebenso wird zur Abschätzung zur sicheren Seite die Zeitvarianz des Widerstands aufgrund der Temperaturabhängigkeit vernachlässigt, sodass der Widerstand durch einen konstanten Widerstand bei maximalen Widerstandswert berücksichtigt wird [21]. Der physikalische Zusammenhang zwischen erzeugter Wärmeenergie und dem thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom ist in Formel (2.6) aufgezeigt [21].

$$E_{zu} = R \cdot \int_0^T i(t)^2 \cdot dt = R \cdot I_{th}^2 \cdot T \quad (2.6)$$

Formel (2.6) ist zu entnehmen, dass die maximale thermische Beanspruchung in Folge der zugeführten Wärmeenergie durch den größtmöglichen thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom $I_{th,max}$ repräsentiert wird. Aus diesem Grund ist für die Dimensionierung von stromführenden Betriebsmitteln in Drehstromsystemen der größtmögliche thermisch äquivalente Kurzzeitstrom jedes stromführenden Betriebsmittels zu ermitteln. [21]

Aufgrund der gleichen physikalischen Zusammenhänge von Stromwärmeverlusten bei Gleich- und Drehströmen wird in dieser Arbeit der Ansatz der Berechnung eines thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms zur Abschätzung der thermischen Beanspruchung von stromführenden Betriebsmitteln in Gleichstromsystemen, äquivalent zum Vorgehen für heutige Drehstromsysteme, verfolgt. Deshalb ist im

Zuge der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode die Berechnung des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} jedes stromführenden Betriebsmittels notwendig.

2.3.2.2 Bewertungskenngrößen

Zur Bewertung der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze erfolgt ein Vergleich der vorgestellten Kurzschlusskenngrößen der transienten Berechnungen mit den entsprechenden Kurzschlusskenngrößen der vereinfachten Berechnungen. Dementsprechend stellen die normierten Abweichungen der Kurzschlussstromkenngrößen der vereinfachten Berechnungen von den Kurzschlussstromkenngrößen der transienten Berechnungen (kurz: Fehler) die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bewertungskenngrößen dar. Die verwendeten Bewertungskenngrößen sind demzufolge wie folgt definiert:

$$e_p = \frac{i_{p,vereinfacht} - i_{p,transient}}{i_{p,transient}} \quad (2.7)$$

$$e_{th} = \frac{I_{th,vereinfacht} - I_{th,transient}}{I_{th,transient}} \quad (2.8)$$

Formel (2.7) gibt den Fehler hinsichtlich des Stoßkurzschlussstroms und Formel (2.8) den Fehler hinsichtlich des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms an.

Für die abschließende Bewertung der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze ist es somit erforderlich, die Bewertungskenngrößen für jedes Betriebsmittel zu bestimmen.

2.4 Schutz vor Kurzschlussströmen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen

In diesem Unterkapitel wird die dritte Fragestellung der Analyse behandelt. Diese lautet:

3. Welchen Einfluss hat der Schutz vor Kurzschlussströmen auf die zu entwickelnde Berechnungsmethode?

Dabei kann die Fragestellung wie folgt konkretisiert werden:

- ▲ Wie können Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze vor Überströmen in Folge von Kurzschlüssen geschützt werden?

- ▲ In wie weit muss der Kurzschlussstromschutz bei der Entwicklung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode berücksichtigt werden?

Zur Beantwortung dieser konkretisierten Fragestellungen der Analyse werden in einem ersten Schritt mögliche Schutzkonzepte für Gleichstromnetze analysiert. Anschließend wird der Einfluss des Schutzes auf die zu entwickelnde vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode identifiziert.

2.4.1 Schutzkonzepte für Gleichstromnetze

Unter einem Schutzkonzept versteht man generell die Koordination der Kurzschlussdetektion, der Kurzschlusslokalisierung und der Kurzschlussklärung, wobei auch Schutzreserven einbezogen werden [33, 77]. Für die Kurzschlussklärung in Gleichstromnetzen können prinzipiell die in Kapitel 2.2.7 vorgestellten Leistungsschalterttypen eingesetzt werden. Für die Fehlerdetektion und die Fehlerlokalisierung in Gleichstromnetzen werden in der Forschung aktuell verschiedene Ansätze vorgeschlagen und untersucht [78–87].

Aufgrund der aktuellen Ungewissheit hinsichtlich der eingesetzten Schutzkonzepte für zukünftige Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze können im Rahmen dieser Arbeit keine zusätzlichen Kurzschlussstromkenngrößen zur Parametrierung der Schutzgeräte identifiziert werden, die durch die vereinfachte Berechnungsmethode zu berechnen wären.

2.4.2 Einfluss des Schutzes auf die Kurzschlussstromberechnung

Wie in Kapitel 2.3.2 festgestellt wurde, ist die Dauer des Kurzschlussstroms für die thermische Belastung von Betriebsmitteln relevant, sodass die Zeit bis zur Fehlerklärung einen relevanten Einfluss auf die thermische Belastung von stromführenden Betriebsmitteln hat.

Da das Versagen von Schutzeinrichtungen möglich ist und die Dauer des Kurzschlussstroms dadurch erhöht wird, können Betriebsmittel durch Schutzversagen potentiell gefährdet werden. Aus diesem Grund wird in heutigen Drehstromsystemen die für die Auslegung relevante thermische Belastung nicht anhand von spezifischen Fehlerklärungszeiten ermittelt, sondern es wird eine Ausschaltzeit T_A angenommen, bei der es sich um eine wirtschaftlich angemessene Abschätzung zur sicheren Seite handelt. [21]

Im Zuge dieser Arbeit wird ein äquivalentes Vorgehen zum Drehstromsystem fokussiert, wodurch spezifische Fehlerklärungszeiten vernachlässigt und eine definierte Ausschaltzeit T_A verwendet wird. Da in aktueller Forschung keine Einigkeit

hinsichtlich einer spätestens notwendigen Abschaltung von Kurzschlussströmen existiert, wird im Rahmen dieser Arbeit die Anwendbarkeit der zu entwickelnden Berechnungsmethode für verschiedene Ausschaltzeiten überprüft.

2.5 Kurzschlüsse in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze

In diesem Unterkapitel wird die vierte Fragestellung der Analyse behandelt. Diese lautet:

4. Welche Kurzschlüsse gilt es bei der zu entwickelnde Berechnungsmethode zu berücksichtigen?

Dabei kann die Fragestellung wie folgt konkretisiert werden:

- ▲ Welche Kurzschlussarten gilt es bei der zu entwickelnde Berechnungsmethode zu berücksichtigen?
- ▲ Welche Kurzschlusspositionen je stromführendem Betriebsmittel sind auslegungsrelevant?

Zur Beantwortung dieser konkretisierten Fragestellungen der Analyse werden in einem ersten Schritt alle möglichen Kurzschlussarten in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen betrachtet und die für die zu entwickelnde Berechnungsmethode relevanten Kurzschlussarten, die zu den höchsten Belastungen für die stromführenden Betriebsmittel führen, identifiziert. Anschließend werden für jedes stromführende Betriebsmittel die zu berücksichtigenden Positionen der relevanten Kurzschlüsse, die zu den höchsten Belastungen der jeweiligen stromführenden Betriebsmittel führen, ermittelt.

2.5.1 Relevante Kurzschlussarten

Die generell möglichen Kurzschlussarten in Gleichstromnetzen, ausgeführt in einem der betrachteten monopolaren Netzkonzepten, sind in Abbildung 2.14 dargestellt.

In durchgeführten Voruntersuchungen, veröffentlicht in [88], wurden in einem ersten Schritt alle Fehlerarten identifiziert, die im Fehlerfall höhere Ströme hervorrufen als die Ströme im Normalbetrieb. Aufbauend auf [88] wurden in tiefergehenden Voruntersuchungen, veröffentlicht in [89], die Kurzschlussarten identifiziert, die zu den höchsten thermischen und mechanischen Belastungen der stromführenden Betriebsmittel führen. Diese für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung relevanten Kurzschlussarten werden nachfolgend für das

asymmetrische monopolare Netzkonzept mit metallischer Rückleitung und für das symmetrische monopolare Netzkonzept vorgestellt.

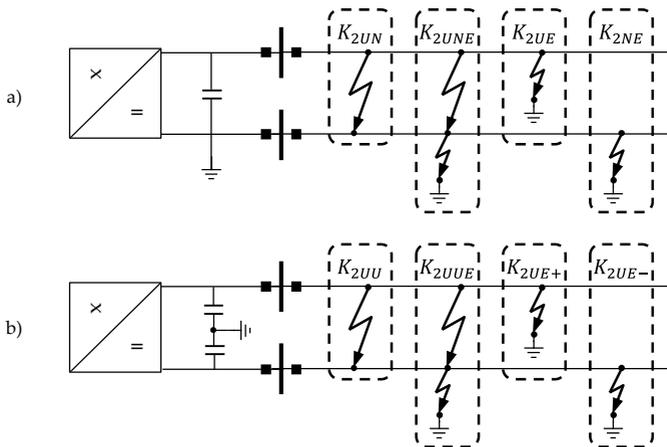


Abbildung 2.14: Mögliche Kurzschlussarten des asymmetrisch monopolaren Netzkonzepts mit metallischer Rückleitung (a) und des symmetrischen monopolaren Netzkonzepts (b)

2.5.1.1 Relevante Kurzschlussarten des asymmetrisch monopolaren Netzkonzepts mit metallischer Rückleitung

Für das asymmetrisch monopolare Netzkonzept mit metallischer Rückleitung wurden zwei relevante Kurzschlussarten ermittelt. Zum einen verursacht der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung K_{2UNE} die höchsten thermischen und mechanischen Belastungen für die Betriebsmittel des spannungsführenden Pols. Das ist auf das teilweise Kurzschließen bzw. Parallelschalten des neutralen Pols (Rückleiter) durch die Erde zurückzuführen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der zweipolige Kurzschluss ohne Erdberührung K_{2UN} die höchsten thermischen und mechanischen Belastungen für die Betriebsmittel des neutralen Pols hervorruft. Aus diesem Grund ist in der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze, ausgeführt im asymmetrisch monopolaren Netzkonzept, lediglich die Berücksichtigung von K_{2UNE} und K_{2UN} notwendig. [89]

2.5.1.2 Relevante Kurzschlussarten des symmetrisch monopolaren Netzkonzepts

Für das symmetrisch monopolare Netzkonzept wurden zwei relevante Kurzschlussarten ermittelt. Dabei handelt es sich um den zweipoligen Kurzschluss mit

Erdberührung K_{2UUE} und den zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung K_{2UU} . Dabei ist festzuhalten, dass für beide Kurzschlussarten dieselben Kurzschlussströme resultieren, sodass die ausschließliche Berücksichtigung von K_{2UU} für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung für Mittel- und Niederspannungs-gleichstromnetze, ausgeführt im symmetrisch monopolaren Netzkonzept, ausreicht. [89]

2.5.2 Relevante Kurzschlusspositionen

Zusätzlich zu der Ermittlung der relevanten Kurzschlussarten wurden in [89] die relevanten Kurzschlusspositionen für die stromführenden Betriebsmittel identifiziert. Diese relevanten Kurzschlusspositionen werden nachfolgend vorgestellt.

2.5.2.1 Relevante Kurzschlusspositionen von Leitungen

Die durchgeführten Voruntersuchungen aus [89], aber auch die Untersuchungen aus [90] zeigen, dass ein Kurzschluss sehr nah an den angrenzenden Abgangsfeldern zur höchsten lokalen (d.h. punktuellen) mechanischen und thermischen Belastung für den Leitungsabschnitt zwischen Kurzschluss und Abgangsfeld führt. Wie in [89] und [90] festgestellt wurde, steigen die Belastungen mit sinkender Distanz zwischen Kurzschluss und Abgangsfeld. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Leitungsabschnitte sehr nah an den angrenzenden Abgangsfeldern in der Regel eine geringer elektrische Distanz zu den Kurzschlussstromquellen aufweisen. Aus diesem Grund werden in der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode die Kurzschlusspositionen direkt an den Verbindungspunkten zwischen Abgangsfeldern und Leitung als Abschätzung zur sicheren Seite berücksichtigt.

2.5.2.2 Relevante Kurzschlusspositionen von Sammelschienen

Abhängig von der Position der Abgangsfelder bzw. Schaltfelder an einer Sammelschiene können verschiedene Abschnitte einer Sammelschiene im Falle eines Kurzschlusses unterschiedliche mechanische und thermische Belastungen erfahren. Diese Gegebenheit wird anhand von Abbildung 2.15 schematisch verdeutlicht.

Zur Abschätzung zur sicheren Seite der mechanischen und thermischen Belastungen von Sammelschienen werden für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode Kurzschlüsse zwischen den Endpunkten der Sammelschienen

(siehe Abbildung 2.15b) berücksichtigt. Diese Kurzschlusspositionen charakterisieren sich durch eine Aufsummierung aller Teilkurzschlussströme der Abgangsfelder und stellen eine Abschätzung zur sicheren Seite dar.

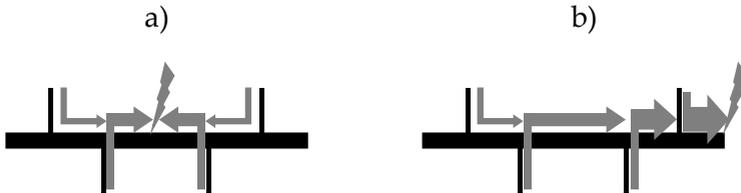


Abbildung 2.15: Exemplarische Stromverteilungen bei Kurzschlüssen auf einer Sammelschiene

2.5.2.3 Relevante Kurzschlusspositionen von Abgangs- bzw. Schaltfeldern

Bezüglich der Abgangsfelder und ggf. derer stromführenden Schalt- und Messgeräte ist festzuhalten, dass ein Kurzschluss an Anfang oder am Ende des Abgangsfeldes zu den größtmöglichen Kurzschlussstrom über das Abgangsfeld führt [89]. Aus diesem Grund werden diese beiden Kurzschlusspositionen in der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode berücksichtigt.

2.6 Verhalten von Betriebsmittel im Kurzschlussfall

In diesem Unterkapitel wird die fünfte Fragestellung der Analyse behandelt. Diese lautet:

5. Wie verhalten sich die Betriebsmittel bei einem Kurzschluss in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen?

Dabei kann die Fragestellung wie folgt konkretisiert werden:

- ▲ Welche Betriebsmittel tragen zum Kurzschlussstrom in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen bei?
- ▲ Welche Betriebsmittel dämpfen den Kurzschlussstrom im relevanten Ausmaß?

Zur Beantwortung dieser konkretisierten Fragestellungen der Analyse werden nachfolgend die Verhaltensweisen der unterschiedlichen Betriebsmittel analysiert und vorgestellt. Dazu erfolgt in einem ersten Schritt die Vorstellung von Betriebs-

mittel mit relevantem Beitrag zum Kurzschlussstrom, die im Folgenden als Kurzschlussstromquellen definiert werden. Dabei kann zwischen direkt (d.h. ohne leistungselektronische Wandler) ans Gleichstromnetz angeschlossenen (netzinternen) und nicht direkt (d.h. über leistungselektronische Wandler) ans Gleichstromnetz angeschlossenen (netzexternen) Kurzschlussstromquellen unterschieden werden. Da bei den netzexternen Kurzschlussstromquellen leistungselektronische Wandler zwischen dem Kurzschluss und den Kurzschlussstromquellen liegen, wird das Verhalten von Umrichtern und Gleichspannungswandlern vor den netzexternen Kurzschlussstromquellen vorgestellt. Abschließend erfolgt die Vorstellung des Verhaltens der Betriebsmittel, die den DC-Kurzschlussstrom im wesentlichen Maß dämpfen.

2.6.1 Netzinterne Kurzschlussstromquellen

Als netzinterne Kurzschlussstromquellen können grundlegend alle spannungsführenden Betriebsmittel angesehen werden, da der Kurzschluss einen Ausgleichsvorgang der Ladungsträger und damit eine Entladung der Spannung mit sich bringt, der in einem Kurzschlussstrombeitrag mündet. Dabei gilt, dass je kapazitiver die Wirkungsweise des Betriebsmittels ist, desto größer ist der potentielle Kurzschlussstrombeitrag [20, 29]. Als kapazitiv wirkende Betriebsmittel mit einem relevanten Betrag zum Kurzschlussstrom können Leitungen und insbesondere Kondensatoren angesehen werden, da diese eine vergleichsweise große Kapazität aufweisen. Die Kapazität von Sammelschienen und Schaltgeräten ist im Vergleich zu den Kapazitäten von Kondensatoren und Leitungen deutlich kleiner. Das kann dadurch abgeleitet werden, dass in heutigen Netzberechnungen für Drehstromnetze die kapazitive Wirkung dieser Betriebsmittel vernachlässigt wird [91–93]. Somit erscheint die Vernachlässigung der Kapazitäten von Sammelschienen und Schaltfeldern als zulässig, sodass im Zuge dieser Arbeit nur Kondensatoren und Leitungen als netzinterne Kurzschlussstromquellen angesehen werden.

2.6.1.1 Kondensatoren

Werden die Pole eines Kondensators kurzgeschlossen, so trägt dieser durch den Ausgleich der Ladungsträger zum Kurzschlussstrom bei, wodurch die Spannung des Kondensators einbricht [20]. Ein exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag und der zugehörige Verlauf der Klemmenspannung sind in Abbildung 2.16 dargestellt.

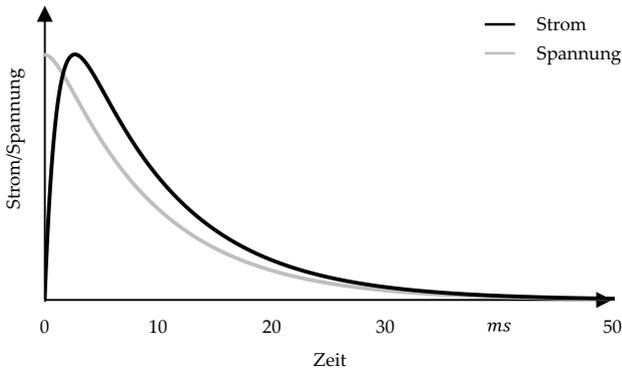


Abbildung 2.16: Exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag mit zugehörigem Spannungsverlauf eines Kondensators

Durch den Spannungseinbruch an dem Kondensator und durch die leitfähige Verbindung aller netzinternen Kondensatoren durch Leitungen erfahren alle sich im Netz befindenden Kondensatoren eine Entladung und liefern einen Beitrag zum Kurzschlussstrom. Somit sind alle netzinternen Kondensatoren als Kurzschlussstromquellen anzusehen und müssen bei einer Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden. [20, 29]

2.6.1.2 Leitungen

Ähnlich zu Kondensatoren weisen Leitungen ein kapazitives Verhalten auf, wobei sich die Kapazität über die gesamte Länge der Leitung verteilt. Durch den ebenfalls verteilten Leitungswiderstand und die Leitungsinduktivität wird die Entladung weiter vom Kurzschluss entfernter Leitungsabschnitte stärker gedämpft als die Entladung kurzschlussnaher Leitungsabschnitte. Das hat zur Folge, dass die geladene Kapazität der Leitung sich nicht wie bei einem Kondensator gebündelt, sondern zeitlich gestaffelt entlädt. Ein exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag einer Gleichstromleitung bei einem Kurzschluss am Leitungsende ist in Abbildung 2.17 dargestellt. [29, 94]

In Folge eines Fehlers werden äquivalent zu den Kondensatoren alle netzinternen Leitungen entladen und tragen somit einen Beitrag zum Kurzschlussstrom bei. Somit sind alle netzinternen Leitungen als Kurzschlussstromquellen anzusehen und müssen bei einer Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden. [29]

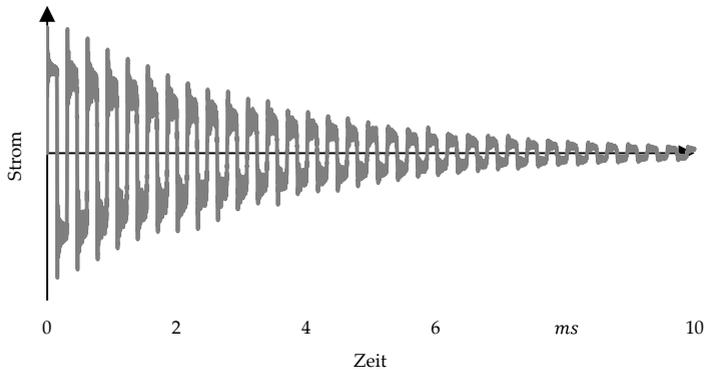


Abbildung 2.17: Exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag einer Leitung

2.6.2 Verhalten von Umrichtern bei Kurzschlüssen auf der Gleichstromseite

In diesem Unterkapitel wird das Verhalten der in Kapitel 2.2.5 vorgestellten VSC-Topologien bzw. -Topologievarianten im Falle eines gleichstromseitigen Kurzschlusses vorgestellt.

2.6.2.1 Zwei-Level-Umrichter

In Folge des durch den Kurzschluss auftretenden netzweiten Einbruchs der DC-Spannung trägt ein Zwei-Level-Umrichter (2L-VSC) einen relevanten Beitrag zum Kurzschlussstrom bei [38]. Ein beispielhafter Kurzschlussstrombeitrag ist in Abbildung 2.18 dargestellt.

Direkt nach dem Auftreten des Kurzschlusses entlädt sich der DC-seitige Umrichtercondensator und die Spannung am DC-Ausgang des 2L-VSC sinkt. Sobald die Umrichterregelung ein Absinken der DC-Spannung (bei Konstant-Spannungs-Regelung) bzw. der ein- oder ausgespeisten Leistung (bei Konstant-Leistungs-Regelung) erkennt, versucht die Umrichterregelung dem Absinken durch eine Erhöhung des durch den Umrichter eingespeisten Stroms entgegenzuwirken. Sobald der eingespeiste Strom einen definierten Grenzwert über- oder die DC-Spannung einen definierten Grenzwert unterschreitet, wird ein Kurzschluss detektiert und die leistungselektronischen Schaltelemente werden aus Gründen des Selbstschutzes vor Überlastungen und ggf. Zerstörung abgeschaltet. Nichtsdestotrotz wird der DC-seitige Kondensator nach Abschaltung der Schaltelemente wei-

ter entladen. Zusätzlich kommutiert der Stromfluss auf die antiparallelen Freilaufdioden der Schaltelemente. Ab diesem Zeitpunkt verhält sich der 2L-VSC wie ein passiver Sechs-Puls-Diodengleichrichter (B6-Gleichrichter), wodurch der Einbruch der DC-Spannung über den Umrichter an die AC-Seite übertragen wird, sodass die hinterlagerten Drehstrombetriebsmittel ebenfalls einen Spannungseinbruch äquivalent zu einem dreipoligen Kurzschluss erfahren (Abbildung 2.18). Dadurch wird ein durch den 2L-VSC nicht kontrollierbarer Kurzschlussstrombeitrag von den externen AC-Kurzschlussstromquellen zum DC-Kurzschlussstrom ermöglicht, der in einem stationären Kurzschlussstrom mündet. [20, 38]

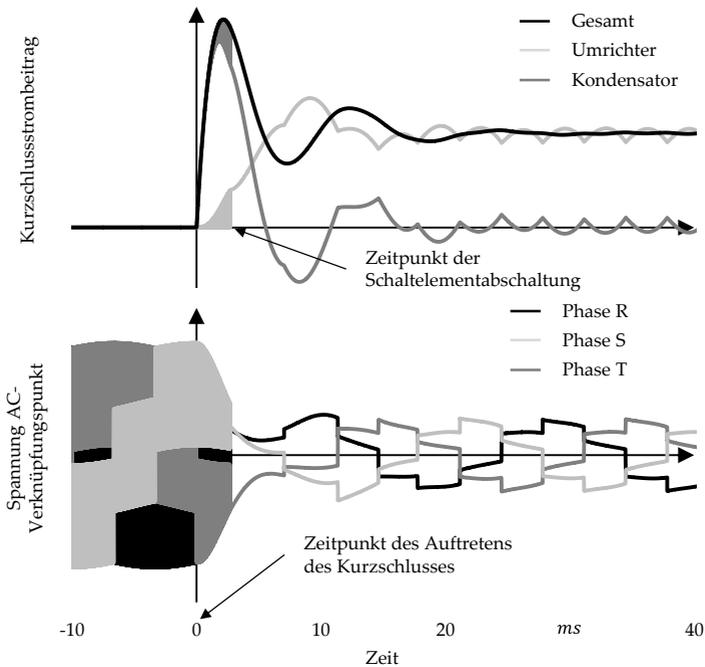


Abbildung 2.18: Exemplarischer DC-Kurzschlussstrombeitrag eines Zwei-Level-Umrichters mit zugehörigem Spannungsverlauf am AC-Verknüpfungspunkt

Aufgrund des möglichen Einsatzes von 2L-VSC in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, 2L-VSC in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen. Darüber hinaus müssen aufgrund des Übertragens des Spannungseinbruchs auf die AC-Seite die

Betriebsmittel des Drehstromsystems in der Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden. Eine Vorstellung der relevanten Betriebsmittel von Drehstromsystemen erfolgt in Kapitel 2.6.5.1.

2.6.2.2 Diode-Clamped Multilevel- und Flying-Capacitor Multilevel-Umrichtertopologie

Umrichter, ausgeführt als Diode-Clamped Multilevel-Umrichter (DCM-VSC) oder Flying-Capacitor Multilevel-Umrichter (FCM-VSC), verhalten sich unabhängig von der ausgeführten Topologievariante im Falle eines DC-seitigen Kurzschlusses aufgrund der DC-seitigen Kondensatoren und der antiparallelen Freilaufdioden ähnlich zum 2L-VSC. Nach der Schaltelementausschaltung verhalten sich DCM-VSC oder FCM-VSC äquivalent zum 2L-VSC wie ein B6-Gleichrichter, wodurch ein Einbruch der DC-Spannung an die AC-Seite übertragen wird. Dadurch wird ein durch den VSC nicht kontrollierbarer Kurzschlussstrombeitrag von den externen AC-Kurzschlussstromquellen zum DC-Kurzschlussstrom ermöglicht, der in einem stationären Kurzschlussstrom mündet. [38, 95]

Aufgrund des möglichen Einsatzes von DCM-VSC und FCM-VSC in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, diese Umrichter in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

2.6.2.3 Modulare-Multilevel-Umrichter mit Halbbrückensubmodulen

In Folge des durch den Kurzschluss auftretenden netzweiten Einbruchs der DC-Spannung trägt ein Modularer-Multilevel-Umrichter (MMC) mit Halbbrückensubmodulen (HBSM) einen relevanten Beitrag zum Kurzschlussstrom bei. Ein beispielhafter Kurzschlussstrombeitrag eines MMC mit HBSM ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

Direkt nach dem Auftreten des Kurzschlusses entladen sich die eingeschalteten SM-Kondensatoren. Übersteigt der durch die SM-Kondensatorentladung auftretende Strom oder unterschreitet die DC-Spannung einen definierten Grenzwert, wird ein Kurzschluss detektiert und die leistungselektronischen Schaltelemente werden aus Gründen des Selbstschutzes vor Überlastungen und ggf. Zerstörung abgeschaltet. Durch die Abschaltung der Schaltelemente wird die weitere Entladung der SM-Kondensatoren verhindert. Zusätzlich kommutiert der Stromfluss auf die antiparallelen Freilaufdioden der Schaltelemente S_2 (vgl. Abbildung 2.9). Ab diesem Zeitpunkt verhält sich auch der MMC mit HBSM wie ein B6-Gleichrichter, wodurch der Spannungseinbruch ähnlich zum 2L-VSC an die AC-Seite

übertragen wird, sodass die hinterlagerten Drehstrombetriebsmittel ebenfalls einen Spannungseinbruch erfahren. Dadurch wird ein durch den MMC mit HBSM nicht kontrollierbarer Kurzschlussstrombeitrag von den externen AC-Kurzschlussstromquellen zum DC-Kurzschlussstrom ermöglicht, der in einem quasi-stationären Kurzschlussstrom mündet. [38, 95]

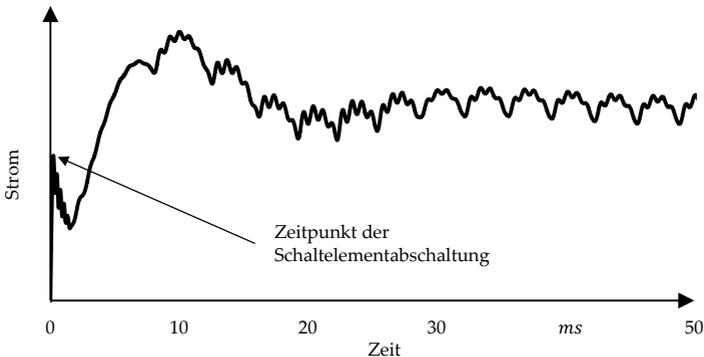


Abbildung 2.19: Exemplarischer DC-Kurzschlussstrombeitrag eines MMC mit HBSM

Aufgrund des möglichen Einsatzes von MMC mit HBSM in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, MMC mit HBSM in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

2.6.2.4 Modulare-Multilevel-Umrichter mit Vollbrückensubmodulen

In Folge des durch den Kurzschluss auftretenden netzweiten Einbruchs der DC-Spannung trägt ein Modularer-Multilevel-Umrichter (MMC) mit Vollbrückensubmodulen (VBSM) einen relevanten Beitrag zum Kurzschlussstrom bei. Ein beispielhafter Kurzschlussstrombeitrag eines MMC mit VBSM ist in Abbildung 2.20a dargestellt.

Direkt nach dem Auftreten des Kurzschlusses entladen sich die eingeschalteten SM-Kondensatoren. Übersteigt der durch die SM-Kondensatorentladung auftretende Strom oder unterschreitet die DC-Spannung einen definierten Grenzwert, wird ein Kurzschluss detektiert. Der weitere Verlauf des in das Gleichstromnetz eingespeisten Kurzschlussstrombeitrags ist abhängig von der Ausgestaltung der Regelung. Im konservativsten Fall werden die leistungselektronischen Schaltelemente ausgeschaltet. Dadurch wird die weitere Entladung der SM-Kondensatoren

verhindert und durch die Fähigkeit der Bereitstellung des Gegenspannungszustandes durch die VBSM die Kommutierung des Stroms auf die antiparallelen Dioden unterbunden, sodass insgesamt die Einspeisung eines stationären Stroms verhindert wird. Als Alternative zur Abschaltung der Schaltelemente ist ein Wechsel des Regelungsmodus zu einem Modus zur DC-Fehlerdurchfahrt (DC-FRT) möglich. Dieser Regelungsmodus nutzt den Gegenspannungszustand der VBSM aktiv aus, um einen einstellbaren stationären Strom einzuspeisen. Somit haben beide Regelungsansätze die Fähigkeit, eine Übertragung des DC-Spannungseinbruchs auf die AC-Seite des Umrichters zu verhindern, sodass der MMC mit VBSM einen kontrollierbaren Kurzschlussstrombeitrag von den externen AC-Kurzschlussstromquellen zum DC-Kurzschlussstrom entsprechend Abbildung 2.20b ermöglicht. [38, 96, 97]

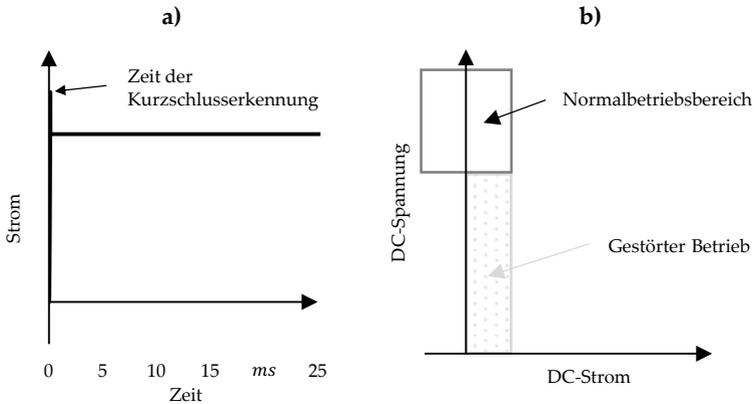


Abbildung 2.20: Exemplarischer DC-Kurzschlussstrombeitrag eines MMC mit VBSM (a) und Strom-Spannungs-Kennlinie eines MMC mit VBSM (b)

Aufgrund des möglichen Einsatzes von MMC mit VBSM in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, MMC mit VBSM in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

2.6.2.5 Modulare-Multilevel-Umrichter mit anderen Submodultypen

Da das Ziel der weiteren Submodultypen (vgl. Abbildung 2.10) oder einer Mischung von Submodultypen die Reduktion der benötigten Schaltelemente im Vergleich zu ausschließlich verwendeten VBSM bei gleichzeitiger Erhaltung der DC-FRT-Fähigkeit ist, kann festgehalten werden, dass sich MMC mit anderen Submodulen sehr ähnlich zum MMC mit VBSM im Falle eines DC-seitigen Kurzschlusses

verhalten. Dementsprechend gilt, dass diese MMC einen kontrollierbaren Kurzschlussstrombeitrag von den externen AC-Kurzschlussstromquellen zum DC-Kurzschlussstrom entsprechend Abbildung 2.20 ermöglichen. [52–54, 57, 58]

Aufgrund des möglichen Einsatzes von MMC mit anderen Submodultypen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, MMC mit anderen Submodultypen in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

Zusammenfassend können die vorgestellten Umrichter hinsichtlich ihres Verhaltens während eines gleichstromseitigen Kurzschlusses in drei typische Verhaltensweisen unterteilt werden. Diese Klassifizierung ist in Tabelle 4 vorgestellt.

Umrichtertopologie	Klassifizierung
2L-VSC	Typ 1
DCM-VSC	Typ 1
FCM-VSC	Typ 1
MMC mit HBSM	Typ 2
MMC mit VBSM	Typ 3
MMC mit SVBSM	Typ 3
MMC mit SCCSM	Typ 3
MMC mit ACCSM	Typ 3
MMC mit DCSM	Typ 3
MMC mit gemischten SM	Typ 3

Tabelle 4: Klassifizierung der Umrichtertopologien entsprechend ihres Verhaltens während eines gleichstromseitigen Kurzschlusses

2.6.3 Verhalten von Gleichspannungswandlern bei Kurzschlüssen auf den Gleichstromseiten

In diesem Unterkapitel wird das Verhalten, der in Kapitel 2.2.5 vorgestellten galvanisch getrennten Gleichspannungswandler topologien, im Falle eines ein- und eines ausgangsseitigen Kurzschlusses vorgestellt.

2.6.3.1 Unidirektionale Gleichspannungswandler

Aufgrund des ähnlichen grundlegenden Aufbaus und des generell selben Funktionsprinzips der vorgestellten unidirektionalen, galvanisch getrennten Gleichspannungswandler, verhalten sich diese Topologievarianten im Normalbetrieb und Kurzschlussfall sehr ähnlich. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Verhalten eines einphasigen (1P) Vollbrückenwandlers bei einem ein- und ausgangsseitigem Kurzschluss repräsentativ für die unidirektionalen galvanisch getrennten Gleichspannungswandlervarianten vorgestellt.

In Folge eines Kurzschlusses im Gleichstromsystem der Eingangsseite und dem damit verbundenen Spannungseinbruch am Eingang eines 1P-Vollbrückenwandlers trägt dieser einen Beitrag zum Kurzschlussstrom bei. Der schematische Verlauf eines exemplarischen eingangsseitigen Kurzschlussstrombeitrags ist in Abbildung 2.21a dargestellt.

Direkt nach dem Auftreten des Kurzschlusses entlädt sich der eingangsseitige Kondensator und die eingangsseitige Spannung des Vollbrückenwandlers sinkt. Unterschreitet die Eingangsspannung einen definierten Grenzwert, wird ein Kurzschluss detektiert und die Leistungsübertragung zur Ausgangsseite unterbrochen. Zudem ist durch den ausgangsseitigen passiven Gleichrichter ein Kurzschlussstrombeitrag von der Ausgangs- zur Eingangsseite nicht möglich, sodass nur die Entladung des Kondensators am Eingang einen nicht kontrollierbaren Beitrag zum Kurzschlussstrom liefert. Somit wird auch das Übertragen des Spannungseinbruchs von der Eingangs- auf die Ausgangsseite verhindert, wobei die Versorgung der Ausgangsseite durch den Vollbrückenwandler unterbrochen wird. [40, 47, 59]

In Folge eines Kurzschlusses im Gleichstromsystem der Ausgangsseite und dem damit verbundenen Spannungseinbruch am Ausgang des 1P-Vollbrückenwandlers trägt dieser ebenfalls einen Beitrag zum Kurzschlussstrom bei. Der schematische Verlauf eines exemplarischen ausgangsseitigen Kurzschlussstrombeitrags ist in Abbildung 2.21b dargestellt. Direkt nach dem Auftreten des Kurzschlusses entlädt sich der ausgangsseitige Kondensator und die ausgangsseitige Spannung am

Vollbrückenwandler sinkt. Sobald die Regelung des Vollbrückenwandlers ein Absinken der Ausgangsspannung erkennt, versucht die Regelung dem Absinken der Spannung durch eine Erhöhung des vom Eingang zum Ausgang fließenden (eingespeisten) Stroms entgegenzuwirken. Sobald der Strom einen definierten Grenzwert überschreitet, wird ein Kurzschluss detektiert. Der weitere Verlauf des in das Gleichstromnetz eingespeisten Stroms über den Vollbrückenwandler ist abhängig von der Ausgestaltung der Regelung. Im konservativsten Fall wird das leistungselektronische Schaltelement ausgeschaltet, sodass sich der ausgangsseitige Kondensator weiter entlädt, aber kein weiterer Strom von der Eingangsseite des Vollbrückenwandlers übertragen wird. Alternativ kann die Regelung, ähnlich zum MMC mit VBSM, in einen DC-FRT-Modus übergehen, durch den der eingespeiste Strom eingestellt werden kann. Zusammenfassend erfolgt somit bei einem ausgangsseitigen Kurzschluss ein Beitrag zum Kurzschlussstrom durch die nicht kontrollierbare Entladung des ausgangsseitigen Kondensators, wobei der Beitrag von der Eingangsseite durch den Vollbrückenwandler kontrolliert werden kann. Darüber hinaus wird eine unkontrollierte Übertragung des Spannungseinbruchs von der Ausgangs- auf die Eingangsseite verhindert. [40, 47, 59]

Aufgrund des möglichen Einsatzes von unidirektionalen, galvanisch getrennten Gleichspannungswandlern in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, diese Gleichspannungswandler geeignet in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

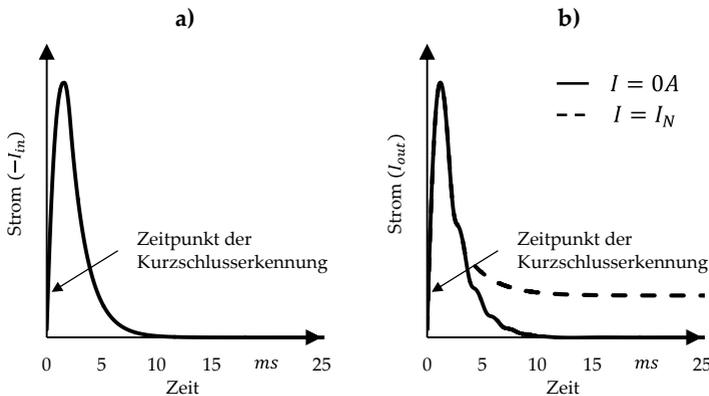


Abbildung 2.21: Exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag eines Vollbrückenwandlers bei einem eingangsseitigen Kurzschluss (a) und einem ausgangsseitigen Kurzschluss (b)

2.6.3.2 Dual-Active-Bridge-Wandler

In Folge eines Kurzschlusses im Gleichstromsystem der Eingangs- bzw. Ausgangsseite und dem damit verbundenen Spannungseinbruch am Ein- bzw. Ausgang eines DAB-Wandlers, tragen die DAB-Topologien einen Beitrag zum Kurzschlussstrom bei. Hierbei ist aufgrund der Symmetrie der DAB-Topologien keine Unterscheidung zwischen ein- und ausgangsseitigem Kurzschluss mehr notwendig. Zudem verhalten sich die verschiedenen, aktuell diskutierten DAB-Topologien im Falle eines Kurzschlusses ähnlich, weshalb im Folgenden das Verhalten im Kurzschlussfall ausschließlich anhand eines ausgangsseitigen Kurzschlusses bei einem dreiphasigen Zwei-Level-DAB-Wandler vorgestellt wird. Ein exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag ist in Abbildung 2.22a dargestellt.

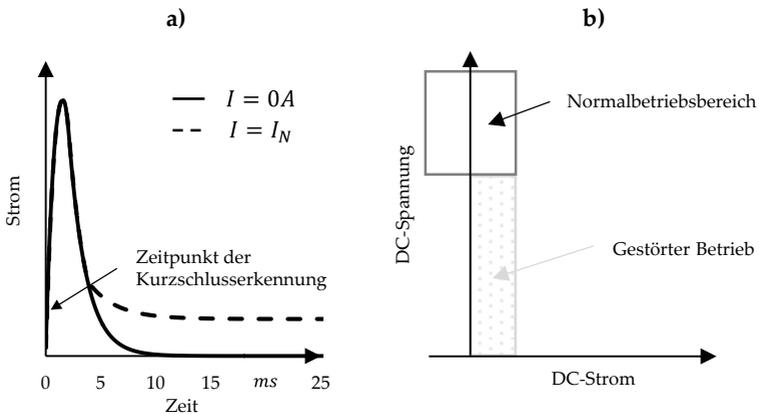


Abbildung 2.22: Kurzschlussstrombeitrag (a) und stationäre Strom-Spannungs-Kennlinie (b) eines DAB-Wandlers

Direkt nach dem Auftreten des Kurzschlusses entlädt sich der ausgangsseitige Kondensator und die Spannung am Ausgang der DAB sinkt. Sobald die Regelung der DAB ein Absinken der DC-Spannung erkennt, versucht die Regelung dem Absinken durch eine Erhöhung des durch den DAB-Wandler eingespeisten Stroms entgegenzuwirken. Sobald der eingespeiste Strom einen definierten Grenzwert über- oder die DC-Spannung einen definierten Grenzwert unterschreitet, wird ein Kurzschluss detektiert. Der weitere Verlauf des in das ausgangsseitige Gleichstromnetz eingespeisten Stroms über den DAB-Wandler ist abhängig von der Ausgestaltung der Regelung. Im konservativsten Fall werden alle leis-

tungselektronischen Schaltelemente ausgeschaltet, sodass sich der ausgangsseitige Kondensator weiter entlädt, aber kein weiterer Strom von der Eingangsseite des DAB-Wandler übertragen werden kann. Alternativ kann die Regelung in einen DC-FRT-Modus übergehen, durch den der eingespeiste Strom eingestellt werden kann. Dadurch ergibt sich für den stationären Kurzschlussstrombeitrag die Strom-Spannungs-Kennlinie aus Abbildung 2.22b, wobei anders als beim MMC mit VBSM die Entladung des Kondensators nicht verhindert werden kann. Zusammenfassend erfolgt somit bei einem ausgangsseitigen Kurzschluss ein Beitrag zum Kurzschlussstrom durch die nicht kontrollierbare Entladung des ausgangsseitigen Kondensators, wobei der Beitrag von der Eingangsseite durch den DAB-Wandler kontrolliert werden kann. Darüber hinaus wird eine unkontrollierte Übertragung des Spannungseinbruchs von der Ausgangs- auf die Eingangsseite verhindert. [98, 99]

Aufgrund des möglichen Einsatzes von DAB-Wandlern verschiedenster Ausführungen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen und dem vorhandenen Kurzschlussstrombeitrag gilt es, DAB-Wandler in der Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

Zusammenfassend können die vorgestellten Gleichspannungswandler hinsichtlich ihres Verhaltens während eines ein- oder ausgangsseitigen Kurzschlusses in zwei typische Verhaltensweisen unterteilt werden. Diese Klassifizierung ist in Tabelle 5 vorgestellt.

Gleichspannungswandler- topologie	Klassifizierung bei eingangsseitigem Kurzschluss	Klassifizierung bei ausgangsseitigem Kurzschluss
Dual-Active-Bridge	Typ 2	Typ 2
Sperrwandler	Typ 1	Typ 2
Eintaktwandler	Typ 1	Typ 2
Gegentaktwandler	Typ 1	Typ 2
Vollbrückenwandler	Typ 1	Typ 2

Tabelle 5: Klassifizierung der Gleichspannungswandler-
topologien entsprechend ihres Verhaltens während eines ein- bzw. ausgangsseitigen Kurzschlusses

2.6.4 Netzexterne Kurzschlussstromquellen

Bei netzexternen Kurzschlussstromquellen handelt es sich um über leistungselektronische Wandler ans betrachtete Gleichstromsystem angeschlossene Betriebsmittel, die den Ursprung von Teilkurzschlussströmen darstellen. Die möglichen netzexternen Kurzschlussstromquellen sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Hinsichtlich der netzexternen Kurzschlussstromquellen ist festzuhalten, dass diese sowohl direkt (d.h. unmittelbar über einen leistungselektronischen Wandler) oder indirekt (d.h. über ein anderes ausgedehntes Dreh- bzw. Gleichstromnetz mit entsprechenden leistungselektronischen Wandlern) mit dem betrachteten Gleichstromsystem verbunden sein können. Nachfolgend werden direkte als elektrisch nahe und indirekte als elektrisch ferne netzexterne Kurzschlussstromquellen definiert. Eine bildhafte Verdeutlichung der Definitionen von direkten und indirekten netzexternen Kurzschlussstromquellen kann Anhang A.2 entnommen werden.

Netzexterne Kurzschlussstromquelle	Stromform
Synchronmaschine	AC
Asynchronmaschine	AC
Doppelt gespeiste Asynchronmaschine	AC
Gleichstrommaschine	DC
PV-Module	DC
Batteriespeicher	DC

Tabelle 6: Übersicht über die netzexternen Kurzschlussstromquellen

Aufgrund des möglichen Beitrags zum Kurzschlussstrom von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen sind die vorgestellten netzexternen Kurzschlussstromquellen bei der Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen geeignet zu berücksichtigen.

2.6.5 Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom

Betriebsmittel mit einem dämpfenden Einfluss auf den Kurzschlussstrom befinden sich im Strompfad eines Teilkurzschlussstroms und besitzen ein resistives und/oder induktives Verhalten. Aufgrund der Möglichkeit, dass ein Kurzschluss im Gleichstromsystem bei entsprechend eingesetzten Umrichtern als dreiphasiger

Kurzschluss im Drehstromsystem wirken kann, wird nachfolgend zwischen Betriebsmitteln mit dämpfendem Einfluss in Gleichstromsystemen und Betriebsmitteln mit dämpfendem Einfluss in Drehstromsystemen unterschieden.

2.6.5.1 Betriebsmittel im Drehstromnetz mit dämpfendem Einfluss auf Kurzschlussströme

Wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben, kann ein Kurzschluss im Gleichstromsystem bei entsprechend eingesetzten Umrichtern als dreiphasiger Kurzschluss im Drehstromsystem angesehen werden. Aus diesem Grund können die relevanten Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom aus der vorhandenen Kurzschlussstromberechnung von Drehstromsystemen nach [100] übernommen werden. Bei diesen Betriebsmitteln handelt es sich um:

- ❖ Leitungen
- ❖ Transformatoren

Aufgrund der in Forschung und Technik bestehenden Kenntnisse des Einflusses dieser Betriebsmittel auf den Kurzschlussstrom in Drehstromsystemen wird im Rahmen dieser Arbeit auf die detaillierte Vorstellung des Einflusses dieser Betriebsmittel auf den Kurzschlussstrom verzichtet und auf die bestehenden Methoden zur Kurzschlussstromberechnung in Drehstromsystemen (bspw. VDE 0102) verwiesen.

Weitere resistive und/oder induktiv wirkende Betriebsmittel im Strompfad von Teilkurzschlussströmen wie beispielsweise Sammelschienen, Abgangsfelder, Trennschalter oder Leistungsschalter werden in der Kurzschlussstromberechnung von Drehstromnetzen aufgrund der vergleichbar geringen resistiven und/oder induktiven Wirkung häufig vernachlässigt [21, 100].

2.6.5.2 Betriebsmittel im Gleichstromnetz mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom

Anders als für Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom in Drehstromsystemen ist für Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen nicht hinreichend bekannt, welche Betriebsmittel aufgrund eines geringen Einflusses auf den Kurzschlussstrom vernachlässigt werden dürfen. Aus diesem Grund sind vorerst alle sich möglicherweise im Strompfad von Teilkurzschlussströmen befindenden resistiv und/oder induktiv wirkenden Betriebsmittel als relevant zu erachten. Bei diesen Betriebsmitteln handelt es sich um:

- ❖ Leitungen
- ❖ Sammelschienen
- ❖ Abgangsfelder mit ggf. Trenn- und/oder Leistungsschaltern
- ❖ Kurzschlussstrombegrenzer von Wandlerstationen
- ❖ Betriebsmittel der Neutralpunktbehandlung

Alle diese Betriebsmittel nutzen ein leitfähiges, metallisches Leitermaterial, wie Kupfer oder Aluminium, zur Stromleitung. Dabei ist hinsichtlich des resistiven Verhaltens der metallischen Leitermaterialien eine Temperaturabhängigkeit festzustellen, wobei mit steigender Temperatur das resistive Verhalten ansteigt, was gleichbedeutend ein Anstieg des Widerstands darstellt. Zur Verdeutlichung ist die Temperaturabhängigkeit des Widerstands eines exemplarischen 240 mm^2 Kupferleiters in Abbildung 2.23 dargestellt. Dadurch wird ersichtlich, dass der Widerstand zwischen 20°C und 90°C um ca. 30 % ansteigt. Zusätzlich zur Temperaturabhängigkeit ist hinsichtlich des resistiven und induktiven Verhaltens der metallischen Leitermaterialien zusätzlich eine Frequenzabhängigkeit gegeben. Diese ist auf den Skin- und Proximity-Effekt zurückzuführen und führt bei steigender Frequenz zu einem Anstieg des resistiven und induktiven Verhaltens, was gleichbedeutend ein Anstieg des Widerstands und der Induktivität darstellt. Zur Verdeutlichung ist die Frequenzabhängigkeit des Widerstands eines exemplarischen 240 mm^2 Kupferleiters ebenfalls in Abbildung 2.23 dargestellt. [33, 76, 94, 101]

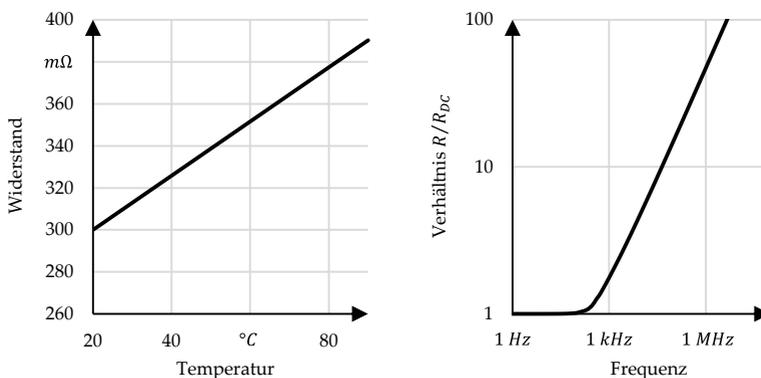


Abbildung 2.23: Temperaturabhängigkeit (links) und Frequenzabhängigkeit (rechts) des Widerstands eines exemplarischen 240 mm^2 Kupferleiters

Dadurch wird ersichtlich, dass insbesondere bei sehr hohen Frequenzen ein deutlicher Anstieg des Widerstands gegeben ist. Somit kann festgehalten werden, dass die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit den transienten Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen beeinflussen kann, sodass es diese Abhängigkeiten bei der Kurzschlussstromberechnung geeignet zu berücksichtigen gilt. [33, 76, 94, 101]

2.6.5.3 Weitere kurzschlussstromführende Stromleiter mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom

Weitere kurzschlussstromführende Stromleiter, die den Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen dämpfen, aber keine Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen darstellen, sind:

- ❖ der Kurzschluss
- ❖ die Erde

Ein Kurzschluss kann in Form eines Lichtbogens oder ein durch leitfähiges Material bestehende Verbindung auftreten. Dabei haben beide Arten des Kurzschlusses ein resistives und im geringen Ausmaß ein induktives Verhalten [100]. Aus diesem Grund gilt es, das resistive und induktive Verhalten des Kurzschlusses bei der Kurzschlussstromberechnung geeignet zu berücksichtigen.

Zusätzlich stellt im Falle eines Erdkurzschlusses die Erde einen relevanten Stromleiter mit resistivem und induktivem Verhalten dar [100, 102]. Somit kann, aufgrund des als relevant identifizierten zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung bei dem asymmetrisch monopolaren Netzkonzept, festgehalten werden, dass es das Verhalten des Erdbodens als Stromleiter geeignet zu berücksichtigen gilt.

3 Transiente Vergleichsrechnung

Ziel der transienten Vergleichsrechnung ist die Generierung von realitätsnahen Kurzschlussstromverläufen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen zur Validierung der zu entwickelnden vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode. Zur transienten Berechnung werden dynamische Zeitverlaufsimulationen verwendet, die auf Verfahren der numerischen Integration basieren. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Simulationsumgebung PLECS¹, welches eine Simulationsumgebung speziell für leistungselektronische Systeme darstellt, verwendet, weil PLECS eine detaillierte Abbildung der leistungselektronischen Wandlerysteme ermöglicht und diese einen wesentlichen Einfluss auf den Kurzschlussstromverlauf in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen haben.

Nachfolgend werden die verwendeten dynamischen Einzelmodelle für die in Kapitel 2.6 als relevant identifizierten Betriebsmittel vorgestellt.

3.1 Modellierung von Kondensatoren

Kondensatoren werden in Gleichstromsystemen als Energiespeicher zur Spannungsglättung eingesetzt. Für die Elektronik lassen sich Kondensatoren nach [103] durch konzentrierte Elemente entsprechend Abbildung 3.1 modellieren. Aufgrund des prinzipiell selben Verhaltens von Leistungskondensatoren von Gleichstromnetzen erfolgt im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung eine Modellierung von Kondensatoren entsprechend Abbildung 3.1. Eine Erläuterung der Parameter des Modells, sowie typische recherchierte Werte dieser Parameter sind in Anhang B.1 aufgelistet.

¹ Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation

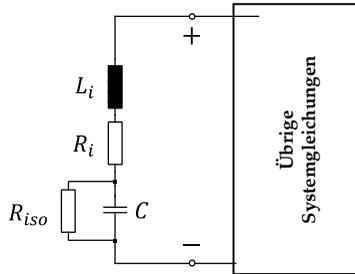


Abbildung 3.1: Simulationsmodell für einen Kondensator

3.2 Modellierung von Leitungen

Nach [33, 104] können Leitungen durch eine Kettenschaltung, bestehend aus Kettenglieder mit konzentrierten Elementen, für transiente Rechnungen modelliert werden. Aus diesem Grund werden Leitungen im Rahmen der transienten Vergleichssimulation durch eine Kettenschaltung abgebildet. Dabei sind unterschiedliche Ausgestaltungen eines Kettenglieds (bspw. als L-Glied oder T-Glied) möglich, wobei diese sich hinsichtlich ihres transienten Verhaltens nahezu identisch verhalten. Aus diesem Grund wird ein Kettenglied in der transienten Vergleichsrechnung durch eine T-Glied entsprechend Abbildung 3.2 modelliert. Eine Erklärung der Parameter des Modells, sowie typische Werte dieser Parameter sind Anhang B.2 zu entnehmen.

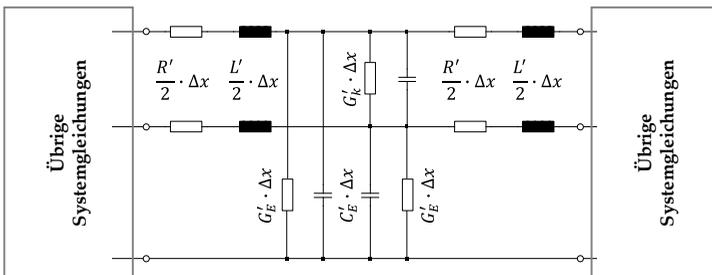


Abbildung 3.2: Modell eines Kettenglieds ausgeführt als T-Glied

Die notwendige Anzahl an Kettengliedern einer Leitung wurde durch Voruntersuchungen (siehe Anhang B.3) ermittelt. Dabei wurde eine Abbildung einer Leitung durch zwei Kettenglieder als ausreichend und mit Abschätzung zur sicheren Seite identifiziert, sodass im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung Leitungen durch die Reihenschaltung von zwei Kettenglieder abgebildet werden.

Wie in Kapitel 2.6.5 vorgestellt wurde, sind die Längsparameter einer Leitung im für die Kurzschlussstromberechnung relevanten Bereich frequenzabhängig. Zur Abschätzung zur sicheren Seite werden die Längsparameter über einen frequenzunabhängigen Wert bei minimalem Widerstand bzw. minimaler Induktivität abgebildet. Der minimale Widerstand bzw. die minimale Induktivität treten bei 0 Hz auf, sodass der Gleichstromwiderstand und die Gleichstrominduktivität in der transienten Vergleichsrechnung verwendet werden. Darüber hinaus ist der Längswiderstand der Leitung temperaturabhängig. Ähnlich zur Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit wird die Temperaturabhängigkeit durch einen konstanten, minimalen Widerstandswert als Abschätzung zur sicheren Seite modelliert. Der minimale Widerstand tritt bei minimaler Leitertemperatur auf. Entsprechend der DIN EN 61660 wird für die transiente Vergleichsrechnung 20°C als minimale Leitertemperatur verwendet.

3.3 Modellierung von Spulen

Spulen werden in Gleichstromsystemen beispielsweise als Kurzschlussstrombegrenzer, aber auch zur induktiven Neutralpunktbehandlung verwendet. Nach [105] ist eine Berücksichtigung des dynamischen (insbesondere hochfrequenten) Verhaltens von Spulen durch konzentrierte Elemente entsprechend Abbildung 3.3 möglich, sodass im Rahmen der Vergleichsrechnung die Modellierung entsprechend dieser Abbildung erfolgt. Eine Erläuterung der Parameter des Modells sowie recherchierte Werte dieser Parameter sind in Anhang B.4 aufgelistet.

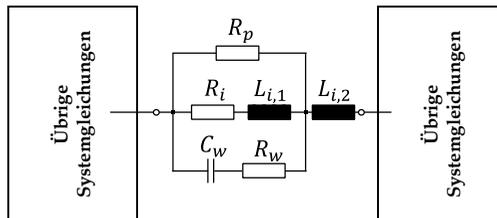


Abbildung 3.3: Simulationsmodell für eine Spule

3.4 Modellierung von leistungselektronischen Wandlern

In diesem Unterkapitel wird die Modellierung der leistungselektronischen Wandler vorgestellt. Dazu wird zu Beginn die Modellierung der leistungselektronischen Schaltelemente vorgestellt. Anschließend werden die Modelle der verwendeten Umrichter und Gleichspannungswandler präsentiert.

3.4.1 Modellierung der leistungselektronischen Schaltelemente

Für systemische Untersuchungen, wie sie Kurzschlussstromberechnungen darstellen, werden die leistungselektronischen Schaltelemente typischerweise als ideale leistungselektronische Schaltelemente modelliert, da eine detailliertere Modellierung einen geringen Einflusses auf die Ergebnisgenauigkeit bei gleichzeitig deutlicher Reduktion der Komplexität des mathematischen Problems hat [38, 42, 106]. Aus diesem Grund werden im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung die leistungselektronischen Schaltelemente aus Kapitel 2.2.5.1 durch idealisierte Modelle dieser leistungselektronischen Schaltelemente abgebildet.

3.4.2 Modellierung von Umrichtern

Nachfolgend wird die Modellierung der in Kapitel 2.2.5.2 präsentierten Umrichter vorgestellt. Dabei lassen sich Umrichter, unabhängig von ihrer Topologie, durch eine Kombination aus drei Teilmodellen für die Regelung, die Schaltsignalgenerierung und den elektrischen Teil modellieren. Die Modellierung dieser drei Teilmodelle wird nachfolgend vorgestellt.

3.4.2.1 Modellierung der Umrichterregelung

Im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung wird die Umrichterregelung detailliert berücksichtigt, um eine möglichst detaillierte Nachbildung der Realität zu erreichen. Dabei wird die Umrichterregelung mit einem Konstant-Spannungs- und einem Konstant-Leistungs-Modus entsprechend [38] und [46] ausgeführt. Diese Umrichterregelung wird für alle modellierten VSC-Topologievarianten verwendet. Das zugehörige Regelungsdiagramm des Konstant-Spannungs-Modus, gemeinsam mit einer Erläuterung der Parameter der Regelung, sowie typischen Werte dieser Parameter kann Anhang B.5 entnommen werden.

3.4.2.2 Modellierung der Generierung von Schaltsignalen

Bezüglich der Generierung von Schaltsignalen ist festzuhalten, dass die Generierung spezifisch für eine Topologievariante durchzuführen ist. Hinsichtlich des 2L-VSC wird die Generierung der Schaltsignale nach [47] durch eine Pulsweitenmodulation (PWM) mit dreieckförmigem Trägersignal durchgeführt. Für die Topologievarianten der DCM- und FCM-Topologie wird eine Multilevel-PWM-Herangehensweise entsprechend [107] herangezogen, die es für die entsprechende Anzahl an Leveln anzupassen gilt. Für die Topologievarianten der MMC-Topologie wird ebenfalls eine Multilevel-PWM-Herangehensweise mit einer zusätzlichen Regelung zur Submodul-Spannungsbalancierung entsprechend [108]

verwendet. Diese Herangehensweise ist für die entsprechende Topologievarianten zu modifizieren.

3.4.2.3 Modellierung der elektrischen Schaltung

Für die Modellierung des elektrischen Teils der Umrichter wird die Fähigkeit der Simulationsumgebung PLECS genutzt, Umrichter durch das Kombinieren von mathematischen Modellen der elektrotechnischen Einzelkomponenten (bspw. Kondensatoren, Spulen und leistungselektronischen Schaltelementen) zu modellieren. Als Beispiel ist in Abbildung 3.4 das zusammengefügte Modell des elektrischen Teils eines 2L-VSC dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass parasitäre Effekte innerhalb des Umrichters zur Reduktion der Rechenzeit vernachlässigt werden.

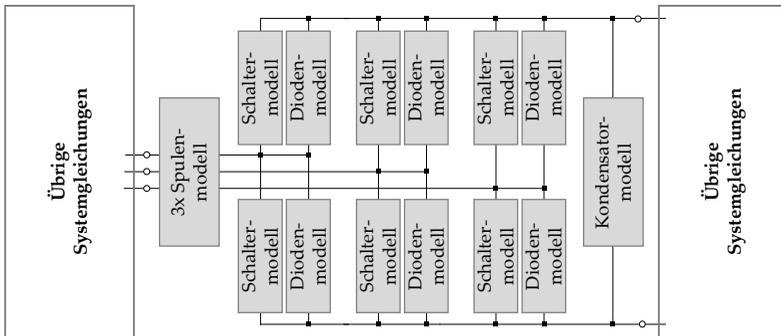


Abbildung 3.4: Exemplarisches Simulationsmodell für einen 2L-VSC

Die Modelle des elektrischen Teils aller weiteren Topologievarianten lassen sich äquivalent zum 2L-VSC durch das Kombinieren der mathematischen Modelle der elektrotechnischen Einzelkomponenten erstellen, sodass der Einfluss jeder Topologievarianten auf den Kurzschlussstrom hinreichend berücksichtigt werden kann.

3.4.3 Modellierung von Gleichspannungswandlern

Nachfolgend wird die Modellierung der in Kapitel 2.2.5.3 präsentierten relevanten Gleichspannungswandler vorgestellt. Dabei lassen sich die Gleichspannungswandler äquivalent zu den Umrichtern durch eine Kombination aus drei Teilmodellen für die Regelung, die Schaltsignalgenerierung und den elektrischen Teil modellieren. Die Modellierung dieser drei Teilmodelle wird nachfolgend vorgestellt.

3.4.3.1 Modellierung der Regelung

Bei den unidirektionalen, galvanisch getrennten Gleichspannungswandlern erfolgt die Regelung der ausgangsseitigen Spannung bzw. Leistung durch die Anpassung des Tastgrads. Die Regelung dieses Tastgrads kann entsprechend der Wandlervariante unterschiedlich erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Regelung des Tastgrads durch einen PID-Regler umgesetzt [63]. Die FRT-Fähigkeit wird durch einen FRT-Regelungsmodus ermöglicht, bei dem der ausgangsseitige Strom durch die Anpassung des Tastgrads geregelt wird.

Bei den DAB-Varianten erfolgt die Regelung der ausgangsseitigen Spannung bzw. Leistung durch die Anpassung des Phasenversatzes. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Phasenversatz-Regelung (engl. single phase-shift control) entsprechend [39, 109] verwendet. Die FRT-Fähigkeit wird durch den FRT-Regelungsmodus entsprechend [99] ermöglicht.

3.4.3.2 Modellierung der Generierung von Schaltsignalen

Die Generierung der Schaltsignale der unidirektionalen Wandlervarianten und der DAB-Varianten kann durch eine PWM durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine PWM entsprechend [39] verwendet. Die exakte Umsetzung der PWM ist dabei abhängig von der Wandlervariante.

3.4.3.3 Modellierung der elektrischen Schaltung

Für die Modellierung des elektrischen Teils der Gleichspannungswandler wird erneut die Fähigkeit der Simulationsumgebung PLECS genutzt, leistungselektronische Wandler durch das Kombinieren von mathematischen Modellen der elektrotechnischen Einzelkomponenten (bspw. Kondensatoren, Spulen, Transformatoren und leistungselektronischen Schaltelementen) zu modellieren. Dadurch lassen sich die Modelle aller vorgestellten Gleichspannungswandlervarianten durch das Kombinieren der mathematischen Modelle der elektrotechnischen Einzelkomponenten erstellen, sodass der Einfluss jeder Gleichspannungswandlervariante auf den Kurzschlussstrom hinreichend berücksichtigt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit parasitäre Effekte innerhalb der Gleichspannungswandler – wie schon bei der Modellierung der Umrichter – vernachlässigt werden, um die Rechenzeit zu reduzieren.

3.5 Modellierung von netzexternen Kurzschlussstromquellen

In diesem Kapitel wird die Modellierung der netzexternen Kurzschlussstromquellen aus Kapitel 2.6.4 für die transiente Vergleichsrechnung vorgestellt. Da die dynamische Modellierung der in Kapitel 2.6.4 vorgestellten Kurzschlussstromquellen in der Technik hinreichend bekannt ist, wird auf eine tiefgehende Vorstellung der Modelle verzichtet und auf entsprechende Literatur verwiesen. Im Rahmen der Modellierung der netzexternen Kurzschlussstromquellen wird zwischen elektrisch nahen und elektrisch fernen netzexternen Kurzschlussstromquellen unterschieden. Diese Unterscheidung dient der Reduktion der Komplexität des zu lösenden mathematischen Problems.

3.5.1 Modellierung von elektrisch nahen netzexternen Kurzschlussstromquellen

Nachfolgend wird zwischen elektrisch nahen netzexternen Kurzschlussstromquellen basierend auf Dreh- und Gleichstrom unterschieden.

3.5.1.1 Drehstrombasierte netzexterne Kurzschlussstromquellen

Aufgrund der Möglichkeit, dass ein Kurzschluss im Gleichstromsystem für ein Drehstromsystem als entsprechender dreiphasiger Kurzschluss angesehen werden kann (siehe Kapitel 2.6.2), werden die elektrisch nahen netzexternen Kurzschlussstromquellen basierend auf Drehstrom entsprechend der Modellierung für die transiente Kurzschlussstromberechnung von Drehstromnetzen modelliert.

Elektrisch nahe Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen und doppelt gespeiste Asynchronmaschinen (DFIG) werden in der transienten Vergleichsrechnung durch Modelle mit Berücksichtigung von elektromagnetischen transienten Ausgleichsvorgängen (EMT-Modelle) abgebildet, um das transiente Verhalten möglichst gut abzubilden. Im Stand der Technik existieren viele verschiedene EMT-Modelle für Synchronmaschinen [110–112], Asynchronmaschinen [111, 112] und DFIG [112, 113]. Im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung wird für Synchronmaschinen das durch PLECS bereitgestellte, erprobte EMT-Modell für eine Schenkelpolsynchronmaschine verwendet [114, 115]. Für Asynchronmaschinen wird das durch PLECS bereitgestellte, erprobte EMT-Modell für einen Käfigläufer verwendet [114, 115] und für DFIG wird das durch PLECS bereitgestellte, erprobte EMT-Modell nach [116, 117] verwendet.

3.5.1.2 Gleichstrombasierte netzexterne Kurzschlussstromquellen

In Kapitel 2.6.3 wurde festgestellt, dass die einsetzbaren Gleichspannungswandler das unkontrollierte Übertragen eines Spannungseinbruchs verhindert, wodurch die gleichstrombasierten elektrisch nahen netzexternen Kurzschlussstromquellen keine relevanten Auswirkungen des Kurzschlusses erfahren. Das hat zur Folge, dass sich der Betriebspunkt der gleichstrombasierten Kurzschlussstromquellen nicht wesentlich ändert und im Normalbetriebsbereich verbleibt. Aus diesem Grund wird eine vereinfachte Modellierung der gleichstrombasierten elektrisch nahen netzexternen Kurzschlussstromquellen durch eine ideale Gleichspannungsquelle angewendet.

3.5.2 Modellierung von elektrisch fernen netzexternen Kurzschlussstromquellen

Nachfolgend wird zwischen elektrisch fernen netzexternen Kurzschlussstromquellen basierend auf Dreh- und Gleichstrom unterschieden.

3.5.2.1 Drehstrombasierte netzexterne Kurzschlussstromquellen

Alle elektrisch ferne drehstrombasierte netzexterne Kurzschlussstromquellen eines gemeinsamen Drehstromnetzes werden durch ein Modell für das Drehstromnetz abgebildet. Dabei werden in der transienten Vergleichsrechnung Drehstromnetze durch eine Reihenschaltung einer idealen Drehstromspannungsquelle mit einer idealen Induktivität und einem idealen Widerstand modelliert. Die Induktivität und der Widerstand bilden die Innenimpedanz des Drehstromnetzes ab und werden mithilfe der Kurzschlussleistung $S''_{k,AC}$ und des R/X-Verhältnisses $x_{R/X}$ am Netzanschlusspunkt entsprechend Formeln (3.1) und (3.2) bestimmt. [33]

$$L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x_{R/X})^2 + 1}} \cdot \frac{(U_{r,AC})^2}{S''_{k,AC}} \quad (3.1)$$

$$R = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot x_{R/X} \quad (3.2)$$

3.5.2.2 Gleichstrombasierte netzexterne Kurzschlussstromquellen

Alle elektrisch ferne gleichstrombasierte netzexterne Kurzschlussstromquellen eines gemeinsamen Gleichstromnetzes werden durch ein Modell für das Gleichstromnetz abgebildet. Dabei wird ein Gleichstromnetz äquivalent zu den elektrisch nahen gleichstrombasierten netzexternen Kurzschlussstromquellen durch eine ideale Spannungsquelle modelliert.

3.6 Modellierung von Betriebsmitteln mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom

Die Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom werden nachfolgend entsprechend der Unterteilung aus Kapitel 2.6.5 in Drehstrom-, Gleichstrombetriebsmittel und weitere Stromleiter unterteilt.

3.6.1 Modellierung von Betriebsmittel im Drehstromnetz mit dämpfendem Einfluss

Nachfolgend wird die Modellierung der in Kapitel 2.6.5.1 als relevant identifizierten Drehstrombetriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen vorgestellt.

Drehstromleitungen werden in der transienten Vergleichsrechnung äquivalent zu Gleichstromleitungen aus Kapitel 3.2 durch eine Reihenschaltung an Kettengliedern mit konzentrierten Elementen modelliert. Transformatoren werden in der transienten Vergleichsrechnung durch das durch PLECS bereitgestellte, erprobte Modell eines Transformators mit Berücksichtigung von Sättigungseffekten des Kernmaterials modelliert [114].

3.6.2 Modellierung von Betriebsmitteln im Gleichstromnetz mit dämpfendem Einfluss

Nachfolgend wird die Modellierung der in Kapitel 2.6.5.2 als relevant identifizierten Gleichstrombetriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen vorgestellt. Dabei wurde die Modellierung von Gleichstromleitungen bereits in Kapitel 3.2 vorgestellt.

Anders als bei der Kurzschlussstromrechnung in Drehstromnetzen kann das resistive und induktive Verhalten von Sammelschienen und Abgangsfelder bei der Kurzschlussstromberechnung in Gleichstromsystemen nicht von vornherein als vernachlässigbar angenommen werden. Dies ist auf die hohe Sensitivität des Widerstands und der Induktivität auf den Kurzschlussstrom in Gleichstromsystemen bei kondensatornahen Kurzschlüssen zurückzuführen. Aus diesem Grund wird das resistive und induktive Verhalten von Sammelschienen und Abgangsfelder im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung berücksichtigt. Bei Sammelschienen wird jeder zwischen zwei Abgängen befindende Abschnitt einer Sammelschiene durch eine Reihenschaltung von konzentrierten Elementen in Form eines Widerstands und einer Induktivität modelliert (siehe Abbildung 3.5). Abgangsfelder werden ebenfalls durch eine Reihenschaltung von konzentrierten

Elementen in Form eines Widerstands und einer Induktivität abgebildet (siehe ebenfalls Abbildung 3.5).

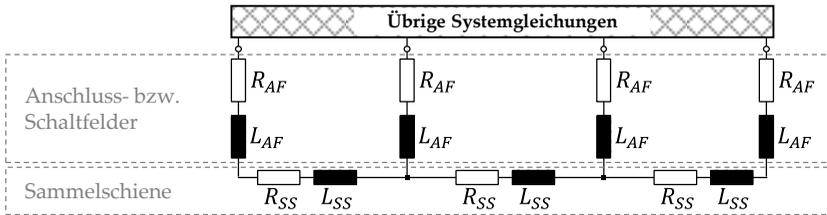


Abbildung 3.5: Simulationsmodell für Sammelschienen und Abgangsfelder

Da eine Kurzschlussstrombegrenzung (bspw. von Wandlerstationen) i.d.R. durch längsgeschaltete Spulen realisiert wird (siehe Kapitel 2.2.3), werden Kurzschlussstrombegrenzer im Zuge der transienten Vergleichssimulation durch das Spulenmodell aus Kapitel 3.2 berücksichtigt.

Im Falle einer Erdberührung können auch Betriebsmittel zur Neutralpunktbehandlung einen Teilkurzschlussstrom führen. Im Zuge der transienten Vergleichssimulation wird die starre Neutralpunktbehandlung durch eine widerstandslose Verbindung des Neutralpunkts mit der Erde, die resistive Neutralpunktbehandlung durch Verbindung des Neutralpunkts mit der Erde über einen konzentrierten Widerstand, die induktive Neutralpunktbehandlung durch Verbindung des Neutralpunkts mit der Erde über das Spulenmodell nach Kapitel 2.2.3 und die isolierte Neutralpunktbehandlung durch keine Verbindung des Neutralpunkts mit der Erde abgebildet.

3.6.3 Modellierung von weiteren kurzschlussstromführenden Stromleitern

Nachfolgend wird die Modellierung der in Kapitel 2.6.5.3 vorgestellten weiteren kurzschlussstromführenden Stromleiter für die transiente Vergleichsrechnung vorgestellt. Bei diesen handelt es sich um die Erde und den Kurzschluss.

Im Rahmen der transienten Vergleichsrechnung werden die Erde und der Kurzschluss aufgrund großer möglicher Variation des resistiven Verhaltens und Unsicherheiten hinsichtlich der Datengrundlage entsprechend dem Vorgehen bei der heutigen Kurzschlussstromberechnung in Drehstromsystemen durch eine Abschätzung zur sicheren Seite modelliert. Diese Abschätzung ist äquivalent zur Kurzschlussstromberechnung in Drehstromsystemen die Modellierung von Erde und Kurzschlüssen als ideal leitfähiger Leiter. [100]

4 Vereinfachte Kurzschlussstromberechnung

Wie in Kapitel 1.4 vorgestellt, ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze basierend auf dem Berechnungsansatz *Superposition von approximierten Stromverläufen*. Nachfolgend erfolgt die Vorstellung der entwickelten, vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode. Dazu wird zu Beginn der Berechnungsansatz *Superposition von approximierten Stromverläufen* im Detail vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Vorstellung der entwickelten, vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode.

4.1 Berechnungsansatz Superposition von approximierten Stromverläufen

Der verwendete Berechnungsansatz *Superposition von approximierten Stromverläufen* kann in drei aufeinanderfolgende Berechnungsschritte unterteilt werden. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend vorgestellt.

Im ersten Berechnungsschritt werden die Stromverläufe aller speisenden Kurzschlussstromquellen approximiert. Dazu wird ausgehend von dem realen Gleichstromnetz ein elektrotechnisches Ersatzschaltbild abgeleitet, bei dem die Kurzschlussstromquellen als zeitveränderliche Stromquellen modelliert werden. Diese Herangehensweise ist zur Verdeutlichung des Vorgehens schematisch in Abbildung 4.1 aufgezeigt. Basierend auf diesem Ersatzschaltbild werden die approximierten Stromverläufe des Kurzschlussstrombeitrags jeder Kurzschlussstromquelle bestimmt.

Im zweiten Berechnungsschritt werden die approximierten Stromverläufe der einzelnen Kurzschlussstromquellen unter Berücksichtigung des Gleichstromsystems

superponiert. Dadurch erfolgt die Berechnung der Teilkurzschlussströme aller stromführenden Betriebsmittel.

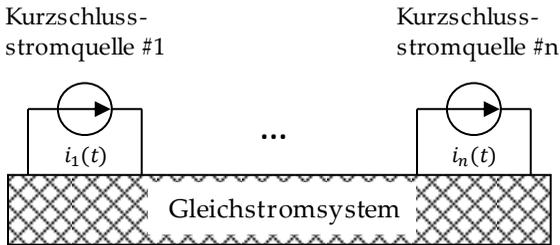


Abbildung 4.1: Herangehensweise zur Abbildung der Kurzschlussstromquellen

Im letzten Berechnungsschritt erfolgt abschließend die Ermittlung der relevanten Kurzschlussstromkenngrößen – Stoßkurzschlussstrom i_p und thermisch äquivalenter Kurzzeitstrom I_{th} – aller stromführenden Betriebsmittel.

4.2 Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Kurzschlussstromquellen

Nachfolgend werden die für die entwickelte, vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode hergeleiteten Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags der verschiedenen Kurzschlussstromquellen vorgestellt. Dazu werden in einem ersten Schritt die Modelle für die netzinternen Kurzschlussstromquellen präsentiert, bevor anschließend die Modelle für die netzexternen Kurzschlussstromquellen vorgestellt werden. Darauf folgend wird die notwendige Modellierung des Gleichstromsystems für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags der verschiedenen Kurzschlussstromquellen aufgezeigt. Abschließend wird eine Berechnungsmethode zur Bestimmung des quasistationären Kurzschlussstrombeitrags der Kurzschlussstromquellen präsentiert, die in der entwickelten, vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode angewendet wird.

4.2.1 Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzinternen Kurzschlussstromquellen

Entsprechend Kapitel 2.6.1 handelt es sich bei Kondensatoren und Leitungen um die relevanten netzinternen Kurzschlussstromquellen. Die Herleitung der verwendeten Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags dieser Betriebsmittel wird nachfolgend vorgestellt. Dabei erfolgt jeweils im ersten Schritt die Bestimmung der verwendeten Näherungsfunktion zur Approximation des

Stromverlaufs. Anschließend wird im zweiten Schritt die Berechnung der zugehörigen Kenngrößen der verwendeten Näherungsfunktion hergeleitet.

4.2.1.1 Approximation des Strombeitrags von Kondensatoren

Ausgehend vom typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags von netzinternen Kondensatoren (vgl. Kapitel 2.6.1.1) wird zur Approximation dieses Kurzschlussstrombeitrags die vorgeschlagene Näherungsfunktion aus [26] verwendet, da diese die Charakteristika des Kurzschlussstrombeitrags in ausreichender Form abschätzt. Die verwendete Näherungsfunktion ist Formel (4.1) zu entnehmen.

$$i_{approx}(t) = \begin{cases} i_p \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}} & , \text{für } 0 \leq t < t_p \\ i_p \cdot \left(e^{-\frac{t-t_p}{\tau_2}} \right) & , \text{für } t_p \leq t \end{cases} \quad (4.1)$$

Die zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung dieser Näherungsfunktion sind der Stoßkurzschlussstrom i_p , der Zeitpunkt des Stoßkurzschlussstroms t_p sowie eine Anstiegszeitkonstante τ_1 bzw. Abfallzeitkonstante τ_2 .

Voruntersuchungen zu relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kondensatoren (vgl. Anhang C.1) haben ergeben, dass folgende Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben:

- ❖ Kapazität C des Kondensators
- ❖ Innenwiderstand R_i des Kondensators
- ❖ Inneninduktivität L_i des Kondensators
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems
- ❖ Spannungsvorzustand U_0 des Kondensators

Diese Parameter gilt es somit bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen. Dabei sind C , R_i und L_i vom Hersteller bereitzustellen. R_{DC} und L_{DC} können entsprechend Kapitel 4.2.4.2 bestimmt werden und U_0 ist entsprechend der Netznutzungssituation zu wählen.

Basierend auf den zu berücksichtigenden Parametern wird das Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.2 für die Ermittlung der zu berechnenden Kenngrößen der Näherungsfunktion herangezogen.

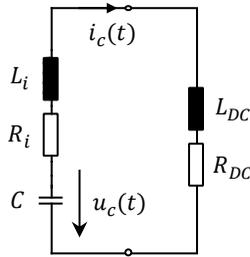


Abbildung 4.2: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Kondensatoren

Basierend auf dem Ersatzschaltbild kann eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, die in Formel (4.2) mit den zugehörigen Definitionen entsprechend Formel (4.3) bis Formel (4.6) dargestellt ist, abgeleitet werden.

$$\frac{d^2 i_c(t)}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{di_c(t)}{dt} + \omega_o^2 \cdot i_c(t) = 0 \quad (4.2)$$

$$\omega_o^2 := \frac{1}{L_{ges} \cdot C} \quad (4.3)$$

$$2\delta := \frac{R_{ges}}{L_{ges}} \quad (4.4)$$

$$R_{ges} := R_i + R_{DC} \quad (4.5)$$

$$L_{ges} := L_i + L_{DC} \quad (4.6)$$

Abhängig von den Eigenwerten $\omega_{d,1}$ und $\omega_{d,2}$ lässt sich der Stoßkurzschlussstrom und die Zeit des Stoßkurzschlussstroms aus Formel (4.2) bestimmen. Die Eigenwerte lassen sich entsprechend Formel (4.7) berechnen.

$$\omega_{d,1,2} = \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_o^2} \quad (4.7)$$

Der Stoßkurzschlussstrom kann wie in der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung üblich mithilfe eines Stoßfaktors κ_c entsprechend Formel (4.8) bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Stoßfaktor abhängig von den Eigenwerten der Differentialgleichung aus Formel (4.2) unterschiedlich bestimmt wird.

$$i_p = \kappa_c \cdot \frac{U_{DC}}{R_{ges}} \quad (4.8)$$

Für reale und gleiche Eigenwerte ($\omega_{d,1} = \omega_{d,2} = 0$) ist die Zeit des Stoßkurzschlussstroms und der Stoßfaktor nach Formel (4.9) bzw. (4.10) zu bestimmen.

$$t_p = \delta^{-1} \quad (4.9)$$

$$\kappa_c = 2 \cdot e^{-1} \quad (4.10)$$

Für reale aber ungleiche Eigenwerte ist die Zeit des Stoßkurzschlussstroms und der Stoßfaktor nach Formel (4.11) bzw. (4.12) zu bestimmen.

$$t_p = \frac{1}{2 \cdot |\omega_d|} \cdot \ln\left(\frac{\delta + |\omega_d|}{\delta - |\omega_d|}\right) \quad (4.11)$$

$$\kappa_c = \frac{2 \cdot \delta}{|\omega_d|} \cdot \sinh(|\omega_d| \cdot t_p) \cdot e^{-\delta \cdot t_p} \quad (4.12)$$

Für komplexkonjugierte Eigenwerte ist die Zeit des Stoßkurzschlussstroms und der Stoßfaktor nach Formel (4.13) bzw. (4.14) zu bestimmen.

$$t_p = \frac{1}{|\omega_d|} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{|\omega_d|}{\delta}\right) \quad (4.13)$$

$$\kappa_c = \frac{2 \cdot \delta}{|\omega_d|} \cdot \sin(|\omega_d| \cdot t_p) \cdot e^{-\delta \cdot t_p} \quad (4.14)$$

Die Bestimmung der Anstiegszeitkonstante τ_1 und der Abfallzeitkonstante τ_2 erfolgt durch Formel (4.15) und Formel (4.16).

$$\tau_1 = 0.5 \cdot t_p \quad (4.15)$$

$$\tau_2 = \begin{cases} \frac{\omega_0}{\delta} \cdot R_{ges} \cdot C & , \text{for } \delta \leq \omega_0 \\ R_{ges} \cdot C & , \text{for } \delta > \omega_0 \end{cases} \quad (4.16)$$

4.2.1.2 Approximation des Strombeitrags von Leitungen

Ausgehend vom typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags von Gleichstromleitungen (vgl. Kapitel 2.6.1.2) wird zur Approximation dieses Kurzschlussstrombeitrags ebenfalls die Näherungsfunktion aus [26] (siehe Formel (4.1)) verwendet, da diese erneut die Charakteristika der Entladung von Gleichstromlei-

tungen in ausreichender Form abschätzt. Somit sind die zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion erneut der Stoßkurzschlussstrom i_p , der Zeitpunkt des Stoßkurzschlussstroms t_p sowie eine Anstiegszeitkonstante τ_1 bzw. Abfallzeitkonstante τ_2 .

Voruntersuchungen zu relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag von Gleichstromleitungen (vgl. Anhang C.2) haben ergeben, dass folgende Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben:

- ❖ Erdkapazitätsbelag C'_E und Koppelkapazitätsbelag C'_k
- ❖ Widerstandsbelag R' und Induktivitätsbelag L'
- ❖ Widerstand R_{sys} und Induktivität L_{sys} des übrigen Gleichstromsystems²
- ❖ Spannungsvorzustände der Kapazitäten $U_{0,E}$ und $U_{0,k}$

Diese Parameter gilt es somit bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen. Dabei sind C'_E , C'_k , R' und L' vom Hersteller bereitzustellen. R_{sys} und L_{sys} können entsprechend Kapitel 4.2.4.2 bestimmt werden und $U_{0,E}$ und $U_{0,k}$ sind entsprechend des Netzkonzepts und der Netznutzungssituation zu wählen.

Basierend auf den als relevant identifizierten Parametern wird das Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.2a für die Ermittlung der zu berechnenden Kenngrößen der Näherungsfunktion herangezogen. Dabei wird eine Leitung durch ein T-Glied abgebildet, um wie bei der transienten Berechnung numerische Probleme bei einem idealen Kurzschluss zu vermeiden. Ausgehend vom Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.2a werden die zu berechnenden Kenngrößen der Näherungsfunktion durch das vereinfachte Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.2b bestimmt. Dabei stellt die Kapazität C entweder eine Koppelkapazität oder eine Erdkapazität dar. Der Widerstand R_{DC} bzw. die Induktivität L_{DC} stellen den resultierenden Widerstand bzw. Induktivität mit Berücksichtigung des Widerstands- bzw. Induktivitätsbelags der betrachteten Leitung dar. Die Bestimmung des Widerstands R_{DC} und der Induktivität L_{DC} ist dabei äquivalent zur Bestimmung von R_{sys} und L_{sys} möglich, wobei die zugehörigen konzentrierten Elemente (Widerstand und Induktivität) der betrachteten Gleichstromleitung berücksichtigt werden.

² Ohne Berücksichtigung der konzentrierten Elemente (Widerstand und Induktivität) der betrachteten Gleichstromleitung

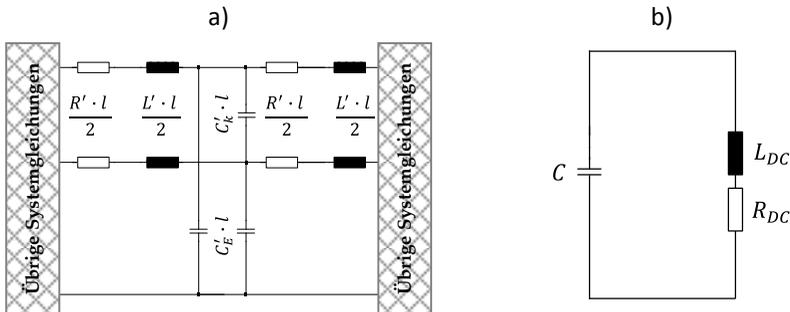


Abbildung 4.3: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion der Leitungsentladung

Basierend auf dem gezeigten Ersatzschaltbild werden im Zuge der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung die Kenngrößen der Entladung der Erd- und Kopplkapazitäten entsprechend der Formeln (4.2) bis (4.16) ermittelt.

4.2.2 Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen Kurzschlussstromquellen über Umrichter

In diesem Unterkapitel erfolgt die Vorstellung der verwendeten Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen drehstrombasierten Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Umrichter. Voruntersuchungen bezüglich der minimal notwendigen Anzahl an Standardmodellen (siehe [95] und Anhang C.3) haben ergeben, dass für die monopolen Netzkonzepte drei Standardmodelle als ausreichend anzusehen sind. Die Zuordnung der Umrichtertopologien zu den drei Standardmodellen entspricht Tabelle 4.

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten drei Standardmodelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Umrichter vorgestellt. Dabei erfolgt im ersten Schritt erneut die Bestimmung der verwendeten Näherungsfunktion zur Approximation des Stromverlaufs und im zweiten Schritt wird die Berechnung der zugehörigen Kenngrößen der verwendeten Näherungsfunktion hergeleitet.

4.2.2.1 Approximation des Strombeitrags von Drehstromsystemen angeschlossen über Typ 1-Umrichter

Ausgehend vom typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags von drehstrombasierten, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Typ 1-Umrichter (vgl. Kapitel 2.6.2.1) wird zur Approximation dieses Kurzschlussstrombeitrags die hergeleitete Näherungsfunktion aus Formel (4.17) vorgeschlagen. Diese hergeleitete Näherungsfunktion ermöglicht dabei, dass die wesentlichen Charakteristika des Kurzschlussstrombeitrags in ausreichender Form berücksichtigt werden.

$$i_{approx}(t) = \begin{cases} i_{p,1} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_{p,1}}{\tau_1}}} + i_{p,2} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{1 - e^{-\frac{t_{p,2}}{\tau_2}}} & , \text{für } t \leq t_{p,1} \\ (i_{p,1} - i_{p,2}) \cdot e^{-\frac{t-t_{p,1}}{\tau_3}} + i_{p,2} & , \text{für } t_{p,1} < t \leq t_{p,2} \\ i_{p,2} \cdot \left[\left(1 - \frac{I_k}{i_{p,2}} \right) \cdot e^{-\frac{t-t_{p,2}}{\tau_4}} + \frac{I_k}{i_{p,2}} \right] & , \text{für } t_{p,2} < t \end{cases} \quad (4.17)$$

Die zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion sind die Stoßkurzschlussströme $i_{p,1}$ und $i_{p,2}$, der stationäre Kurzschlussstrombeitrag I_k , die Zeitpunkte der Stoßkurzschlussströme $t_{p,1}$ und $t_{p,2}$ sowie die Anstiegszeitkonstanten τ_1 und τ_2 bzw. Abfallzeitkonstanten τ_3 und τ_4 . Bezüglich der zwei Stoßkurzschlussströme gilt es zu beachten, dass $i_{p,1}$ den Stoßkurzschlussstrom durch die Entladung des Umrichtercondensators und $i_{p,2}$ den Stoßkurzschlussstrom durch die Umrichterspeisung darstellen (vgl. Abbildung 2.18).

Voruntersuchungen zu relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag von Typ 1-Umrichtern (vgl. Anhang C.4) haben ergeben, dass folgende Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , äquivalenter Widerstand R_N und äquivalente Induktivität L_N des Drehstromsystems
- ❖ Widerstand $R_{L,1}$ und Induktivität L_L der Umrichterspulen
- ❖ Kapazität C , Spannungsvorzustand U_0 , Innenwiderstand R_i und Inneninduktivität L_i des Umrichtercondensators
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Diese Parameter gilt es somit bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung der zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion mithilfe des Ersatzschaltbildes aus Abbildung 4.4.

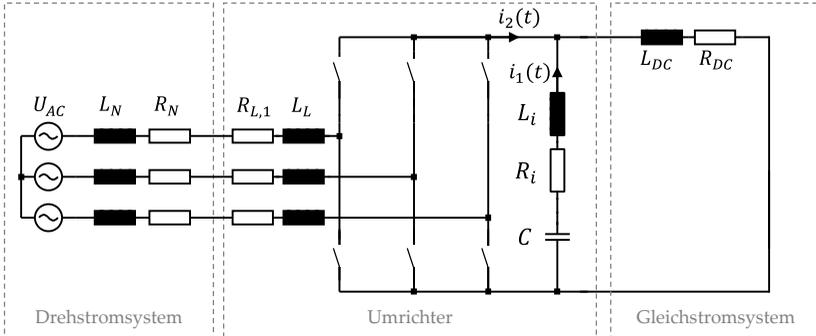


Abbildung 4.4: Grundlegendes Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Typ 1-Umrichtern

Aufgrund der Komplexität der Differentialgleichungen des Ersatzschaltbilds aus Abbildung 4.4 wird zur Vereinfachung von einer Unabhängigkeit der Umrichterpeisung $i_2(t)$ von der Kondensatorentladung $i_1(t)$ ausgegangen. Durch diese Vereinfachung ist es möglich $i_{p,1}$ und $i_{p,2}$, sowie $t_{p,1}$ und $t_{p,2}$ durch die Nutzung separater Ersatzschaltbilder getrennt voneinander zu ermitteln.

Für die Ermittlung von $i_1(t)$ mit $i_{p,1}$ und $t_{p,1}$ wird das Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.2 verwendet. Dadurch wird $i_{p,1}$ und $t_{p,1}$ entsprechend der Formeln (4.9) bis (4.14) bestimmt. Zusätzlich wird τ_1 durch Formel (4.15) ermittelt.

Für die Ermittlung von $i_2(t)$ mit $i_{p,2}$ und $t_{p,2}$ wird das Ersatzschaltbild nach Abbildung 4.5 verwendet. Dabei ist zu beachten, dass zur Vereinfachung von einer B6-Diodengleichrichterschaltung ausgegangen wird. Diese Vereinfachung erscheint hinsichtlich der zügigen Kurzschlussdetektion im Umrichter und des geringen Einflusses der regelungstechnischen Parameter als zulässig. Zusätzlich wird für die Induktivität des Drehstromsystems die subtransiente Induktivität L''_N verwendet, um die Ausgleichseffekte in potentiell angeschlossenen elektrischen Drehstrommaschinen zu berücksichtigen.

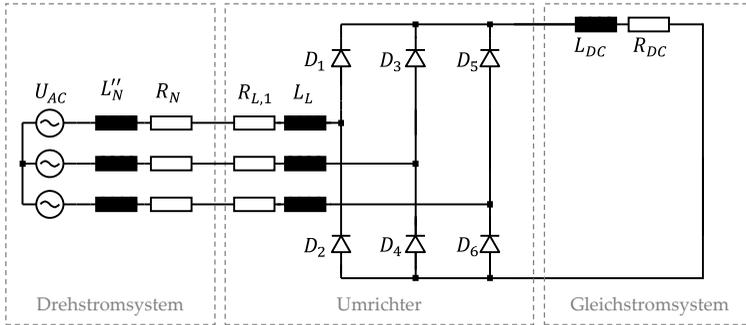


Abbildung 4.5: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Umrichterspeisung

Basierend auf dem Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.5 können für unterschiedliche Zustände der Dioden Differentialgleichungen aufgestellt werden, mithilfe derer die Kenngrößen der Näherungsfunktion ermittelt werden können [20, 26].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Abschätzung von $i_{p,2}$ mithilfe eines Stoßfaktors κ und des stationären Kurzschlussstroms I_k nach Formel (4.18) durchgeführt. Der Stoßfaktor wird dabei nach DIN EN 61660 entsprechend der Formeln (4.19) und (4.20) bestimmt, während der stationäre Kurzschlussstrom durch eine iterative Berechnungsmethode mit linearisierten Spannungs-Strom-Kennlinien basierend auf [31] ermittelt wird. Die Vorstellung dieser iterativen Berechnungsmethode erfolgt nachgelagert in Kapitel 4.2.5 .

$$i_{p,2} = \kappa \cdot I_k \quad (4.18)$$

$$\kappa = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \rho\right) \cdot \cot \rho} \cdot \sin \left(\rho \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\left(\frac{L_{DC}}{L_{AC}} \right) \right) \right) \right) \quad (4.19)$$

$$\rho = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\left(\frac{R_{AC}}{\omega \cdot L_{AC}} \right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{DC}}{3 \cdot R_{AC}} \right)} \right) \quad (4.20)$$

$$R_{AC} = R_N + R_{L,1} \quad (4.21)$$

$$L_{AC} = L'_N + L_L \quad (4.22)$$

Die Abschätzung von $t_{p,2}$ erfolgt ebenfalls nach DIN EN 61660 mithilfe der Formel (4.23).

$$t_{p,2} = \begin{cases} \frac{(3 \cdot \kappa + 6)}{1000} & , \text{für } \frac{L_{DC}}{L_{AC}} < 1 \\ \frac{(3 \cdot \kappa + 6 + 4 \cdot \left(\frac{L_{DC}}{L_{AC}} - 1\right))}{1000} & , \text{für } \frac{L_{DC}}{L_{AC}} \geq 1 \end{cases} \quad (4.23)$$

Zur Berechnung der Anstiegszeitkonstante τ_2 bzw. Abfallzeitkonstanten τ_3 und τ_4 werden die Formeln (4.24) bis (4.26) herangezogen, wobei τ_2 und τ_4 erneut nach DIN EN 61660 berechnet werden.

$$\tau_2 = \begin{cases} \frac{2 + (\kappa - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{L_{DC}}{L_{AC}}\right)}{1000} & , \text{für } \kappa \geq 1,05 \\ \frac{0,7 + \left(7 - \frac{R_{AC}}{\omega \cdot L_{AC}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{DC}}{3 \cdot R_{AC}}\right)\right) \cdot \left(0,1 + 0,2 \cdot \frac{L_{DC}}{L_{AC}}\right)}{1000} & , \text{für } \kappa < 1,05 \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\tau_3 = \frac{t_{p,1} - t_{p,2}}{10} \quad (4.25)$$

$$\tau_4 = \frac{\omega \cdot L_{AC}}{R_{AC} \cdot \left(300 + 450 \cdot \frac{R_{DC}}{R_{AC}}\right)} \quad (4.26)$$

4.2.2.2 Approximation des Strombeitrags von Drehstromsystemen angeschlossen über Typ 2-Umrichter

Ausgehend vom typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags von drehstrombasierten, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Typ 2-Umrichter (vgl. Kapitel 2.6.2.3) wird zur Approximation dieses Kurzschlussstrombeitrags die Näherungsfunktion aus Formel (4.27) vorgeschlagen. Diese hergeleitete Näherungsfunktion ermöglicht dabei, dass die Charakteristika des Kurzschlussstrombeitrags insbesondere bei umrichternahen Kurzschlüssen in ausreichendem Maß berücksichtigt werden.

$$i_{approx}(t) = \begin{cases} i_p \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau}}} & , \text{für } t \leq t_{p,1} \\ i_p & , \text{für } t > t_{p,1} \end{cases} \quad (4.27)$$

Die zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion sind der Stoßkurzschlussstrom i_p , der Zeitpunkt des Stoßkurzschlussstroms t_p sowie die Anstiegszeitkonstante τ .

Voruntersuchungen zu relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag von Typ 2-Umrichtern (siehe Anhang C.5) haben ergeben, dass folgende Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , äquivalenter Widerstand R_N und äquivalente Induktivität L_N des Drehstromsystems
- ❖ Widerstand $R_{L,1}$ und Induktivität L_L der Umrichterspulen
- ❖ Widerstand $R_{a,1}$ und Induktivität L_a der Armspulen
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Diese Parameter gilt es somit bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung der zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion mithilfe des Ersatzschaltbildes aus Abbildung 4.6. Dabei ist zu beachten, dass zur Vereinfachung äquivalent zum Typ 1-Umrichter von einer B6-Diodengleichrichterschaltung ausgegangen wird, da die Voruntersuchungen gezeigt haben, dass die regelungstechnischen Parameter erneut einen geringen Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben. Zusätzlich wird für die Induktivität des Drehstromsystems die subtransiente Induktivität L_N'' verwendet, um die Ausgleichseffekte in potentiell angeschlossenen elektrischen Drehstrommaschinen zu berücksichtigen.

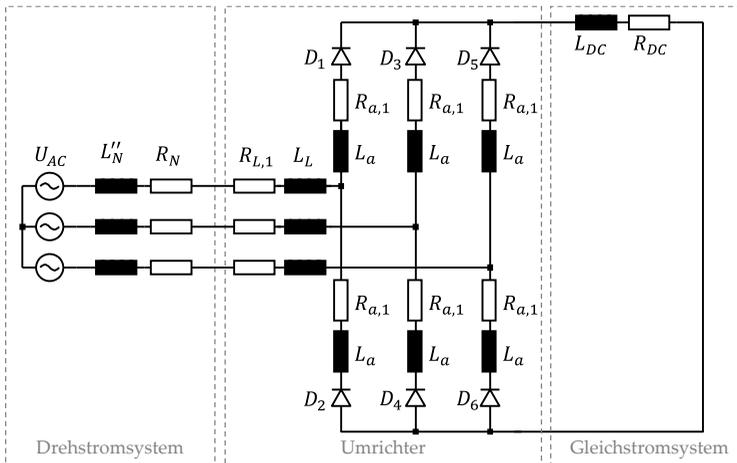


Abbildung 4.6: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Typ 2-Umrichtern

Basierend auf dem Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.6 können äquivalent zu Kapitel 4.2.2.1 für unterschiedliche Zustände der Dioden Differentialgleichungen aufgestellt werden, mithilfe derer die Kenngrößen der Näherungsfunktion ermittelt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Abschätzung von i_p mithilfe eines Stoßfaktors κ und des stationären Kurzschlussstroms I_k nach Formel (4.28) durchgeführt. Der Stoßfaktor wird dabei ebenfalls nach DIN EN 61660 entsprechend der Formeln (4.29) bis (4.32) bestimmt, während der stationäre Kurzschlussstrom durch die iterative Berechnungsmethode aus Kapitel 4.2.5 bestimmt wird.

$$i_p = \kappa \cdot I_k \quad (4.28)$$

$$\kappa = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \rho\right) \cdot \cot \rho} \cdot \sin \left(\rho \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{L_{DC}}{L_{AC}} \right) \right) \right) \quad (4.29)$$

$$\rho = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\left(\frac{R_{AC}}{\omega \cdot L_{AC}} \right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{DC}}{3 \cdot R_{AC}} \right)} \right) \quad (4.30)$$

$$R_{AC} = R_N + R_L + R_a \quad (4.31)$$

$$L_{AC} = L_N'' + L_L + L_a \quad (4.32)$$

Die Abschätzung von t_p erfolgt mithilfe von Formel (4.33) und zur Berechnung der Anstiegszeitkonstant τ wird Formel (4.34) herangezogen [24].

$$t_p = \begin{cases} \frac{(3 \cdot \kappa + 6)}{1000} & , \text{für } \frac{L_{DC}}{L_{AC}} < 1 \\ \frac{(3 \cdot \kappa + 6 + 4 \cdot \left(\frac{L_{DC}}{L_{AC}} - 1 \right))}{1000} & , \text{für } \frac{L_{DC}}{L_{AC}} \geq 1 \end{cases} \quad (4.33)$$

$$\tau = \begin{cases} \frac{2 + (\kappa - 0,9) \cdot \left(2,5 + 9 \cdot \frac{L_{DC}}{L_{AC}}\right)}{1000} & , \text{für } \kappa \geq 1,05 \\ \frac{0,7 + \left(7 - \frac{R_{AC}}{\omega \cdot L_{AC}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{DC}}{3 \cdot R_{AC}}\right)\right) \cdot \left(0,1 + 0,2 \cdot \frac{L_{DC}}{L_{AC}}\right)}{1000} & , \text{für } \kappa < 1,05 \end{cases} \quad (4.34)$$

4.2.2.3 Approximation des Strombeitrags von Drehstromsystemen angeschlossen über Typ 3-Umrichter

Ausgehend vom typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags von drehstrombasierten, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Typ 3-Umrichter (vgl. Kapitel 2.6.2.4) können unterschiedlich detaillierte Näherungsfunktionen verwendet werden. Die mögliche Bandbreite reicht von einer vergleichsweise einfachen Abbildung durch eine konstante Stromquelle bis hin zu einer detaillierteren Abbildung durch eine Näherungsfunktion bspw. nach [118].

Voruntersuchungen zu relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag von Typ 3-Umrichtern (siehe Anhang C.6) haben ergeben, dass folgende Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben:

- ❖ Abschaltstrom I_{max} und der einstellbare stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ der Umrichterregelung

Basierend auf dem typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags und den ermittelten relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag wird zur Approximation dieses Kurzschlussstrombeitrags der Ansatz einer konstanten Stromquelle vorgeschlagen. Da der Abschaltstrom in der Regel größer oder gleich groß zum einstellbaren stationären Kurzschlussstrom ist, wird zur Abschätzung zur sicheren Seite die Näherungsfunktion aus Formel (4.35) vorgeschlagen. Diese ermöglicht dabei, dass die wesentlichen Charakteristika des Kurzschlussstrombeitrags mit Abschätzung zur sicheren Seite berücksichtigt werden.

$$i_{approx}(t) = I_{max} \quad (4.35)$$

Die zu ermittelnde Kenngröße zur Parametrierung der Näherungsfunktion ist somit der Abschaltstrom I_{max} bei dem die Umrichterregelung vom Normalzustand in den Kurzschlussmodus übergeht. Dieser Abschaltstrom ist vom Hersteller anzugeben.

4.2.3 Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen Kurzschlussstromquellen über Gleichspannungswandlern

In diesem Unterkapitel erfolgt die Vorstellung der verwendeten Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen gleichstrombasierten Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Gleichspannungswandler. Voruntersuchungen bezüglich der minimal notwendigen Anzahl an Standardmodellen (siehe Anhang C.7) haben ergeben, dass für die monopolaren Netzkonzepte ein einziges Standardmodell als ausreichend anzusehen ist.

Nachfolgend wird das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Standardmodelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netzexternen gleichstrombasierten Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Gleichspannungswandler vorgestellt. Dabei wird im ersten Schritt erneut die verwendete Näherungsfunktion zur Approximation des Stromverlaufs bestimmt. Anschließend wird die Berechnung der zugehörigen Kenngrößen der verwendeten Näherungsfunktion hergeleitet.

4.2.3.1 Approximation des Strombeitrags von Gleichstromsystemen angeschlossen über Typ 1-Gleichspannungswandler

Ausgehend vom typischen Verlauf des Kurzschlussstrombeitrags von gleichstrombasierten, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Gleichspannungswandler (vgl. Kapitel 2.6.3.2) wird zur Approximation dieses Kurzschlussstrombeitrags die Näherungsfunktion aus Formel (4.36) vorgeschlagen, da diese die wesentlichen Charakteristika des Kurzschlussstrombeitrags in ausreichender Form berücksichtigt.

$$i_{approx}(t) = \begin{cases} i_p \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}} + I_k & , \text{für } 0 \leq t < t_p \\ i_p \cdot \left(e^{-\frac{t-t_p}{\tau_2}} \right) + I_k & , \text{für } t_p \leq t \end{cases} \quad (4.36)$$

Die zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion sind der Stoßkurzschlussstrom i_p , der Zeitpunkt des Stoßkurzschlussstroms t_p , der stationäre Kurzschlussstrombeitrag I_k sowie eine Anstiegszeitkonstante τ_1 bzw. Abfallzeitkonstante τ_2 . Für den Fall, dass ein Gleichspannungswandler keinen stationären Kurzschlussstrom einspeisen kann, ist $I_k = 0A$ zu wählen.

Voruntersuchungen zu relevanten Einflussgrößen auf den Kurzschlussstrombeitrag von Gleichspannungswandlern (siehe Anhang C.8) haben ergeben, dass folgende Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag haben:

- ❖ Kapazität C des ausgangsseitigen Kondensators
- ❖ Innenwiderstand R_i des ausgangsseitigen Kondensators
- ❖ Inneninduktivität L_i des ausgangsseitigen Kondensators
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems
- ❖ Spannungsvorzustand U_0 des ausgangsseitigen Kondensators
- ❖ Einstellbarer stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ der Regelung

Diese Parameter gilt es somit bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung der zu berechnenden Kenngrößen zur Parametrierung der Näherungsfunktion mithilfe des Ersatzschaltbildes dargestellt in Abbildung 4.7.

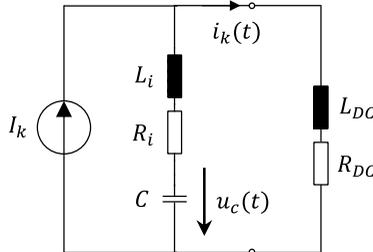


Abbildung 4.7: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Gleichspannungswandlern

Für die Bestimmung der Kenngrößen i_p , t_p , τ_1 und τ_2 wird zur Abschätzung zur sicheren Seite die Stromquelle des Ersatzschaltbildes vernachlässigt. Somit können diese Kenngrößen entsprechend der Formeln (4.2) bis (4.16) ermittelt werden.

Die Ermittlung der Kenngröße I_k erfolgt abschließend entsprechend Formel (4.37), wobei I_k dem in der Regelung des Gleichspannungswandlers eingestellten Wertes entspricht.

$$I_k = I_{k,inj} \quad (4.37)$$

4.2.4 Modellierung des Gleichstromsystems für die Approximation der Kurzschlussstrombeiträge

Wie in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 zu sehen ist, hat der resultierende Widerstand R_{DC} bzw. die resultierende Induktivität L_{DC} einen Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag der Kurzschlussstromquellen, sodass es diese zu ermitteln gilt. Dazu werden zuerst die notwendigen Modelle für die Betriebsmittel mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen abgeleitet, bevor anschließend die Ermittlung von R_{DC} bzw. L_{DC} vorgestellt wird.

4.2.4.1 Modellierung von Betriebsmittel im Gleichstromsystem mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom

Bei den potentiellen Betriebsmitteln mit dämpfendem Einfluss auf den Kurzschlussstrom von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen handelt es sich um Gleichstromleitungen, Sammelschienen, Abgangsfelder, Kurzschlussstrombegrenzer und ggf. Betriebsmittel zur Neutralpunktbehandlung. Weitere Stromleiter, die einen Kurzschlussstrom führen können und es somit abzubilden gilt, sind die Erde und der Kurzschluss. Die verwendeten Modelle dieser Komponenten werden nachfolgend aufgezeigt.

Das gewählte Modell für Gleichstromleitungen wurde bereits in Kapitel 4.2.1 vorgestellt. Dieses ist zudem in Abbildung 4.8 dargestellt, wobei Abbildung 4.8 die Modellierung einer exemplarischen Gleichstrom-Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufzeigt.

Für Sammelschienen und Abgangsfelder haben Voruntersuchungen zum Datenbedarf (siehe Anhang C.9) ergeben, dass der Widerstand R_{AF} bzw. R_{SS} und die Induktivität L_{AF} bzw. L_{SS} aus Abbildung 3.5 einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen haben können. Das ist damit zu begründen, dass die Widerstände und Induktivitäten in der gleichen Größenordnung liegen wie der Innenwiderstand bzw. die Inneninduktivität von netz-internen Kondensatoren. Somit sind diese Parameter der Sammelschienen und Abgangsfelder zu berücksichtigen und müssen vom Hersteller angegeben werden.

Für Kurzschlussstrombegrenzer und Spulen zur Neutralpunktbehandlung haben Voruntersuchungen zum Datenbedarf (siehe Anhang C.10) ergeben, dass die Parameter R und L aus dem Modell nach Abbildung 3.3 einen relevanten dämpfenden Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen haben. Somit gilt es diese Parameter in der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zu berücksichtigen.

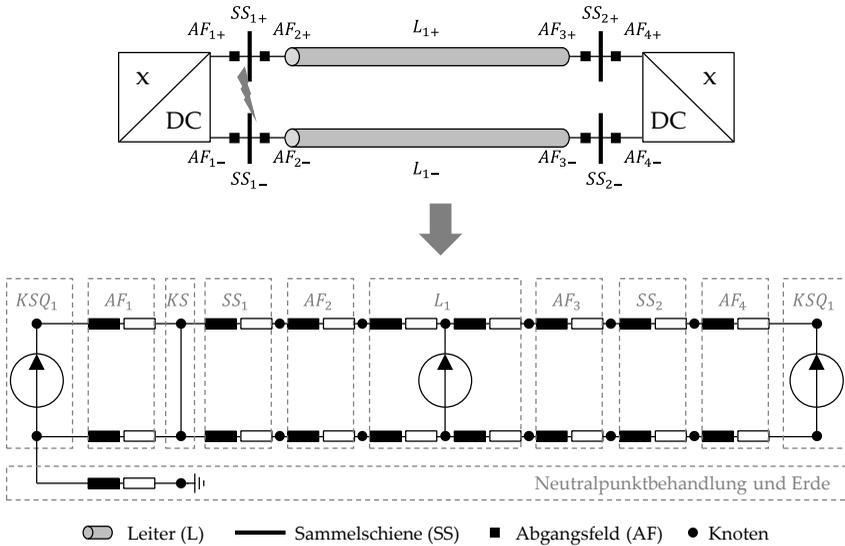


Abbildung 4.8: Modellierung einer exemplarischen Gleichstrom-Punkt-zu-Punkt-Verbindung

4.2.4.2 Bestimmung der Widerstände und Induktivitäten zwischen Kurzschlussstromquellen und Kurzschluss

Zur Bestimmung der resultierenden Widerstände R_{DC} je Kurzschlussstromquelle wird eine Konduktanzmatrix für den Fehlerzustand (Fehlerkonduktanzmatrix) \vec{G}_F aufgestellt. Dabei wird \vec{G}_F für ein zweipoliges Ersatzschaltbild nach Abbildung 4.8 aufgestellt. Dabei ist zu beachten, dass sowohl Leitungen als auch Sammelschienen, Abgangsfelder, Kurzschlussstrombegrenzer und Betriebsmittel zu Neutralpunktbehandlung als separate Zweige in \vec{G}_F eingehen. Das Ermitteln von \vec{G}_F erfolgt entsprechend Formeln (4.38) und (4.39).

$$G_{F,ij} = - \sum_{m \in ij} G_{\text{längs},m} \quad (4.38)$$

$$G_{F,ii} = \sum_{m \in i} G_{\text{längs},m} \quad (4.39)$$

Durch die Invertierung von $\vec{\mathbf{G}}_F$ ist die Ermittlung des Widerstands zwischen zwei Knoten des Systems möglich. Dadurch kann der Widerstand R_{DC} zwischen den beiden Knoten einer Kurzschlussstromquelle ermittelt werden. [27]

Über ein äquivalentes Vorgehen zur Ermittlung des Widerstands R_{DC} kann die Induktivität L_{DC} bestimmt werden, sodass auf eine detaillierte Vorstellung der Bestimmung der Induktivität L_{DC} verzichtet wird.

4.2.5 Berechnungsmethode zur Bestimmung der stationären Kurzschlussströme

Für die Bestimmung der stationären Kurzschlussströme von netzexternen Kurzschlussstromquellen wird eine iterative Berechnungsmethode nach [31] verwendet. Die Grundidee hinter dieser iterativen Berechnungsmethode ist die stückweise Linearisierung der nichtlinearen, stationären Strom-Spannungs-Kennlinien von netzexternen Kurzschlussstromquellen. Die linearisierten stationären Strom-Spannungs-Kennlinien für die vorgestellten Modelle netzexterner Kurzschlussstromquellen aus Kapitel 4.2.2 und Kapitel 4.2.3 sind in Abbildung 4.9 gezeigt.

Ausgehend von diesen linearisierten Kennlinien kann für jeden Linearisierungsabschnitt ein zugehöriges Thévenin-Äquivalent, bestehend aus einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand, bestimmt werden. Die Bestimmung der Thévenin-Äquivalente für die vorgestellten Modelle netzexterner Kurzschlussstromquellen kann Anhang C.11 entnommen werden.

Mithilfe der Thévenin-Äquivalente und dem Gleichstromsystem, abgebildet durch die Fehlerkonduktanzmatrix $\vec{\mathbf{G}}_F$ (siehe Kapitel 4.2.4.2), wird durch eine Knotenpotentialanalyse für einen initialen Anfangszustand an Thévenin-Äquivalenten der stationäre Kurzschlussstrombeitrag I_k je netzexterner Kurzschlussstromquelle berechnet. Liegt dieser berechnete Kurzschlussstrom außerhalb der Stromgrenzen des Linearisierungsabschnittes wird das verwendete Thévenin-Äquivalent angepasst und erneut eine Knotenpotentialanalyse durchgeführt. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis alle berechneten Kurzschlussströme in den Stromgrenzen des Linearisierungsabschnittes liegen. Ist dies geschehen, ist

die Methode konvergiert und die stationären Kurzschlussstrombeiträge sind ermittelt. Diese fließen daraufhin als Eingangsdaten in die bereits vorgestellten Modelle aus Kapitel 4.2.2 ein.

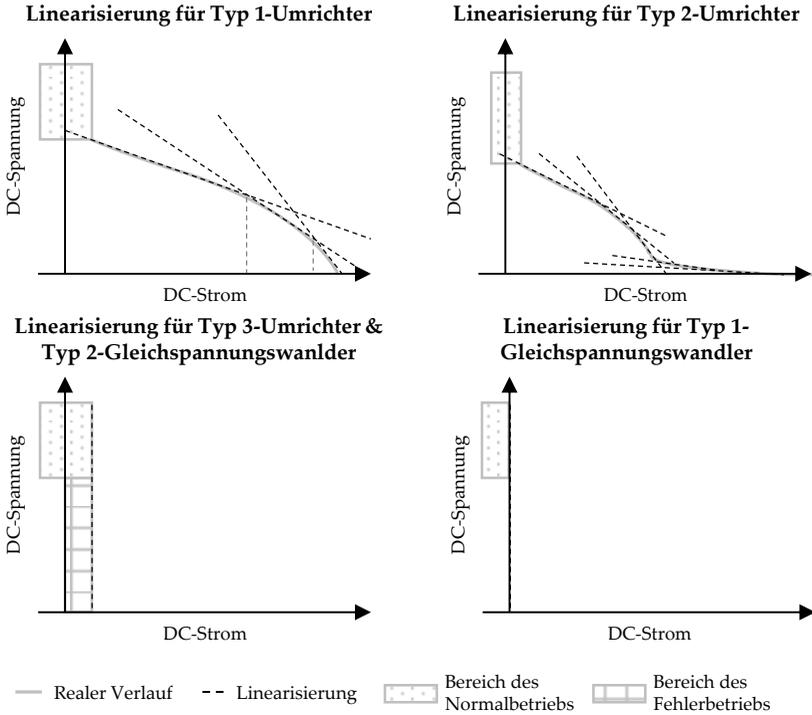


Abbildung 4.9: Linearisierung der stationären Strom-Spannungs-Kennlinien für die leistungselektronischen Wandler³

4.3 Superponieren der approximierten Stromverläufe

Nachfolgend wird die Berechnung der Teilkurzschlussstromverläufe aller stromführenden Betriebsmittel (bzw. Zweige) vorgestellt. Dazu wird die Superposition der in Kapitel 4.2 ermittelten Kurzschlussstromverläufe entsprechend Formel (4.40) verwendet.

³ Für eine Definition von Typ 1- und Typ 2-Gleichspannungswandlern siehe Tabelle 5

$$\vec{I}_{Zweige}(t) = \vec{A} \cdot \vec{G}_F \cdot \vec{I}_{Approx}(t) \quad (4.40)$$

Dabei stellt \vec{I}_{Zweige} den Vektor der Teilkurzschlussstromverläufe aller stromführenden Betriebsmittel, \vec{A} die gewichtete Adjazenzmatrix des Gleichstromsystems, \vec{G}_F die Fehlerkonduktanzmatrix des Gleichstromsystems und \vec{I}_{Approx} den Vektor der Kurzschlussstrombeiträge der Kurzschlussstromquellen dar. Während \vec{G}_F und \vec{I}_{Approx} entsprechend Kapitel 4.2 bestimmt werden, wird \vec{A} durch Formeln (4.41) und (4.42) bestimmt. Dabei beschreibt der Index i den i -ten Zweig, der von Knoten k nach Knoten l verläuft. [27]

$$A_{i,k} = \frac{1}{R_{k,l}} \quad (4.41)$$

$$A_{i,l} = -\frac{1}{R_{k,l}} \quad (4.42)$$

5 Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die aus der übergeordneten Fragestellung abgeleiteten, spezifischen Fragen aus Kapitel 1.4 beantwortet. Diese lauten:

- ▲ Ist die vereinfachte Berechnung von beliebigen Teilkurzschlussströmen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen mithilfe des Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* möglich?
- ▲ Ist die vereinfachte Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussströme mithilfe des Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* für stromführende Betriebsmittel von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen möglich?

Nachfolgend wird zunächst die Vorgehensweise bezüglich der Untersuchungen präsentiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Beantwortung der beiden spezifischen Fragen vorgestellt, wobei in Kapitel 5.2 die erste Frage und in Kapitel 5.3 die zweite Frage fokussiert wird. Abschließend erfolgt zur Beantwortung der spezifischen Fragen eine Einordnung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse.

5.1 Vorgehensweise und Untersuchungsprogramm

Zur Beantwortung der spezifischen Fragen erfolgen Vergleiche der Ergebnisse der vereinfachten Berechnung aus Kapitel 4 mit zugehörigen Ergebnissen einer transienten Berechnung nach Kapitel 3. Als Bewertungsgrößen für die Vergleiche der Ergebnisse werden die in Kapitel 2.3 abgeleiteten Bewertungskenngrößen e_p (prozentuale Abweichung des Stoßkurzschlussstroms) und e_{th} (prozentuale Abweichung des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms) herangezogen. Bezüglich e_{th} werden exemplarisch durch den Schutz definierte Ausschaltzeit T_A von 200 ms,

100 ms und 50 ms untersucht. Die akzeptierten Werte der Bewertungskenngrößen werden untersuchungsspezifisch festgelegt und in Kapitel 5.2 bzw. Kapitel 5.3 eingeführt.

Des Weiteren werden zur möglichst allgemeingültigen Beantwortung der spezifischen Fragen Variantenrechnung hinsichtlich zweier übergeordneter Dimensionen durchgeführt:

- ❖ Ausgestaltung des Gleichstromnetzes
- ❖ Netznutzungssituation des Gleichstromnetzes

Da im Rahmen dieser Arbeit eine Berechnung der Bewertungskenngrößen für den vorhandenen Lösungsraum an möglichen Ausgestaltungen von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen nicht vollumfänglich abgedeckt werden kann, erfolgen Berechnungen der Bewertungskenngrößen von exemplarischen Ausgestaltungen an Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen als Indikatoren. Um eine möglichst gute Indikation zur Beantwortung der spezifischen Fragen aus Kapitel 1.4 zu gewährleisten, wird eine Vielzahl exemplarischer Ausgestaltungsvarianten betrachtet. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen exemplarischen Ausgestaltungsvarianten hinsichtlich folgender Eigenschaften, die im Rahmen dieser Untersuchungen variiert werden:

- ❖ **Netzstruktur:**
Es werden drei Basisformen für die Mittel- oder Niederspannungsgleichstromnetze herangezogen:
 - 2-Knoten-Anordnung bzw. Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindung (kurz: DC-P2P-Verbindung)
 - Radiale 13-Knoten-Anordnung basierend auf einem IEEE-13-Knoten-Testsystem nach [119]
 - Vermaschte 14-Knoten-Anordnung basierend auf einem IEEE-14-Knoten-Testsystem nach [120]
- ❖ **Netzkonzept:**
Für die Variation der Eigenschaft des eingesetzten Netzkonzepts wird zwischen dem symmetrisch monopolen Netzkonzept und dem asymmetrisch monopolen Netzkonzept mit metallischem Rückleiter (vgl. Kapitel 2.2.8) differenziert.

❖ **Betriebsspannung:**

Es erfolgt eine Abtastung der möglichen Betriebsspannungen. Die untersuchten Betriebsspannungen sind:

- 0,5 kV, 1 kV und 1,5 kV für die Niederspannung
- 2,5 kV, 5 kV, 10 kV, 20 kV und 40 kV für die Mittelspannung

❖ **Betriebsmittel:**

Für die Variation der verwendeten Betriebsmittel werden verschiedene Umrichter- und Gleichspannungswandlertopologien, Leitungstypen, Betriebsmittel zur Neutralpunktbehandlung und der Einsatz von Kurzschlussstrombegrenzern berücksichtigt.

❖ **Versorgungsaufgabe:**

Bezüglich der Versorgungsaufgabe werden verschiedene an das Gleichstromsystem angeschlossene Systeme untersucht. Hierbei werden Gleichstromnetze, Drehstromnetze, Synchron- und Asynchronmaschinen sowie Gleichstrom- bzw. Drehstromkundenanlagen berücksichtigt.

Zusätzlich zur Variation der Ausgestaltung erfolgt aufgrund der Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von der gegebenen Netznutzung (insb. dem Spannungsvorzustand) eine Variation unterschiedlicher Netznutzungssituationen.

5.2 Bewertung der Berechnung von Kurzschlussstromkenngrößen beliebiger Teilkurzschlussströme

Zur Beantwortung der ersten spezifischen Frage dieses Forschungsvorhabens werden exemplarische Ergebnisse der Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen repräsentativer Teilkurzschlussströme unterschiedlicher Kurzschlüsse vorgestellt. Dabei erfolgt die Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen durch eine Anwendung der Berechnungsmethode aus Kapitel 4 für die entsprechenden exemplarischen Kurzschlüsse.

Bezüglich der akzeptierten Werte der Bewertungskenngrößen wird für diese Untersuchungen das Bewertungsschema entsprechend Tabelle 7 herangezogen. Dabei wird eine geringe bis mäßige Abweichung als akzeptabel festgelegt, während eine deutliche Abweichung als nicht akzeptabel angesehen wird. Zusätzlich wird eine unterschiedliche Bewertung für den positiven und den negativen Wertebereich verwendet, da eine Unterschätzung eine potentielle Gefährdung von Betriebsmitteln nach sich ziehen kann, während eine Überschätzung eine Abschätzung zur sicheren Seite darstellt.

Abweichung	Positiver Wertebereich	Negativer Wertebereich
Gering	$e \leq 5\%$	$e \geq -1\%$
Mäßig	$5\% < e \leq 10\%$	$-1\% > e \geq -2\%$
Deutlich	$e > 10\%$	$e < -2\%$

Tabelle 7: Bewertungsschema für die Bewertungskenngrößen der Untersuchung der ersten spezifischen Frage

Nachfolgend werden exemplarische Ergebnisse für ausgewählte Ausgestaltungsvarianten mit ausgewählten Netznutzungssituationen vorgestellt.

5.2.1 Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen

Der grundsätzliche Aufbau einer DC-P2P-Verbindung mitsamt der Teilkurzschlussströme, für die die Bewertungskenngrößen berechnete werden, ist in Abbildung 5.2 aufgezeigt.

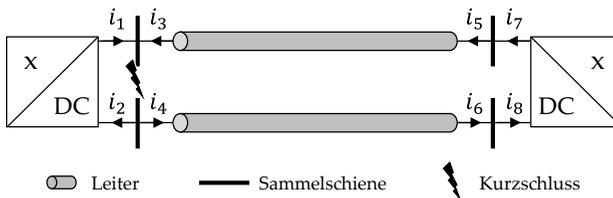


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau von Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen mit zugehörigen Teilkurzschlussströmen

Es wird zwischen Ergebnissen für das symmetrisch monopolare Netzkonzept und das asymmetrisch monopolare Netzkonzept mit metallischem Rückleiter unterschieden. Zusätzlich erfolgt für das asymmetrisch monopolare Netzkonzept mit metallischem Rückleiter eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Kurzschlussart entsprechend Kapitel 2.5.1.

5.2.1.1 Symmetrisch monopolarer Netzkonzept

Im Folgenden werden die Ergebnisse für DC-P2P-Verbindungen ausgeführt als symmetrisch monopolarer Netzkonzept präsentiert, wobei die Ergebnisse für die unterschiedlichen leistungselektronischen Wandler separat vorgestellt werden. Es erfolgt die Unterscheidung zwischen der ausschließlichen Verwendung von:

- ❖ Typ 1-Umrichter repräsentiert durch 2L-VSC

- ❖ Typ 2-Umrichter repräsentiert durch MMC mit fünf HBSM je Arm
- ❖ Typ 3-Umrichter repräsentiert durch MMC mit fünf VBSM je Arm
- ❖ Gleichspannungswandler repräsentiert durch eine 3P-2L-DAB

Ergebnisse für vier exemplarische Ausgestaltungen – eine je leistungselektronischem Wandlertypen – sind in Tabelle 8 bis Tabelle 11 dargestellt.

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	-0,02%	0,83%	0,83%	0,83%
i_2	-0,02%	0,83%	0,83%	0,83%
i_3	26,35%	-3,73%	-3,51%	-3,13%
i_4	26,35%	-3,73%	-3,51%	-3,13%
i_5	26,34%	-3,73%	-3,51%	-3,13%
i_6	26,34%	-3,73%	-3,51%	-3,13%
i_7	26,34%	-3,73%	-3,51%	-3,13%
i_8	26,34%	-3,73%	-3,51%	-3,13%

Tabelle 8: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 1-Umrichtern⁴

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	4,37%	5,24%	6,11%	8,09%
i_2	4,37%	5,24%	6,11%	8,09%
i_3	-2,43%	-2,39%	-4,82%	-10,75%
i_4	-2,43%	-2,39%	-4,82%	-10,75%
i_5	-2,09%	-2,39%	-4,82%	-10,75%
i_6	-2,09%	-2,39%	-4,82%	-10,75%
i_7	-2,09%	-2,39%	-4,82%	-10,75%
i_8	-2,09%	-2,39%	-4,82%	-10,75%

Tabelle 9: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 2-Umrichtern⁵

⁴ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.9, Nr. 1) entnommen werden

⁵ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.10, Nr. 31) entnommen werden

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	0,00%	0,01%	0,01%	0,03%
i_2	0,00%	0,01%	0,01%	0,03%
i_3	54,20%	0,37%	0,74%	1,45%
i_4	54,20%	0,37%	0,74%	1,45%
i_5	0,00%	0,10%	0,21%	0,42%
i_6	0,00%	0,10%	0,21%	0,42%
i_7	0,00%	0,10%	0,21%	0,42%
i_8	0,00%	0,10%	0,21%	0,42%

Tabelle 10: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 3-Umrichtern⁶

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	-0,02%	-0,05%	-0,05%	-0,05%
i_2	-0,02%	-0,05%	-0,05%	-0,05%
i_3	-0,34%	138,45%	133,65%	108,91%
i_4	-0,34%	138,45%	133,65%	108,91%
i_5	-0,59%	138,65%	133,85%	109,09%
i_6	-0,59%	138,65%	133,85%	109,09%
i_7	-0,59%	138,65%	133,85%	109,09%
i_8	-0,59%	138,65%	133,85%	109,09%

Tabelle 11: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Gleichspannungswandlern⁷

Die vorgestellten exemplarischen Ergebnisse der Berechnung von beliebigen Teilkurzschlussströmen von DC-P2P-Verbindungen ausgeführt im symmetrisch monopolaren Netzkonzept verdeutlichen, dass insbesondere die Kurzschlussstromkenngrößen der Teilkurzschlussströme von kurzschlussnahen Kurzschlussstromquellen (i_1 und i_2) in einem akzeptablen Maß abgeschätzt werden. Jedoch zeigen die exemplarischen Ergebnisse auch, dass die Kurzschlussstromkenngrößen der Teilkurzschlussströme von kurzschlussfernen Kurzschlussstromquellen teilweise deutliche Abweichungen aufweisen.

⁶ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.11, Nr. 2) entnommen werden

⁷ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.12, Nr. 2) entnommen werden

5.2.1.2 Asymmetrisch monopolares Netzkonzept mit metallischem Rückleiter

Für DC-P2P-Verbindungen ausgeführt im asymmetrisch monopolaren Netzkonzept mit metallischem Rückleiter wurden ebenfalls exemplarische Ausgestaltungen mit ausschließlicher Verwendung der vier vorgestellten Wandlertypen untersucht, wobei am ersten Wandler (linker Wandler in Abbildung 5.2) eine starre Neutralpunktbehandlung vorliegt. Der Neutralpunkt des anderen Wandlers verfügt hingegen über einen isolierten Neutralpunkt. Zusätzlich wurden sowohl Untersuchungen mit einem zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung (K_{2UN}) und einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung (K_{2UNE}) durchgeführt.

Die zugehörigen Ergebnisse für exemplarische Ausgestaltungen mit ausschließlicher Verwendung von Typ 1- bzw. Typ 2-Umrichtern, sowie Gleichspannungswandlern und einem Kurzschluss entsprechend Abbildung 5.2 sind Anhang D.1 zu entnehmen. Auch diese Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Kurzschlussstromkenngrößen der Teilkurzschlussströme von kurzschlussnahen Kurzschlussstromquellen (i_1 und i_2) in einem akzeptablen Maß abgeschätzt werden, während die Kurzschlussstromkenngrößen der Teilkurzschlussströme von kurzschlussfernen Kurzschlussstromquellen teilweise deutliche Abweichungen aufweisen.

Ergebnisse für die exemplarische Ausgestaltung mit Typ 3-Umrichtern sind in Tabelle 12 und Tabelle 13⁸ dargestellt

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_3	-1,70%	-11,51%	-19,84%	-29,76%
i_4	-49,38%	-0,90%	-1,83%	-3,47%
i_5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 12: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 3-Umrichtern (AMN, K_{2UNE})

Während für den zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung (Tabelle 12) ebenfalls zu erkennen ist, dass i_1 und i_2 in einem akzeptablen Maß abgeschätzt werden,

⁸ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.11, Nr. 2) entnommen werden

wird i_2 beim zweipoligen Kurzschluss ohne Erdberührung (vgl. Tabelle 13) deutlich unterschätzt. Dieses Verhalten ist auf eine Unterschätzung der Leitungsentladung beim asymmetrisch monopolaren Netzkonzept zurückzuführen. Diese Unterschätzung tritt auf, da bei der vereinfachten Berechnung nur eine Entladung der Erdkapazitäten des Spannungsführenden Pols berücksichtigt und die Umladung zwischen den Erdkapazitäten vernachlässigt wird.

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_2	0,08%	-10,95%	-18,60%	-28,72%
i_3	-1,99%	-11,51%	-19,43%	-29,77%
i_4	-49,40%	-0,88%	-1,74%	-3,39%
i_5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabelle 13: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit abschließlicher Nutzung von Typ 3-Umrichtern (AMN, K_{2UN})

5.2.1.3 Schlussfolgerung

Aufgrund der teilweise deutlichen Abweichung der Kurzschlussstromkenngrößen der Teilkurzschlussströme von kurzschlussfernen Kurzschlussstromquellen ist eine Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen von beliebigen Teilkurzschlussströmen mithilfe der in Kapitel 4 vorgestellten vereinfachten Berechnungsmethode für eine beliebige 2-Knoten-Anordnung nicht möglich.

Da bereits die vereinfachte Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen von beliebigen Teilkurzschlussströmen für 2-Knoten-Anordnungen nicht möglich ist, wird auch die vereinfachte Berechnung von beliebigen Teilkurzschlussströmen für größere Mehr-Knoten-Anordnungen nicht möglich sein. Aus diesem Grund wird auf die Vorstellung von weiteren Ergebnissen für die radiale 13-Knoten-Anordnung sowie die vermaschte 14-Knoten-Anordnung verzichtet.

5.3 Bewertung der Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen

Zur Beantwortung der zweiten spezifischen Frage dieses Forschungsvorhabens werden exemplarische Ergebnisse der Berechnung der auslegungsrelevanten

Kurzschlussstromkenngrößen vorgestellt. Dabei erfolgt die Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen durch eine iterative Anwendung der Berechnungsmethode aus Kapitel 4 für alle relevanten Kurzschlussarten und -positionen entsprechend Kapitel 2.5. Die maximalen Kurzschlussstromkenngrößen eines Betriebsmittels entsprechen somit den auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen dieses Betriebsmittels und werden verglichen.

Bezüglich der akzeptierten Werte der Bewertungskenngrößen der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen wird für diese Untersuchungen das Bewertungsschema entsprechend Tabelle 14 herangezogen. Dabei wird eine geringe bis mäßige Überschätzung als akzeptable Abschätzung zur sicheren Seite festgelegt, während eine deutliche Unterschätzung (d.h. $e < 0\%$) als nicht akzeptabel eingestuft wird, da eine Unterschätzung von auslegungsrelevanten Kurzschlussströmen ein erhöhte Gefährdung für das Betriebsmittel nach sich zieht.

Abweichung	Positiver Wertebereich	Negativer Wertebereich
Gering	$e \leq 5\%$	$e = 0\%$
Mäßig	$5\% < e \leq 15\%$	–
Deutlich	$e > 15\%$	$e < 0\%$

Tabelle 14: Bewertungsschema für die Bewertungskenngrößen der Untersuchung der zweiten spezifischen Frage

Nachfolgend werden in einem ersten Schritt Ergebnisse für eine Vielzahl exemplarischer Ausgestaltungsvarianten der Basisform DC-P2P-Verbindung vorgestellt. Dabei werden je Ausgestaltungsvariante bis zu drei unterschiedliche Netznutzungssituationen betrachtet. Diese vorgestellten Ergebnisse dienen der Validierung und bei Bedarf Verbesserung der in Kapitel 4 vorgestellten Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags der Kurzschlussstromquellen. Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse exemplarischer Ausgestaltungsvarianten der übrigen beiden Basisformen (radiale 13-Knoten-Anordnung und vermaschtes 14-Knoten-Anordnung) präsentiert.

5.3.1 Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen

Der grundsätzliche Aufbau einer DC-P2P-Verbindung mitsamt der vorhandenen stromführenden Betriebsmittel, für die die Bewertungskenngrößen berechnet werden, ist in Abbildung 5.2 aufgezeigt. Die aufgezeigten Abkürzungen für die stromführenden Betriebsmittel sind in der nachfolgenden Vorstellung der Untersuchungsergebnisse wiederzufinden.

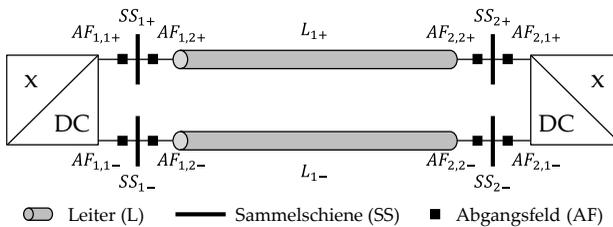


Abbildung 5.2: Schematischer Aufbau von Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen mit zugehörigen stromführenden Betriebsmitteln

Es wird im Folgenden zwischen Ergebnissen für das symmetrisch monopolare Netzkonzept und das asymmetrisch monopolare Netzkonzept mit metallischem Rückleiter unterschieden.

5.3.1.1 Symmetrisch monopolarer Netzkonzept

Im Folgenden werden die Ergebnisse für DC-P2P-Verbindungen ausgeführt im symmetrisch monopolarer Netzkonzept vorgestellt, wobei die Ergebnisse für die unterschiedlichen Wandlertypen separat vorgestellt werden. Es erfolgt somit die Unterscheidung zwischen der ausschließlichen Verwendung von:

- ❖ Typ 1-Umrichter repräsentiert durch 2L-VSC
- ❖ Typ 2-Umrichter repräsentiert durch MMC mit fünf HBSM je Arm
- ❖ Typ 3-Umrichter repräsentiert durch MMC mit fünf VBSM je Arm
- ❖ Gleichspannungswandler repräsentiert durch eine 3P-2L-DAB

Diese Unterscheidung erfolgt, um die in Kapitel 4 vorgestellten Modelle zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags der leistungselektronischen Wandler zu validieren und ggf. zur Sicherstellung einer zuverlässigen Abschätzung anzupassen.

Die nachfolgende Vorstellung der Ergebnisse für die DC-P2P-Verbindung erfolgt in aggregierter Form durch Bandbreiten der auslegungsrelevanten Bewertungskenngrößen für die stromführenden Betriebsmittel einer Vielzahl verschiedener Ausstattungsvarianten.

Typ 1-Umrichter

Bezüglich der ausschließlichen Verwendung von Typ 1-Umrichtern wurden 104 exemplarische Ausstattungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC

untersucht (vgl. Anhang D.2, Tabelle D.9). Aggregierte Ergebnisse für die Untersuchungen von 64 exemplarischen Ausgestaltungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC und ohne den Einsatz von Kurzschlussstrombegrenzern (KSS-Begrenzern) sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

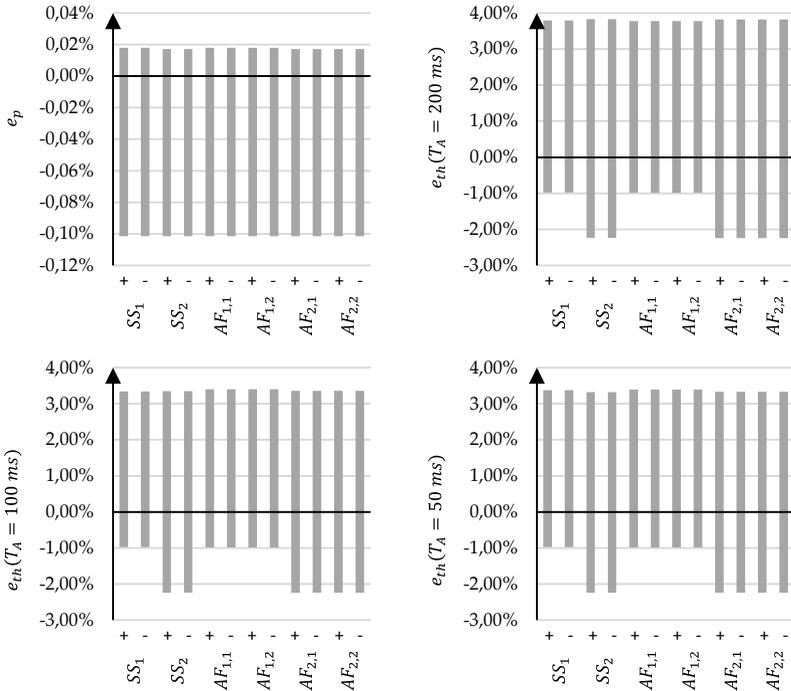


Abbildung 5.3: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 64 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC (ohne KSS-Begrenzer)

Abbildung 5.3 verdeutlicht, dass teilweise eine leichte Unterschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen resultiert, was als nicht akzeptabel anzusehen ist. Da auch die maximale Überschätzung als gering einzuschätzen ist, wird die Einführung eines zusätzlichen Korrekturfaktors k für den Stoßkurzschlussstrom des Modells aus Kapitel 4.2.2.1 entsprechend Formel (5.1) vorgeschlagen, um eine zuverlässige Abschätzung zur sicheren Seite zu gewährleisten.

$$i_{p,1} = k \cdot \kappa_c \cdot \frac{U_{DC}}{R_{ges}} \tag{5.1}$$

Auf Basis der untersuchten Ausgestaltungsvarianten wird ein exemplarischer Korrekturfaktor von $k = 1,025$ vorgeschlagen. Die durch diese Anpassung resultierenden Bandbreiten der Kurzschlussstromkenngrößen für dieselben exemplarischen Ausgestaltungsvarianten sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

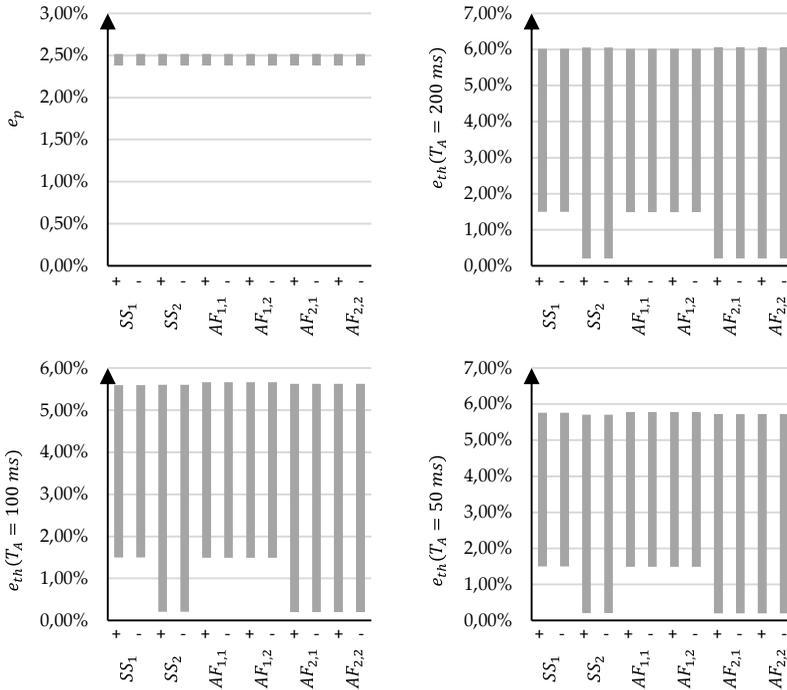


Abbildung 5.4: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 64 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC mit Korrekturfaktoren (ohne KSS-Begrenzer)

Die vereinfachte Berechnung mit der vorgestellten Anpassung nach Formel (5.1) führt gemäß Abbildung 5.4 für die untersuchten Ausgestaltungsvarianten zu keiner Unterschätzung, wobei weiterhin eine geringe bis mäßige maximale Überschätzung auftritt. Somit kann das angepasste Modell für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von 2L-VSC (und damit für Typ 1-Umrichter) ohne

den Einsatz von KSS-Begrenzern hinsichtlich der Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen bei einem symmetrisch monopolen Netzkonzept als geeignet angesehen werden.

Darüber hinaus sind aggregierte Ergebnisse für Untersuchungen von über 40 exemplarischen Ausgestaltungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC und zusätzlichem Einsatz von KSS-Begrenzern in Abbildung 5.5 dargestellt.

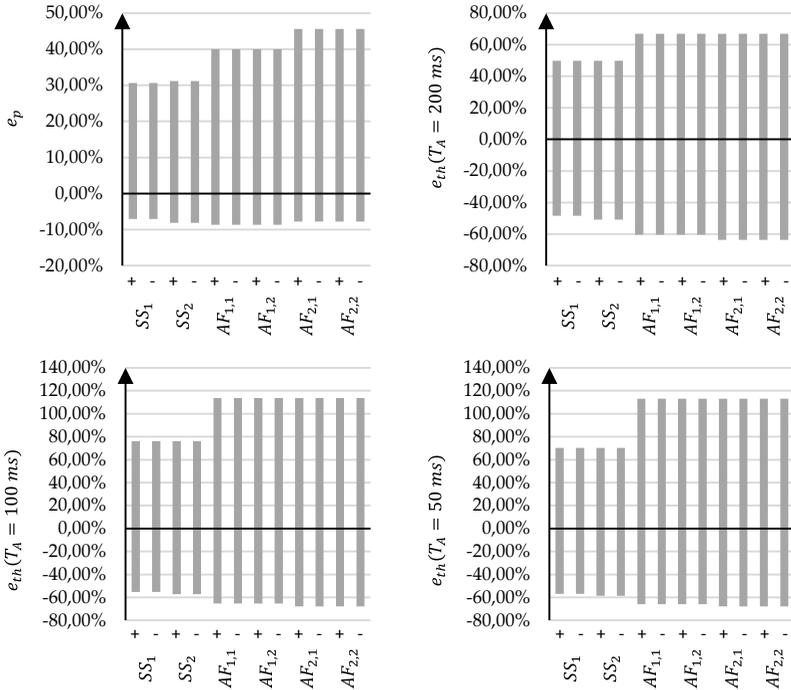


Abbildung 5.5: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 40 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC mit Kurzschlussstrombegrenzer (mit Korrekturfaktor)

Trotz des zusätzlichen Korrekturfaktors kann sowohl eine deutlich Unterschätzung als auch eine deutliche Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen auftreten. Aus diesem Grund wird geschlossen, dass der Einsatz des Modells aus Kapitel 4.2.2.1 nicht für die Abschätzung des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 1-Umrichtern mit KSS-Begrenzern bei einem symmetrisch monopolen Netzkonzept geeignet ist.

Typ 2-Umrichter

Bezüglich der ausschließlichen Verwendung von Typ 2-Umrichtern wurden 112 exemplarische Ausgestaltungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung untersucht (vgl. Anhang D.2, Tabelle D.10). Aggregierte Ergebnisse für die Untersuchungen von 70 exemplarischen Ausgestaltungsvarianten einer Mittelspannungs-DC-P2P-Verbindung sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

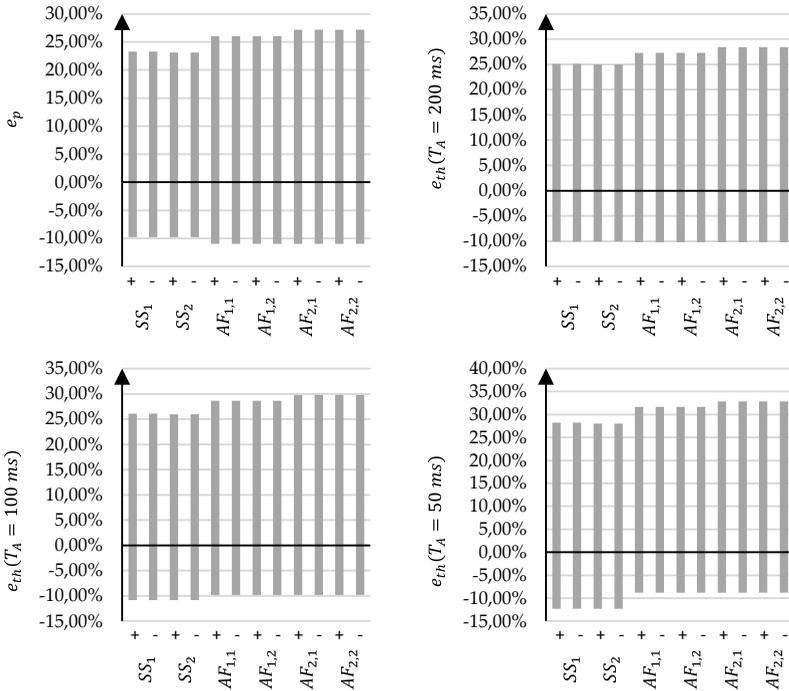


Abbildung 5.6: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 70 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Mittelspannung

Abbildung 5.6 verdeutlicht, dass eine Unterschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen möglich ist, weshalb die Einführung eines zusätzlichen Korrekturfaktors k für das Modell aus Kapitel 4.2.2.2 entsprechend Formel (5.2) vorgeschlagen wird, um erneut eine zuverlässige Abschätzung zur sicheren Seite zu gewährleisten.

$$i_p = k \cdot \kappa \cdot I_k \quad (5.2)$$

Auf Basis der untersuchten Ausgestaltungen wird ein exemplarischer Korrekturfaktor von $k = 1,15$ vorgeschlagen. Die durch diese Anpassung resultierenden Bandbreiten der Kurzschlussstromkenngrößen für dieselben exemplarischen Ausgestaltungsvarianten sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

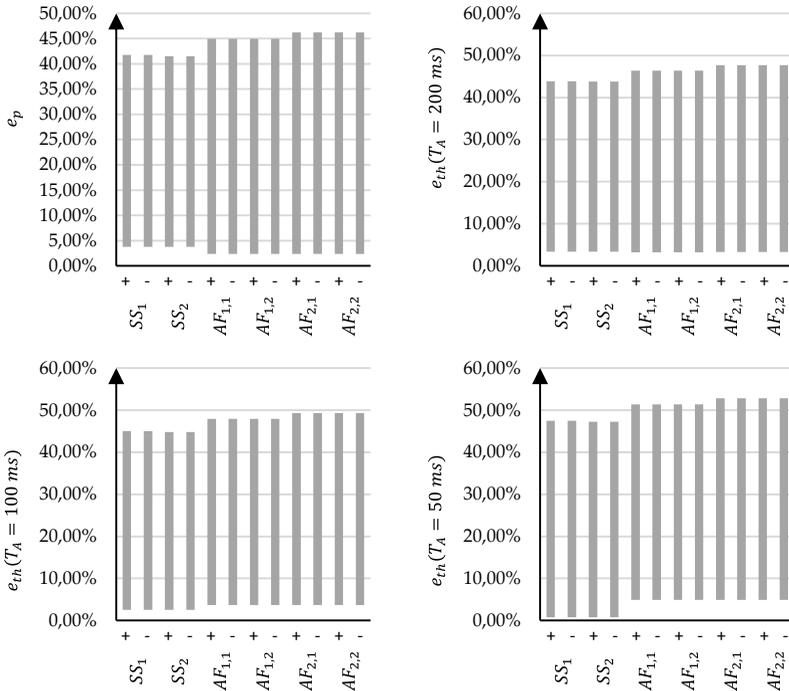


Abbildung 5.7: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 70 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Mittelspannung mit Korrekturfaktor

Die vereinfachte Berechnung mit der vorgestellten Anpassung nach Formel (5.2) führt für die untersuchten Ausgestaltungsvarianten zu keiner Unterschätzung. Jedoch tritt eine deutliche maximale Überschätzung (bis zu 52%) auf. Somit kann das angepasste Modell für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von

MMC mit HSBM (und damit für Typ 2-Umrichter) für die Mittelspannung hinsichtlich der Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen als bedingt geeignet angesehen werden.

Zusätzlich sind Ergebnisse für Untersuchungen von 40 exemplarischen Ausgestaltungen einer Niederspannungs-DC-P2P-Verbindung in Abbildung 5.8 dargestellt. Dabei erfolgt die Berücksichtigung des eingeführten Korrekturfaktors.

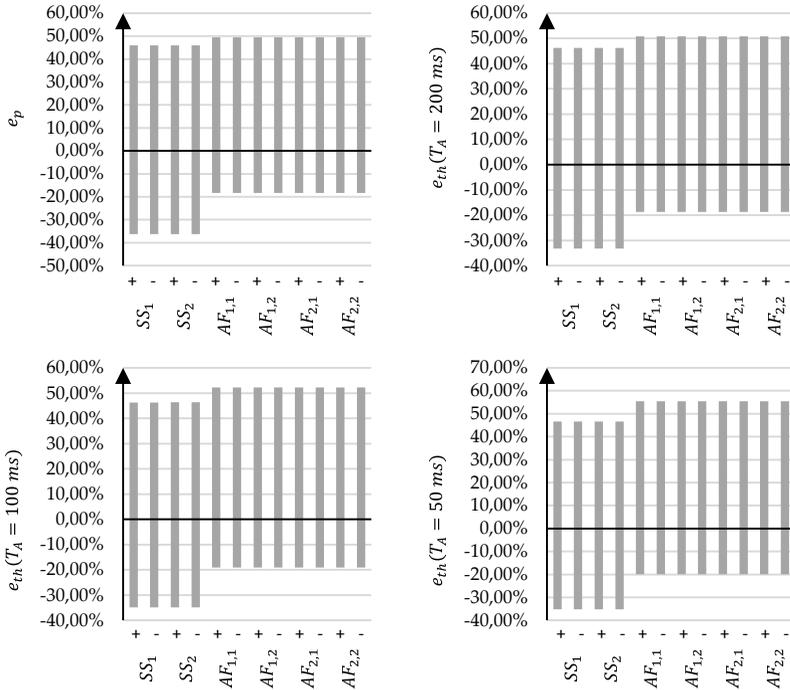


Abbildung 5.8: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 42 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HSBM für die Niederspannung mit Korrekturfaktor

Trotz des eingeführten Korrekturfaktors kann sowohl eine deutlich Unterschätzung als auch eine deutliche Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen resultieren. Aus diesem Grund wird geschlossen, dass der Einsatz des Modells aus Kapitel 4.2.2.2 zur Abschätzung des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 2-Umrichtern nicht für die Niederspannung geeignet ist.

Typ 3-Umrichter

Bezüglich der ausschließlichen Verwendung von Typ 3-Umrichtern wurden 85 exemplarische Ausgestaltungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM untersucht (vgl. Anhang D.2, Tabelle D.11).

In einem ersten Schritt werden ausschließlich Ergebnisse von Ausgestaltungsvarianten vorgestellt, bei denen eine Kurzschlussdetektion beider Umrichter stattgefunden hat und ein stationärer Kurzschlussstrom in Höhe des Umrichter-nennstroms eingespeist wird. Die zugehörigen Bandbreiten der auslegungsrelevanten Bewertungskenngrößen sind in Abbildung 5.9 dargestellt.

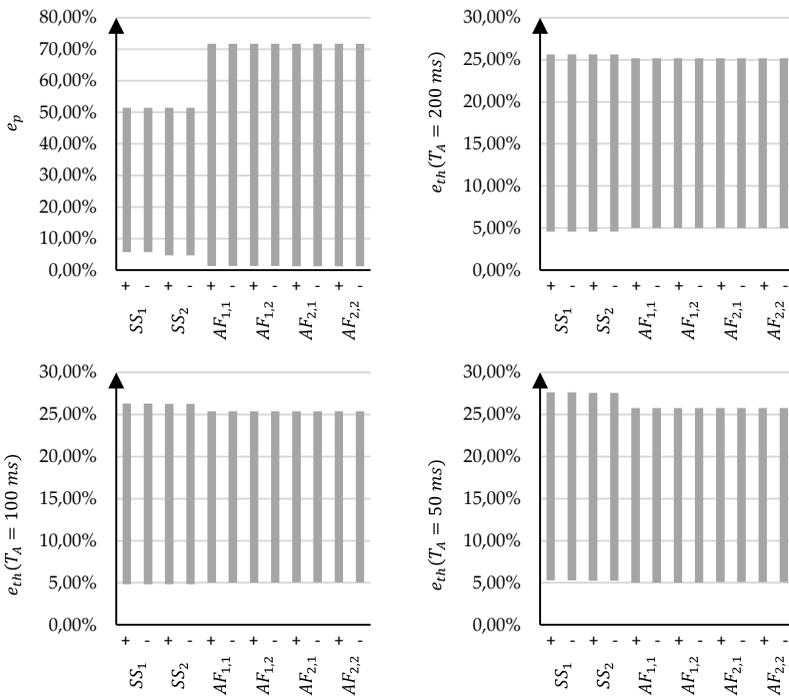


Abbildung 5.9: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit Kurzschlussdetektion und einem stationären Kurzschlussstrombeitrag in Höhe des Nennstroms der Umrichter)

Es erfolgt keine Unterschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen, jedoch ist zu erkennen, dass eine deutliche Überschätzung sowohl

für den Stoßkurzschlussstrom als auch für den thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom auftreten kann. Da Typ 3-Umrichter das begrenzen des Kurzschlussstrombeitrags ermöglicht, können bereits kleine absolute Abweichungen zu großen prozentualen Abweichungen führen. Deshalb sind in Abbildung 5.10 die Bandbreiten der zugehörigen absoluten Abweichungen des Stoßkurzschlussstroms (ΔI_p) und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms (ΔI_{th}) für eine Ausschaltzeit T_A von 50 ms dargestellt. Die stellvertretende Darstellung von ΔI_{th} für ein T_A von 50 ms erfolgt, da für diese Ausschaltzeit die größten absoluten Abweichungen auftreten.

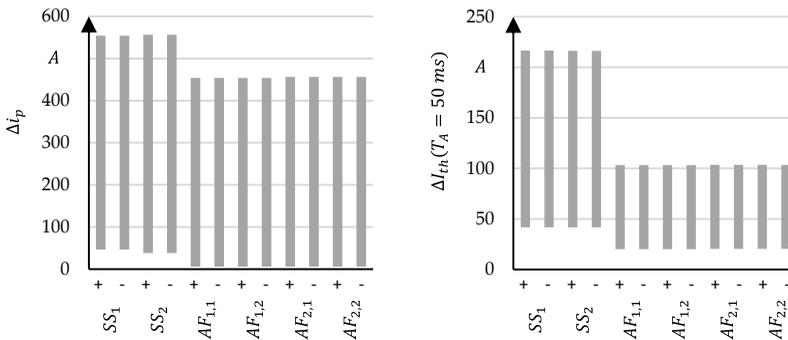


Abbildung 5.10: Bandbreite der absoluten Abweichung für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit Kurzschlussdetektion und einem stationären Kurzschlussstrombeitrag in Höhe des Nennstroms der Umrichter)

Bezüglich des Stoßkurzschlussstroms wurde eine maximale Überschätzung von rund 550 A ermittelt. Für den thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom wurde zudem eine maximale Überschätzung von ca. 225 A ermittelt. Im Zuge einer vereinfachten Kurzschlussstromabschätzung kann eine Überschätzung in dieser Größenordnung als akzeptable Abschätzung zur sicheren Seite angesehen werden.

Im nächsten Schritt werden zusätzliche Ausgestaltungsvarianten berücksichtigt, bei denen keine Kurzschlussdetektion beider Umrichter stattgefunden hat, wobei die Umrichter, die den Kurzschluss detektiert haben, weiterhin einen stationären Kurzschlussstrom in Höhe des Umrichternennstroms einspeisen. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 5.11 aufgezeigt.

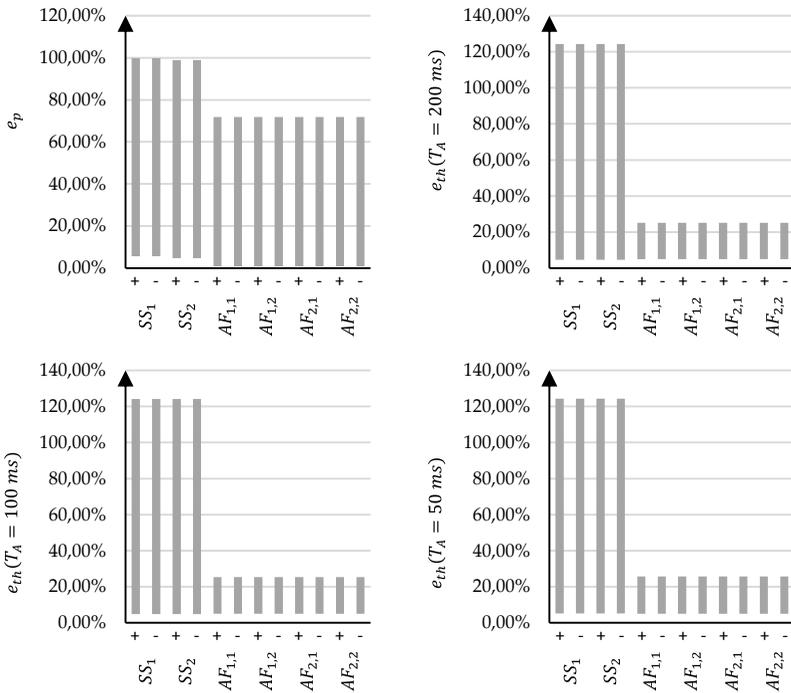


Abbildung 5.11: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für über 70 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit einem stationären Kurzschlussstrombeitrag in Höhe des Nennstroms der Umrichter)

Die maximalen Abweichungen steigt im Vergleich zu Abbildung 5.9 an. Das ist darauf zurückzuführen, dass ein Umrichter bei keiner erfolgreichen Kurzschlussdetektion durch die Umrichterregelung in einen neuen Normalbetriebsarbeitspunkt übergehen kann, bei dem der eingespeiste Strom deutlich unterhalb des Detektionsstroms verbleibt. Dadurch steigt die maximale prozentuale Abweichung deutlich an, wobei weiterhin eine mäßige maximale absolute Abweichung ($\Delta i_{p,max} \approx \Delta I_{th,max}(50\text{ ms}) \approx 550\text{ A}$) vorliegt.

Im letzten Schritt werden weitere Ausgestaltungsvarianten berücksichtigt, bei denen ein stationärer Kurzschlussstrom kleiner als der Nennstrom des Umrichters eingespeist wird. Die zugehörigen Ergebnisse sind Abbildung 5.12 zu entnehmen.

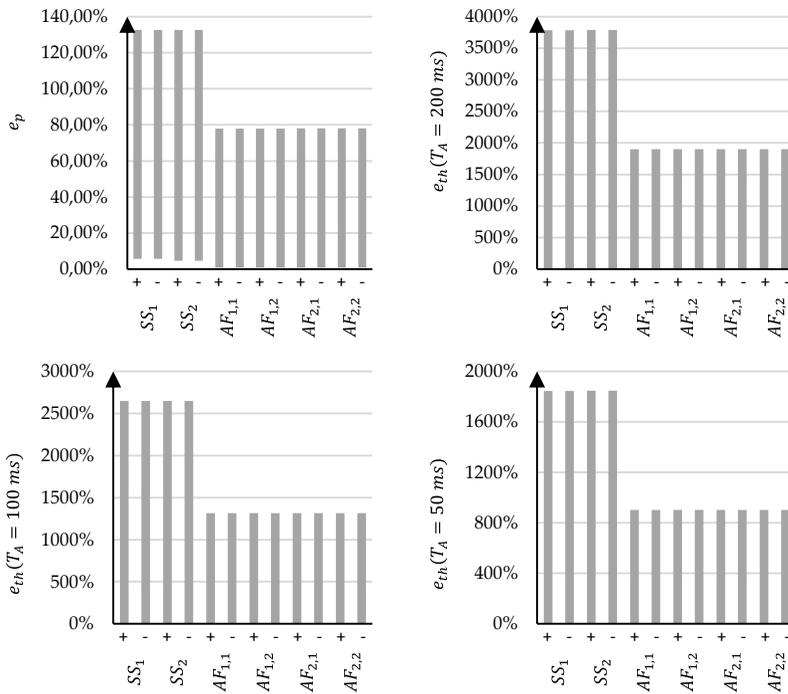


Abbildung 5.12: Bandbreite der Bewertungskenngößen für über 80 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit einem stationären Kurzschlussstrombeitrag kleiner als der Nennstrom des Umrichters)

Die maximalen prozentualen Abweichungen im Vergleich zu Abbildung 5.11 steigen deutlich an. Das ist darauf zurückzuführen, dass der stationäre Kurzschlussstrombeitrag im Extremfall auf 0 A geregelt wird, wodurch das Modell nach Kapitel 4.2.2.3 noch stärker als bei den vorherigen Untersuchungen überschätzt. Zusätzlich wird die Basis der prozentualen Betrachtung deutlich kleiner, weshalb beim thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom sehr große prozentuale Abweichungen auftreten können. Werden hingegen die maximalen absoluten Abweichungen betrachtet ($\Delta i_{p,max} \approx 800\text{ A}$ und $\Delta I_{th,max}(50\text{ ms}) \approx 1\text{ kA}$), so ist zu erkennen, dass diese im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungsergebnissen nicht übermäßig ansteigen. Somit ist festzuhalten, dass das vorgestellte Modell für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von MMC mit VBSM (und damit für

Typ 3-Umrichter) hinsichtlich der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen als geeignet angesehen werden kann, da eine Abschätzung zur sicheren Seite ohne übermäßige Überschätzung erfolgt.

Gleichspannungswandler

Bezüglich der ausschließlichen Verwendung von Gleichspannungswandlern wurden 109 exemplarische Ausgestaltungen einer DC-P2P-Verbindung untersucht (vgl. Anhang D.2, Tabelle D.12). Aggregierte Ergebnisse für die Untersuchungen von 93 exemplarischen Ausgestaltungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB und ohne den Einsatz von Kurzschlussstrombegrenzern (KSS-Begrenzer) sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

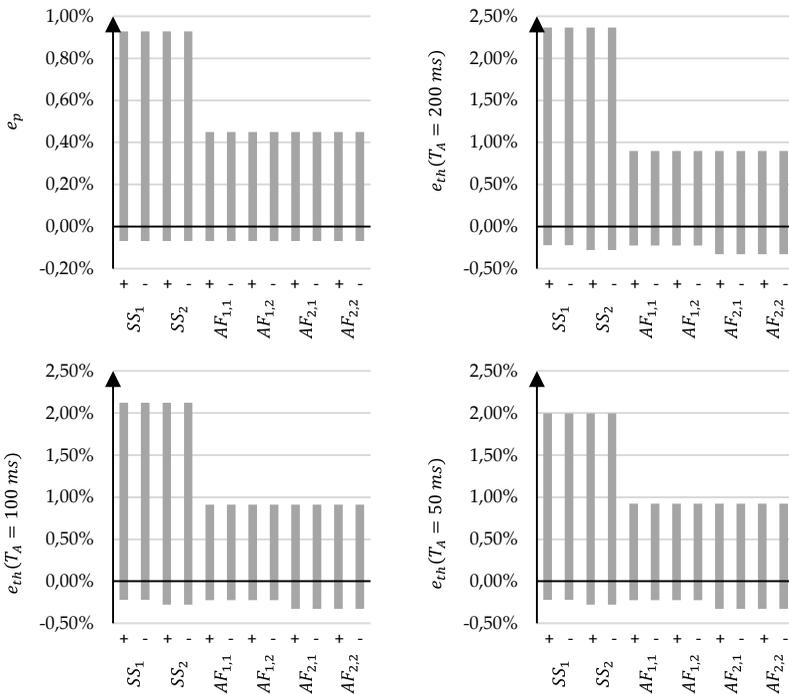


Abbildung 5.13: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 93 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB (ohne KSS-Begrenzer)

Abbildung 5.13 verdeutlicht, dass eine geringe Unterschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen möglich ist, was im Zuge dieser Arbeit als nicht akzeptabel anzusehen ist. Da auch die maximale Überschätzung als gering einzuschätzen ist, wird die Einführung eines zusätzlichen Korrekturfaktors k für den Stoßkurzschlussstrom des Modells aus Kapitel 4.2.3 entsprechend Formel (5.3) vorgeschlagen, um eine Abschätzung zur sicheren Seite zu gewährleisten.

$$i_p = k \cdot \kappa_c \cdot \frac{U_{DC}}{R_{ges}} \tag{5.3}$$

Auf Basis der untersuchten Ausgestaltungen wird ein exemplarischer Korrekturfaktor von $k = 1,01$ vorgeschlagen. Die durch diese Anpassung resultierenden Bandbreiten der Kurzschlussstromkenngrößen für dieselben exemplarischen Ausgestaltungsvarianten sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

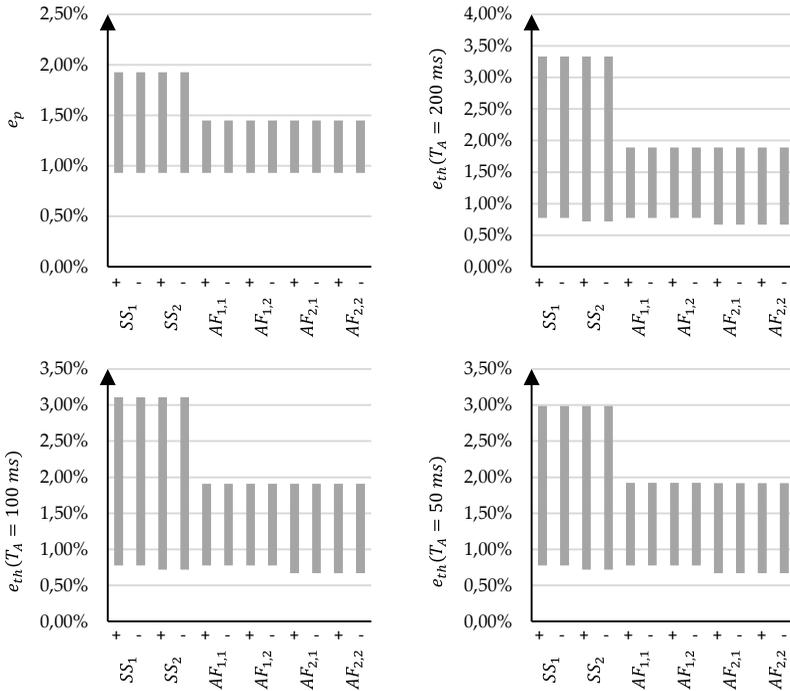


Abbildung 5.14: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 93 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB mit Korrekturfaktoren (ohne KSS-Begrenzer)

Die vereinfachte Berechnung mit der vorgestellten Anpassung nach Formel (5.3) führt für die untersuchten Ausgestaltungsvarianten zu keiner Unterschätzung, wobei weiterhin eine geringe maximale Überschätzung auftritt. Somit kann das angepasste Modell für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von DAB (und damit für Gleichspannungswandler) ohne den Einsatz von KSS-Begrenzern hinsichtlich der Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen für das symmetrisch monopolare Netzkonzept als geeignet angesehen werden.

Des Weiteren sind Ergebnisse für Untersuchungen von 16 exemplarischen Ausgestaltungsvarianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB und zusätzlichem Einsatz von KSS-Begrenzern in Abbildung 5.15 dargestellt. Dabei erfolgt die Berücksichtigung des eingeführten Korrekturfaktors.

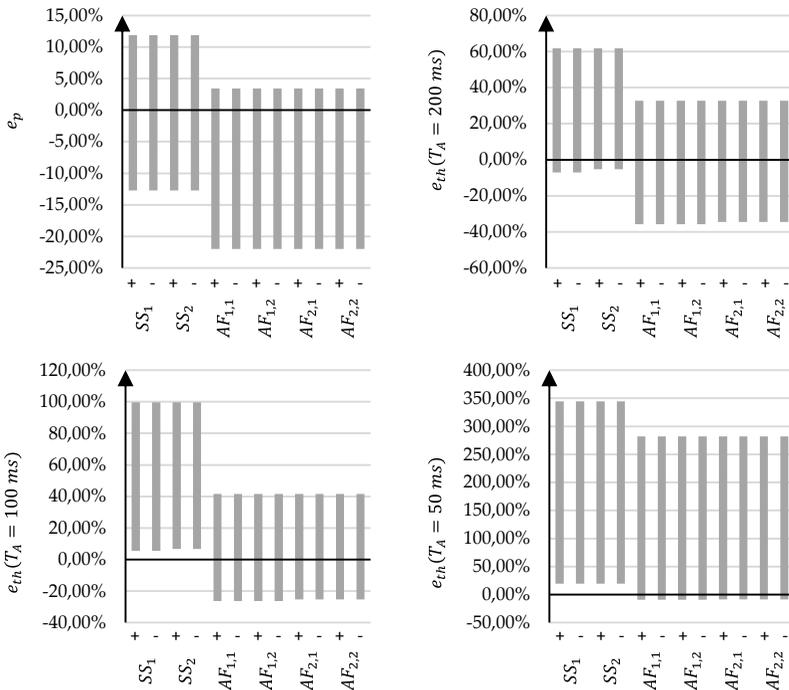


Abbildung 5.15: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 48 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB mit Kurzschlussstrombegrenzer (mit Korrekturfaktor)

Trotz des Korrekturfaktors kann sowohl eine deutlich Unterschätzung als auch eine deutliche Überschätzung der Kurzschlussstromkenngrößen auftreten, sodass der Einsatz des Modells aus Kapitel 4.2.2.1 nicht für die Abschätzung des Kurzschlussstrombeitrags von DAB mit KSS-Begrenzern bei symmetrisch monopolarer Netzkonzept geeignet ist.

5.3.1.2 Asymmetrisch monopolarer Netzkonzept mit metallischem Rückleiter

Im Folgenden werden die Ergebnisse für DC-P2P-Verbindungen ausgeführt im asymmetrisch monopolarer Netzkonzept mit metallischem Rückleiter vorgestellt. Dabei wurden erneut exemplarische Ausgestaltungen mit ausschließlicher Verwendung der vier vorgestellten Wandlertypen untersucht.

Die Untersuchungen der exemplarischen Ausgestaltungen mit ausschließlich Typ 1- und Typ 2-Umrichtern, sowie Gleichspannungswandlern führt für das asymmetrisch monopolarer Netzkonzept mit metallischem Rückleiter zu vergleichbaren Ergebnissen wie für die untersuchten Ausgestaltungen im symmetrisch monopolarer Netzkonzept. Diese Ergebnisse sind Anhang D.3 zu entnehmen, sodass die zugehörigen ermittelten Erkenntnisse und Fazite zu den einzelnen Modellen nicht wiederholt werden.

Bezüglich der ausschließlichen Verwendung von Typ 3-Umrichtern sind Ergebnisse von 64 exemplarischen Ausgestaltungsvarianten (vgl. Anhang D.2, Tabelle D.11) in aggregierter Form in Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 dargestellt. Dabei gilt für alle exemplarischen Ausgestaltungsvarianten, dass ein stationärer Kurzschlussstrom in Höhe des Umrichternennstroms eingespeist wird.

Im Vergleich zur zugehörigen Untersuchung für das symmetrisch monopolarer Netzkonzept sind für das asymmetrisch monopolarer Netzkonzept deutliche Unterschätzungen möglich. Dies ist auf die bereits in Kapitel 5.2.1.2 erläuterte, unzureichende Approximation der Leitungsentladung und der Umladung der Erdkapazitäten beim asymmetrisch monopolarer Netzkonzept zurückzuführen. Zur besseren Einschätzung der möglichen Unterschätzung sind zugehörige Bandbreiten der absoluten Abweichungen in Abbildung 5.17 aufgezeigt. Diese Abweichungen verdeutlichen, dass die absoluten Unterschätzungen der Kurzschlussströme gering ausfallen. Nichtsdestotrotz führt die vereinfachte Berechnung zu einer Unterschätzung, sodass das vorgestellte Modell für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 3-Umrichtern in Kombination mit dem Modell zur Entladung der Leitungskapazitäten bei Nutzung des asymmetrisch monopolarer Netzkonzepts nicht geeignet ist.

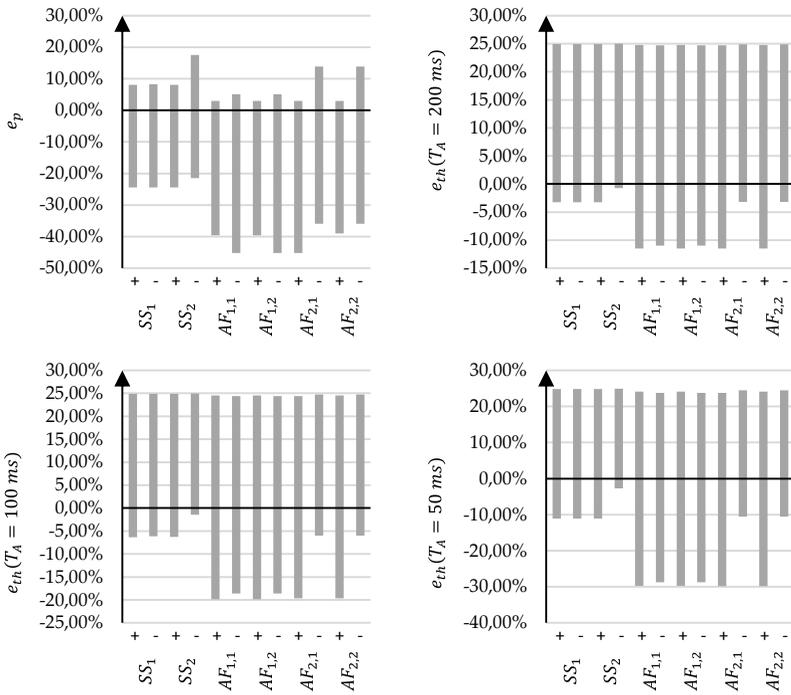


Abbildung 5.16: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 64 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM im AMN

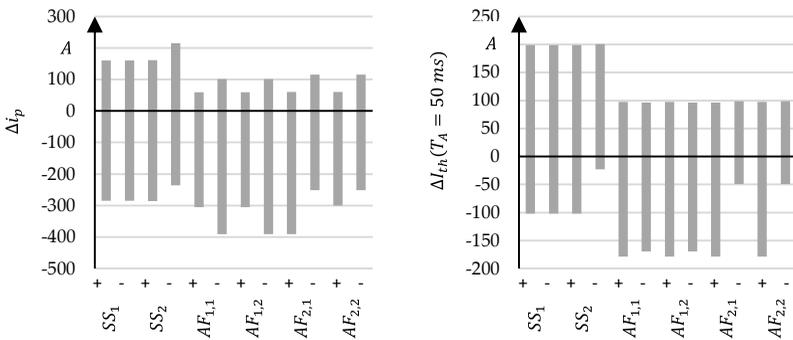


Abbildung 5.17: Zugehörige Bandbreite der absoluten Abweichungen

5.3.1.3 Schlussfolgerung

Basierend auf den ermittelten Ergebnissen ist festzuhalten, dass die Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen der stromführenden Betriebsmittel von DC-P2P-Verbindungen mithilfe der in Kapitel 4 vorgestellten vereinfachten Berechnungsmethode mit Einschränkungen möglich ist. Die wesentlichen ermittelten Einschränkungen liegen bei Nutzung von KSS-Begrenzern sowie bei Nutzung von Typ 2-Umrichtern für beide Netzkonzepte und bei der kombinierten Nutzung von Typ 3-Umrichtern und dem Modell für die Leitungsentladung beim asymmetrisch monopolen Netzkonzept vor.

5.3.2 Radiale 13-Knoten-Anordnung

Es erfolgt die Vorstellung repräsentativer Ergebnisse für eine exemplarische Ausgestaltung eines Mittel- sowie eines Niederspannungsgleichstromnetzes. Für beide Fälle wird das symmetrisch monopolare Netzkonzept verwendet.

5.3.2.1 Mittelspannungsgleichstromnetz

Der Aufbau der untersuchten, exemplarischen 40-kV-Ausgestaltung ist schematisch in Abbildung 5.18 dargestellt.

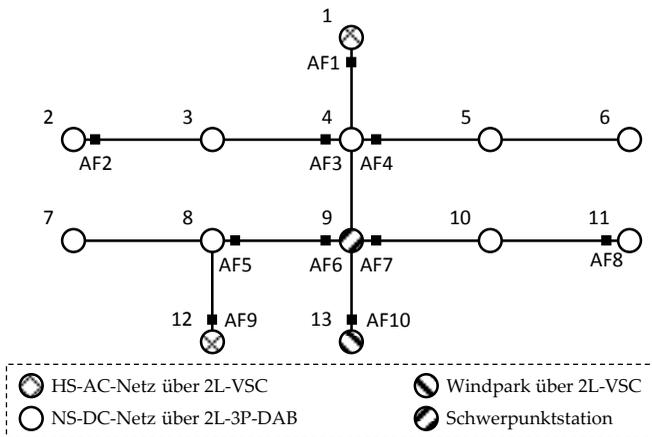


Abbildung 5.18: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Mittelspannungsgleichstromnetzes

Es existieren zwei Schnittstellen zu Hochspannungsdrehstromnetzen (HS-AC-Netz) und neun Schnittstellen zu Niederspannungsgleichstromnetzen (NS-DC-

Netz). Zusätzlich sind eine Schnittstelle zu einem Windpark mit internem Drehstromsystem und eine Schwerpunktstation vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit charakterisiert sich eine Schwerpunktstation durch keine angeschlossenen Netzkunden, sodass keine leistungselektronischen Wandler oder netzinternen Kondensatoren an die Schaltanlagen der Schwerpunktstation angeschlossen sind. Somit dient die Schwerpunktstation allein der Weiterverteilung und nicht der Versorgung von Netzkunden. Darüber hinaus kann eine detailliertere Beschreibung der vorgestellten Ausgestaltungsvariante Anhang D.4 entnommen werden.

Die Bewertungsgrößen der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von repräsentativen Abgangsfeldern (AF), deren Positionen in Abbildung 5.18 gekennzeichnet sind, sind in Abbildung 5.19 dargestellt.

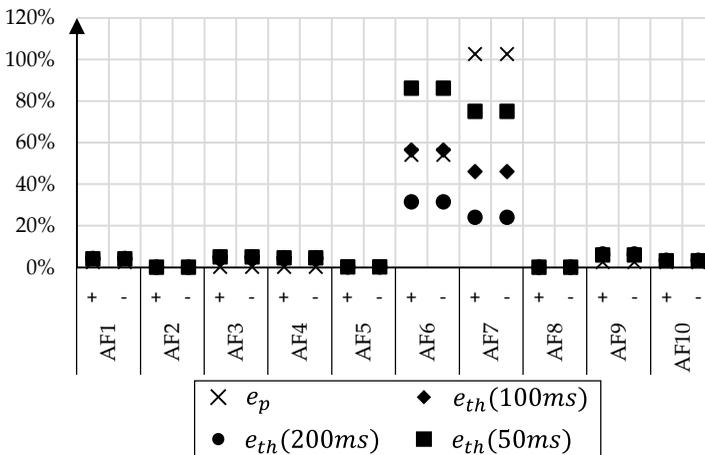


Abbildung 5.19: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Mittelspannungsgleichstromnetzes⁹

Für keine der betrachteten Abgangsfelder erfolgt eine Unterschätzung der Kurzschlussstromkenngrößen. Zusätzlich ist zu erkennen, dass eine deutliche Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen der Abgangsfelder der Schwerpunktstation (AF6 und AF7) auftritt. Somit kann festgehalten

⁹ Zusatzinformation zur Rechenzeit:

Berechnungsdauer der transienten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 45 bis 4800 s

Berechnungsdauer der vereinfachten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 1 bis 10 s

werden, dass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen für Betriebsmittel von Schwerpunktstationen nicht hinreichend genau bestimmt werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass Teilkurzschlussströme von quellenfernen Kurzschlüssen deutlich konservativer abgeschätzt werden als Teilkurzschlussströme von quellennahen Kurzschlüssen (vgl. Kapitel 5.2). Zudem erfolgt eine geringe bis teilweise mäßige Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen der übrigen vorgestellten Abgangsfelder. Vergleichbare Ergebnisse wurden ebenfalls für die nicht vorgestellten stromführenden Betriebsmittel bestimmt, sodass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von Stationen, die keine Schwerpunktstationen darstellen, in einem akzeptablen Maß abgeschätzt werden.

5.3.2.2 Niederspannungsgleichstromnetz

Der Aufbau der untersuchten, exemplarischen 1,5-kV-Ausgestaltung ist schematisch durch Abbildung 5.20 vorgestellt. Es ist eine Schnittstelle zu einem Mittelspannungsgleichstromnetz (MS-DC-Netz) und zwölf Schnittstellen zu Niederspannungs-DC-Kunden vorhanden. Eine detailliertere Beschreibung der untersuchten Ausgestaltungsvariante ist Anhang D.5 entnommen werden.

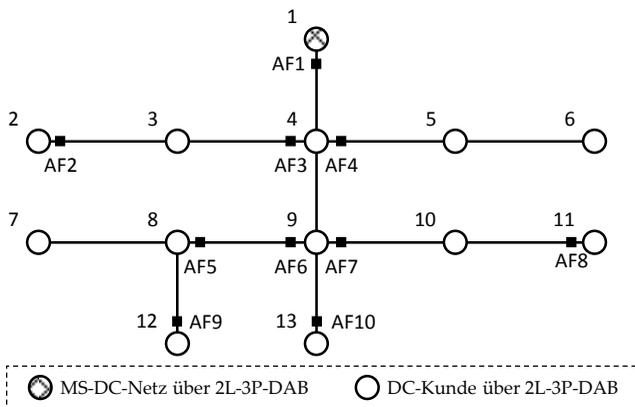


Abbildung 5.20: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes

Die Bewertungsgrößen der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen repräsentativer Abgangsfelder, deren Positionen in Abbildung 5.20 gekennzeichnet sind, sind in Abbildung 5.21 dargestellt.

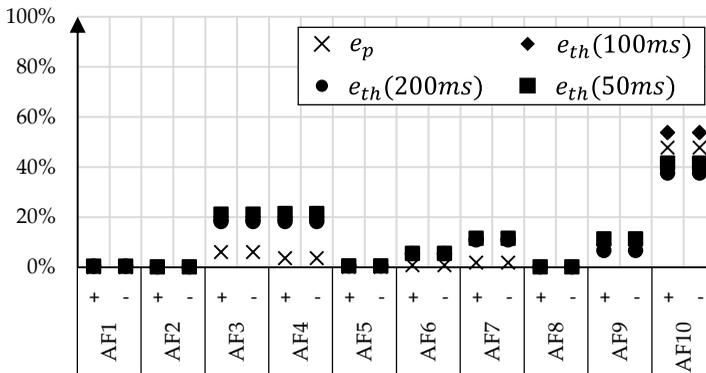


Abbildung 5.21: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes¹⁰

Für keine der betrachteten Abgangsfelder erfolgt eine Unterschätzung der Kurzschlussstromkenngrößen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass für die betrachteten Abgangsfelder eine deutliche maximale Überschätzung von bis zu 55% möglich ist, wobei für die meisten Abgangsfelder eine mäßige bis geringe Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen erfolgt. Geringe und mäßige Überschätzungen wurden zudem auch für die nicht vorgestellten stromführenden Betriebsmittel ermittelt. Insgesamt ist festzuhalten, dass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen für diese Ausgestaltung für die meisten stromführenden Betriebsmittel ausreichend genau abgeschätzt werden. Zusätzlich erfolgt bei vereinzelt stromführenden Betriebsmitteln eine konservativere Abschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen.

5.3.3 Vermaschte 14-Knoten-Anordnung

Wie zuvor erfolgt auch für die vermaschte 14-Knoten-Anordnung die Vorstellung repräsentativer Ergebnisse für eine exemplarische Ausgestaltung eines Mittel- sowie eines Niederspannungsgleichstromnetzes. Für beide Fälle wird erneut das symmetrisch monopolare Netzkonzept verwendet.

¹⁰ Zusatzinformation zur Rechenzeit:

Berechnungsdauer der transienten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 45 bis 4700 s

Berechnungsdauer der vereinfachten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 1 bis 10 s

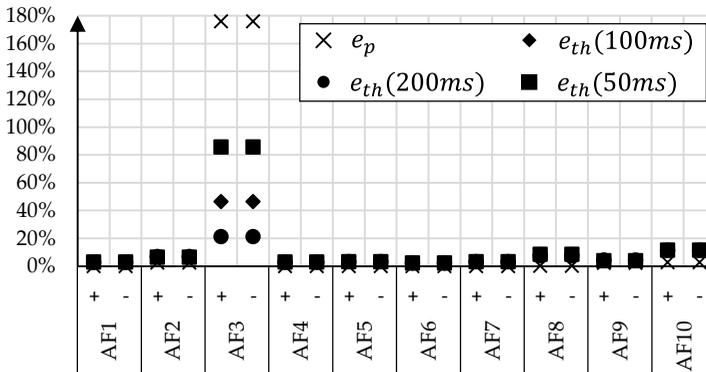


Abbildung 5.23: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes¹¹

Diese exemplarischen Ergebnisse zeigen zum einen, dass für keine der betrachteten Abgangsfelder eine Unterschätzung der Kurzschlussstromkenngrößen erfolgt. Zusätzlich ist erneut zu erkennen, dass eine deutliche Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen der Abgangsfelder der Schwerpunktstation (AF3) auftritt. Somit kann erneut geschlossen werden, dass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen für Betriebsmittel von Schwerpunktstationen nicht hinreichend genau bestimmt werden. Das ist wieder darauf zurückzuführen, dass Teilkurzschlussströme von quellenfernen Kurzschlüssen deutlich konservativer abgeschätzt werden als Teilkurzschlussströme von quellennahen Kurzschlüssen (vgl. Kapitel 5.2). Des Weiteren ist zu erkennen, dass eine geringe bis mäßige Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen der übrigen vorgestellten Abgangsfelder ($e_p < 10\%$, $e_{th} < 15\%$) erfolgt. Vergleichbare Ergebnisse wurden zudem für die nicht vorgestellten stromführenden Betriebsmittel bestimmt, sodass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von Stationen, die keine Schwerpunktstationen darstellen, ausreichend genau abgeschätzt werden können.

¹¹ Zusatzinformation zur Rechenzeit:

Berechnungsdauer der transienten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 2700 bis 5500 s

Berechnungsdauer der vereinfachten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 1 bis 14 s

5.3.3.2 Niederspannungsgleichstromnetz

Der Aufbau der untersuchten, exemplarischen 1,5-kV-Ausgestaltung ist schematisch in Abbildung 5.20 vorgestellt. Es existieren zwei Schnittstellen zu Mittelspannungsgleichstromnetzen (MS-DC-Netz), elf Schnittstellen zu Niederspannungs-DC-Kunden und eine Schwerpunktstation. Eine detailliertere Beschreibung der vorgestellten Ausgestaltung kann Anhang D.7 entnommen werden.

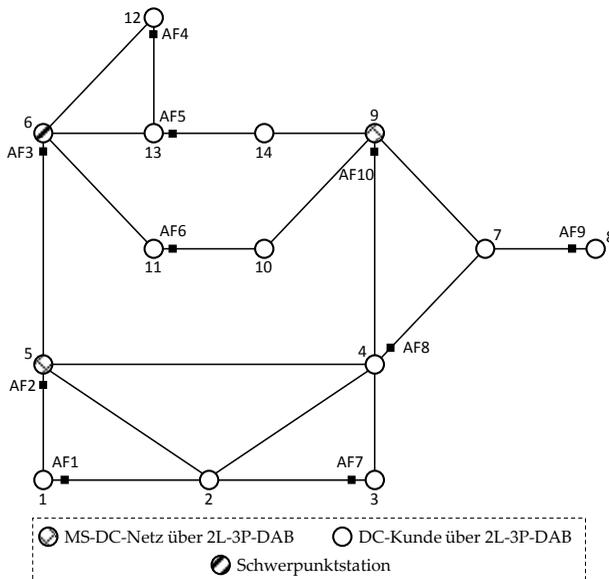


Abbildung 5.24: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes

Die Bewertungskenngrößen der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von repräsentativen Abgangsfeldern (abgekürzt AF), deren Positionen in Abbildung 5.24 gekennzeichnet sind, sind in Abbildung 5.25 dargestellt.

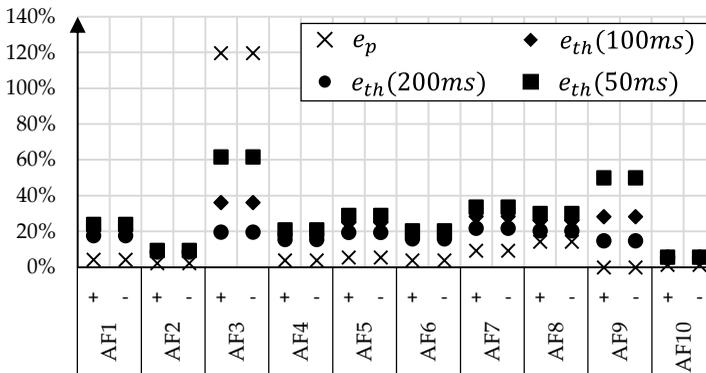


Abbildung 5.25: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes¹²

Es erfolgt für keine der betrachteten Abgangsfelder eine Unterschätzung der Kurzschlussstromkenngrößen. Zudem ist auch für die Niederspannung zu erkennen, dass eine deutliche Überschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen der Abgangsfelder der Schwerpunktstation (bspw. AF3) auftritt. Somit kann festgehalten werden, dass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen für Betriebsmittel von Schwerpunktstationen auch bei Niederspannung nicht hinreichend genau bestimmt werden. Wie für die Mittelspannung ist die deutliche Überschätzung auf die deutlich konservativere Abschätzung von Teilkurzschlussströmen von quellenfernen Kurzschlüssen zurückzuführen. Zudem tritt für die dargestellten Abgangsfelder, die zu keiner Schwerpunktstation gehören, eine maximale Abweichung des Stoßkurzschlussstroms von ca. 17% (vgl. AF8) auf, wobei die meisten dieser Abgangsfelder eine geringe bis mäßige Überschätzung des Stoßkurzschlussstroms aufweisen. Bezüglich des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms ist festzuhalten, dass für die dargestellten Abgangsfelder, die zu keiner Schwerpunktstation gehören, eine deutlich konservativere Überschätzung als für den Stoßkurzschlussstrom erfolgt. Dabei steigt die Abweichung mit sinkender Ausschaltzeit an. Während die maximal ermittelte Abweichung bei einer Ausschaltzeit von 200 ms bei ca. 20% liegt (vgl. AF7), beträgt die maximal ermittelte Abweichung bei einer Abschaltzeit von 50 ms

¹² Zusatzinformation zur Rechenzeit:

Berechnungsdauer der transienten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 45 bis 1650 s

Berechnungsdauer der vereinfachten Berechnung einzelner Kurzschlüsse: 1 bis 10 s

ca. 50%. Vergleichbare Abweichungen konnten zudem auch für die nicht vorgestellten stromführenden Betriebsmittel ermittelt werden. Aus diesem Grund ist zusammenfassend festzuhalten, dass die meisten auslegungsrelevanten Stoßkurzschlussströme dieser Ausgestaltung ausreichend genau abgeschätzt werden, wobei für vereinzelte stromführenden Betriebsmitteln eine konservativere Abschätzung von bis zu 17% erfolgt. Darüber hinaus werden die auslegungsrelevanten thermisch äquivalenten Kurzzeitströme der stromführenden Betriebsmittel häufig konservativ abgeschätzt.

5.4 Einordnung und Diskussion

Nachfolgend werden basierend auf den vorstellten Ergebnissen der Untersuchungen aus Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 die beiden spezifischen Fragen dieser Arbeit beantwortet.

Die in Kapitel 5.2 vorgestellten Ergebnisse zeigen zum einen, dass die Teilkurzschlussströme von kurzschlussnahen Kurzschlussstromquellen in der Regel akzeptabel abgeschätzt werden. Darüber hinaus weisen die Teilkurzschlussströme von kurzschlussfernen Kurzschlussstromquellen unabhängig von der untersuchten Ausgestaltung häufig deutliche, nicht akzeptable Abweichungen auf. Demzufolge ist die Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen von beliebigen Teilkurzschlussströmen durch die in Kapitel 4 vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode nicht zielführend. Bezüglich der ersten spezifischen Frage bedeutet das jedoch nicht zwangsläufig, dass der Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* generell ungeeignet zur Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen von beliebigen Teilkurzschlussströmen ist. Somit kann die erste spezifische Frage nicht eindeutig beantwortet werden, wobei nichtsdestotrotz ein Indikator gegen eine Eignung des Berechnungsansatzes zur Berechnung beliebiger Teilkurzschlussströme identifiziert wurde.

Die in Kapitel 5.3 vorgestellten Ergebnisse bezüglich der Validierung der Einzelmodelle zeigen, dass:

- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 1-Umrichtern mit Berücksichtigung eines Korrekturfaktors und ohne Verwendung von Kurzschlussstrombegrenzern bei Nutzung beider berücksichtigter Netzkonzepte

- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Gleichspannungswandlern mit Berücksichtigung eines Korrekturfaktors und ohne Verwendung von Kurzschlussstrombegrenzern bei Nutzung beider berücksichtigter Netzkonzepte
- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 3-Umrichtern in Kombination mit dem verwendeten Modell zur Approximation der Entladung von Gleichstromleitungen bei Nutzung des symmetrisch monopolen Netzkonzepts

für die vereinfachte Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen als geeignet angesehen werden kann. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse bezüglich der Validierung der Einzelmodelle auch, dass:

- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 1-Umrichtern mit Berücksichtigung eines Korrekturfaktors und mit Verwendung von Kurzschlussstrombegrenzern
- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 2-Umrichtern
- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Typ 3-Umrichtern in Kombination mit dem verwendeten Modell zur Approximation der Entladung von Gleichstromleitungen bei Nutzung des asymmetrisch monopolen Netzkonzepts mit metallischem Rückleiter
- ❖ das entwickelte Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von Gleichspannungswandlern mit Berücksichtigung eines Korrekturfaktors und mit Verwendung von Kurzschlussstrombegrenzern

für die vereinfachte Berechnung von auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen als nicht geeignet anzusehen ist. Demzufolge sollten die Modelle für die Approximation des Kurzschlussstrombeitrags dieser Fälle in weiterführender Forschung weiterentwickelt werden.

Zudem haben die Untersuchungen für die radiale 13- bzw. vermaschte 14-Knoten-Anordnung – bei ausschließlicher Nutzung von leistungselektronischen Wandlern mit geeignetem Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags – aufgezeigt, dass keine Unterschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschluss-

stromkenngrößen erfolgt. Nichtsdestotrotz konnten geringfügige Einschränkungen der Anwendbarkeit, zurückzuführen auf eine deutliche Überschätzung, identifiziert werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Bestimmung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von Betriebsmittel von Schwerpunktstationen sowohl für die Mittel- als auch für die Niederspannungsebene deutliche Überschätzungen aufweisen. Zudem wurde festgestellt, dass die auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von einzelnen Betriebsmitteln (vermehrt in Niederspannungsgleichstromnetzen) konservative Abschätzungen aufweisen können.

Somit erscheint die Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen durch die in Kapitel 4 vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode insgesamt mit geringen Einschränkungen¹³ möglich. Jedoch kann aufgrund der – insbesondere für die 13-Knoten- sowie 14-Knoten-Anordnung – begrenzten Anzahl betrachteter Ausgestaltungsvarianten keine allgemeingültige Aussage zur Anwendbarkeit der entwickelten vereinfachten Berechnungsmethode aus Kapitel 4 abgeleitet werden. Vielmehr sind die ermittelten Ergebnisse ein Indikator für eine Anwendbarkeit der entwickelten vereinfachten Berechnungsmethode, welcher die Vermutung einer Eignung der vereinfachten Berechnung zur sicheren Abschätzung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen nahelegt. Nichtsdestotrotz sind weitere Untersuchungen insbesondere mit gemessenen Vergleichsdaten zu empfehlen.

Bezüglich der zweiten spezifischen Frage dieser Arbeit kann somit festgehalten werden, dass der Berechnungsansatzes *Superposition von approximierten Stromverläufen* generell zur Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von stromführenden Betriebsmitteln von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen geeignet erscheint und verwendet werden kann.

¹³ Einschränkungen sind:

- Ausschließliche Verwendung von leistungselektronischen Wandlern, für die ein geeignetes Modell zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags existiert
- Keine Verwendung von Schwerpunktstationen im Gleichstromnetz
- Akzeptanz der ggf. konservativen Abschätzung einzelner Betriebsmittel

6 Zusammenfassung

Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze rücken zunehmend in den Fokus der Forschung. Wie in heutigen Drehstromsystemen rufen im Fall von Kurzschlüssen auftretende Ströme in der Regel die stärksten Beanspruchungen für stromführende Betriebsmittel in Gleichstromsystemen hervor, sodass die Kenntnis über mögliche Kurzschlussströme zur sicheren und dennoch wirtschaftlich angemessenen Auslegung der stromführenden Betriebsmittel zwingend erforderlich ist. Dabei ist äquivalent zu Drehstromsystemen eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze wünschenswert. Weder der Stand der Normung, noch der Stand der Forschung stellen eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze bereit. Einzig die DIN EN 61660 zur Berechnung von Kurzschlussströmen in Gleichstrom-eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken und Schaltanlagen stellt mit dem verwendeten Berechnungsansatz der *Superposition von approximierten Stromverläufen* eine potentielle Grundlage für eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnungsmethode für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze dar.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel der Arbeit die Entwicklung einer vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode basierend auf dem Berechnungsansatz *Superposition von approximierten Stromverläufen* für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze.

Die Analyse zeigte, dass ein Kurzschlussstrom in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen sowohl durch netzinterne Kurzschlussstromquellen in Form von Kondensatoren und Leitungen, aber auch durch netzexterne Kurzschlussstromquellen in Form von angrenzenden Dreh- und Gleichstromsystemen gespeist wird. Hinsichtlich netzexterner Kurzschlussstromquellen wurde eine in ei-

nem relevanten Maß vorherrschende Beeinflussung des Kurzschlussstrombeitrags durch die verwendeten leistungselektronischen Wandler zur Kopplung der Systeme identifiziert. Zusätzlich wurden relevante Kurzschlussstromkenngrößen für die Auslegung von stromführenden Betriebsmitteln in Form von Stoßkurzschlussströmen und thermisch äquivalenten Kurzzeitströmen abgeleitet.

Zunächst wurde aufgrund des Mangels an Messdaten zu Kurzschlussströmen in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen realitätsnahe Vergleichsdaten zur Validierung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode durch transiente Kurzschlussstromberechnungen generiert. Diese transiente Berechnung erfolgte durch numerische Zeitverlaufsimulationen mithilfe der Simulationsumgebung PLECS. Anschließend erfolgte die Entwicklung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode, wobei die entsprechenden dynamischen Modelle für die transiente Kurzschlussstromberechnung als Grundlage dienen. Im Zuge der Entwicklung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode wurden Standardmodelle für die möglichen netzinternen und netzexternen Kurzschlussstromquellen hergeleitet. Dazu wurde der minimal notwendige Datenbedarf für die betrachteten Betriebsmittel ermittelt und darauf aufbauend eine geeignete Approximation der Kurzschlussstrombeitrags der Kurzschlussstromquelle abgeleitet.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die entwickelte vereinfachte Berechnungsmethode validiert. Dazu wurden zahlreiche Variantenrechnungen durchgeführt, wobei im Wesentlichen die mögliche Ausgestaltung der Gleichstromnetze variiert wurde, sodass eine fundierte Bewertungsgrundlage geschaffen wurde. Die Validierung erfolgte anhand eines Vergleichs der Kurzschlussstromkenngrößen für die transiente und vereinfachte Kurzschlussstromberechnung.

Die ermittelten Ergebnisse und Erkenntnisse der Validierung sind:

- ❖ Eine Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen von beliebigen Teilkurzschlussströmen ist mithilfe der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode nicht zielführend.
- ❖ Eine Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von stromführenden Betriebsmitteln mithilfe der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode erscheint mit geringfügigen Einschränkungen möglich.

Die ermittelten Einschränkungen sind zum einen, dass in Einzelfällen eine konservative Abschätzung der Kurzschlussstromkenngrößen auftreten kann. Diese

konservativen Abschätzungen wurden dabei insbesondere für Niederspannungsgleichstromnetze identifiziert. Für eine Anwendbarkeit der vereinfachten Berechnungsmethode ist somit die Akzeptanz einer potentiell möglichen konservativen Abschätzung erforderlich. Zum anderen ist die Berechnung für spezielle Anwendungsfälle (bspw. die Nutzung einer Schwerpunktstation oder von Kurzschlussstrombegrenzern) nicht geeignet. Nichtsdestotrotz konnte die Anwendbarkeit der entwickelten vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode für eine Vielzahl an möglichen Ausgestaltungen von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen nachgewiesen werden.

Aufgrund der vorhandenen Einschränkungen sollte sich in zukünftiger Forschung weiterhin mit dem Thema der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung für Gleichstromsysteme beschäftigt werden. Zum einen können die Standardmodelle, die mit Einschränkungen verwendbar sind, weiterentwickelt werden. Zudem kann die Einführung eines Spannungsfaktors äquivalent zu DIN EN 60909 zur netznutzungsunabhängigen Abschätzung zur sicheren Seite erfolgen. Des Weiteren könnte die kombinierte Nutzung einer vereinfachten Berechnung (bspw. für die stationären Kurzschlussströme) und einer vereinfachten transienten Berechnung (bspw. nur für die Kondensator- und Leitungsentladungen) untersucht werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] R. W. de Doncker, "Power Electronic Technologies for Flexible DC Distribution Grids," *The 2014 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA - IPEC-Hiroshima 2014*, 2014.
- [2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, "Bedarfsermittlung 2019-2030: Bestätigung des Netzentwicklungsplans Strom für das Zieljahr 2030," Dec. 2019.
- [3] C. Linnemann, "Wirtschaftliche Bewertung von HGÜ-Netzausbaumaßnahmen beim Engpassmanagement im europäischen Übertragungsnetz," Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2013.
- [4] J. Eickmann, "Simulation der Engpassbehebung im deutschen Übertragungsnetzbetrieb," Dissertation, RWTH Aachen; Print Production M. Wolff GmbH, 2015.
- [5] T. van Leeuwen, "Einfluss von Unsicherheiten und Flexibilität auf den deutschen Übertragungsnetzbetrieb," Dissertation, RWTH Aachen; Print Production M. Wolff GmbH, 2018.
- [6] "VDE-Studie: Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung; by ETG,"
- [7] Bundesministerium für Bildung und Forschung, "Der Forschungscampus Flexible Elektrische Netze," [Online]. Available: https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Der_Forschungscampus_Flexible_Elektrische_Netze.pdf
- [8] M. Carpita, D. Dujic, A. Christe, S. Milovanovic, and M. Utvic, "Direct current technologies for Switzerland's electricity transmission and distribution,"

- [9] Laurens Mackay, Tsegay Hailu, Laura Ramirez-Elizondo, and Pavol Bauer, "Towards a DC Distribution System – Opportunities and Challenges," *IEEE International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2015.
- [10] L. Qi *et al.*, "DC Power Distribution: New Opportunities and Challenges," *2017 IEEE Second International Conference on Direct Current Microgrids*, Jun. 2017.
- [11] C. Long, J. Wu, K. Smith, A. Moon, R. Bryans, and J. Yu, "MVDC link in a 33 kV distribution network," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1308–1312, 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.0168.
- [12] G. Bathurst, G. Hwang, and L. Tejwani, "MVDC – The New Technology for Distribution Networks,"
- [13] M. Stieneker and R. W. de Doncker, "Medium-voltage DC distribution grids in urban areas," *IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1109/PEDG.2016.7527045.
- [14] Siemens AG, "MVDC PLUS: Medium Voltage Direct Current Managing the future grid," Accessed: Apr. 27 2018. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/medium-voltage/solutions/mvdc.html>
- [15] ABB, "Technical Application Papers No. 24: Medium voltage direct current applications,"
- [16] A. A. Buchner and U. Schichler, "MITTELSPANNUNGS-GLEICHSTROMÜBERTRAGUNG (MGÜ) IM NETZ DER ZUKUNFT - HERAUSFORDERUNGEN, MÖGLICHKEITEN, ANWENDUNGEN -," *16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria*.
- [17] L. QU *et al.*, "Planning and analysis of the demonstration project of the the MVDC distribution network in Zhuhai," *Front. Energy* 2019.
- [18] U. Boeke, R. Weiß, A. Mauder, L. Hamilton, and L. Ott, "White Paper: Efficiency Advantage Efficiency Advantages of ± 380 V DC Grids in Comparison with in Comparison with 230 V/400 V AC Grids,"
- [19] Chochole, Michael, Zeilinger, Franz, T. Kaufmann, A. Winter, M. Heimberger, and W. Gawlik, "SmartDCGrid – Machbarkeit eines Gleichstromniederspannungsnetzes," *Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT)*, 2015.

- [20] A. Wasserrab, "Kurzschlussstromberechnung in Gleichstromnetzen der elektrischen Leistungsübertragung," Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2016.
- [21] G. Balzer, D. Nelles, and C. Tuttas, *Kurzschlussstromberechnung nach IEC und DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07: Grundlagen, Anwendung der Normen, Auswirkungen der Kurzschlussströme*, 2nd ed. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2009.
- [22] T. Hunger, "Beiträge zur Kurzschlussstromberechnung in Drehstromnetzen," Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1996.
- [23] *DIN EN 60909-0: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen - Teil 0: Berechnung der Ströme*, 2016.
- [24] *DIN EN 61660-1: Kurzschlußströme in Gleichstrom-Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken und Schaltanlagen*, 1998.
- [25] A. Emhemed and G. Burt, "THE EFFECTIVENESS OF USING IEC61660 FOR CHARACTERISING SHORT-CIRCUIT CURRENTS OF FUTURE LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION NETWORKS," *CIRED 22rd International Conference on Electricity Distribution*, 2013.
- [26] C. Nietsch, "Ermittlung des Kurzschlußstromverlaufs in Gleichstromanlagen," Dissertation, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, 1990.
- [27] X. Feng, L. Qi, and Z. Wang, "Estimation of Short Circuit Currents In Mesh DC Networks," *IEEE PES general meeting 27-31 July 2014, National Harbor, MD*, 2014.
- [28] X. Lai, F. Liu, K. Deng, Q. Gao, and X. Zha, "A Short-circuit Current Calculation Method for Low-Voltage DC Microgrid," *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (IEEE PEAC)*, 2014.
- [29] M. K. Bucher, "Transient Fault Currents in HVDC VSC Networks During Pole-to-Ground Faults," Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, 2014.
- [30] C. Li, C. Zhao, J. Xu, Y. Ji, F. Zhang, and T. An, "A Pole-to-Pole Short-Circuit Fault Current Calculation Method for DC Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4943–4953, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2682110.
- [31] A. Saciak, G. Balzer, and J. Hanson, "A Novel Calculation Method for Steady-State Short-Circuit Currents in Meshed DC-Grids," *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2018.

- [32] A. Saciak, G. Balzer, and J. Hanson, "A Calculation Method for Steady-State Short-Circuit Currents in Multi-Terminal HVDC-Grids," 2019.
- [33] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*, 4th ed. Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [34] J. Beerten, "Modeling and Control of DC Grids," Dissertation, KU Leuven, 2013.
- [35] A.-K. Marten, "Operation of meshed high voltage direct current (HVDC) overlay grids: from operational planning to real time operation," Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2015.
- [36] *DIN EN 50110-1: Betrieb von elektrischen Anlagen*, 2014.
- [37] J. Priebe, "Strukturelle Ausgestaltung von Mittelspannungsnetzen auf Basis von Gleichstromtechnologie unter Berücksichtigung einer Leistungsflusssteuerung," Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2020.
- [38] D. Jovicic and K. Ahmed, *High voltage direct current transmission: Converters, systems and DC grids*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2015.
- [39] N. Soltau, "High-Power Medium-Voltage DC-DC Converters: Design, Control and Demonstration," Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2017.
- [40] J. Specovius, *Grundkurs Leistungselektronik*, 9th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [41] P. Y. Yu and M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer e-books; Imprint: Springer, 2010.
- [42] D. van Hertem, O. Gomis-Bellmunt, and J. Liang, *HVDC GRIDS: For Off-shore and Supergrid of the Future*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [43] J. Arrillaga, Y. H. Liu, and N. R. Watson, *Flexible power transmission: The HVDC options*. Chichester, England, Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- [44] A.-K. Marten, "Integration der Betriebsführung eines HGÜ-Overlay-Netzes in die Leitungs-Frequenz-Regelung eines Drehstrom-Verbundnetzes," Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2011.
- [45] F. Blaabjerg, *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 2*, 2018.

- [46] Q.-c. Zhong and T. Hornik, *Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration*. Chichester, West Sussex, Piscataway, New Jersey: Wiley A John Wiley & Sons Ltd. Publications IEEE Press; IEEE Xplore, 2012.
- [47] R. W. de Doncker, *Lecture notes power electronics: Fundamentals, topologies and analysis*, 4th ed. Aachen: ISEA, 2013.
- [48] H. Shin, K. Lee, J. Choi, S. Seo, and J. Lee, "Power loss comparison with different PWM methods for 3L-NPC inverter and 3L-T type inverter," *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, vol. 2014, pp. 1322–1327, doi: 10.1109/PEAC.2014.7038054.
- [49] Reza Kheirollahi, Mustafa Mohamadian, Farzad Golshan, and Ehsan Dehghanpour, "A New Real-Time Implementation of Level Shifted-PWM Method for a Three Phase 5-Level NPC Inverter," *10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, vol. 2019.
- [50] D. Baimel *et al.*, "Hybrid Flying Capacitor cascaded multilevel inverter," *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014)*, vol. 2014, pp. 631–636, doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872048.
- [51] W.-K. Lee, T.-J. Kim, D.-W. Kang, and D.-S. Hyun, "A carrier-rotation strategy for voltage balancing of flying capacitors in flying capacitor multi-level inverter," *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2173–2178, doi: 10.1109/IECON.2003.1280580.
- [52] A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen, and P. Lundberg, "Analysis of Modular Multilevel Converters with DC Short Circuit Fault Blocking Capability in Bipolar HVDC Transmission Systems," *EPE'15 ECCE Europe*, 2015.
- [53] J. Qin, M. Saeedifard, A. Rockhill, and R. Zhou, "Hybrid Design of Modular Multilevel Converters for HVDC Systems Based on Various Submodule Circuits," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 385–394, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2351794.
- [54] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter Topologies with DC-Short Circuit Current Limitation," *8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia (ICPE 2011-ECCE Asia)*, 2011.
- [55] J. Xu, P. Zhao, and C. Zhao, "Reliability Analysis and Redundancy Configuration of MMC With Hybrid Submodule Topologies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 2720–2729, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2444877.

- [56] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter topologies with DC-Short circuit current limitation," *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, pp. 1425–1431, 2011, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944451.
- [57] J.-J. Jung, S. Cui, and S.-K. Sul, "A new topology of multilevel VSC converter for hybrid HVDC transmission system," *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2620–2628, doi: 10.1109/APEC.2016.7468234.
- [58] Yunbeom Gim, Zhengxuan Li, Jingwei Meng, Zexi Deng, and Qiang Song, "Analysis of submodule capacitor overvoltage during DC-side fault in hybrid MMC-based HVDC system," *10th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*.
- [59] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed.: John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [60] R. W. de Doncker, D. M. Divan, and M. H. Kheraluwala, "A three-phase soft-switched high power density DC/DC converter for high power applications," *Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 796–805, Oct. 1988 Pittsburgh, PA, USA, doi: 10.1109/IAS.1988.25153.
- [61] R. U. Lenke, *A contribution to the design of isolated DC-DC converters for utility applications*, 1st ed. Aachen: E. ON Energy Research Center, 2012.
- [62] S. P. Engel, M. Stieneker, N. Soltan, S. Rabiee, H. Stagge, and R. W. de Doncker, "Comparison of the Modular Multilevel DC Converter and the Dual-Active Bridge Converter for Power Conversion in HVDC and MVDC Grids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 124–137, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2310656.
- [63] S. Verma, S. K. Singh, and A. G. Rao, "Overview of control Techniques for DC-DC converters," *Research Journal of Engineering Sciences*, vol. 2013.
- [64] P. Joebges, A. Gorodnichev, and R. W. de Doncker, "Modulation and Active Midpoint Control of a Three-Level Three-Phase Dual-Active Bridge DC-DC Converter under Non-Symmetrical Load," *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, pp. 375–382, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507930.
- [65] R. Bleilevens, J. Priebe, N. Wehbring, and A. Moser, "Reliability Analysis of DC Distribution Grids," *54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2019.

- [66] S. Schumann, A. Schnettler, and R. Puffer, "UNTERSUCHUNG DES ELEKTRISCHEN ALTERUNGSVERHALTENS VON VPE FÜR AC-MITTELSPANNUNGSKABEL BEI SEQUENZIELLER AC UND DC BEANSPRUCHUNG," *Fachtagung Polymere Isolierstoffe und ihre Grenzflächen*, Zittau, Deutschland, 2018.
- [67] Y. Liu and X. Cao, "Electrical tree growth characteristics in XLPE cable insulation under DC voltage conditions," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 6, pp. 3676–3684, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.005222.
- [68] A. Shekhar, E. Kontos, A. R. Mor, L. Ramirez-Elizondo, and P. Bauer, "Re-furbishing existing mvac distribution cables to operate under dc conditions," *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Varna, Bulgaria, pp. 450–455, doi: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752039.
- [69] U. Schichler and A. Buchner, "Realisierung einer Mittelspannungs-Gleichstromübertragung mit extrudierten AC-Kabeln," *Elektrotech. Inftech.*, vol. 135, no. 8, pp. 520–526, 2018, doi: 10.1007/s00502-018-0658-8.
- [70] L. Liljestrand, M. Backman, L. Jonsson, M. Riva, and E. Dullni, "Medium voltage DC vacuum circuit breaker," *3rd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, 2015.
- [71] L. Liljestrand, L. Jonsson, M. Backman, and M. Riva, "A new hybrid medium voltage breaker for DC interruption or AC fault current limitation," *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, pp. 1–10, doi: 10.1109/EPE.2016.7695562.
- [72] Di Wu, Xuguang Liu, Jinda Zhu, Zhihong Yang, Zhuofei Yu, and Jian Luo, "Research on Main Parameters Design Method and Circulation Mechanism of Parallel VSC System," *The 10th International Conference on Communications, Circuits and Systems*, vol. 2018.
- [73] W. Leterme, I. Jahn, P. Ruffing, K. Sharifabadi, and D. van Hertem, "Designing for High-Voltage dc Grid Protection: Fault Clearing Strategies and Protection Algorithms," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 17, no. 3, pp. 73–81, 2019, doi: 10.1109/MPE.2019.2897188.
- [74] Sobhy S. Dessouky, M. Fawzi, Hamed A. Ibrahim, and Nagwa F. Ibrahim, "DC Pole to Pole Short Circuit Fault Analysis in VSC-HVDC Transmission System," *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*.

- [75] Bin Jiang, Yanfeng Gong, Jun Cao, Haifeng Wang, "FAULT CURRENT ANALYSIS OF MMC BASED HVDC SYSTEM UNDER DC POLE-TO-POLE FAULT CONDITION," *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*.
- [76] K. K upfm uller, W. Mathis, and A. Reibiger, *Theoretische Elektrotechnik: Eine Einf uhrung*, 19th ed. Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [77] J. M. Gers and E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 3rd ed. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2005.
- [78] C. D. Barker and R. S. Whitehouse, "An Alternative Approach to HVDC Grid Protection," *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)*, 2012, doi: 10.1049/iet-tv.50.15662.
- [79] K. de Kerf *et al.*, "Wavelet-based protection strategy for DC faults in multi-terminal VSC HVDC systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 4, p. 496, 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0587.
- [80] W. Lin, D. Jovcic, S. NguEFEU, and H. Saad, "Protection of full bridge MMC DC grid employing mechanical DC circuit breakers," *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1–5.
- [81] W. Leterme and D. van Hertem, "Classification of Fault Clearing Strategies for HVDC Grids," *cigr  International Symposium Lund*, 2015.
- [82] A.-K. Marten, C. Troitzsch, Westermann, and D., "Non-telecommunication based DC line fault detection methodology for meshed HVDC grids,"
- [83] Qiu Deng, Xing Liu, Raturaj Soman, Michael Steurer, Roger A. Dougal, "Primary and Backup Protection for Fault Current Limited MVDC Ship-board Power Systems," *2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Jun. 2015.
- [84] P. T unnerhoff, C. Petino, M. Battiato, and A. Schnettler, "Distance Protection for HVDC Transmission Lines Based on MMC Modulation Strategy," *2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, 2016.
- [85] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. I. Candela, and P. Rodriguez, "A Protection Strategy for Fault Detection and Location for Multi-Terminal MVDC Distribution Systems with Renewable Energy Systems," *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 2014.
- [86] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. I. Candela, and Pedro Rodriguez, "Design of a Centralized Protection Technique for Medium Voltage DC Microgrids,"

- [87] H. Li, W. Li, M. Luo, A. Monti, and F. Ponci, "Design of Smart MVDC Power Grid Protection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (IEEE Trans. Instrum. Meas.)*, vol. 60, no. 9, pp. 3035–3046, 2011, doi: 10.1109/TIM.2011.2158152.
- [88] R. Bleilevens, J. Priebe, N. Wehbring, and A. Moser, "Identification of Relevant Fault Types for Grid Planning of DC Distribution Grids," *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems Hamburg, 20 – 21 September 2018 (NEIS 2018)*, 2018.
- [89] R. Bleilevens and A. Moser, "Identifikation auslegungsrelevanter Kurzschlüsse in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen," *16. Symposium Energieinnovation (EnInnov 2020) 12.-14.02.2020, Graz/Austria*.
- [90] A. Pfendler, A. Saciak, J. Hanson, and G. Balzer, "Fault Location Dependency of Short-Circuit Currents in MMC based Meshed HVDC Cable Systems," *2019 IEEE Milan PowerTech*.
- [91] FGH GmbH, "INTEGRAL 7 - Kurzbeschreibung," 2012. [Online]. Available: http://www.fgh.rwth-aachen.de/www/cms/upload/pdf/beschreibung_integral_2012_op.pdf
- [92] DIgSILENT GmbH, "PowerFactory Handbuch," 2017. [Online]. Available: https://www.digsilent.de/files/content/interne_downloads/PF2017_Brochure_DE.pdf
- [93] NEPLAN AG, "NEPLAN Handbuch: Planungs- und Optimierungssystem für Elektrizitätsnetze," [Online]. Available: https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/03/NeplanElektrizitaet_AlleModule.pdf
- [94] G. Balzer, *Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen*, 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [95] R. Bleilevens and A. Moser, "Identification of Required Converter Models for a Simplified Short Circuit Current Calculation of DC Distribution Grids," *54th International Universities Power Engineering Conference (IUPEC)*, 2019.
- [96] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converters: State of the Art and Future Progress," *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 24–31, 2018, doi: 10.1109/MPPEL.2018.2873496.
- [97] A. Mayer, M. Schulz, C. Rolff, and R. Marquardt, "Fault tolerant operation of the Modular High Frequency Converter," *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, pp. 2917–2924, 2015, doi: 10.1109/ICPE.2015.7168190.

- [98] A. Virdag, T. Hager, J. Hu, and R. W. DeDoncker, "Short Circuit Behavior of Dual Active Bridge DC-DC Converter with Low Resistance DC Side Fault," *IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2017, 2017.
- [99] J. Hu, S. Cui, and R. W. de Doncker, "DC Fault Ride-Through of a Three-Phase Dual-Active Bridge Converter for DC Grids," *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*, pp. 2250–2256, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507672.
- [100] J. Schlabbach, *Short-circuit Currents: IET Power and Energy Series 51*. London: The Institution of Engineering and Technology (IET), 2005.
- [101] J. Schindler, *Elektromagnetische Kopplungen hybrider AC-DC-Leitungen: Berechnungen anhand eines verteilten Leitungsmodells*, 1st ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, 2016.
- [102] S. L. Loyka, "A simple formula for the ground resistance calculation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 2, pp. 152–154, 1999, doi: 10.1109/15.765106.
- [103] *DIN EN 60384-1: Festkondensatoren zur Verwendung in Geräten der Elektronik*.
- [104] H. Katzier, *Elektrische Kabel und Leitungen: Technologien, Anwendungen und Anforderungen*. Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2015. [Online]. Available: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/10.12850/9783874803403>
- [105] M. Albach, *Induktivitäten in der Leistungselektronik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [106] W. Leterme, N. Ahmed, J. Beerten, L. Ängquist, and Van Hertem, D. and S. Norrga, "A new HVDC grid test system for HVDC grid dynamics and protection studies in EMT-type software," *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*.
- [107] V. S. Meshalkin, D. B. Kuguchev, and A. R. Mansurov, "PWM on the Basis of Different Configurations of Reference Signals for a Multilevel Converter on H-Bridge," *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, vol. 2018, pp. 6403–6407, doi: 10.1109/EDM.2018.8435014.
- [108] R. Dey and S. Nath, "A Simplified Charge Balancing Algorithm for Modular Multilevel Converter," *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2017. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8303184>

- [109] J. Hu, M. Stieneker, P. Joebges, and R. W. DeDoncker, "Intelligent DC-DC Converter Based Substations Enable Breakerless MVDC Grids," *Conference record of the Third IEEE International Workshop on Electronic Power Grid (eGrid)*, Nov. 2018, Charleston, SC, USA.
- [110] P. W. Sauer, M. A. Pai, and J. H. Chow, *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox 2e*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [111] F. Milano, *Power System Modelling and Scripting*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [112] J. A. Melkebeek, *Electrical Machines and Drives*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [113] A. Abdelbaset, Y. S. Mohamed, A.-H. M. El-Sayed, and A. E. H. A. Ahmed, *Wind Driven Doubly Fed Induction Generator*. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [114] Plexim GmbH, "PLECS - User Manual: Version 4.3," [Online]. Available: <https://www.plexim.com/files/plecsmanual.pdf>
- [115] Plexim GmbH, *Elektrische Maschinen: Vielseitige Modelle auch für unkonventionelle Maschinen-Designs*. [Online]. Available: <https://www.plexim.com/de/plecs/electrical/machines> (accessed: Nov. 25 2019).
- [116] J. Schönberger, "Modeling a DFIG Wind Turbine System using PLECS," *Application Note of Plexim GmbH*, 2008.
- [117] M. Luo, "Multi-Physical Domain Modeling of a DFIG Wind Turbine System using PLECS®," *Application Note of Plexim GmbH*.
- [118] R. Bleilevens, A. M. Jaschek, and A. Moser, "Approximation of Current Contribution by Converters with DC Fault Ride-Through Capability for Short Circuit Current Calculation of DC Distribution Grids," *2019 IEEE Milan PowerTech*, 2019.
- [119] Distribution System Analysis Subcommittee Report, "Radial Distribution Test Feeders," *2000 PES Summer Meeting*, 2000.
- [120] J. A. Boudreaux, "Design, Simulation, and Construction of an IEEE 14-Bus Power System," Master's Theses, Louisiana State University, 2018.
- [121] WIMA GmbH & Co. KG, "Kondensatoren für die Elektronik: Ausgabe 2007,"
- [122] MUECAP Bauelemente GmbH, "Capacitors for Power Electronics and Railway Application,"

- [123] Electronicon GmbH, "E57/E59/SR17: AC and DC Capacitors with large Capacitances,"
- [124] Nexans Deutschland GmbH, *Niederspannungsnetz-kabel und Mittelspannungskabel*. [Online]. Available: https://www.nexans.com/Switzerland/files/NEXANS06_BTMTAcc_D.pdf (accessed: Oct. 28 2019).
- [125] A. Eberle GmbH & Co. KG, *Info-Brief Nr. 20: Kapazität von Leitungen*. [Online]. Available: https://www.a-eberle.de/sites/default/files/media/info_21.pdf (accessed: Dec. 2 2019).
- [126] NKT Group GmbH, *Mittelspannungskabel*. [Online]. Available: https://www.nkt.de/fileadmin/user_upload/nkt_de/mittelspannungskabel/mittelspannungskabel-vpe-isolierung-starkstromkabel-nkt-cables.pdf (accessed: Oct. 28 2019).
- [127] Südkabel GmbH, *Einadrige VPE-isolierte Kabel für Mittelspannungsnetze*. [Online]. Available: https://www.suedkabel.de/wp-content/uploads/2018/06/Einadrige_VPE-isolierte_Mittelspannungskabel_neu.pdf (accessed: Oct. 28 2019).
- [128] F. de Bosio, M. Pastorelli, Ribeiro, L. A. de Sousa Ribeiro, M. S. Lima, F. Freijedo, and J. M. Guerrero, "Current control loop design and analysis based on resonant regulators for microgrid applications," *IEEE Industrial Electronics Conference 2015*, pp. 5322–5327, 2015, doi: 10.1109/IECON.2015.7392938.
- [129] Rittal GmbH & Co. KG, "Datenblatt von Sammelschienen E-Cu,"
- [130] ABH Stromschienen GmbH, "Datenblatt E-LINE KB: Schienenverteiler 800 A ... 6300 A,"
- [131] E. Dullni, D. Gentsch, W. Shang, and T. Delachaux, "Resistance increase of vacuum interrupters due to high-current interruptions," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005245.
- [132] Schaltbau GmbH, "Auskunft von Mitarbeitern der Schaltbau GmbH," 2020.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Vergleichende Gegenüberstellung von schematischen Kurzschlussströmen in Dreh- und Gleichstromsystemen	3
Abbildung 2.1: Schematische Übersicht zur Einbindung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen in das heutige Elektrizitätsversorgungssystem	12
Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau von Umrichterstationen [38]	13
Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau von Gleichspannungswandlerstationen	14
Abbildung 2.4: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise von Umrichtern	17
Abbildung 2.5: Vereinfachte Darstellung der Umrichterregelung	18
Abbildung 2.6: Aufbau eines Zwei-Level-Umrichters	20
Abbildung 2.7: Aufbau eines Drei-Level-DCM- und eines Fünf-Level-DCM-Umrichters .	21
Abbildung 2.8: Aufbau eines Drei-Level-FCM- und eines Fünf-Level-FCM-Umrichters...	21
Abbildung 2.9: Aufbau von modularen Multilevel-Umrichtern und Aufbau des Halbbrückensubmoduls (a) und des Vollbrückensubmoduls (b)	22
Abbildung 2.10: Weitere Submodultypen für den Einsatz in modularen Multilevel-Umrichtern	23
Abbildung 2.11: Aufbau exemplarischer galvanisch getrennter, unidirektionaler DC/DC-Wandler [47]	27
Abbildung 2.12: Aufbau eines einphasigen Zwei-Level-Dual-Active-Bridge-Wandlers (a) und eines dreiphasigen Zwei-Level-Dual-Active-Bridge-Wandlers (b)	28
Abbildung 2.13: Stations- und Leitungskonzepte für Gleichspannungsnetze	32

Abbildung 2.14: Mögliche Kurzschlussarten des asymmetrisch monopolen Netzkonzepts mit metallischer Rückleitung (a) und des symmetrischen monopolen Netzkonzepts (b)	44
Abbildung 2.15: Exemplarische Stromverteilungen bei Kurzschlüssen auf einer Sammelschiene	46
Abbildung 2.16: Exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag mit zugehörigem Spannungsverlauf eines Kondensators	48
Abbildung 2.17: Exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag einer Leitung	49
Abbildung 2.18: Exemplarischer DC-Kurzschlussstrombeitrag eines Zwei-Level-Umrichters mit zugehörigem Spannungsverlauf am AC-Verknüpfungspunkt	50
Abbildung 2.19: Exemplarischer DC-Kurzschlussstrombeitrag eines MMC mit HBSM	52
Abbildung 2.20: Exemplarischer DC-Kurzschlussstrombeitrag eines MMC mit VBSM (a) und Strom-Spannungs-Kennlinie eines MMC mit VBSM (b)	53
Abbildung 2.21: Exemplarischer Kurzschlussstrombeitrag eines Vollbrückenwandlers bei einem eingangsseitigen Kurzschluss (a) und einem ausgangsseitigen Kurzschluss (b)	56
Abbildung 2.22: Kurzschlussstrombeitrag (a) und stationäre Strom-Spannungs-Kennlinie (b) eines DAB-Wandlers	57
Abbildung 2.23: Temperaturabhängigkeit (links) und Frequenzabhängigkeit (rechts) des Widerstands eines exemplarischen 240 mm ² Kupferleiters	61
Abbildung 3.1: Simulationsmodell für einen Kondensator	64
Abbildung 3.2: Modell eines Kettenglieds ausgeführt als T-Glied	64
Abbildung 3.3: Simulationsmodell für eine Spule	65
Abbildung 3.4: Exemplarisches Simulationsmodell für einen 2L-VSC	67
Abbildung 3.5: Simulationsmodell für Sammelschienen und Abgangsfelder	72
Abbildung 4.1: Herangehensweise zur Abbildung der Kurzschlussstromquellen	74
Abbildung 4.2: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Kondensatoren	76
Abbildung 4.3: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion der Leitungsentladung	79
Abbildung 4.4: Grundlegendes Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Typ 1-Umrichtern	81

Abbildung 4.5: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Umrichterspeisung	82
Abbildung 4.6: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Typ 2-Umrichtern	84
Abbildung 4.7: Ersatzschaltbild zur Ermittlung der Kenngrößen der Näherungsfunktion von Gleichspannungswandlern	88
Abbildung 4.8: Modellierung einer exemplarischen Gleichstrom-Punkt-zu-Punkt-Verbindung.....	90
Abbildung 4.9: Linearisierung der stationären Strom-Spannungs-Kennlinien für die leistungselektronischen Wandler	92
Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau von Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen mit zugehörigen Teilkurzschlussströmen.....	98
Abbildung 5.2: Schematischer Aufbau von Punkt-zu-Punkt-Gleichstromverbindungen mit zugehörigen stromführenden Betriebsmitteln.....	104
Abbildung 5.3: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 64 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC (ohne KSS-Begrenzer)	105
Abbildung 5.4: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 64 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC mit Korrekturfaktoren (ohne KSS-Begrenzer)	106
Abbildung 5.5: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 40 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC mit Kurzschlussstrombegrenzer (mit Korrekturfaktor).....	107
Abbildung 5.6: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 70 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Mittelspannung	108
Abbildung 5.7: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 70 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Mittelspannung mit Korrekturfaktor	109
Abbildung 5.8: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 42 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Niederspannung mit Korrekturfaktor	110
Abbildung 5.9: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit Kurzschlussdetektion und einem stationären Kurzschlussstrombeitrag in Höhe des Nennstroms der Umrichter).....	111
Abbildung 5.10: Bandbreite der absoluten Abweichung für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit Kurzschlussdetektion und	

einem stationären Kurzschlussstrombeitrag in Höhe des Nennstroms der Umrichter)	112
Abbildung 5.11: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für über 70 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit einem stationären Kurzschlussstrombeitrag in Höhe des Nennstroms der Umrichter)	113
Abbildung 5.12: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für über 80 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM (mit einem stationären Kurzschlussstrombeitrag kleiner als der Nennstrom des Umrichters)	114
Abbildung 5.13: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 93 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB (ohne KSS-Begrenzer)	115
Abbildung 5.14: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 93 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB mit Korrekturfaktoren (ohne KSS-Begrenzer)	116
Abbildung 5.15: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 48 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB mit Kurzschlussstrombegrenzer (mit Korrekturfaktor)	117
Abbildung 5.16: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 64 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC mit VBSM im AMN	119
Abbildung 5.17: Zugehörige Bandbreite der absoluten Abweichungen	119
Abbildung 5.18: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Mittelspannungsgleichstromnetzes	120
Abbildung 5.19: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Mittelspannungsgleichstromnetzes	121
Abbildung 5.20: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes	122
Abbildung 5.21: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 13-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes	123
Abbildung 5.22: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes	124
Abbildung 5.23: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes	125
Abbildung 5.24: Schematischer Aufbau der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes	126

Abbildung 5.25: Exemplarische Ergebnisse der untersuchten Ausgestaltung eines 14-Knoten-Niederspannungsgleichstromnetzes 127

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anhaltspunkte der Schaltelementgrenzwerte nach [40] (<i>IDC</i> : permanenter Gleichstrom, <i>toff</i> : Ausschaltdauer, <i>ITQM</i> : maximal abschaltbarer Strom, <i>I_{AV}</i> : Mittelwert).....	16
Tabelle 2:	Übersicht üblicher VSC-Topologien	19
Tabelle 3:	Übersicht klassischer Gleichspannungswandlertopologien	25
Tabelle 4:	Klassifizierung der Umrichtertopologien entsprechend ihres Verhaltens während eines gleichstromseitigen Kurzschlusses	54
Tabelle 5:	Klassifizierung der Gleichspannungswandlertopologien entsprechend ihres Verhaltens während eines ein- bzw. ausgangseitigen Kurzschlusses.....	58
Tabelle 6:	Übersicht über die netzexternen Kurzschlussstromquellen	59
Tabelle 7:	Bewertungsschema für die Bewertungskenngrößen der Untersuchung der ersten spezifischen Frage	98
Tabelle 8:	Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 1-Umrichtern.....	99
Tabelle 9:	Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 2-Umrichtern.....	99
Tabelle 10:	Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 3-Umrichtern.....	100
Tabelle 11:	Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Gleichspannungswandlern	100

Tabelle 12: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 3-Umrichtern (AMN, *K2UNE*) ... 101

Tabelle 13: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 3-Umrichtern (AMN, *K2UN*) 102

Tabelle 14: Bewertungsschema für die Bewertungskenngrößen der Untersuchung der zweiten spezifischen Frage 103

10 Veröffentlichungen

Bleilevens R.; Moser A., *Identifikation auslegungsrelevanter Kurzschlüsse in Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen*, 16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria

Bleilevens R.; Moser A., *Identification of Required Converter Models for a Simplified Short Circuit Current Calculation of DC Distribution Grids*, 54th International Universities Power Engineering Conference, September 2019, Bucharest.

Bleilevens R.; Priebe, J.; Wehbring, N.; Moser A., *Reliability Analysis of DC Distribution Grids*, 54th International Universities Power Engineering Conference, September 2019, Bucharest.

Bleilevens R.; Jaschek A. M.; Moser A., *Approximation of Current Contribution by Converters with DC Fault Ride-Through Capability for Short Circuit Current Calculation of DC Distribution Grids*, 2019 IEEE Milan PowerTech, June 2019, Milan.

Bleilevens R.; Moser A., *Algebraic Modelling of Converters without DC Fault Ride-Through Capability for Short Circuit Current Calculation of DC Distribution Grids*, 53rd International Universities Power Engineering Conference, September 2018, Glasgow.

Wehbring, N.; Bleilevens R.; Tepase, B.; Priebe, J.; Moser A., *Strategies to convert AC into DC Medium Voltage Grids*, 53rd International Universities Power Engineering Conference, September 2018, Glasgow.

Bleilevens R.; Priebe, J.; Wehbring, N.; Moser A., *Identification of Relevant Fault Types for Grid Planning of DC Distribution Grids*, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems (NEIS 2018), September 2018, Hamburg.

11 Studentische Arbeiten

Die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten sind während der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens durchgeführt worden und haben in großem Maße zu dem Ergebnis der Arbeit beigetragen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Studentinnen und Studenten für ihren wertvollen Beitrag bedanken.

Kai Uwe Hinrichsen, *Bewertung des Einsatzes eines Gleichstromhaushaltsnetzes unter Berücksichtigung von PV-Anlagen, Batteriesystemen und Elektromobilität*, Bachelorarbeit, 2020

Maximilian Dickmeis, *Bewertung des Einsatzes einer DC-Stromverteilung innerhalb von Haushalten*, Bachelorarbeit, 2019

Florian Andresen, *Herleitung eines Modells zur Bestimmung des Kurzschlussstrombeitrags von Dual-Active-Bridge DC/DC-Wandlern für die Kurzschlussstromberechnung*, Bachelorarbeit, 2019

Semir Begic, *Analyse des Verhaltens der Erdrückleitung bei Erdfehlern in Verteilungsnetzen auf Basis von Gleichspannung*, Bachelorarbeit, 2018

Bernd Tepsaße, *Aus- und Umbauplanung hybrider AC/DC Verteilnetze*, Masterarbeit, 2017

Michael Krott, *Modellierung des Verhaltens von Gleichspannungswandlern bei Kurzschlüssen auf der Gleichstromseite*, Bachelorarbeit, 2017

Alexander Maximilian Jaschek, *Modellierung von Umrichtern mit strombegrenzenden Verhalten bei Kurzschlüssen auf der Gleichstromseite*, Bachelorarbeit, 2017

Yves Valdes Tsakem Jeugo, *Analyse von internen Fehlern in Betriebsmitteln zur Kopplung von AC- und DC-Netzen*, Bachelorarbeit, 2017

Lukas Timmermanns, *Analyse aktueller Kurzschlussberechnungsverfahren zur Bestimmung relevanter Kurzschlussströme in Verteilnetzen*, Bachelorarbeit, 2017

Jonas Cappenberg, *Analytische Modellierung des Verhaltens von Umrichtern bei Kurzschlüssen auf der Gleichstromseite*, Bachelorarbeit, 2017

Tim Püttner, *Analyse des Kurzschlussverhaltens in neuartigen Verteilnetzen unter Berücksichtigung von innovativer Gleichstromtechnologie*, Bachelorarbeit, 2016

Natalia Alkemper, *Analyse erforderlicher Schutzkonzepte für innovative Verteilnetze auf Basis von Gleichspannung*, Bachelorarbeit, 2016

A ANHANG ZUR ANALYSE

A.2 Definition elektrisch naher und ferner netzexterner Kurzschlussstromquellen

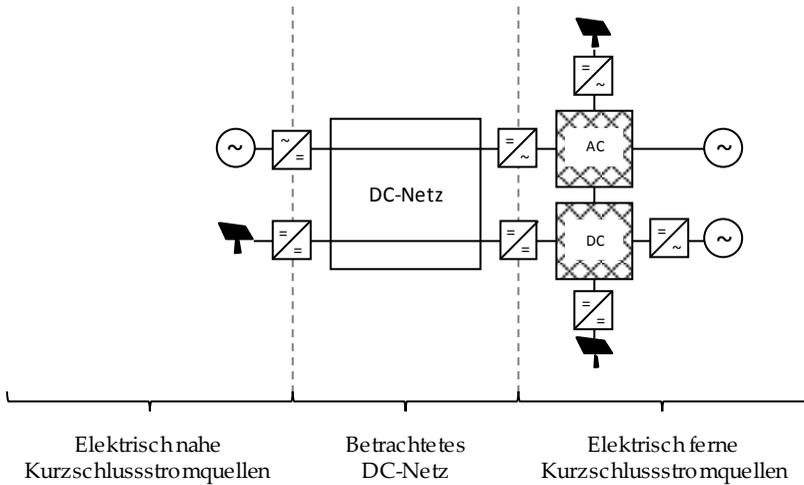


Abbildung A.2: Schematische Darstellung der Definition elektrisch naher und elektrisch ferner netzexterner Kurzschlussstromquellen

B ANHANG ZUR TRANSIENTEN VERGLEICHSCHEUNUNG

B.1 Parameter des Kondensatormodells

Formelzeichen	Beschreibung
C	Kapazität des Kondensators
R_i	Innenwiderstand des Kondensators
L_i	Inneninduktivität des Kondensators
R_{iso}	Widerstand der Isolation zwischen den Polen des Kondensators

Tabelle B.1:
satormodell

Erläuterung der Formelzeichen/Parameter des dynamischen Kondensatormodell

Typ	U_N [kV]	C [mF]	R_i [mΩ]	L_i [mH]	R_{iso} [MΩ]	Quelle
E57.A40-504010	1,25	0,5	0,4	30	k.A.	[123]
E50.U52-135F50	1,2	1,3	0,4	120	k.A.	[123]
E50.U52-134F70	3,6	0,132	0,37	120	k.A.	[123]
E57.A12-7040XX	3,0	0,7	0,38	<40	k.A.	[123]
TRAFIM	1,8 - 6,0	0,1 - 11	0,32 - 1,39	24 - 149	k.A.	[122]
WIMA SMD-PET	0,1 - 1	0,01 - 6,8	k.A.	k.A.	10 - 100000	[121]

Tabelle B.2: Typische Werte der Parameter von Leistungskondensatoren

B.2 Parameter des Leitungsmodells

Formelzeichen	Beschreibung
R'	Widerstandsbelag der Leitung
L'	Induktivitätsbelag der Leitung
C'_E	Erdkapazitätsbelag der Leitung
C'_k	Koppelkapazitätsbelag der Leitung
G'_E	Erdableitbelag der Leitung
G'_k	Koppelableitwert der Leitung
Δx	Länge eines Kettenglieds

Tabelle B.3: Erläuterung der Formelzeichen/Parameter des dynamischen Leitungsmodells

Da keine Daten hinsichtlich Gleichstromleitungen für Mittel- und Niederspannungsgleichstromsysteme aktuell verfügbar sind, wurden Daten von Drehstromleitungen als Ausgangslage herangezogen. Recherchierte Daten zu den Parametern von Drehstromleitungen sind in Tabelle B.4 aufgelistet.

Typ	U_N [kV]	R' [Ω /km]	L' [mH/km]	C'_E [nF/km]	C'_K [nF/km]	G'_E [nS/km]	G'_K [nS/km]	Quelle
N2XSy 12/20 (1x35/16)	20	0,524	0,74	160	-	170	-	[126, 127]
NA2XS(F)2Y 12/20 (1x1200/16)	20	0,0247	0,28	580	-	410	-	[126, 127]
NA2XSy 6/10 (1x35/16)	10	0,868	0,74	220	-	240	-	[126, 127]
N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	10	0,037	0,28	610	-	620	-	[126, 127]
N(A)KBA 6/10 (3x120/16)	10	K.A.	K.A.	410	50-	K.A.	K.A.	[125]
GKN (1x150/50)	0,4	0,124	0,255	480	-	K.A.	-	[124]
GKN (3x50/50)	0,4	0,387	0,22	~400	~90	K.A.	K.A.	[124, 125]

Tabelle B.4: Typische Werte der Parameter von Drehstromkabeln als Anhaltspunkt für Gleichstromkabel

B.3 Ermittlung der notwendigen Anzahl an Kettengliedern von Leitungen

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung der notwendigen, minimalen Anzahl an Kettengliedern für das Gleichstromleitungsmodell der transienten Kurzschlussstromberechnung.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung der notwendigen Anzahl an Kettengliedern des dynamischen Gleichstromleitungsmodells wurde der Einfluss der Anzahl an Kettengliedern auf Kurzschlussströme untersucht. Dazu wurde der Kurzschlussstrombeitrag einer Leitung, aber auch die Übertragung des Kurzschlussstroms über eine Leitung für verschiedene Anzahlen an Kettenglieder bei gleichbleibender Leitungslänge verglichen. Als Vergleichsgrößen wurden die Abweichung des Stoßkurzschlussstroms, die Abweichung des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms aber auch der RMSE zu einer Referenz herangezogen. Als Referenz wurde das Ergebnis einer Berechnung mit dem Leitungsmodell entsprechend Kapitel 3.2 mit einer Länge eines Kettenglieds von $\Delta x = 1 \text{ m}$ verwendet. Diese Referenz stellt zwar nicht die bestmögliche Lösung dar, sollte für die Ermittlung der notwendigen Anzahl an Kettengliedern jedoch ausreichen.

Ergebnisse:

Exemplarisch ermittelte Vergleichsgrößen von drei verschiedenen Leitungen mit einer Länge von 5 km sind in Abbildung B.1 dargestellt. Zusätzlich sind exemplarische Vergleichsgrößen für Leitungen mit einer Länge von 1 km (Abbildung B.2) und $0,2 \text{ km}$ (Abbildung B.3) dargestellt. Darüber hinaus ist ein exemplarischer Vergleich der Kurzschlussstromverläufe des Leitungstypen N2XS2Y 1x500/35 bei einer Leitungslänge von 5 km zur Einschätzung der dargestellten RMSE in Abbildung B.4 dargestellt.

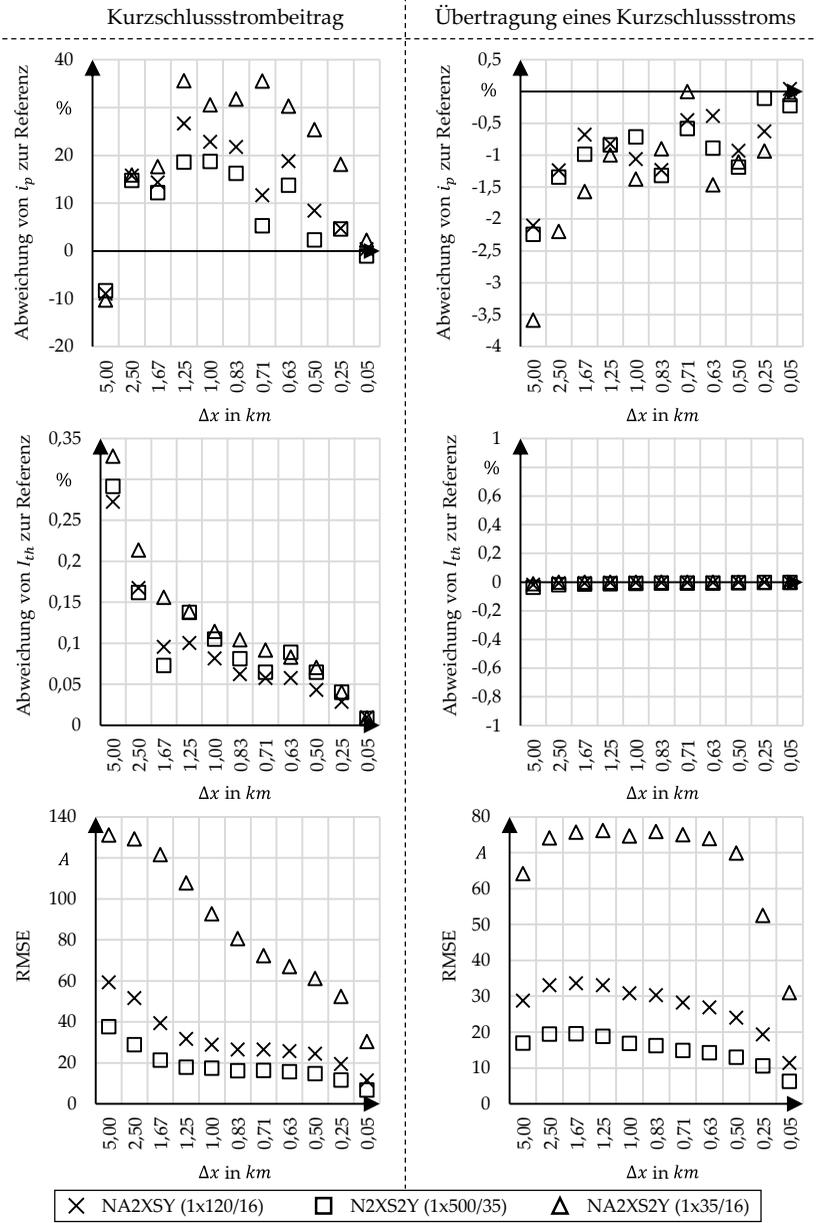


Abbildung B.1: Ergebnisse der Untersuchung von Leitungen mit einer Länge von 5 km

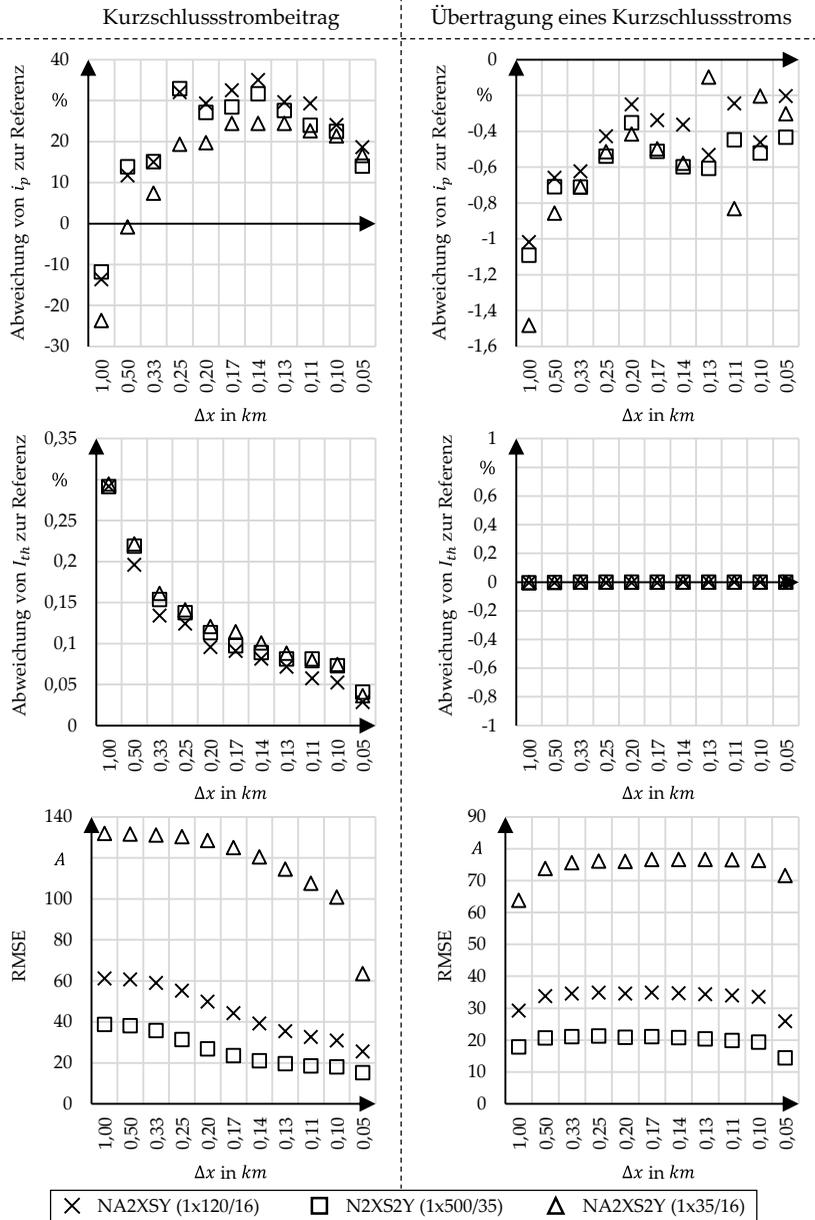


Abbildung B.2: Ergebnisse der Untersuchung von Leitungen mit einer Länge von 1 km

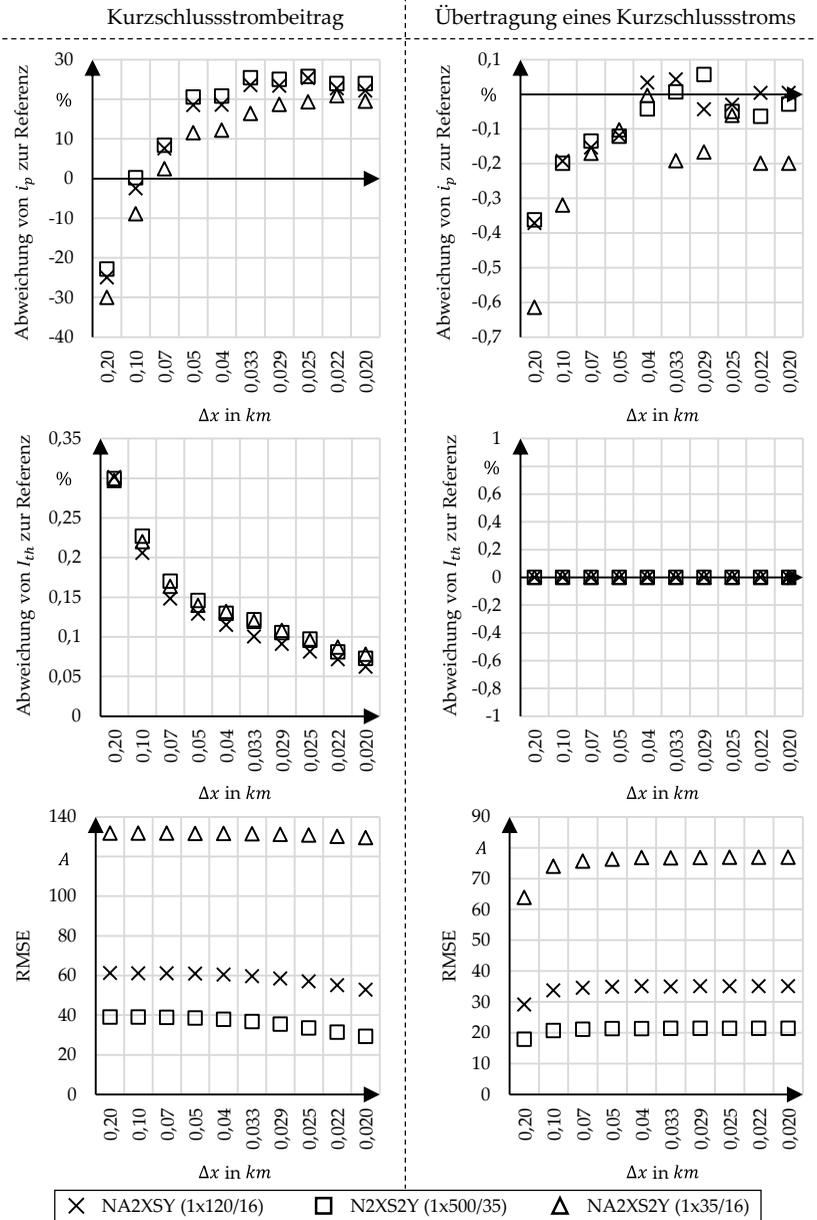


Abbildung B.3: Ergebnisse der Untersuchung von Leitungen mit einer Länge von 0,2 km

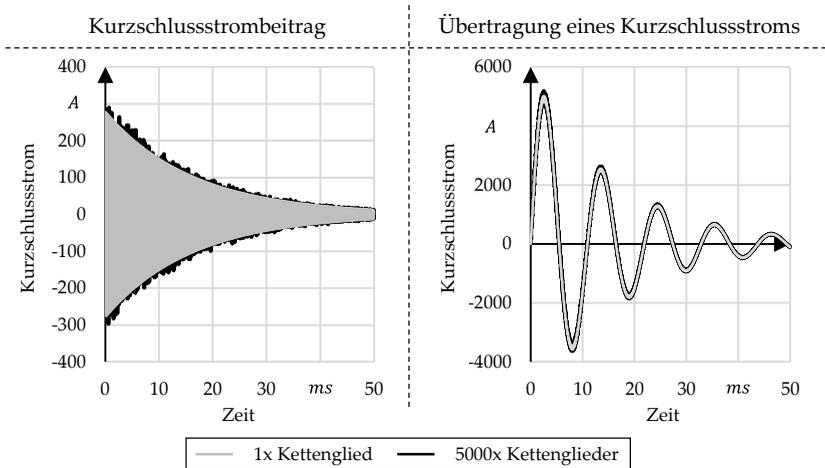


Abbildung B.4: Gegenüberstellung der simulierten Stromverläufe einer Leitung (N2XS2Y 1x500/35) mit einer Länge von 5 km zur Einschätzung des RMSE

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung eines einzigen Kettenglieds zu einer deutlichen Unterschätzung des Stoßkurzschlussstroms sowohl für den Strombeitrag einer Leitung als auch für einen übertragenen Kurzschlussstrom führen kann. Zusätzlich kann bezüglich des Stoßkurzschlussstroms festgestellt werden, dass erst sehr kleine Δx zu einer sehr geringen Abweichung führen, wobei der Stoßkurzschlussstrom des Kurzschlussstrombeitrags der Leitung eher deutlich überschätzt und der Stoßkurzschlussstrom der Kurzschlussstromübertragung im geringen Maße unterschätzt wird. Hinsichtlich des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms und der RMSE ist zu erkennen, dass im betrachteten Bereich der Δx die Reduktion des Δx keinen wesentlichen Einfluss auf den thermisch äquivalenten Kurzzeitstrom und den RMSE hat.

Fazit:

Auf Basis der ermittelten Ergebnisse kann festgehalten werden, dass zur möglichst detaillierten Berechnung mittels des in Kapitel 3.2 vorgestellten Modells ein möglichst kleines Δx verwendet werden sollte. Zusätzlich sollten mindestens zwei Kettenglieder zur Abbildung einer Leitung verwendet werden. Aufgrund des exponentiellen Anstiegs der Rechenzeit bei der Nutzung von kleinen Δx erscheint für die transiente Vergleichsrechnung zur Reduktion der Rechenzeit die Verwendung von zwei Kettengliedern zur Abbildung des Verhaltens im Kurzschlussfall einer Gleichstromleitung als ausreichende Abschätzung.

B.4 Parameter des Spulenmodells

Formelzeichen	Beschreibung
$L_{i,1}$	Hauptinduktivität der Spule
$L_{i,2}$	Nebeninduktivität der Spule zur Definition einer Resonanzstelle der Impedanz im hochfrequenten Bereich
R_i	Widerstand der Wicklungen (Innenwiderstand) der Spule
C_w	Zusammengefasste Wicklungskapazität
R_w	Widerstand zur Definition des hochfrequenten Verhaltens
R_p	Parallelwiderstand, zur Berücksichtigung, dass die Hochfrequenzverluste im Kern und in der Wicklung die Güte des Schwingkreises reduzieren

Tabelle B.5: Erläuterung der Formelzeichen/Parameter des dynamischen Spulenmodells nach [105]

Aufgrund der Tatsache, dass Hochleistungsspulen ähnlich wie Hochleistungstransformatoren kundenspezifisch angefertigt und die Parameter im Wesentlichen durch das Design bestimmt und beeinflusst werden [105], sind wenig belastbare Daten hinsichtlich der aufgeführten Parameter öffentlich verfügbar. Die wenigen belastbaren, recherchierten Daten sind in Tabelle B.6 aufgelistet.

Typ	U_N [kV]	$L_{i,1}$ [mH]	$L_{i,2}$ [mH]	R_i [Ω]	C [pH]	R_w [kΩ]	R_p [MΩ]	Quelle
k.A.	k.A.	10	0,1	2	40	0,5	0,2	[105]

Tabelle B.6: Typische Werte der Parameter des Spulenmodells nach [105]

B.5 Parameter des Umrichterregelung

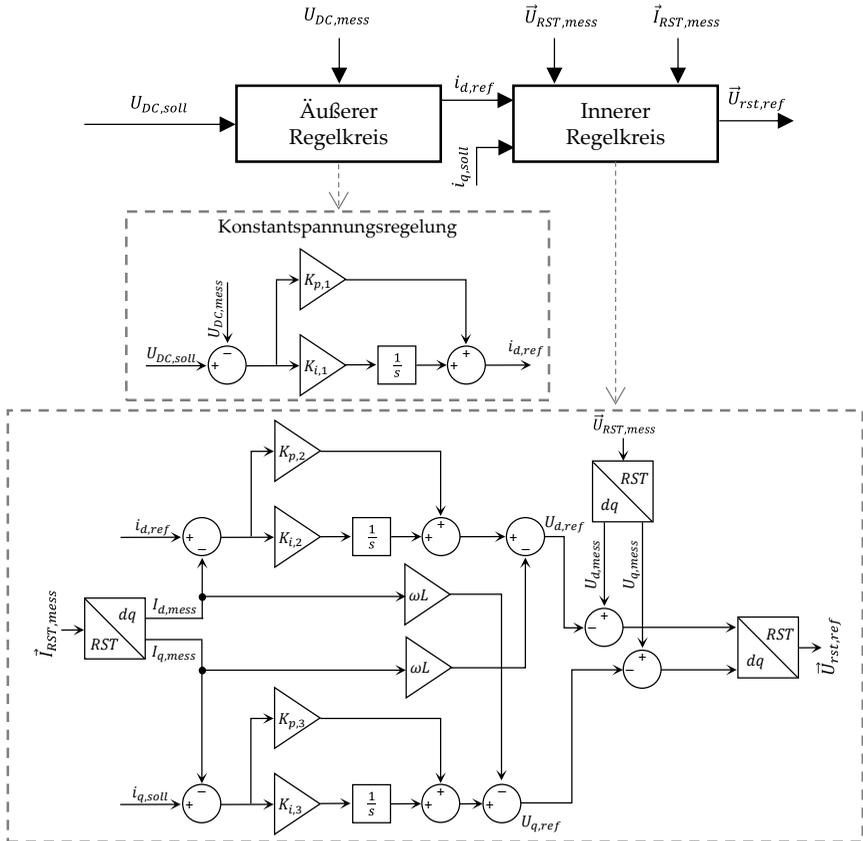


Abbildung B.5: Simulationsmodell für den Konstant-Spannungsmodus der verwendeten Umrichterregelung

Formelzeichen	Beschreibung
$K_{p,1}$	Multiplikationsfaktor des Proportionalglieds der äußeren Spannungsregelung
$K_{i,1}$	Multiplikationsfaktor des Integratorglieds der äußeren Spannungsregelung
$K_{p,2}$	Multiplikationsfaktor des Proportionalglieds der inneren Stromregelung des d-Anteils
$K_{i,2}$	Multiplikationsfaktor des Integratorglieds der inneren Stromregelung des d-Anteils
$K_{p,3}$	Multiplikationsfaktor des Proportionalglieds der inneren Stromregelung des q-Anteils
$K_{i,3}$	Multiplikationsfaktor des Integratorglieds der inneren Stromregelung des q-Anteils
L	Induktivität der AC-seitigen Spule

Tabelle B.7: Erläuterung der Formelzeichen/Parameter des Modells der Umrichterregelung

$K_{p,1}$	$K_{i,1}$	$K_{p,2}$	$K_{i,2}$	$K_{p,3}$	$K_{i,3}$	Quelle
0,27	16,11	33,3	666,7	33,3	666,7	[45]
k.A.	k.A.	5,6	311	5,6	311	[128]

Tabelle B.8: Typische Werte der Parameter der Umrichterregelung

B.6 Parameter des Modells für Sammelschienen und Abgangsfelder

Formelzeichen	Beschreibung
R_{SS}	Widerstand eines Sammelschienenabschnittes zwischen zwei Abgangsfeldern
L_{SS}	Induktivität eines Sammelschienenabschnittes zwischen zwei Abgangsfeldern
R_{AF}	Widerstand eines Abgangsfeldes
L_{AF}	Induktivität eines Abgangsfeldes

Tabelle B.9: Erläuterung der Formelzeichen/Parameter des dynamischen Modells der Sammelschienen und Abgangsfelder

Widerstandsbelag von Sammelschienen $\left[\frac{m\Omega}{m}\right]$	Induktivitätsbelag von Sammelschienen $\left[\frac{nH}{m}\right]$	Quelle
0,871	k.A.	[129]
0,008 – 0,057	ca. 16 - 100	[130]

Tabelle B.10: Typische Werte der Parameter von Sammelschienen

Widerstand von Leistungsschaltern $[\mu\Omega]$	Induktivität von Leistungsschaltern $[nH]$	Quelle
11,0 - 74,1	k.A.	[131]
ca. 50 - 125	k.A.	[132]

Tabelle B.11: Typische Werte der Parameter von Abgangsfeldern

C ANHANG ZUR VEREINFACHTEN
KURZSCHLUSSTROMBERECHNUNG

C.1 Datenbedarf zu netzinternen Kondensatoren

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs bezüglich Kondensatoren für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kondensatoren bestimmt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kondensatoren ermittelt:

- ❖ Kapazität C , Innenwiderstand R_i , Inneninduktivität L_i und Parallelwiderstand R_{iso} des Kondensators
- ❖ Spannungsvorzustand U_0 des Kondensators
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Die Ermittlung des Einflusses erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.1 aufgezeigten dynamischen Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Als Ausgangspunkt dieser Parametervariationen wurden die recherchierten Parameter aus Tabelle B.2 (Anhang B.1) herangezogen. Basierend auf den Bandbreiten der recherchierten Parameter erfolgte die Variation dieser Parameter mit Berücksichtigung einer zusätzlichen Sicherheitsmarge, um eine möglichst gute Aussage hinsichtlich des Einflusses auf den Kurzschlussstrombeitrag gewährleisten zu können. Diese Sicherheitsmarge wurde so gewählt, dass der maximale Wert um ungefähr eine Potenz vergrößert und der minimale Wert um ungefähr eine Potenz verkleinert wird. Darüber hinaus erfolgte die Bewertung des Einflusses der Parameter anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags bei einer Ausschaltzeit T_A von 100 ms.

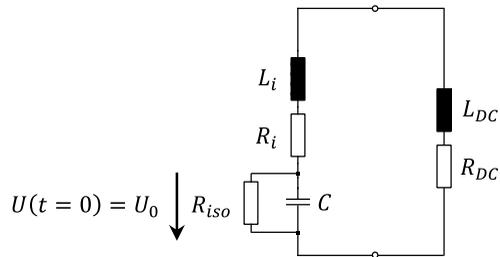


Abbildung C.1: Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen Parameter auf die Kondensatorentladung

Fazit:

Durch die ermittelten Ergebnisse wurde festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag eines netzinternen Kondensators haben:

- ❖ Kapazität C des Kondensators
- ❖ Innenwiderstand R_i des Kondensators
- ❖ Inneninduktivität L_i des Kondensators
- ❖ Spannungsvorzustand U_0 des Kondensators
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.2 Datenbedarf zu Gleichstromleitungen

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs bezüglich Gleichstromleitungen für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag von Gleichstromleitungen bestimmt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag von Gleichstromleitungen ermittelt:

- ❖ Widerstandsbelag R' , Induktivitätsbelag L' , Erdkapazitätsbelag C'_E , Koppelkapazitätsbelag C'_k , Erdableitbelag G'_E und Koppelableitbelag G'_k der Gleichstromleitung
- ❖ Spannungsvorzustände der Kapazitäten $U_{0,E}$ und $U_{0,k}$ der Gleichstromleitung
- ❖ Widerstand R_{Sys} und Induktivität L_{Sys} des übrigen Gleichstromsystems

Die Ermittlung des Einflusses erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.2 aufgezeigten Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Als Ausgangspunkt dieser Parametervariationen wurden die recherchierten Parameter von Drehstromleitungen aus Tabelle B.4 (Anhang B.2) herangezogen. Basierend auf den Bandbreiten der recherchierten Parameter erfolgte die Variation der elektrischen Parameter mit Berücksichtigung einer zusätzlichen Sicherheitsmarge, um eine möglichst gute Aussage hinsichtlich des Einflusses auf den Kurzschlussstrombeitrag gewährleisten zu können. Diese Sicherheitsmarge wurde so gewählt, dass der maximale Wert um ungefähr eine Potenz vergrößert und der minimale Wert um ungefähr eine Potenz verkleinert wird. Darüber hinaus erfolgte die Bewertung des Einflusses der Parameter anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags der Gleichstromleitung bei einer Ausschaltzeit T_A von 50 ms.

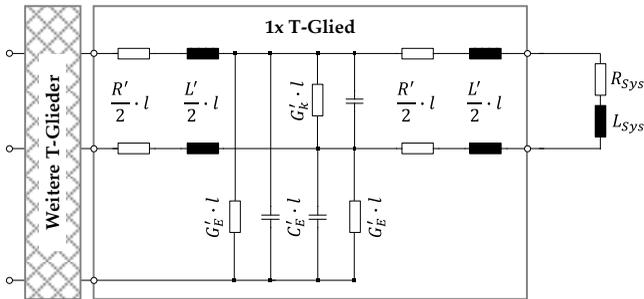


Abbildung C.2: Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen Parameter auf die Entladung von Gleichstromleitungen

Fazit:

Durch die ermittelten Ergebnisse wurde festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag einer Gleichstromleitung haben:

- ❖ Erdkapazitätsbelag C'_E und Koppelkapazitätsbelag C'_k
- ❖ Widerstandsbelag R' und Induktivitätsbelag L'
- ❖ Widerstand R_{Sys} und Induktivität L_{Sys} des Gleichstromsystems
- ❖ Spannungsvorzustände der Kapazitäten $U_{0,E}$ und $U_{0,k}$

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.3 Standardmodelle für Umrichter

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung der minimal notwendigen Anzahl an Modellen zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netz-externen Kurzschlussstromquellen basierend auf Drehstrom angeschlossen über Umrichter.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung der minimal notwendigen Anzahl an Modellen wurde die Klassifizierung der Umrichtertopologien aus Tabelle 4 herangezogen. Darauf aufbauend wurde diese vorgenommene Einteilung der Umrichtertopologien durch transiente Kurzschlussstromberechnungen mit den zugehörigen Umrichtermodellen, die entsprechend Kapitel 3.4.2 umgesetzt worden, überprüft. Diese Überprüfung erfolgte durch den Vergleich der Kurzschlussstrombeiträge von verschiedenen Topologievarianten der Umrichtertopologien einer Typenklasse für vergleichbare Parametervariationen. Dabei wurden für den Vergleich der Kurzschlussstrombeiträge die Kurzschlussstromkenngrößen Stoßkurzschlussstroms i_p und thermisch äquivalenter Kurzzeitstrom I_{th} bei einer Ausschaltzeit T_A von 100 ms herangezogen.

Ergebnisse:

Bezüglich der Überprüfung der Einteilung in Typ 1-Umrichter sind exemplarische Ergebnisse von beispielhaften Typ 1-Umrichtern in Abbildung C.3 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die ermittelten Kurzschlussstromkenngrößen von vier unterschiedlichen Topologievarianten für eine vergleichbare Parametrierung.

Es ist zu erkennen, dass für die verschiedenen Topologievarianten ansatzweise die gleichen Kurzschlussstromkenngrößen ermittelt wurden. Vergleichbare Ergebnisse konnten zudem für weitere Parametrierungen ermittelt werden. Somit wird insgesamt geschlussfolgert, dass die durchgeführte Klassifizierung der Typ 1-Umrichter für eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnung angemessen ist.

Bezüglich der Überprüfung der Einteilung in Typ 2-Umrichter sind exemplarische Ergebnisse von beispielhaften Typ 2-Umrichtern in Abbildung C.4 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die ermittelten Kurzschlussstromkenngrößen von drei unterschiedlichen MMCs mit HBSM, die sind durch die Anzahl der verwendeten Submodule unterscheiden, für eine vergleichbare Parametrierung.

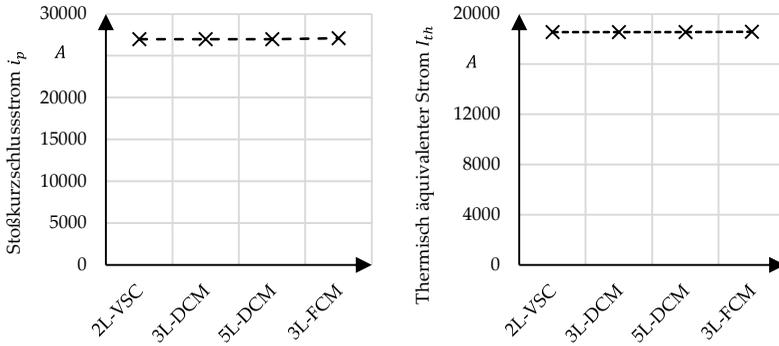


Abbildung C.3: Exemplarischer Vergleich der Kurzschlussstromkenngößen von Typ 1-Umrichtern

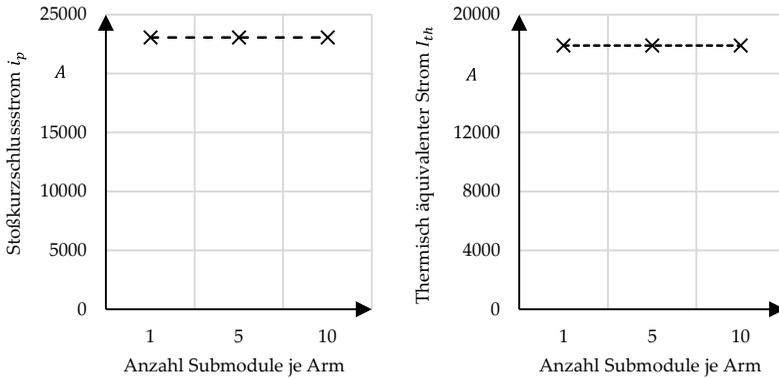


Abbildung C.4: Exemplarischer Vergleich der Kurzschlussstromkenngößen von Typ 2-Umrichtern

Für die unterschiedlichen MMCs mit HBSM wurden ansatzweise die gleichen Kurzschlussstromkenngößen ermittelt. Vergleichbare Ergebnisse konnten zudem für weitere Parametrierungen ermittelt werden. Somit wird insgesamt geschlossen, dass auch die durchgeführte Klassifizierung der Typ 2-Umrichter für eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnung angemessen ist.

Bezüglich der Überprüfung der Einteilung in Typ 3-Umrichtern wurde im Rahmen dieser Voruntersuchungen auf eine transiente Kurzschlussstromberechnung verzichtet, da alle aufgelisteten Umrichtertopologien, die Typ 3 zugeordnet wurden, so ausgelegt werden, dass sie eine DC-FRT-Fähigkeit aufweisen. Dementsprechend ist bereits das Ziel der Auslegung, dass sich diese Umrichtertopologien im Kurzschlussfall ansatzweise identisch verhalten. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Voruntersuchungen keine Notwendigkeit für eine zusätzliche Überprüfung der Einteilung gesehen.

Fazit:

Basierend auf den ermittelten Ergebnissen erscheint die Einteilung entsprechend Tabelle 4 für eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnung angemessen und praktikabel.

C.4 Datenbedarf zu Typ 1-Umrichtern

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs bezüglich Typ 1-Umrichter für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimalen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag drehstrombasierter, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Typ 1-Umrichter bestimmt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer und regelungstechnischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag des Umrichters ermittelt:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , Netzfrequenz f_{AC} , äquivalenter Widerstand R_{AC} und äquivalente Induktivität L_{AC} des Drehstromsystems
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems
- ❖ Widerstand $R_{L,1}$, Widerstand $R_{L,2}$, Widerstand $R_{L,p}$, Induktivität $L_{L,1}$, Induktivität $L_{L,2}$ und Kapazität C_L der Umrichterspulen
- ❖ Kapazität C , Innenwiderstand R_i , Inneninduktivität L_i und Parallelwiderstand R_{iso} des Umrichtercondensators
- ❖ Spannungsvorzustand U_0 des Umrichtercondensators und Stromvorzustand I_0 des Umrichters
- ❖ Proportionalfaktoren $K_{p,1}$, $K_{p,2}$, $K_{p,3}$, Integratorfaktoren $K_{i,1}$, $K_{i,2}$, $K_{i,3}$, Schaltfrequenz f_{sw} und Grenzstrom zur Detektion eines Kurzschlusses I_{max} der Umrichterregelung

Die Ermittlung erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.5 aufgezeigten Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Als Ausgangspunkt der Parametervariationen der regelungstechnischen Parameter wurden die recherchierten Werte aus Tabelle B.8 (Anhang B.5) herangezogen. Zusätzlich werden die netzexternen Kurzschlussstromquellen durch ein starres Drehstromsystem mit Innenimpedanz repräsentiert. Die Bewertung des Einflusses der Parameter erfolgt anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags bei einer Ausschaltzeit T_A von 200 ms.

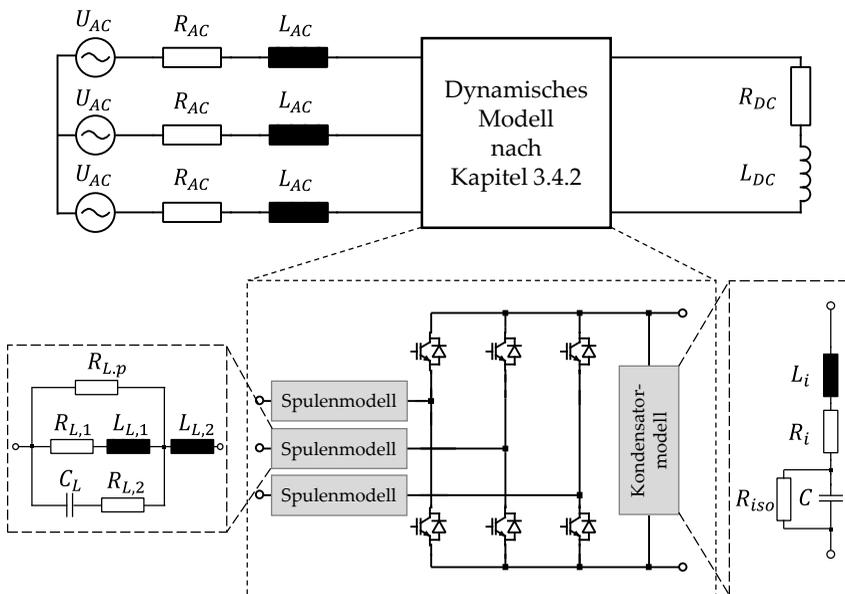


Abbildung C.5: Dynamisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Beitrag von Typ 1-Umrichtern

Fazit:

Es wurde durch die ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag eines Typ 1-Umrichters haben:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , äquivalenter Widerstand R_N und äquivalente Induktivität L_N des Drehstromsystems
- ❖ Widerstand $R_{L,1}$ und Induktivitäten $L_{L,1}$ und $L_{L,2}$ der Umrichterspulen, wobei aufgrund der ermittelten Vernachlässigungen $L_{L,1}$ und $L_{L,2}$ zu L_L zusammengefasst werden
- ❖ Kapazität C , Spannungsvorzustand U_0 , Innenwiderstand R_i und Inneninduktivität L_i des Umrichtercondensators
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.5 Datenbedarf zu Typ 2-Umrichtern

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs bezüglich Typ 2-Umrichter für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimalen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag drehstrombasierter, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Typ 2-Umrichter bestimmt. Dazu wurde der Einfluss folgender Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag des Umrichters ermittelt:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , Netzfrequenz f_{AC} , äquivalenter Widerstand R_{AC} und äquivalente Induktivität L_{AC} des Drehstromsystems
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems
- ❖ Widerstand $R_{L,1}$, Widerstand $R_{L,2}$, Widerstand $R_{L,p}$, Induktivität $L_{L,1}$, Induktivität $L_{L,2}$ und Kapazität C_L der Umrichterspulen
- ❖ Widerstand $R_{a,1}$, Widerstand $R_{a,2}$, Widerstand $R_{a,p}$, Induktivität $L_{a,1}$, Induktivität $L_{a,2}$ und Kapazität C_a der Armspulen
- ❖ Kapazität C_{SM} , Innenwiderstand R_{SM} , Inneninduktivität L_{SM} und Parallelwiderstand R_{SM} der Submodulkondensatoren
- ❖ Stromvorzustand I_0 des Umrichters
- ❖ Proportionalfaktoren $K_{p,1}$, $K_{p,2}$, $K_{p,3}$, Integratorfaktoren $K_{i,1}$, $K_{i,2}$, $K_{i,3}$, Schaltfrequenz f_{sw} und Grenzstrom zur Detektion eines Kurzschlusses I_{max} der Umrichterregelung

Die Ermittlung erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.6 aufgezeigten Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Als Ausgangspunkt der Parametervariationen der regelungstechnischen Parameter wurden die recherchierten Parameter aus Tabelle B.8 (Anhang B.5) herangezogen. Zusätzlich werden die netzexternen Kurzschlussstromquellen durch ein starres Drehstromsystem mit Innenwiderstand repräsentiert. Die Bewertung des Einflusses der Parameter erfolgt anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags bei einer Ausschaltzeit T_A von 200 ms.

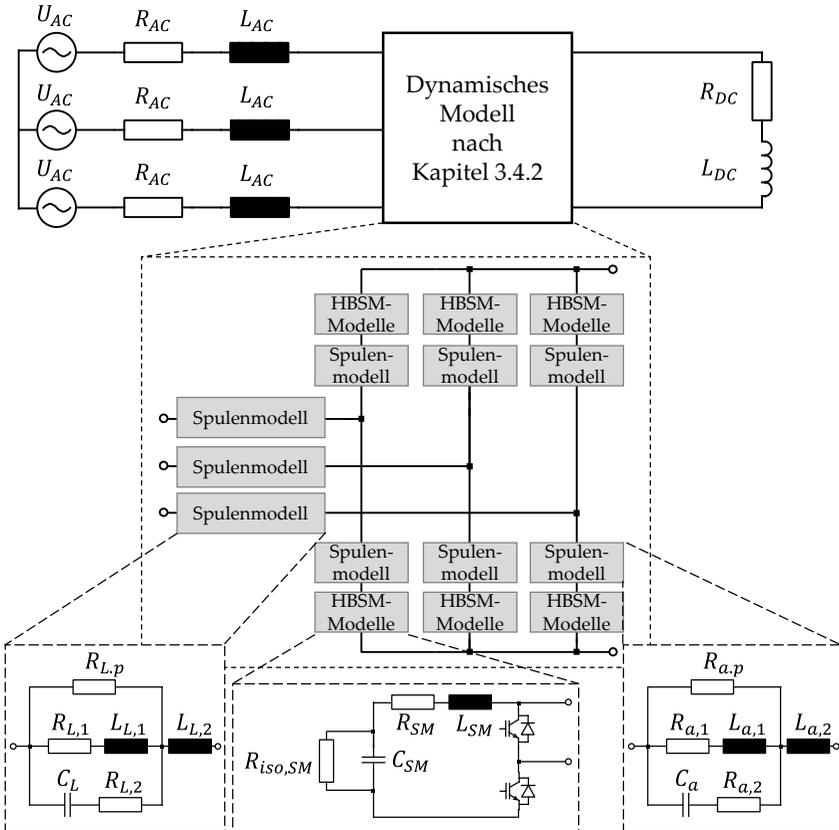


Abbildung C.6: Dynamisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Beitrag von Typ 2-Umrichtern

Fazit:

Es wurde durch die ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag eines Typ 2-Umrichters haben:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , äquivalenter Widerstand R_N und äquivalente Induktivität L_N des Drehstromsystems

- ❖ Widerstand $R_{L,1}$ und Induktivitäten $L_{L,1}$ und $L_{L,2}$ der Umrichterspulen, wobei aufgrund der ermittelten Vernachlässigungen $L_{L,1}$ und $L_{L,2}$ zu L_L zusammengefasst werden
- ❖ Widerstand $R_{a,1}$ und Induktivitäten $L_{a,1}$ und $L_{a,2}$ der Armspulen, wobei aufgrund der ermittelten Vernachlässigungen $L_{a,1}$ und $L_{a,2}$ zu L_a zusammengefasst werden
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.6 Datenbedarf zu Typ 3-Umrichtern

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs bezüglich Typ 3-Umrichtern für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimalen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag drehstrombasierter, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Typ 3-Umrichter bestimmt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer und regelungstechnischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag des Umrichters ermittelt:

- ❖ Betriebsspannung U_{AC} , Netzfrequenz f_{AC} , äquivalenter Widerstand R_{AC} und äquivalente Induktivität L_{AC} des Drehstromsystems
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems
- ❖ Widerstand $R_{L,1}$, Widerstand $R_{L,2}$, Widerstand $R_{L,p}$, Induktivität $L_{L,1}$, Induktivität $L_{L,2}$ und Kapazität C_L der Umrichterspulen
- ❖ Widerstand $R_{a,1}$, Widerstand $R_{a,2}$, Widerstand $R_{a,p}$, Induktivität $L_{a,1}$, Induktivität $L_{a,2}$ und Kapazität C_a der Armospulen
- ❖ Kapazität C_{SM} , Innenwiderstand R_{SM} , Inneninduktivität L_{SM} und Parallelwiderstand R_{SM} der Submodulkondensatoren
- ❖ Stromvorzustand I_0 des Umrichters
- ❖ Proportionalfaktoren $K_{p,1}$, $K_{p,2}$, $K_{p,3}$, Integratorfaktoren $K_{i,1}$, $K_{i,2}$, $K_{i,3}$, Schaltfrequenz f_{sw} , Grenzstrom zur Detektion eines Kurzschlusses I_{max} und der einstellbare stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ der Umrichterregelung

Die Ermittlung erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.7 aufgezeigten Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Als Ausgangspunkt der Parametervariationen der regelungstechnischen Parameter wurden die recherchierten Parameter aus Tabelle B.8 (Anhang B.5) herangezogen. Zusätzlich werden die netzexternen Kurzschlussstromquellen durch ein starres Drehstromsystem mit Innenwiderstand repräsentiert. Die Bewertung des Einflusses der Parameter erfolgt anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und

des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags bei einer Ausschaltzeit T_A von 10 ms.

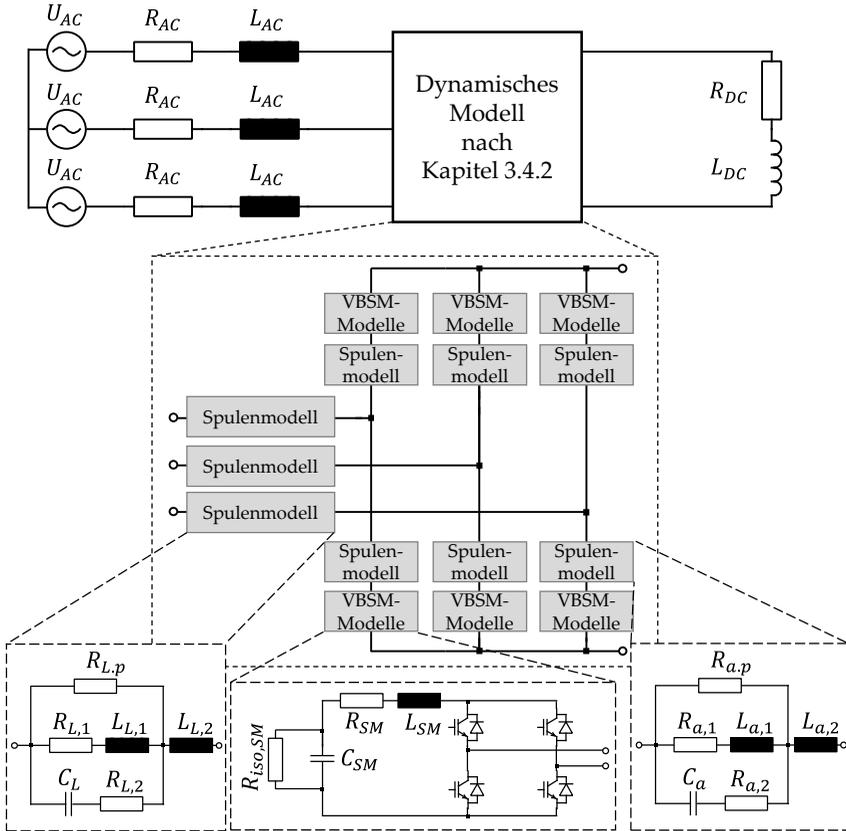


Abbildung C.7: Dynamisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Beitrag von Typ 3-Umrichtern

Fazit:

Es wurde durch die ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag eines Typ 2-Umrichters haben:

- ❖ Abschaltstrom I_{max} und der einstellbare stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ der Umrichterregelung

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung zwingend berücksichtigt werden.

Des Weiteren wurde ermittelt, dass die folgenden Parameter einen geringen und nur in Sonderfällen auftretenden Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag eines Typ 3-Umrichters haben:

- ❖ Widerstand R_a und Induktivität L_a der Armspulen
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des Gleichstromsystems

Somit können diese Parameter ggf. bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden, wobei eine Berücksichtigung nicht erforderlich erscheint.

C.7 Standardmodellen für Gleichspannungswandler

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung der minimal notwendigen Anzahl an Modellen zur Approximation des Kurzschlussstrombeitrags von netz-externen Kurzschlussstromquellen basierend auf Gleichstrom angeschlossen über galvanisch getrennte Gleichspannungswandler.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung der minimal notwendigen Anzahl an Modellen wurde die Klassifizierung der Gleichspannungswandler topologien aus Tabelle 5 herangezogen. Darauf aufbauend wurde diese vorgenommene Einteilung der Gleichspannungswandler topologien durch transiente Kurzschlussstromberechnungen mit den zugehörigen Modellen, die entsprechend Kapitel 3.4.3 umgesetzt worden, überprüft. Diese Überprüfung erfolgte durch den Vergleich der Kurzschlussstrombeiträge von verschiedenen Topologievarianten einer Typenklasse für vergleichbare Parametervariationen. Dabei wurden für den Vergleich der Kurzschlussstrombeiträge die Kurzschlussstromkenngrößen Stoßkurzschlussstroms i_p und thermisch äquivalenter Kurzzeitstrom I_{th} bei einer Ausschaltzeit T_A von 100 ms herangezogen.

Ergebnisse:

Bezüglich der Überprüfung der Einteilung in zwei Typen sind exemplarische Ergebnisse von beispielhaften Gleichspannungswandlern in Abbildung C.8 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die ermittelten Kurzschlussstromkenngrößen von unterschiedlichen Topologievarianten bei einer vergleichbaren Parametrierung.

Es ist zu erkennen, dass für die Typ 1-Gleichspannungswandler (Sperrwandler In¹⁴ 0A, Gegentaktwandler In 0A) ansatzweise die gleichen Kurzschlussstromkenngrößen ermittelt wurden. Darüber hinaus wurden zudem vergleichbare Kurzschlussstromkenngrößen für Typ 2- Gleichspannungswandler (3P-2L-DAB 0A, Sperrwandler Out¹⁵ 0A, Gegentaktwandler Out 0A) ermittelt, bei denen der einstellbare stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ auf 0 A eingestellt wurde. Andere Kurzschlussstromkenngrößen wurden hingegen für Typ 2- Gleichspannungswandler (3P-2L-DAB 500A, Sperrwandler Out¹⁶ 500A) mit einer Parametrierung von $I_{k,inj}$ auf 500 A ermittelt, wobei auch hier festzustellen ist, dass für die

¹⁴ Eingangsseitig

¹⁵ Ausgangsseitig

¹⁶ Ausgangsseitig

unterschiedlichen Typ 2-Gleichspannungswandler ansatzweise die gleichen Kurzschlussstromkenngrößen ermittelt wurden. Weitere ermittelte Ergebnisse für andere Parametrierungen haben einen vergleichbaren Sachverhalt gezeigt.

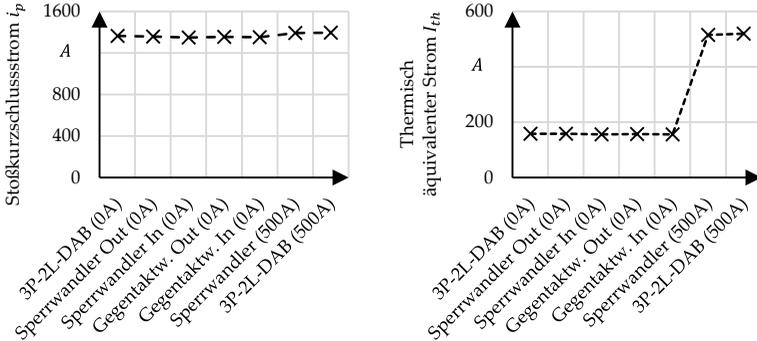


Abbildung C.8: Exemplarischer Vergleich der Kurzschlussstromkenngrößen von unterschiedlichen Gleichspannungswandertopologien

Fazit:

Basierend auf den ermittelten Ergebnissen erscheint eine Einteilung der Gleichspannungswandertopologien entsprechend Tabelle 5 angemessen, wobei ermittelt wurde, dass der Kurzschlussstrombeitrag von beide Typen durch ein gemeinsames Standardmodell approximiert werden kann, da das Verhalten von Typ 1-Gleichspannungswandlern einen Spezialfall des Verhaltens von Typ 2-Gleichspannungswandlern ($I_{k,inj} = 0 A$) darstellt.

C.8 Datenbedarf zu Gleichspannungswandlern

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs bezüglich galvanisch getrennter Gleichspannungswandler für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimalen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag gleichstrombasierter, netzexternen Kurzschlussstromquellen angeschlossen über Gleichspannungswandler bestimmt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer und regelungstechnischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag des Wandlers ermittelt:

- ❖ Betriebsspannung U_{in} , äquivalenter Widerstand R_{in} und äquivalente Induktivität L_{in} des nicht kurzschlussbehafteten Gleichstromsystems
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des kurzschlussbehafteten Gleichstromsystems
- ❖ Kapazität C_i , Innenwiderstand $R_{i,i}$, Inneninduktivität $L_{i,i}$, Parallelwiderstand $R_{iso,i}$ und Spannungsvorzustand $U_{0,i}$ des Kondensators der nicht kurzschlussbehafteten Seite des Gleichspannungswandlers
- ❖ Kapazität C_o , Innenwiderstand $R_{i,o}$, Inneninduktivität $L_{i,o}$, Parallelwiderstand $R_{iso,o}$ und Spannungsvorzustand $U_{0,o}$ des Kondensators der kurzschlussbehafteten Seite des Gleichspannungswandlers
- ❖ Grenzstrom zur Detektion eines Kurzschlusses I_{max} und der einstellbare stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ der Regelung

Die Ermittlung erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.9 aufgezeigten Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Die Bewertung des Einflusses der Parameter erfolgt anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags bei einer Ausschaltzeit T_A von 200 ms.

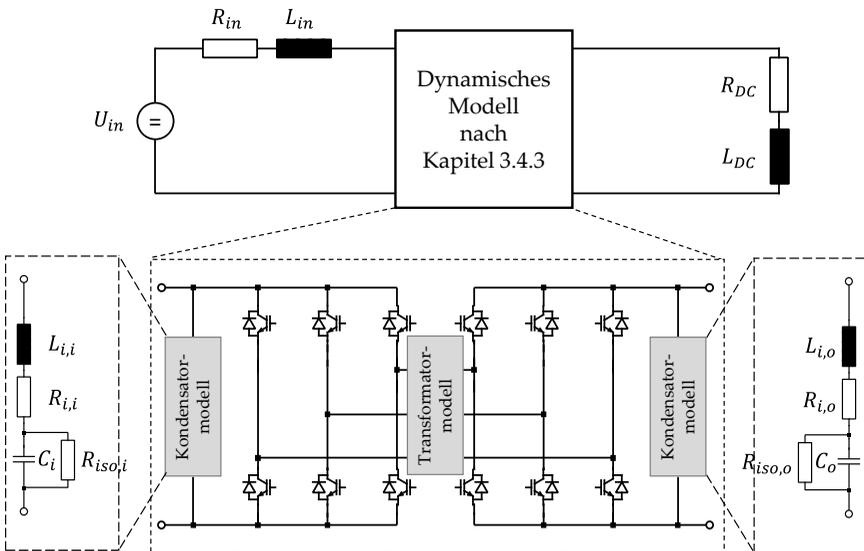


Abbildung C.9: Dynamisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen und regelungstechnischen Parameter auf den Beitrag von Gleichspannungswandlern

Fazit:

Es wurde durch die ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag eines galvanisch getrennten Gleichspannungswandlers haben:

- ❖ Kapazität C_o , Spannungsvorzustand $U_{0,o}$, Innenwiderstand $R_{i,0}$ und Inneninduktivität $L_{i,0}$ des Kondensators der kurzschlussbehafteten Seite des Gleichspannungswandlers
- ❖ Widerstand R_{DC} und Induktivität L_{DC} des kurzschlussbehafteten Gleichstromsystems
- ❖ Der einstellbare stationäre Kurzschlussstrombeitrag $I_{k,inj}$ der Regelung

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.9 Datenbedarf zu Sammelschienen und Abgangsfeldern

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des notwendigen Datenbedarfs von Sammelschienen und Abgangsfeldern für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen Parameter dieser Betriebsmittel auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen ermittelt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen ermittelt:

- ❖ Widerstand R_{AF} und Induktivität L_{AF} von Abgangsfeldern
- ❖ Widerstand R_{SS} und Induktivität L_{SS} von Sammelschienenabschnitten

Im Rahmen dieser Voruntersuchungen wurde als Kurzschlussstromquelle exemplarisch ein Drehstromnetz angeschlossen über einen Zwei-Level-Umrichters (2L-VSC) betrachtet. Die Ermittlung des Datenbedarfs erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.10 aufgezeigten dynamischen Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen. Dieses Modell stellt einen umrichternahen Kurzschluss direkt hinter dem zweiten Abgangsfeld dar. Als Ausgangspunkt dieser Parametervariationen der elektrischen Parameter wurden die recherchierten Parameter aus Tabelle B.10 und Tabelle B.11 (siehe Anhang B.6) herangezogen. Als Modell für den 2L-VSC wurde das vorgestellte Modell aus Abbildung C.5 verwendet, wobei von einem Umrichter Kondensator mit $R_i = 0,4 \mu\Omega$ und $L_i = 120 nH$ entsprechend Tabelle B.2 ausgegangen wurde. Die Bewertung des Einflusses der Parameter erfolgt anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} des Kurzschlussstrombeitrags.

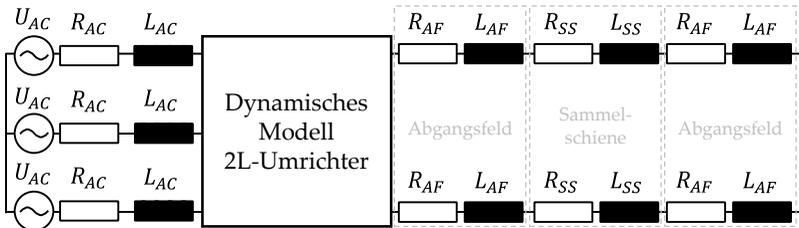


Abbildung C.10: Dynamisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen Parameter von Sammelschienen und Abgangsfeldern auf den Kurzschlussstrom

Fazit:

Es wurde durch die ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass die folgenden Parameter einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen haben können:

- ❖ Widerstand R_{AF} und Induktivität L_{AF}
- ❖ Widerstand R_{SS} und Induktivität L_{SS}

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.10 Datenbedarf zu Kurzschlussstrombegrenzern

Ziel:

Das Ziel dieser Voruntersuchungen ist die Ermittlung des notwendigen Datenbedarfs von Kurzschlussstrombegrenzern für die vereinfachte Kurzschlussstromberechnung von Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetzen.

Methodisches Vorgehen:

Zur Ermittlung des minimal notwendigen Datenbedarfs wurde die Relevanz der elektrischen Parameter dieser Betriebsmittel auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen ermittelt. Dazu wurde der Einfluss folgender elektrischer Parameter auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen ermittelt:

- ❖ Widerstand R_L , Widerstand R_w , Widerstand R_p , Induktivität $L_{L,1}$, Induktivität $L_{L,2}$ und Kapazität C_w der Spulen

Im Rahmen dieser Voruntersuchungen wurde als Kurzschlussstromquelle exemplarisch ein netzinterner Kondensator betrachtet, da Kurzschlussstrombegrenzer im Wesentlichen die Aufgabe haben den Stoßkurzschlussstrom, in der Regel hervorgerufen durch die Kondensatorentladung, zu begrenzen. Die Ermittlung des Datenbedarfs erfolgte dabei mithilfe des in Abbildung C.11 aufgezeigten dynamischen Modells durch eine Vielzahl numerischer Simulationen mit verschiedenen Parametervariationen.

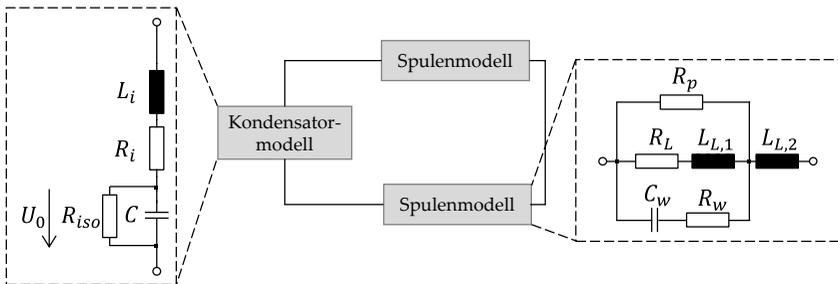


Abbildung C.11: Dynamisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen Parameter von Kurzschlussstrombegrenzern auf einen Kurzschlussstrom

Dieses Modell stellt einen kondensatornahen Kurzschluss direkt hinter den Kurzschlussstrombegrenzern dar. Als Ausgangspunkt dieser Parametervariationen der elektrischen Parameter wurden die recherchierten Parameter aus Tabelle B.6

(siehe Anhang B.4) herangezogen. Für den netzinternen Kondensator wurde $C = 1 \text{ mF}$, $R_i = 0,4 \mu\Omega$, $L_i = 120 \text{ nH}$ und $R_{iso} = 100 \text{ M}\Omega$ entsprechend Tabelle B.2 verwendet. Die Bewertung des Einflusses der Parameter erfolgt anhand des Stoßkurzschlussstroms i_p und des thermisch äquivalenten Kurzzeitstroms I_{th} (100 ms) des Kurzschlussstrombeitrags.

Fazit:

Es wurde durch die ermittelten Ergebnisse festgestellt, dass die folgenden Parameter eines Kurzschlussstrombegrenzers einen relevanten Einfluss auf den Kurzschlussstrombeitrag von Kurzschlussstromquellen haben können:

- ❖ Widerstand R_L
- ❖ Induktivitäten $L_{L,1}$ und $L_{L,2}$, wobei aufgrund der ermittelten Vernachlässigungen $L_{L,1}$ und $L_{L,2}$ zu L_L zusammengefasst werden

Aus diesem Grund sollten diese Parameter bei der vereinfachten Kurzschlussstromberechnung berücksichtigt werden.

C.11 Bestimmung der Thévenin-Äquivalente für das iterative Verfahren aus Kapitel 4.2.5

Nachfolgend wird die Bestimmung der entsprechenden Thévenin-Äquivalente für das vorgestellte iterative Verfahren zur Abschätzung der stationären Kurzschlussstrombeiträge von netzexternen Kurzschlussstromquellen aus Kapitel 4.2.5 vorgestellt. Dabei erfolgt ebenfalls eine Unterteilung für die ermittelten Standardmodelle.

Die Thévenin-Äquivalente der Linearisierung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Typ 1-Umrichters (siehe Abbildung 4.9) lassen sich entsprechend [31] durch die Formeln (C.1) bis (C.9) bestimmen.

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{N,AC} \quad (C.1)$$

$$I_{d12} = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{U_{d0}}{Z_{AC}} \cdot \frac{\sqrt{6} - 2}{\sqrt{3} - 1} \quad (C.2)$$

$$I_{d23} = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{U_{d0}}{Z_{AC}} \cdot (1 + \sqrt{3}) \cdot (2 - \sqrt{2}) \quad (C.3)$$

$$U_{d1} = U_{d0} \quad , \text{für } I_d < I_{d12} \quad (C.4)$$

$$R_{d1} = \frac{3 \cdot Z_{AC}}{\pi} \quad , \text{für } I_d < I_{d12} \quad (C.5)$$

$$U_{d2} = \sqrt{1,5} \cdot U_{d0} \quad , \text{für } I_{d12} < I_d < I_{d23} \quad (C.6)$$

$$R_{d2} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot Z_{AC}}{\pi} \quad , \text{für } I_{d12} < I_d < I_{d23} \quad (C.7)$$

$$U_{d3} = \sqrt{3} \cdot U_{d0} \quad , \text{für } I_d > I_{d23} \quad (C.8)$$

$$R_{d3} = \frac{9 \cdot Z_{AC}}{\pi} \quad , \text{für } I_d > I_{d23} \quad (C.9)$$

Die Thévenin-Äquivalente der Linearisierung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Typ 2-Umrichters (siehe Abbildung 4.9) lassen sich entsprechend [32] durch die Formeln (C.10) bis (C.26) bestimmen, wobei die Definitionen aus Formel (C.27) bis (C.31) angewendet werden.

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{N,AC} \quad (C.10)$$

$$Z_d = Z_{AC} + Z_{Arm} \quad (C.11)$$

$$k = \frac{Z_{Arm}}{Z_d} \quad (C.12)$$

$$I_{d12} = \frac{\pi}{1200} \cdot \frac{U_{d0}}{Z_d} \cdot \frac{(k + k_1 - 3) \cdot (1 - k) \cdot (6k^2 - 26k + 45)}{k - 2 \cdot k_1 + 3} \quad (C.13)$$

$$I_{d23} = \frac{\pi}{1200} \cdot \frac{U_{d0}}{Z_d} \cdot \frac{(k + k_1 - 3) \cdot (k_2) \cdot (k + 1) + 200 \cdot k_1}{(k - 2 \cdot k_1 + 3) \cdot k_1} \quad (C.14)$$

$$I_{d34} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{d0}}{Z_d} \cdot \frac{k \cdot \sqrt{k^2 - 4k + 7} - \sqrt{3k^2 + 9}}{(k - 3) \cdot (k^2 - 2k + 3)} \quad (C.15)$$

$$I_{d45} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{U_{d0}}{Z_d} \cdot \frac{\sqrt{k^2 - 4k + 7} - (k + 1)}{(k - 1) \cdot (k - 2)} \quad (C.16)$$

$$U_{d1} = U_{d0} \quad , \text{für } I_d < I_{d12} \quad (C.17)$$

$$R_{d1} = \frac{3 \cdot Z_{AC}}{\pi} \quad , \text{für } I_d < I_{d12} \quad (C.18)$$

$$U_{d2} = U_{d0} \cdot k_3 \quad , \text{für } I_{d12} < I_d < I_{d23} \quad (C.19)$$

$$R_{d2} = \frac{9 \cdot Z_{AC}}{\pi} \cdot \frac{k - k_1 + 1}{k + k_1 - 3} \quad , \text{für } I_{d12} < I_d < I_{d23} \quad (C.20)$$

$$U_{d3} = U_{d0} \cdot \frac{k_1}{k + 1} \quad , \text{für } I_{d23} < I_d < I_{d34} \quad (C.21)$$

$$R_{d3} = \frac{3 \cdot Z_{AC}}{\pi} \cdot \frac{3 - k}{k + 1} \quad , \text{für } I_{d23} < I_d < I_{d34} \quad (C.22)$$

$$U_{d4} = U_{d0} \cdot \frac{k}{2} \cdot k_4 \quad , \text{für } I_{d34} < I_d < I_{d45} \quad (C.23)$$

$$R_{d4} = \frac{Z_{AC}}{\pi} \cdot \frac{k \cdot (2 - k) \cdot (3 - k)}{k + 1} \quad , \text{für } I_{d34} < I_d < I_{d45} \quad (C.24)$$

$$U_{d5} = U_{d0} \cdot \frac{k}{\sqrt{3}} \quad , \text{für } I_d \geq I_{d45} \quad (C.25)$$

$$R_{d5} = \frac{Z_{AC}}{\pi} \cdot k \cdot (2 - k) \quad , \text{für } I_d \geq I_{d45} \quad (C.26)$$

$$k_1 = \sqrt{k^2 + 3} \quad (\text{C.27})$$

$$k_2 = 6k^3 - 32k^2 + 71k - 245 \quad (\text{C.28})$$

$$k_3 = -0,03k^3 \pm 0,16k^2 - 0,355k + 1,225 \quad (\text{C.29})$$

$$k_3 = \frac{3-k}{k+1} \cdot \cos(\alpha) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{C.30})$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1+k}{\sqrt{3} \cdot (k-3)} \right) \quad (\text{C.31})$$

Bezüglich der Linearisierung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Typ 3-Umrichters (siehe Abbildung 4.9) wird als Thévenin-Äquivalent eine ideale Stromquelle verwendet. Der Strom der Stromquelle berechnet sich entsprechend Formel (C.32), wobei $I_{k,inj}$ den durch die Umrichterregelung einstellbaren stationären Kurzschlussstrombeitrag darstellt.

$$I_d = I_{k,inj} \quad (\text{C.32})$$

Für die Linearisierung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Typ 1-Gleichspannungswandlers (siehe Abbildung 4.9) wird auf ein Thévenin-Äquivalent verzichtet, da keine stationäre Einspeisung eines Kurzschlussstrombeitrags möglich ist.

Aufgrund derselben Linearisierung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Typ 2-Gleichspannungswandlers wie bei der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Typ 3-Umrichters wird als Thévenin-Äquivalent ebenfalls eine ideale Stromquelle verwendet. Der Strom der Stromquelle berechnet sich somit ebenfalls entsprechend Formel (C.32).

D ANHANG ZU DEN UNTERSUCHUNGEN

D.1 Exemplarische Ergebnisse zu Kapitel 5.2.1.2

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	-0,01%	0,86%	0,86%	0,85%
i_2	-0,01%	0,86%	0,85%	0,85%
i_3	22,93%	-3,73%	-3,51%	-3,14%
i_4	23,45%	-3,73%	-3,52%	-3,15%
i_5	25,81%	-3,72%	-3,51%	-3,13%
i_6	25,81%	-3,72%	-3,51%	-3,13%
i_7	25,81%	-3,72%	-3,51%	-3,13%
i_8	25,81%	-3,72%	-3,51%	-3,13%

Tabelle D.1: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit abschließlicher Nutzung von Typ 1-Umrichtern (AMN, K_{2UN})¹⁷

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	-0,04%	0,85%	0,85%	0,85%
i_2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_3	23,12%	-3,73%	-3,51%	-3,14%
i_4	23,61%	-3,73%	-3,52%	-3,16%
i_5	25,90%	-3,73%	-3,51%	-3,14%
i_6	25,90%	-3,73%	-3,51%	-3,14%
i_7	25,90%	-3,73%	-3,51%	-3,14%
i_8	25,90%	-3,73%	-3,51%	-3,14%

Tabelle D.2: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit abschließlicher Nutzung von Typ 1-Umrichtern (AMN, K_{2UNE})¹⁸

¹⁷ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.9, Nr. 1) entnommen werden

¹⁸ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.9, Nr. 1) entnommen werden

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	4,37%	5,21%	6,10%	8,09%
i_2	4,37%	5,21%	6,10%	8,09%
i_3	-11,90%	-5,22%	-10,95%	-23,95%
i_4	-15,57%	-5,22%	-10,96%	-23,98%
i_5	-2,87%	-5,21%	-10,94%	-23,95%
i_6	-2,87%	-5,21%	-10,94%	-23,95%
i_7	-2,87%	-5,21%	-10,94%	-23,95%
i_8	-2,87%	-5,21%	-10,94%	-23,95%

Tabelle D.3: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 2-Umrichtern (AMN, K_{2UNE})¹⁹

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	4,37%	5,21%	6,10%	8,09%
i_2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_3	-11,90%	-5,22%	-10,95%	-23,95%
i_4	-15,60%	-5,22%	-10,96%	-23,98%
i_5	-2,86%	-5,21%	-10,94%	-23,95%
i_6	-2,86%	-5,21%	-10,94%	-23,95%
i_7	-2,86%	-5,21%	-10,94%	-23,95%
i_8	-2,86%	-5,21%	-10,94%	-23,95%

Tabelle D.4: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit ausschließlicher Nutzung von Typ 2-Umrichtern (AMN, K_{2UNE})²⁰

¹⁹ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.10, Nr. 31) entnommen werden

²⁰ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.10, Nr. 31) entnommen werden

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	-0,01%	0,09%	0,09%	0,09%
i_2	-0,01%	0,09%	0,09%	0,09%
i_3	-5,77%	138,16%	133,35%	108,65%
i_4	-6,56%	138,09%	133,27%	108,56%
i_5	-0,59%	138,64%	133,84%	109,07%
i_6	-0,59%	138,64%	133,84%	109,07%
i_7	-0,59%	138,64%	133,84%	109,07%
i_8	-0,59%	138,64%	133,84%	109,07%

Tabelle D.5: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit abschließlicher Nutzung von Typ 1-Gleichspannungswandlern (AMN, K_{2UN})²¹

Teilkurzschlussstrom	e_p	$e_{th}(200\text{ ms})$	$e_{th}(100\text{ ms})$	$e_{th}(50\text{ ms})$
i_1	-0,02%	-0,02%	-0,02%	-0,02%
i_2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
i_3	-5,87%	138,14%	133,33%	108,63%
i_4	-6,73%	138,05%	133,23%	108,52%
i_5	-0,68%	138,62%	133,82%	109,06%
i_6	-0,68%	138,62%	133,82%	109,06%
i_7	-0,68%	138,62%	133,82%	109,06%
i_8	-0,68%	138,62%	133,82%	109,06%

Tabelle D.6: Ergebnisse einer exemplarischen DC-P2P-Ausgestaltung mit abschließlicher Nutzung von Typ 1-Gleichspannungswandlern (AMN, K_{2UNE})²²

²¹ Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.12, Nr. 2) entnommen werden

²² Technischen Daten können Anhang D.2 (Tabelle D.12, Nr. 2) entnommen werden

D.2 Eingangsdaten der 2-Knoten-Anordnungen

Die Eingangsdaten der untersuchten 2-Knoten-Anordnungen sind in Tabelle D.9 bis Tabelle D.12 aufgelistet. Zusätzlich sind in Tabelle D.7 und Tabelle D.8 die Daten der verwendeten Transformator- und Leitungstypen aufgezeigt.

Name	U_{OS} [kV]	$I_{N,OS}$ [A]	U_{US} [kV]	u_k [%]	$I_{OS,0}$ [kV]	P_{Cu} [kW]	P_{Fe} [kW]
110/16	110	300	16	14	0,16	200	20
110/8	110	300	8	14	0,16	200	20
110/4	110	300	4	14	0,16	200	20
110/2	110	300	2	14	0,16	200	20
110/1	110	300	1	14	0,16	200	20
110/0,6	110	300	0,6	14	0,16	200	20
110/0,4	110	300	0,4	14	0,16	200	20
110/0,2	110	300	0,2	14	0,16	200	20
20/16	20	360	16	12	0,1	80	10
20/8	20	360	8	12	0,1	80	10
20/4	20	360	4	12	0,1	80	10
20/2	20	360	2	12	0,1	80	10
20/1	20	360	1	12	0,1	80	10
20/0,6	20	360	0,6	12	0,1	80	10
20/0,4	20	360	0,4	12	0,1	80	10
20/0,2	20	360	0,2	12	0,1	80	10

Tabelle D.7: Parameter der verwendeten Transformatortypen

Nachfolgende Bezeichnung	Typ entsprechend Tabelle B.4
500/35	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)
35/16	N2XSY 12/20 (1x35/16)

Tabelle D.8: Parameter der verwendeten Leitungstypen

Ausgestaltungs-Nr.		1	2	3
Betriebsspannung [kV]		40	40	40
Knoten 1	S''_k [MVA]	8000	8000	8000
	R/X-Verhältnis	0,1	0,1	0,1
	Trafotyp	110/16	110/16	110/16
	L_L [mH]	1	1	1
	Neutralpunkt-Beh.	starr	starr	starr
	C [mF]	5	1	0,1
	R_l [mΩ]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
R_{KSSB} [mΩ]	0	0	0	
Knoten 2	S''_k [MVA]	4000	4000	4000
	R/X-Verhältnis	0,2	0,2	0,2
	Trafotyp	110/16	110/16	110/16
	L_L [mH]	1	1	1
	Neutralpunkt-Beh.	isoliert	isoliert	isoliert
	C [mF]	5	1	0,1
	R_l [mΩ]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
R_{KSSB} [mΩ]	0	0	0	
Leitung	Länge [km]	10	10	10
	Typ	500/35	500/35	500/35
Ausgestaltungs-Nr.		53	54	55
Spannung [kV]		2,5	2,5	2,5
Knoten 1	S''_k [MVA]	8000	8000	8000
	R/X-Verhältnis	0,1	0,1	0,1
	Trafotyp	110/1	110/1	110/1
	L_L [mH]	1	1	1
	Neutralpunkt-Beh.	starr	starr	starr
	C [mF]	5	1	0,1
	R_l [mΩ]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
R_{KSSB} [mΩ]	0	0	0	
Knoten 2	S''_k [MVA]	4000	4000	4000
	R/X-Verhältnis	0,2	0,2	0,2
	Trafotyp	110/1	110/1	110/1
	L_L [mH]	1	1	1
	Neutralpunkt-Beh.	isoliert	isoliert	isoliert
	C [mF]	5	1	0,1
	R_l [mΩ]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
R_{KSSB} [mΩ]	0	0	0	
Leitung	Länge [km]	10	10	10
	Typ	500/35	500/35	500/35

4	5	6	7	8	9	10
40	40	40	40	40	40	40
8000	8000	8000	8000	8000	1000	1000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,25
110/16	110/16	110/16	110/16	110/16	20/16	20/16
1	0,1	1	1	1	1	1
starr						
0,05	1	1	1	1	5	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	50	1	10	0	0
0	0	50	10	50	0	0
4000	4000	4000	4000	4000	500	500
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5
110/16	110/16	110/16	110/16	110/16	20/16	20/16
1	0,1	1	1	1	1	1
isoliert						
0,05	1	1	1	1	5	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	50	1	10	0	0
0	0	50	10	50	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
56	57	58	59	60	61	62
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
8000	8000	8000	8000	8000	1000	1000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,25
110/1	110/1	110/1	110/1	110/1	20/1	20/1
1	0,1	1	1	1	1	1
starr						
0,05	1	1	1	1	5	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	50	1	10	0	0
0	0	50	10	50	0	0
4000	4000	4000	4000	4000	500	500
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5
110/1	110/1	110/1	110/1	110/1	20/1	20/1
1	0,1	1	1	1	1	1
isoliert						
0,05	1	1	1	1	5	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	50	1	10	0	0
0	0	50	10	50	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

11	12	13	14	15	16	17
40	40	40	20	20	20	20
1000	1000	100	8000	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1
20/16	20/16	20/16	110/8	110/8	110/8	110/8
1	1	1	1	1	1	1
starr						
1	1	1	5	1	0,1	0,05
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	0	0	0	0	0
50	10	0	0	0	0	0
500	500	50	4000	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	0,2	0,2	0,2	0,2
20/16	20/16	20/16	110/8	110/8	110/8	110/8
1	1	1	1	1	1	1
isoliert						
1	1	1	5	1	0,1	0,05
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	0	0	0	0	0
50	10	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
63	64	65	66	67	68	69
2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1000	1000	100	8000	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1
20/1	20/1	20/1	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6
1	1	1	1	1	1	1
starr						
1	1	1	5	1	0,1	0,05
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	0	0	0	0	0
50	10	0	0	0	0	0
500	500	50	4000	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	0,2	0,2	0,2	0,2
20/1	20/1	20/1	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6
1	1	1	1	1	1	1
isoliert						
1	1	1	5	1	0,1	0,05
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	0	0	0	0	0
50	10	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

18	19	20	21	22	23	24
20	20	20	20	20	20	20
8000	8000	8000	8000	1000	1000	1000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25
110/8	110/8	110/8	110/8	20/8	20/8	20/8
0,1	1	1	1	1	1	1
starr						
1	1	1	1	5	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	1	10	0	0	50
0	50	10	50	0	0	50
4000	4000	4000	4000	500	500	500
0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5
110/8	110/8	110/8	110/8	20/8	20/8	20/8
0,1	1	1	1	1	1	1
isoliert						
1	1	1	1	5	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	1	10	0	0	50
0	50	10	50	0	0	50
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
70	71	72	73	74	75	76
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
8000	8000	8000	8000	1000	1000	1000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25
110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	20/0,6	20/0,6	20/0,6
0,1	1	1	1	1	1	1
starr						
1	1	1	1	5	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	1	10	0	0	50
0	50	10	50	0	0	50
4000	4000	4000	4000	500	500	500
0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5
110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	20/0,6	20/0,6	20/0,6
0,1	1	1	1	1	1	1
isoliert						
1	1	1	1	5	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	1	10	0	0	50
0	50	10	50	0	0	50
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

25	26	27	28	29	30	31
20	20	10	10	10	10	10
1000	100	8000	8000	8000	8000	8000
0,25	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20/8	20/8	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4
1	1	1	1	1	1	0,1
starr						
1	1	5	1	0,1	0,05	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
500	50	4000	4000	4000	4000	4000
0,5	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20/8	20/8	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4
1	1	1	1	1	1	0,1
isoliert						
1	1	5	1	0,1	0,05	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
77	78	79	80	81	82	83
1,5	1,5	1	1	1	1	1
1000	100	8000	8000	8000	8000	8000
0,25	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20/0,6	20/0,6	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	1	1	1	1	1	0,1
starr						
1	1	5	1	0,1	0,05	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
500	50	4000	4000	4000	4000	4000
0,5	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20/0,6	20/0,6	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	1	1	1	1	1	0,1
isoliert						
1	1	5	1	0,1	0,05	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

32	33	34	35	36	37	38
10	10	10	10	10	10	10
8000	8000	8000	1000	1000	1000	1000
0,1	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25
110/4	110/4	110/4	20/4	20/4	20/4	20/4
1	1	1	1	1	1	1
starr						
1	1	1	5	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	10	0	0	50	1
50	10	50	0	0	50	10
4000	4000	4000	500	500	500	500
0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5
110/4	110/4	110/4	20/4	20/4	20/4	20/4
1	1	1	1	1	1	1
isoliert						
1	1	1	5	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	10	0	0	50	1
50	10	50	0	0	50	10
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
84	85	86	87	88	89	90
1	1	1	1	1	1	1
8000	8000	8000	1000	1000	1000	1000
0,1	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25
110/0,4	110/0,4	110/0,4	20/0,4	20/0,4	20/0,4	20/0,4
1	1	1	1	1	1	1
starr						
1	1	1	5	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	10	0	0	50	1
50	10	50	0	0	50	10
4000	4000	4000	500	500	500	500
0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5
110/0,4	110/0,4	110/0,4	20/0,4	20/0,4	20/0,4	20/0,4
1	1	1	1	1	1	1
isoliert						
1	1	1	5	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
50	1	10	0	0	50	1
50	10	50	0	0	50	10
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

39	40	41	42	43	44	45
10	5	5	5	5	5	5
100	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20/4	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2
1	1	1	1	1	0,1	1
starr						
1	5	1	0,1	0,05	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	50
0	0	0	0	0	0	50
50	4000	4000	4000	4000	4000	4000
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20/4	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2
1	1	1	1	1	0,1	1
isoliert						
1	5	1	0,1	0,05	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	50
0	0	0	0	0	0	50
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
91	92	93	94	95	96	97
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
100	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20/0,4	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	1	1	1	1	0,1	1
starr						
1	5	1	0,1	0,05	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	50
0	0	0	0	0	0	50
50	4000	4000	4000	4000	4000	4000
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20/0,4	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	1	1	1	1	0,1	1
isoliert						
1	5	1	0,1	0,05	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	50
0	0	0	0	0	0	50
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

46	47	48	49	50	51	52
5	5	5	5	5	5	5
8000	8000	1000	1000	1000	1000	100
0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75
110/2	110/2	20/2	20/2	20/2	20/2	20/2
1	1	1	1	1	1	1
starr	starr	starr	starr	starr	starr	starr
1	1	5	1	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	10	0	0	50	1	0
10	50	0	0	50	10	0
4000	4000	500	500	500	500	50
0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	1
110/2	110/2	20/2	20/2	20/2	20/2	20/2
1	1	1	1	1	1	1
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
1	1	5	1	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	10	0	0	50	1	0
10	50	0	0	50	10	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
98	99	100	101	102	103	104
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
8000	8000	1000	1000	1000	1000	100
0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75
110/0,2	110/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2
1	1	1	1	1	1	1
starr	starr	starr	starr	starr	starr	starr
1	1	5	1	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	10	0	0	50	1	0
10	50	0	0	50	10	0
4000	4000	500	500	500	500	50
0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	1
110/0,2	110/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2
1	1	1	1	1	1	1
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
1	1	5	1	1	1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1	10	0	0	50	1	0
10	50	0	0	50	10	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

Tabelle D.9: Eingangsdaten der 2-Knoten-Anordnungen (Typ 1-Umrichter)

Ausgestaltungs-Nr.		1	2	3
Betriebsspannung [kV]		40	40	40
Knoten 1	S''_k [MVA]	8000	8000	8000
	R/X-Verhältnis	0,1	0,1	0,1
	Trafotyp	110/16	110/16	110/16
	L_L [mH]	1	1	1
	L_a [mH]	1	5	1
	Neutralpunkt-Beh.	starr	starr	starr
Knoten 2	S''_k [MVA]	4000	4000	4000
	R/X-Verhältnis	0,2	0,2	0,2
	Trafotyp	110/16	110/16	110/16
	L_L [mH]	1	1	1
	L_a [mH]	1	5	1
	Neutralpunkt-Beh.	isoliert	isoliert	isoliert
Leitung	Länge [km]	10	10	10
	Typ	35/16	500/35	500/35
Ausgestaltungs-Nr.		57	58	59
Spannung [kV]		2,5	2,5	2,5
Knoten 1	S''_k [MVA]	8000	8000	8000
	R/X-Verhältnis	0,1	0,1	0,1
	Trafotyp	110/1	110/1	110/1
	L_L [mH]	1	1	1
	Neutralpunkt-Beh.	1	5	1
	C [mF]	starr	starr	starr
Knoten 2	S''_k [MVA]	4000	4000	4000
	R/X-Verhältnis	0,2	0,2	0,2
	Trafotyp	110/1	110/1	110/1
	L_L [mH]	1	1	1
	Neutralpunkt-Beh.	1	5	1
	C [mF]	isoliert	isoliert	isoliert
Leitung	Länge [km]	10	10	10
	Typ	35/16	500/35	500/35

4	5	6	7	8	9	10
40	40	40	40	40	40	40
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/16	110/16	110/16	110/16	110/16	110/16	110/16
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/16	110/16	110/16	110/16	110/16	110/16	110/16
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16
60	61	62	63	64	65	66
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/1	110/1	110/1	110/1	110/1	110/1	110/1
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/1	110/1	110/1	110/1	110/1	110/1	110/1
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16

11	12	13	14	15	16	17
40	40	40	40	20	20	20
600	600	100	100	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,75	0,1	0,1	0,1
20/16	20/16	20/16	20/16	110/8	110/8	110/8
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
starr						
400	400	50	50	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	1	0,2	0,2	0,2
20/16	20/16	20/16	20/16	110/8	110/8	110/8
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
isoliert						
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	500/35	500/35
67	68	69	70	71	72	73
2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5
600	600	100	100	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,75	0,1	0,1	0,1
20/1	20/1	20/1	20/1	110/0,6	110/0,6	110/0,6
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
starr						
400	400	50	50	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	1	0,2	0,2	0,2
20/1	20/1	20/1	20/1	110/0,6	110/0,6	110/0,6
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
isoliert						
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	500/35	500/35

18	19	20	21	22	23	24
20	20	20	20	20	20	20
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	110/8
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	110/8
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16
74	75	76	77	78	79	80
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16

25	26	27	28	29	30	31
20	20	20	20	10	10	10
600	600	100	100	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,75	0,1	0,1	0,1
20/8	20/8	20/8	20/8	110/4	110/4	110/4
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
starr						
400	400	50	50	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	1	0,2	0,2	0,2
20/8	20/8	20/8	20/8	110/4	110/4	110/4
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
isoliert						
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	500/35	500/35
81	82	83	84	85	86	87
1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1
600	600	100	100	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,75	0,1	0,1	0,1
20/0,6	20/0,6	20/0,6	20/0,6	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
starr						
400	400	50	50	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	1	0,2	0,2	0,2
20/0,6	20/0,6	20/0,6	20/0,6	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
isoliert						
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	500/35	500/35

32	33	34	35	36	37	38
10	10	10	10	10	10	10
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/4	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/4	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16
88	89	90	91	92	93	94
1	1	1	1	1	1	1
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16

39	40	41	42	43	44	45
10	10	10	10	5	5	5
600	600	100	100	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,75	0,1	0,1	0,1
20/4	20/4	20/4	20/4	110/2	110/2	110/2
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
starr						
400	400	50	50	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	1	0,2	0,2	0,2
20/4	20/4	20/4	20/4	110/2	110/2	110/2
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
isoliert						
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	500/35	500/35
95	96	97	98	99	100	101
1	1	1	1	0,5	0,5	0,5
600	600	100	100	8000	8000	8000
0,25	0,25	0,75	0,75	0,1	0,1	0,1
20/0,4	20/0,4	20/0,4	20/0,4	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
starr						
400	400	50	50	4000	4000	4000
0,5	0,5	1	1	0,2	0,2	0,2
20/0,4	20/0,4	20/0,4	20/0,4	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	1	1	1	1	1	1
1	0,1	1	0,1	1	5	1
isoliert						
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	500/35	500/35

46	47	48	49	50	51	52
5	5	5	5	5	5	5
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/2	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/2	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2	110/2
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16
102	103	104	105	106	107	108
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	0,1	1	1	1	1	1
0,1	0,1	0,01	1	1	1	1
isoliert						
10	10	10	5	1	5	1
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16

53	54	55	56
5	5	5	5
600	600	100	100
0,25	0,25	0,75	0,75
20/2	20/2	20/2	20/2
1	1	1	1
1	0,1	1	0,1
starr	starr	starr	starr
400	400	50	50
0,5	0,5	1	1
20/2	20/2	20/2	20/2
1	1	1	1
1	0,1	1	0,1
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35
109	110	111	112
0,5	0,5	0,5	0,5
600	600	100	100
0,25	0,25	0,75	0,75
20/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2
1	1	1	1
1	0,1	1	0,1
starr	starr	starr	starr
400	400	50	50
0,5	0,5	1	1
20/0,2	20/0,2	20/0,2	20/0,2
1	1	1	1
1	0,1	1	0,1
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35

Tabelle D.10: Eingangsdaten der 2-Knoten-Anordnungen (Typ 2-Umrichter)

Ausgestaltungs-Nr.		1	2	3
Betriebsspannung [kV]		40	40	40
Knoten 1	S''_k [MVA]	8000	8000	8000
	R/X-Verhältnis	0,1	0,1	0,1
	Trafotyp	110/16	110/16	110/16
	L_L [mH]	1	1	1
	L_a [mH]	1	1	1
	I_{det} [A]	500	400	500
	$I_{k,inj}$ [A]	0	400	400
Neutralpunkt-Beh.		starr	starr	starr
Knoten 2	S''_k [MVA]	4000	4000	4000
	R/X-Verhältnis	0,2	0,2	0,2
	Trafotyp	110/16	110/16	110/16
	L_L [mH]	1	1	1
	L_a [mH]	1	1	1
	I_{det} [A]	500	400	500
	$I_{k,inj}$ [A]	0	400	400
Neutralpunkt-Beh.		isoliert	isoliert	isoliert
Leitung	Länge [km]	10	10	5
	Typ	500/35	500/35	500/35
Ausgestaltungs-Nr.		37	38	39
Spannung [kV]		2,5	2,5	2,5
Knoten 1	S''_k [MVA]	8000	8000	8000
	R/X-Verhältnis	0,1	0,1	0,1
	Trafotyp	110/1	110/1	110/1
	L_L [mH]	1	1	1
	L_a [mH]	1	1	1
	I_{det} [A]	500	400	500
	$I_{k,inj}$ [A]	0	400	400
Neutralpunkt-Beh.		starr	starr	starr
Knoten 2	S''_k [MVA]	4000	4000	4000
	R/X-Verhältnis	0,2	0,2	0,2
	Trafotyp	110/1	110/1	110/1
	L_L [mH]	1	1	1
	L_a [mH]	1	1	1
	I_{det} [A]	500	500	500
	$I_{k,inj}$ [A]	0	400	400
Neutralpunkt-Beh.		isoliert	isoliert	isoliert
Leitung	Länge [km]	10	10	5
	Typ	500/35	500/35	500/35

4	5	6	7	8	9	10
40	40	40	40	40	40	20
8000	8000	8000	8000	1000	100	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,75	0,1
110/16	110/16	110/16	110/16	20/16	20/16	110/8
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	0
starr						
4000	4000	4000	4000	500	50	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	1	0,2
110/16	110/16	110/16	110/16	20/16	20/16	110/8
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	0
isoliert						
1	10	5	1	10	10	10
500/35	35/16	35/16	35/16	500/35	500/35	500/35
40	41	42	43	44	45	46
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5
8000	8000	8000	8000	1000	100	8000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,25	0,75	0,1
110/1	110/1	110/1	110/1	20/1	20/1	110/0,6
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	0
starr						
4000	4000	4000	4000	500	50	4000
0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	1	0,2
110/1	110/1	110/1	110/1	20/1	20/1	110/0,6
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	0
isoliert						
1	10	5	1	10	10	10
500/35	35/16	35/16	35/16	500/35	500/35	500/35

11	12	13	14	15	16	17
20	20	20	20	20	20	20
8000	8000	8000	8000	8000	8000	1000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,25
110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	20/8
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	400
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	500
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5
110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	110/8	20/8
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	400
isoliert						
10	5	1	10	5	1	10
500/35	500/35	500/35	35/16	35/16	35/16	500/35
47	48	49	50	51	52	53
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
8000	8000	8000	8000	8000	8000	1000
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,25
110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	20/0,6
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	400
starr						
4000	4000	4000	4000	4000	4000	500
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5
110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	110/0,6	20/0,6
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	400	400	400	400
isoliert						
10	5	1	10	5	1	10
500/35	500/35	500/35	35/16	35/16	35/16	500/35

18	19	20	21	22	23	24
20	10	10	10	10	10	10
100	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20/8	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	0	400	400	400	400	400
starr						
50	4000	4000	4000	4000	4000	4000
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20/8	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4	110/4
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	0	400	400	400	400	400
isoliert						
10	10	10	5	1	10	5
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16
54	55	56	57	58	59	60
1,5	1	1	1	1	1	1
100	8000	8000	8000	8000	8000	8000
0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20/0,6	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	0	400	400	400	400	400
starr						
50	4000	4000	4000	4000	4000	4000
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
20/0,6	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4	110/0,4
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	0	400	400	400	400	400
isoliert						
10	10	10	5	1	10	5
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	35/16	35/16

25	26	27	28	29	30	31
10	10	10	5	5	5	5
8000	1000	100	8000	8000	8000	8000
0,1	0,25	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1
110/4	20/4	20/4	110/2	110/2	110/2	110/2
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	0	400	400	400
starr						
4000	500	50	4000	4000	4000	4000
0,2	0,5	1	0,2	0,2	0,2	0,2
110/4	20/4	20/4	110/2	110/2	110/2	110/2
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	0	400	400	400
isoliert						
1	10	10	10	10	5	1
35/16	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
61	62	63	64	65	66	67
1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
8000	1000	100	8000	8000	8000	8000
0,1	0,25	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1
110/0,4	20/0,4	20/0,4	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	0	400	400	400
starr						
4000	500	50	4000	4000	4000	4000
0,2	0,5	1	0,2	0,2	0,2	0,2
110/0,4	20/0,4	20/0,4	110/0,2	110/0,2	110/0,2	110/0,2
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
500	500	500	500	500	500	500
400	400	400	0	400	400	400
isoliert						
1	10	10	10	10	5	1
35/16	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

32	33	34	35	36
5	5	5	5	5
8000	8000	8000	1000	100
0,1	0,1	0,1	0,25	0,75
110/2	110/2	110/2	20/2	20/2
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
500	500	500	500	500
400	400	400	400	400
starr	starr	starr	starr	starr
4000	4000	4000	500	50
0,2	0,2	0,2	0,5	1
110/2	110/2	110/2	20/2	20/2
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
500	500	500	500	500
400	400	400	400	400
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
10	5	1	10	10
35/16	35/16	35/16	500/35	500/35
68	69	70	71	72
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
8000	8000	8000	1000	100
0,1	0,1	0,1	0,25	0,75
110/0,2	110/0,2	110/0,2	20/0,2	20/0,2
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
500	500	500	500	500
400	400	400	400	400
starr	starr	starr	starr	starr
4000	4000	4000	500	50
0,2	0,2	0,2	0,5	1
110/0,2	110/0,2	110/0,2	20/0,2	20/0,2
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
500	500	500	500	500
400	400	400	400	400
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
10	5	1	10	10
35/16	35/16	35/16	500/35	500/35

Tabelle D.11: Eingangsdaten der 2-Knoten-Anordnungen (Typ 3-Umrichter)

Ausgestaltungs-Nr.		1	2	3
Betriebsspannung [kV]		40	40	40
Knoten 1	$U_{DC,in}$ [kV]	10	10	10
	$L_{\sigma,OS}$ [mH]	0,185	0,185	0,185
	I_{det} [A]	600	600	600
	$I_{k,inj}$ [A]	0	500	500
	Neutralpunkt-Beh.	starr	starr	starr
	C [mF]	1	1	0,1
	R_l [m Ω]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
Knoten 2	$U_{DC,in}$ [kV]	10	10	10
	$L_{\sigma,OS}$ [mH]	0,185	0,185	0,185
	I_{det} [A]	600	600	600
	$I_{k,inj}$ [A]	0	500	500
	Neutralpunkt-Beh.	isoliert	isoliert	isoliert
	C [mF]	1	1	0,1
	R_l [m Ω]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
Leitung	R_{KSSB} [m Ω]	0	0	0
	Länge [km]	10	10	10
	Typ	500/35	500/35	500/35
Ausgestaltungs-Nr.		57	58	59
Spannung [kV]		2,5	2,5	2,5
Knoten 1	$U_{DC,in}$ [kV]	10	10	10
	$L_{\sigma,OS}$ [mH]	0,185	0,185	0,185
	I_{det} [A]	600	600	600
	$I_{k,inj}$ [A]	0	500	500
	Neutralpunkt-Beh.	starr	starr	starr
	C [mF]	1	1	0,1
	R_l [m Ω]	0,4	0,4	0,4
	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
Knoten 2	R_{KSSB} [m Ω]	0	0	0
	$U_{DC,in}$ [kV]	10	10	10
	$L_{\sigma,OS}$ [mH]	0,185	0,185	0,185
	I_{det} [A]	600	600	600
	$I_{k,inj}$ [A]	0	500	500
	Neutralpunkt-Beh.	isoliert	isoliert	isoliert
	C [mF]	1	1	0,1
	R_l [m Ω]	0,4	0,4	0,4
Leitung	L_{KSSB} [mH]	0	0	0
	R_{KSSB} [m Ω]	0	0	0
	Länge [km]	10	10	10
	Typ	500/35	500/35	500/35

4	5	6	7	8	9	10
40	40	40	40	40	40	40
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
60	61	62	63	64	65	66
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

11	12	13	14	15	16	17
40	40	40	40	20	20	20
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
starr						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
isoliert						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
67	68	69	70	71	72	73
2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
starr						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	601	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
isoliert						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

18	19	20	21	22	23	24
20	20	20	20	20	20	20
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
74	75	76	77	78	79	80
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

25	26	27	28	29	30	31
20	20	20	20	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
starr						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
isoliert						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
81	82	83	84	85	86	87
1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
starr						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	601	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
isoliert						
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

32	33	34	35	36	37	38
10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
88	89	90	91	92	93	94
1	1	1	1	1	1	1
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

39	40	41	42	43	44	45
10	10	10	10	5	5	5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
starr	starr	starr	starr	starr	starr	starr
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	601	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
95	96	97	98	99	100	101
1	1	1	1	0,5	0,5	0,5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
starr	starr	starr	starr	starr	starr	starr
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	601	600	600	600
0	500	500	250	0	500	500
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
1	1	0,1	1	1	1	0,1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

46	47	48	49	50	51	52
5	5	5	5	5	5	5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35
102	103	104	105	106	107	108
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
starr						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	10	10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600	600	600	600
250	500	500	500	500	500	500
isoliert						
1	1	1	0,1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0	50	0	0	0	0	1
0	50	0	0	0	0	10
10	10	5	5	1	1	10
500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35	500/35

53	54	55	56
5	5	5	5
10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600
0	500	500	250
starr	starr	starr	starr
1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0
0	0	0	0
10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	601
0	500	500	250
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0
0	0	0	0
10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35
109	110	111	112
0,5	0,5	0,5	0,5
10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	600
0	500	500	250
starr	starr	starr	starr
1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0
0	0	0	0
10	10	10	10
0,185	0,185	0,185	0,185
600	600	600	601
0	500	500	250
isoliert	isoliert	isoliert	isoliert
1	1	0,1	1
0,4	0,4	0,4	0,4
0	0	0	0
0	0	0	0
10	10	10	10
500/35	500/35	500/35	500/35

Tabelle D.12: Eingangsdaten der 2-Knoten-Anordnungen (Gleichspannungswandler)

D.3 Exemplarische Ergebnisse zu Kapitel 5.3.1.2

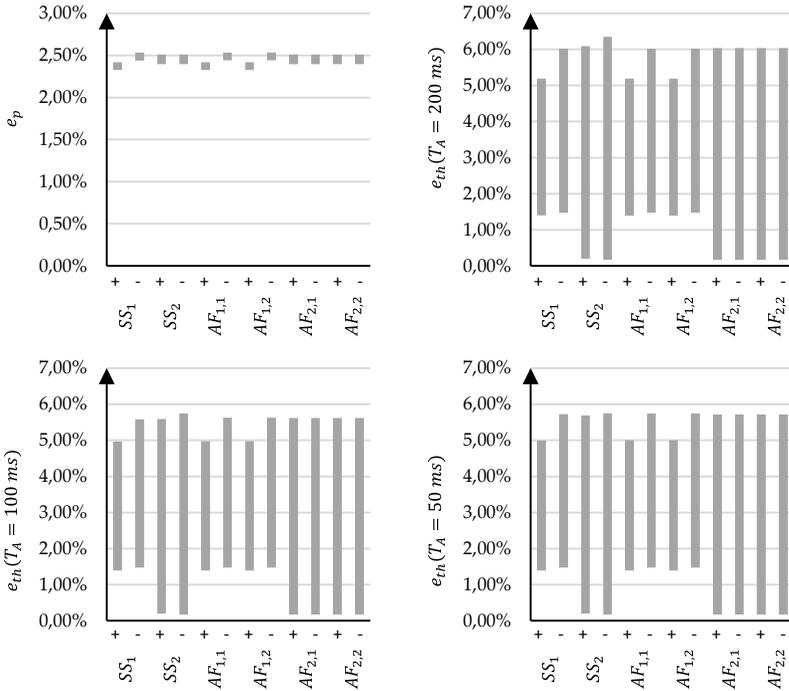


Abbildung D.1: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC mit Korrekturfaktoren (ohne KSS-Begrenzer)

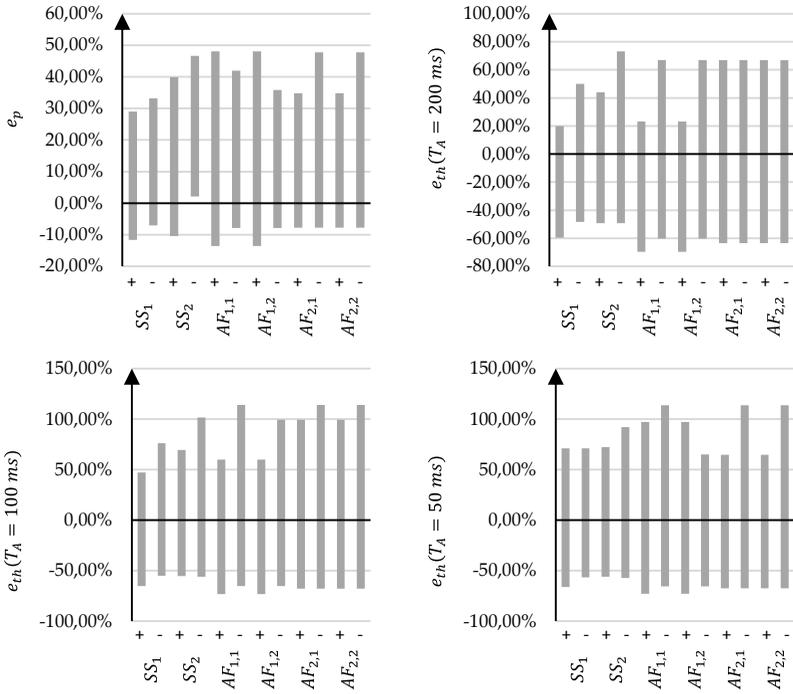


Abbildung D.2: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit 2L-VSC mit Kurzschlussstrombegrenzer (mit Korrekturfaktor)

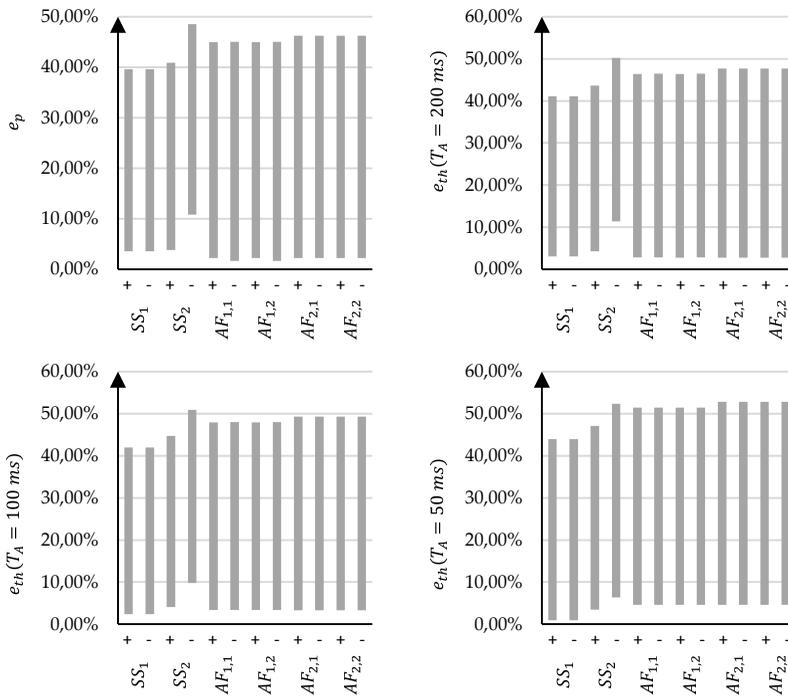


Abbildung D.3: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Mittelspannung mit Korrekturfaktor

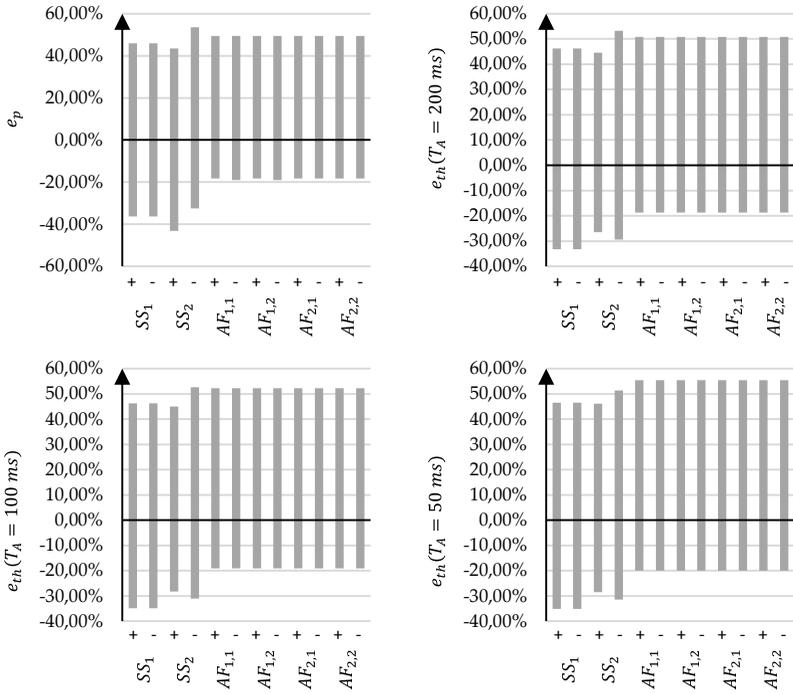


Abbildung D.4: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit MMC-HBSM für die Niederspannung mit Korrekturfaktor

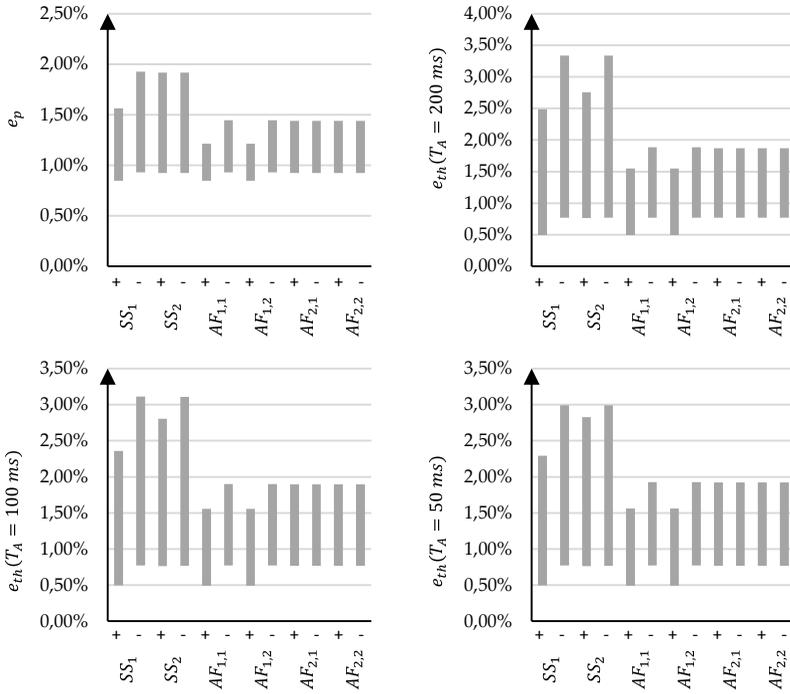


Abbildung D.5: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 100 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB mit Korrekturfaktoren (ohne KSS-Begrenzer)

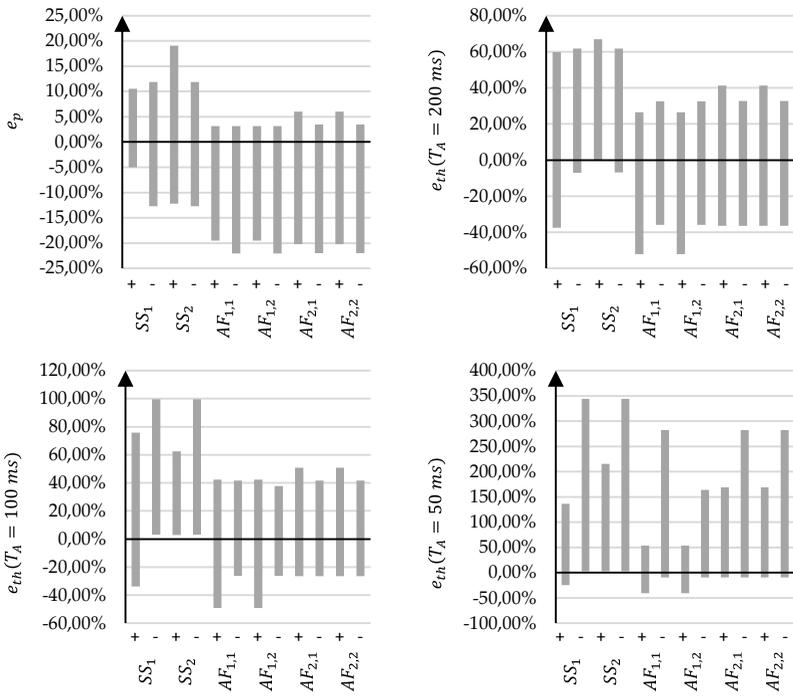


Abbildung D.6: Bandbreite der Bewertungskenngrößen für 48 exemplarische Varianten einer DC-P2P-Verbindung mit DAB mit Kurzschlussstrombegrenzer (mit Korrekturfaktor)

D.4 Eingangsdaten der 13-Knoten-Anordnung (Mittelspannung)

Knoten-Nr.	Wandler-typ	U_{AC} [kV]	S'_k [MVA]	R/X	C_{out} [mF]	$R_{i,out}$ [mΩ]
1	2L-VSC	110	60000	0,12	0,5	0,5
12	2L-VSC	110	40000	0,15	0,025	0,3
13	2L-VSC	20	200	0,355	0,055	0,3

Tabelle D.13: Daten der Stationen mit Typ 1-Umrichtern

Knoten-Nr.	Wandler-typ	U_{in} [kV]	C_{out} [mF]	$R_{i,out}$ [mΩ]	I_d [A]	I_c [A]
2	DAB	1	0,11	0,51	500	520
3	DAB	1	0,1	0,55	500	520
4	DAB	1	0,1	0,2	500	520
5	DAB	1	0,2	0,2	500	520
6	DAB	1	0,15	0,25	500	520
7	DAB	1	0,4	0,4	500	520
8	DAB	1	0,5	0,4	500	520
10	DAB	1	0,11	0,3	500	520
11	DAB	1	0,12	0,5	500	520

Tabelle D.14: Daten der Stationen mit Gleichspannungswandlern

Leitungs-Nr.	Knoten Anf.	Knoten End.	Leitungstyp	Länge [km]
1	1	4	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,853
2	2	3	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	5,921
3	3	4	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	9,617
4	4	5	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,418
5	5	6	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	9,735
6	4	9	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	5,368
7	7	8	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	8,202
8	8	9	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,277
9	9	10	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	4,795
10	10	11	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	9,241
11	8	12	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	8,129
12	9	13	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	6,901

Tabelle D.15: Daten der Leitungen

D.5 Eingangsdaten der 13-Knoten-Anordnung (Nieder- spannung)

Knoten- Nr,	Wandler- typ	U_{in} [kV]	C_{out} [mF]	$R_{i,out}$ [m Ω]	I_d [A]	I_c [A]
1	DAB	10	0,5	0,5	500	600
2	DAB	1	0,11	0,51	100	120
3	DAB	1	0,1	0,55	100	120
4	DAB	1	0,1	0,2	100	120
5	DAB	1	0,2	0,2	100	120
6	DAB	1	0,15	0,25	100	120
7	DAB	1	0,4	0,4	100	120
8	DAB	1	0,5	0,4	100	120
9	DAB	1	0,4	0,4	100	120
10	DAB	1	0,11	0,3	100	120
11	DAB	1	0,12	0,5	100	120
12	DAB	1	0,025	0,3	100	120
13	DAB	1	0,055	0,3	100	120

Tabelle D.16: Daten der Stationen mit Gleichspannungswandlern

Leitungs- Nr.	Knoten Anf.	Knoten End.	Leitungstyp	Länge [km]
1	1	4	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,062
2	2	3	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,321
3	3	4	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,115
4	4	5	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,023
5	5	6	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,223
6	4	9	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,186
7	7	8	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,361
8	8	9	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,051
9	9	10	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,285
10	10	11	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,354
11	8	12	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,062
12	9	13	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,321

Tabelle D.17: Daten der Leitungen

D.6 Eingangsdaten der 14-Knoten-Anordnung (Mittelspannung)

Knoten-Nr,	Wandler-typ	U_{AC} [kV]	S'_k [MVA]	R/X	C_{out} [mF]	$R_{i,out}$ [mΩ]
5	2L-VSC	110	80000	0,1	0,5	0,5
8	2L-VSC	20	500	0,25	0,025	0,3
9	2L-VSC	110	60000	0,12	0,075	0,5

Tabelle D.18: Daten der Stationen mit Typ 1-Umrichtern

Knoten-Nr,	Wandler-typ	U_{in} [kV]	C_{out} [mF]	$R_{i,out}$ [mΩ]	I_d [A]	I_c [A]
1	DAB	1	0,1	0,5	500	600
2	DAB	1	0,11	0,51	500	600
3	DAB	1	0,1	0,55	500	600
4	DAB	1	0,1	0,2	500	600
7	DAB	1	0,4	0,4	500	600
10	DAB	1	0,11	0,3	500	600
11	DAB	1	0,12	0,5	500	600
12	DAB	1	0,075	0,5	500	600
13	DAB	1	0,1	0,5	500	600
14	DAB	1	0,05	0,5	500	600

Tabelle D.19: Daten der Stationen mit Gleichspannungswandlern

Leitungs-Nr.	Knoten Anf.	Knoten End.	Leitungstyp	Länge [km]
1	1	2	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,853
2	1	5	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	5,922
3	2	3	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	9,618
4	2	4	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,419
5	3	4	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	9,735
6	4	5	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	5,368
7	4	7	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	8,203
8	4	9	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,277
9	5	6	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	4,796
10	6	11	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	9,242
11	6	12	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	8,130
12	6	13	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	6,902
13	7	8	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	18,853
14	7	9	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	1,321
15	9	10	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	4,736
16	9	14	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	3,715
17	10	11	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	4,031
18	12	13	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	3,973
19	13	14	N2XS2Y 6/10 (1x500/35)	2,569

Tabelle D.20: Daten der Leitungen

D.7 Eingangsdaten der 14-Knoten-Anordnung (Nieder- spannung)

Knoten- Nr.	Wandler- typ	U_{in} [kV]	C_{out} [mF]	$R_{i,out}$ [mΩ]	I_d [A]	I_c [A]
1	DAB	1	0,1	0,5	200	220
2	DAB	1	0,11	0,51	200	220
3	DAB	1	0,1	0,55	200	220
4	DAB	1	0,1	0,2	200	220
5	DAB	10	1	0,4	500	600
7	DAB	1	0,4	0,4	200	220
8	DAB	1	0,025	0,3	200	220
9	DAB	10	1	0,4	500	600
10	DAB	1	0,11	0,3	200	220
11	DAB	1	0,12	0,5	200	220
12	DAB	1	0,075	0,5	200	220
13	DAB	1	0,1	0,5	200	220
14	DAB	1	0,05	0,5	200	220

Tabelle D.21: Daten der Stationen mit Gleichspannungswandlern

Leitungs-Nr.	Knoten Anf.	Knoten End.	Leitungstyp	Länge [km]
1	1	2	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,222
2	1	5	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,185
3	2	3	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,452
4	2	4	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,159
5	3	4	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,058
6	4	5	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,111
7	4	7	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,304
8	4	9	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,082
9	5	6	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,122
10	6	11	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,086
11	6	12	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,347
12	6	13	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,146
13	7	8	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,822
14	7	9	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,159
15	9	10	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,222
16	9	14	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,432
17	10	11	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,042
18	12	13	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,242
19	13	14	N2XSY 12/20 (1x35/16)	0,322

Tabelle D.22: Daten der Leitungen

E LEBENSLAUF

Name	Raphael Bleilevens
Geburtsdatum und -ort	06. April 1991, Geilenkirchen
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Familienstand	ledig

Bildungsweg

04/2014 – 09/2015	Masterstudium Elektrotechnik, Informationstechnik und technische Informatik an der RWTH Aachen mit Vertiefungsrichtung Energietechnik Masterarbeitsthema: „Eigenverbrauchsoptimierung durch Einsatz von Speichern und Demand Side Management“, durchgeführt am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen
10/2010 – 03/2014	Bachelorstudium Elektrotechnik, Informationstechnik und technische Informatik an der RWTH Aachen mit Vertiefungsrichtung Energietechnik Bachelorarbeitsthema: „Erweiterung der PSCAD Bibliotheken“, durchgeführt am Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS) des EON Energy Research Centers der RWTH Aachen
08/2007 – 06/2010	Bischöfliches Gymnasium St. Ursula, Geilenkirchen Erlangen der allgemeinen Hochschulreife

Berufserfahrung

Seit 06/2020	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen, Aachen Lehrstuhl: Lehrstuhl für Aktive Energieverteilnetze Forschungsgruppe: Energieverteilnetzplanung
12/2015 – 05/2020	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der RWTH Aachen, Aachen Lehrstuhl: Lehrstuhl für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft Forschungsgruppe: Systemstabilität und Versorgungssicherheit
11/2014 – 03/2015	Praktikum bei Westnetz GmbH in Berzdorf Themenschwerpunkt: Planung im Bereich der Primärtechnik des 110-kV-Hochspannungsnetzes

Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze (DC-Verteilnetze) rücken zunehmend in den Fokus der Forschung. Wie in heutigen Drehstromnetzen (AC-Netzen) rufen auch in DC-Verteilnetzen Ströme im Fall von Kurzschlüssen in der Regel die stärksten Beanspruchungen für stromführende Betriebsmittel hinsichtlich deren thermischer und mechanischer Belastung hervor. Zur sicheren und dennoch wirtschaftlich angemessenen Auslegung dieser stromführenden Betriebsmittel ist somit die Kenntnis über mögliche Kurzschlussströme in DC-Verteilnetzen zwingend erforderlich. Für AC-Systeme stehen heute vereinfachte Approximationsansätze für die Kurzschlussstromberechnung zur Verfügung. Für die Praxis sind derartige vereinfachte Approximationsansätze zur Berechnung der möglichen Kurzschlussströme gewünscht, da der Datenbedarf und die Rechenzeit im Vergleich zur transienten Berechnung deutlich reduziert werden können. Aus diesem Grund ist eine vereinfachte Kurzschlussstromberechnung basierend auf einem Approximationsansatz auch für DC-Verteilnetze wünschenswert.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Herleitung einer Methode zur vereinfachten Kurzschlussstromberechnung für DC-Verteilnetze. Zur vereinfachten Kurzschlussstromberechnung wird dabei die Verwendung des Berechnungsansatzes der Superposition von approximierten Stromverläufen fokussiert. Bei diesem Berechnungsansatz werden im ersten Schritt die Stromverläufe aller speisenden Kurzschlussstromquellen ohne die Berücksichtigung der Rückwirkungen durch andere Kurzschlussstromquellen approximiert. Anschließend werden die Stromverläufe der einzelnen Kurzschlussstromquellen unter Berücksichtigung des Gleichstromsystems superponiert. Abschließend werden Kurzschlussstromkenngrößen der stromführenden Betriebsmittel ermittelt.

Zur Bewertung der vereinfachten Kurzschlussstromberechnungsmethode ist ein Vergleich der berechneten Kurzschlussströme mit Vergleichsdaten erforderlich. Aufgrund der fehlenden Realisierung von DC-Verteilnetzen werden realitätsnahe Vergleichsdaten durch transiente Berechnungen in Form von numerischen Zeitverlaufsimulationen generiert und den Ergebnissen der vereinfachten Berechnung gegenübergestellt.

Im Zuge der exemplarischen Untersuchungen erfolgt die Bewertung der vereinfachten Berechnungsmethode für eine Vielzahl unterschiedlicher DC-Verteilnetze. Dabei werden die Netzstruktur, die Versorgungsaufgabe, die Betriebsmittel und die Betriebsspannung der DC-Verteilnetze variiert. Der Bewertung zufolge ist die Berechnung der Kurzschlussstromkenngrößen von beliebigen Teilkurzschlussströmen nicht zielführend. Jedoch erscheint die Berechnung der auslegungsrelevanten Kurzschlussstromkenngrößen von stromführenden Betriebsmitteln mit Einschränkungen möglich.