



D I P L O M A R B E I T

Konzeptionelle Möglichkeiten zur Entflechtung von Transport- und Netzintegrationsaufgaben von Höchstspannungsnetzknotten

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Masterstudiums

**Elektrische Energietechnik
und nachhaltige Energiesysteme**

eingereicht von

Elisabeth Samm

Matrikelnummer: 01618878

am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
im Forschungsbereich Energiesysteme und Netze (E370-01)
der TU Wien

Betreuung: Klöckl, Bernd; Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.sc.techn.

Mitwirkung: Bopp, Siew; Dr. (TenneT TSO)

Wien, am 8. September 2025

Kurzfassung

Übertragungsnetzbetreiber sind für Planung, Bau und Betrieb des Höchstspannungsnetzes verantwortlich. Neben dem Transport großer Energiemengen aus konventionellen und erneuerbaren Quellen umfasst ihr Auftrag auch die Versorgung und den Anschluss von Kunden. Der Netzausbau infolge der Energiewende, verstärkt durch den European Green Deal, führt zu einer wachsenden Zahl an Einspeisepunkten im Höchstspannungsnetz, etwa durch Onshore- und Offshore-Windparks, leistungsstarke Elektrolyseanlagen und Rückspeisungen aus Photovoltaik. Dadurch steigt der Bedarf an Leitungen, Netzknoten und Schaltfeldern, während technische (z.B. Kurzschlussfestigkeit) und räumliche Grenzen (begrenzte Flächen) die Anlagenplanung einschränken.

Diese Arbeit untersucht, ob die konzeptionelle und bauliche Trennung von Schaltanlagen in Netzknotenanlagen, die primär dem Energietransport dienen, und Versorgungs-/Kundenanlagen, die ausschließlich für den Anschluss von Transformatoren von Verteilnetzbetreibern und Kunden vorgesehen sind, eine technisch und betrieblich sinnvolle Möglichkeit darstellt, um den Flächenbedarf und die Anzahl der Schaltfelder pro Anlage zu reduzieren. Die Analyse umfasst Bewertungen zu Leistungsfluss, Transportkapazität, Kurzschlussniveau und Zuverlässigkeit.

Die Ergebnisse zeigen: Jede Anbindung von Erzeugung oder Last zwischen zwei Netzknoten – im Vergleich zum direkten Anschluss in einem Netzknoten – erhöht die Auslastung einzelner Leitungsabschnitte und verringert die Transportkapazität. Unter den untersuchten Varianten bietet die Einfacheinschleifung in vielen Szenarien Vorteile gegenüber der Volleinschleifung, sowohl hinsichtlich der Transportkapazität als auch in Bezug auf ein geringeres Kurzschlussniveau.

Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Frage, wie der zukünftige Netzausbau gestaltet werden kann, um die Integration neuer Erzeugungskapazitäten unter Aufrechterhaltung eines zuverlässigen Stromnetzes zu ermöglichen, ohne dabei technische Grenzwerte zu überschreiten oder den Bedarf an zusätzlichen, zusammenhängenden Flächen unverhältnismäßig zu erhöhen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Transmission system operators are responsible for planning, constructing, and operating the extra-high-voltage grid. Their role encompasses both the transmission of large volumes of electricity from conventional and renewable sources and the supply and connection of customers. The ongoing grid expansion driven by the energy transition, reinforced by the European Green Deal, has led to a significant increase in feed-in points in the extra-high-voltage network, including onshore and offshore wind farms, large-scale electrolysis plants, and reverse flows from photovoltaic generation. This expansion increases the need for lines, substations, and switchbays, while technical constraints (e.g., short-circuit withstand capability) and spatial limitations (availability of large, contiguous sites) restrict substation design.

This study investigates whether separating substations into transmission substations – primarily for energy transport – and supply/customer substations – exclusively for connecting transformers of distribution network operators and customers – is a technically and operationally viable approach to reducing land requirements and the number of switchbays per site. The analysis covers power flow, transmission capacity, short-circuit levels, and reliability.

The results indicate that connecting generation or load between two substations increases the loading of individual line sections and reduces transmission capacity compared to direct connection at a substation. Among the investigated configurations, the loop-in with two circuits frequently outperforms the loop-in with four circuits, offering both higher transmission capacity and lower short-circuit levels.

The findings contribute to the ongoing discussion on designing future grid expansion to integrate new generation capacity while maintaining network reliability, without exceeding technical limits or disproportionately increasing the need for additional, contiguous land.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinen Eltern danken, die mich stets in jeder nur erdenklichen Weise unterstützt haben und auf die ich all die Zeit zählen konnte. Durch ihre Liebe, ihr Verständnis und ihre Geduld haben sie es mir ermöglicht, meinen eigenen Weg zu gehen.

Ebenso möchte ich meinen Studienkollegen und Freunden danken, mit denen ich unzählige Tage und Nächte an Abgaben gearbeitet und zusammen für Klausuren und Prüfungen gelernt habe. Ihre Freundschaft und die gemeinsamen Erlebnisse haben meine Studienzeit zu einer der schönsten Phasen meines Lebens gemacht.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Klöckl, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat und mir durch sein Engagement die Möglichkeit gab, diese bei TenneT zu schreiben. Seine inspirierenden Vorlesungen und sein Einsatz, frischen Wind in die elektrische Energietechnik zu bringen, haben mein Interesse und Verständnis für dieses Fachgebiet maßgeblich geprägt.

Ein riesiges Dankeschön geht an meine Betreuerin bei TenneT, Siew, die mich von Beginn an mit ihrem fachlichen Know-how unterstützt hat, mich ermutigt hat, spannende Themen weiterzuverfolgen und mich mit wertvollen Ideen vorangebracht hat. Unser regelmäßiger Austausch war für mich von unschätzbarem Wert und ich habe die Gespräche stets sehr genossen.

Mein aufrichtiger Dank geht auch an Wolfram, der bei TenneT eine wichtige Ansprechperson war, mich maßgeblich mit seinem Fachwissen unterstützt hat und dessen herzliche und humorvolle Art ich wahnsinnig geschätzt habe.

Abschließend danke ich all jenen Kollegen bei TenneT, die dazu beigetragen haben, dass ich bei meinen Untersuchungen vorankam – sei es durch ihre fachliche oder technische Hilfe, anregende Gespräche, gemeinsame Kaffeepausen oder spannende Kicker-Runden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt bzw. die wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, am 8. September 2025

Elisabeth Samm



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien	5
1.1. Entwicklung und Stand der Technik	5
1.1.1. Schaltanlagen-Topologien	12
1.2. Notwendigkeit für weitere Untersuchungen	21
1.3. Neuartigkeit des eigenen Beitrags	22
2. Untersuchungsbasis und Methoden	25
2.1. Untersuchungsumgebung in PowerFactory	25
2.2. Vermaschungsgrad	26
2.3. Einbindung von Erzeugern und Lasten	30
2.4. Untersuchungsvariablen	33
2.5. Kurzschlussberechnung	34
3. Ergebnisse und Diskussion	37
3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise	37
3.1.1. analytische Berechnung: Annahmen für die Anbindung zwischen A und B	37
3.1.2. Volleinschleifung und Doppelstich	40
3.1.3. Einfacheinschleifung und Stich	50
3.1.4. Konventionelle Anbindung im Netzknoten B	55
3.1.5. Vergleich der Netzanbindungskonzepte: Parameter, Leitungsaus- lastung und Übertragungskapazität	57
3.1.6. Limitationen des vereinfachten/analytischen Modells betreffend optimale Standortwahl	65
3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise	78
3.2.1. Volleinschleifung	80
3.2.2. Einfacheinschleifung	86
3.2.3. Doppelstich	89
3.2.4. Stich	90
3.2.5. Konventionelle Anbindung in B	92
3.2.6. Vergleich der Netzanbindungskonzepte: Parameter, Leitungsaus- lastung und (n-1)-Übertragungskapazität	94
3.2.7. Veränderung der Übertragungskapazität $P_{B,max}$ bei Verschiebung der Schaltanlage	118
3.2.8. Anwendung der analytischen Berechnung in praktischen Planungs- aufgaben	123
3.3. Kurzschluss-Berechnung	127
3.3.1. IEC 60909	127

Inhaltsverzeichnis

3.3.2. Vollständige Methode	138
3.4. Zuverlässigkeitsanalyse	141
3.4.1. (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse	142
3.4.2. Notwendigkeit einer betrieblichen (n-1)-Analyse	153
3.5. Anzahl der Assets	157
4. Synthese der Ergebnisse	159
4.1. Transportkapazität	159
4.1.1. (n-0)-Fall	159
4.1.2. (n-1)-Fall	160
4.2. Kurzschluss	161
4.2.1. Kurzschluss innerhalb der angebundenen Schaltanlage	161
4.2.2. Kurzschluss im Netzknoten B	162
4.2.3. Bewertung der Kurzschlussberechnung nach Norm	162
4.3. Zuverlässigkeitsanalyse	163
4.3.1. Wichtige Erkenntnisse	164
5. Schlussfolgerung	165
Abbildungsverzeichnis	167
Tabellenverzeichnis	171
Literaturverzeichnis	175
A. Anhang 1	177
A.1. Zuverlässigkeitsanalyse: Excel-Auswertung	177
A.2. Zuverlässigkeitsanalyse: Topologien inklusive Wandler-Positionen und Beschriftungen	189
A.3. Zuverlässigkeitsanalyse: realitätsgetreue Darstellungen	193

Einleitung

Ausgehend vom Versorgungsauftrag sind Übertragungsnetzbetreiber für Planung, Bau und Betrieb des Transportnetzes in der Höchstspannungsebene verantwortlich. Ihre Aufgaben lassen sich im Wesentlichen in zwei Bereiche gliedern: den Transport elektrischer Energie – aus konventionellen Kraftwerken und großen Erzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energieträgern – und die Versorgung sowie den Anschluss von Kunden, wie regionalen Verteilnetzbetreibern, großen industriellen Verbrauchern oder Einspeisungen aus regenerativen Erzeugungsanlagen.

Im Zuge der Energiewende – getrieben durch den European Green Deal der Europäischen Union mit dem Ziel, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen – erfolgt ein massiver Netzausbau. Neben neuen Onshore- und Offshore-Windparks werden auch leistungsstarke Elektrolyseanlagen in das Höchstspannungsnetz integriert. Hinzu kommt, dass durch steigende Photovoltaikeinspeisung im Verteilnetz zeitweise erhebliche Leistungen über Netzkuppeltransformatoren in die Höchstspannungsebene zurückfließen. Diese Entwicklungen erhöhen den Transportbedarf im europäischen Höchstspannungsnetz drastisch und erfordern zusätzliche Leitungen und Netzknoten.

Um die Zahl dieser Netzknoten nicht überproportional steigen zu lassen, werden Schaltanlagen zunehmend größer und komplexer, um gleichzeitig Transportfunktionen und Kundenanschlüsse zu erfüllen. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg der erforderlichen Schaltfelder für Leitungen, Kabel, Schaltgeräte, Transformatoren und weitere Betriebsmittel. Technische Grenzen wie Kurzschlussfestigkeit, zulässige Leistungsflüsse an Sammelschienen und kapazitive Ausgleichsströme beim Schalten sowie geografische Faktoren wie die verfügbare Grundstücksfläche setzen hierbei klare Obergrenzen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie sich Schaltanlagenstrukturen und deren Auslegung optimieren lassen, um den steigenden Anforderungen an Übertragungskapazität, Versorgungssicherheit und Flächeneffizienz gerecht zu werden.

Als Lösungsansatz zur Reduzierung der Anzahl der Schaltfelder je Anlage und damit des Flächenbedarfs wird in dieser Arbeit die Kategorisierung von Schaltanlagen in zwei Typen untersucht. Anstelle einer einzelnen, groß dimensionierten Schaltanlage, die sowohl zahlreiche Leitungsstromkreise aufnimmt als auch Kundenanschlüsse bereitstellt, sollen diese beiden Aufgaben auf zwei räumlich getrennte Anlagen verteilt werden. Die Netzknotenanlagen sollen primär dem Transport bzw. der Übertragung elektrischer Energie dienen, während die geografisch getrennten, kompakten Versorgungs-/Kundenanlagen ausschließlich der Einbindung von Transformatoren von Verteilnetzbetreibern und Kunden dienen. Durch die räumliche Trennung von Netzknoten- und Versorgungs-/Kundenanlagen kann die Anzahl der Transformator-Schaltfelder in Netzknotenanlagen verringert und somit der erforderliche Flächenbedarf pro Anlage redu-

Einleitung

ziert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu prüfen, inwieweit die vorgeschlagene konzeptionelle und bauliche Trennung – unter Berücksichtigung verschiedener topologischer Ausführungen der Versorgungs-/Kundenanlagen – technisch und betrieblich sinnvoll umsetzbar ist. Die Sinnhaftigkeit dieser Trennung wird bewertet, indem die Auswirkungen der gewählten Einbindungsart von Versorgungs-/Kundenanlagen in das Höchstspannungsnetz auf folgende Gesichtspunkte analysiert werden:

- Lastflussaufteilung im (n-0)-Fall
- Transportkapazität im (n-1)-Fall
- Kurzschlussniveau
- Zuverlässigkeit der Anlage
 - für den Netzbetreiber im Hinblick auf Transport bzw. Übertragung elektrischer Energie
 - für den Kunden im Hinblick auf Versorgung und Einspeisung

Zur Identifizierung geeigneter Topologien für Versorgungs-/Kundenanlagen wurde zunächst eine Literaturrecherche zu vorangegangenen Arbeiten im Bereich der Netzplanung sowie der Zuverlässigkeitsanalyse von Schaltanlagen durchgeführt.

Für die Untersuchung der ersten drei Bewertungskriterien – Lastflussaufteilung im (n-0)-Fall, Transportkapazität im (n-1)-Fall und resultierende Kurzschlussströme – wurde in PowerFactory ein konzeptionelles Netzmodell erstellt. Dieses bestand aus zwei Netzknotenanlagen, die über eine Doppelleitung (zwei parallel geführte Stromkreise) miteinander verbunden waren, sowie einer dritten Leitung, über die der Vermaschungsgrad des Netzgebiets variiert werden konnte. In dieses Modell wurde anschließend eine Versorgungs-/Kundenanlage integriert, wobei unterschiedliche Anbindungsarten (Voll-einschleifung, Einfacheinschleifung, Doppelstich, Stich) untersucht wurden. Unter Zuhilfenahme einer PowerFactory-Python-Schnittstelle wurden Lastfluss- und Kurzschlussberechnungen für eine Vielzahl an Netznutzungsszenarien durchgeführt und graphisch ausgewertet. Darüber hinaus wurde eine analytische Berechnungsmethode entwickelt, welche sich als erste Abschätzung für die maximale Transportkapazität bei verschiedenen Netzanbindungsvarianten eignet und als hilfreiches Werkzeug für die erste Planungsabschätzung dienen kann.

Die Zuverlässigkeitsanalyse der Anlagen erfolgte auf Basis der Kenngrößen *Ausfallhäufigkeit* und *Reparaturdauer*, die für jedes eingesetzte Betriebsmittel im Rahmen einer zwischen 2004 und 2007 international durchgeführten Untersuchung erhoben und 2012 in einer mehrteiligen CIGRE-Berichtsreihe veröffentlicht wurden. Die Auswertung wurde mithilfe eines Excel-Tools durchgeführt, wobei ausschließlich (n-1)-Fehlerfälle berücksichtigt wurden.

Kapitel 1 umfasst die Literaturrecherche sowie einen Vergleich verschiedener weltweit eingesetzter Schaltanlagenkonzepte. Kapitel 2 beschreibt die angewandte Methodik, insbesondere den Aufbau des konzeptionellen Netzmodells sowie das Vorgehen zur Massenauswertung von simulierten Netznutzungsszenarien mithilfe von Leistungsflussberechnungen in PowerFactory.

Kapitel 3, das in vier thematische Abschnitte gegliedert ist, präsentiert und diskutiert die Ergebnisse dieser Auswertungen. Ausgangspunkt ist die Analyse des fehlerfreien Netzes. Zunächst wird eine analytische Berechnungsmethode zur Abschätzung der Lastflussaufteilung und Leitungsauslastung entwickelt, deren Ergebnisse anschließend mithilfe von PowerFactory-Simulationen ermittelt und in Python ausgewertet werden (Kapitel 3.1).

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird eine analytische Berechnungsmethode zur Bestimmung der maximalen Transportkapazität im (n-1)-Fall entwickelt. Anschließend werden die Ergebnisse mit den Resultaten der PowerFactory-Simulationen verglichen und die Genauigkeit der vereinfachten Berechnungen bewertet (Kapitel 3.2).

Das nächste Unterkapitel (3.3) behandelt die Kurzschlussstromberechnung für verschiedene Einbindungspositionen der Versorgungs-/Kundenanlage – primär gemäß der Norm IEC 60909, ergänzt um eine Verifizierung mittels der exakteren Methode *Superposition mit Lastfluss*.

Kapitel 3.4 behandelt die Zuverlässigkeitsanalyse, die für jede der in der Literaturrecherche als geeignet identifizierten Topologien mithilfe einer Excel-Auswertung durchgeführt wurde.

Kapitel 4 fasst die wesentlichen Ergebnisse aus Kapitel 3 zusammen und bildet eine Synthese der gewonnenen Erkenntnisse. Kapitel 5 enthält die Schlussfolgerungen und schließt die Arbeit ab.

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

1.1. Entwicklung und Stand der Technik

Die Entwicklung von Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien ist eng mit den Fortschritten in der Zuverlässigkeitsanalyse verknüpft. Dabei quantifiziert **Zuverlässigkeit** die Fähigkeit eines elektrischen Energieversorgungssystems, über einen längeren Zeitraum hinweg mit nur wenigen Unterbrechungen nahezu kontinuierlich eine angemessene Stromversorgung bereitzustellen [IEV 617-01-01].

Bereits 1969 legten Davenport, Magidson und Yakub mit ihrer Arbeit *Substations Bus-Switching Arrangements. Their Essential Requirements and Reliability* [1] einen Grundstein für das Verständnis der Zuverlässigkeit von Schaltanlagen. Als **Schaltanlage** wird dabei jener Teil eines Energieversorgungssystems bezeichnet, der an einem bestimmten Ort konzentriert ist und hauptsächlich die Enden von Übertragungs- oder Verteilleitungen, Schaltgeräte und Gebäude umfasst und gegebenenfalls Transformatoren enthalten kann. In der Regel gehören dazu auch Einrichtungen, die für die Systemsicherheit und Steuerung erforderlich sind (z.B. Schutzeinrichtungen) [IEV 605-01-01].

In Veröffentlichung [1] wird die entscheidende Rolle von Anordnung und Design der Sammelschienen für die Zuverlässigkeit der Schaltanlage erläutert. Beschrieben werden verschiedene Sammelschienen- und Schalteranordnungen, darunter unterschiedliche Varianten der H-Schaltung, Doppel- und Mehrfachsammelschiene – jeweils mit und ohne Transferschiene¹ –, Ringsammelschiene, 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie sowie 2-Leistungsschalter-Topologie. Es wird betont, dass eine der Hauptanforderungen an die Sammelschienen- und Schalteranordnungen von Schaltanlagen darin besteht, die Zuverlässigkeit der Stromversorgung für die Verbraucher sicherzustellen und gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Energieübertragung über die Hochspannungsschaltanlage zu gewährleisten.

Die Zuverlässigkeit der genannten Schaltanlagen-Topologien wird auf Grundlage der Ausfallhäufigkeit der eingesetzten Betriebsmittel sowie der Dauer ihrer Reparatur berechnet. Das Ergebnis zeigt, dass unter jenen Topologien ohne Sammelschiene (H1-Schaltung, H3-Schaltung und Ringsammelschiene) die Ringsammelschiene die höchste Zuverlässigkeit in Bezug auf die Versorgung der Verbraucher aufweist. Wird hingegen der Fokus auf die Übertragung gelegt, erreicht die H3-Schaltung (mit im Normalschaltzustand geöffneter Bypass-Verbindung) den höchsten Wert. Unter den untersuchten Varianten mit Sammelschiene (Doppelsammelschiene mit Längskupplung einer der beiden Sammelschienen, Doppelsammelschiene mit Bypass-Schiene, 2-Leistungsschalter-Topologie und 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie) fällt auf, dass die Zuverlässigkeit hin-

¹auch: Bypass-Sammelschiene oder Umgehungsschiene

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

sichtlich der Kundenversorgung bei allen Varianten hinreichend hoch ist, während in Bezug auf die Transportzuverlässigkeit die 2-Leistungsschalter-Topologie am besten abschneidet.

Im Jahr 1974 erschien das Paper *Substation Design Criteria for Simple, Reliable and Safe Service* [2], das im Namen des Study Committee No. 23 (Substations) von Cakebread, Reichert und Schütte präsentiert wurde und auf den Ergebnissen von [1] aufbaut. Darin werden die Zuverlässigkeitskenngrößen Fehlerrate λ und Reparaturrate μ vorgestellt sowie die Zuverlässigkeit $R(t)$ verschiedener Schaltanlagen (Einfachsammelschiene mit Längskupplung, Doppelsammelschiene, Ringsammelschiene und 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie) erstmals als Funktion der Lebensdauer der Schaltanlage ($0 \leq t \leq 200$) dargestellt.

Dies erfolgt für zwei Szenarien: In Szenario a) wird die Last von einem einzigen Transformator gespeist, während in Szenario b) zwei Transformatoren die Last versorgen.

Eines der relevantesten Ergebnisse: Während sich die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie in den ersten Jahren als die zuverlässigste erweist, nimmt ihre Zuverlässigkeit mit zunehmendem Alter der Schaltanlage aufgrund der hohen Anzahl an Betriebsmitteln ab und wird nach 12 Jahren (Szenario b) von der Ringsammelschiene als der zuverlässigsten Topologie abgelöst.

Bemerkenswert ist zudem ein weiterer Schnittpunkt der Kennlinien $R(t)$ in Szenario b): Nach 16 Jahren weist die Doppelsammelschiene eine höhere Zuverlässigkeit auf als die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie.

1979 folgte die Veröffentlichung von Cakebread, Reichert und Schütte mit dem Titel *Reliability in the design of EHV substations. Availability as a function of component failure rate. Repair and maintenance times* [3]. Während sich das Paper [2] lediglich auf den Einfluss der Ausfallraten der Komponenten auf die Zuverlässigkeit der gesamten Schaltanlage beschränkte und Reparatur- und Wartungsarbeiten dabei nicht berücksichtigte, geht das Werk [3] einen Schritt weiter: Es befasste sich mit der Frage, wie die Verfügbarkeit von Hochspannungs-Schaltanlagen durch die Berücksichtigung von Reparaturen und Wartungen gesteigert werden kann. Die Autoren stellten geeignete Modelle zur Berechnung der Verfügbarkeit als Funktion von Ausfallraten, Reparaturzeiten und geplanten Wartungsintervallen vor.

Werden verschiedene Schaltanlagentopologien auf Basis dieser Modelle hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit bewertet, so zeigt sich, dass – unter jenen bereits in [2] untersuchten Topologien – die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie am besten abschneidet. Dagegen reagiert die Ringsammelschiene sehr empfindlich gegenüber der Position des jeweiligen Abzweigs im Ring; die Nichtverfügbarkeit ist dabei mehr oder weniger vergleichbar mit der einer Doppelsammelschiene.

Während die zuvor betrachteten Arbeiten den Schwerpunkt auf die quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit unterschiedlicher Schaltanlagentopologien legen, befassen sich die nachfolgenden Arbeiten ebenfalls mit Aspekten der Zuverlässigkeit, erweitern den Fokus jedoch um zusätzliche Auslegungskriterien für AC-Freiluft-Schaltanlagen.

Die im Jahr 2000 veröffentlichte CIGRE-Richtlinie *General Guidelines for the Design*

of *Outdoor A.C. Substations* [4] wurde von der Arbeitsgruppe 23.03 erarbeitet und stellt eine aktualisierte Version einer früheren Richtlinie [5] dar, die 1992 von der CIGRE Arbeitsgruppe 23.04 veröffentlicht wurde. Der ursprüngliche Leitfaden entstand in den frühen 90er Jahren, um die Entwurfsanforderungen für Freiluft-AC-Umspannwerke zu definieren, jedoch machten die Entwicklung neuer Techniken und die Öffnung der Märkte eine Überarbeitung des ursprünglichen Dokuments erforderlich. Die Hauptziele dieses neuen Handbuchs bestehen darin, einen klaren Leitfaden für die Planung von Freiluft-Umspannwerken bereitzustellen, der die Systemanforderungen, die geeignete Standortwahl und die Gestaltung der zu installierenden Anlagen berücksichtigt. Das Dokument enthält Empfehlungen zu allgemeinen Entwurfsprinzipien sowie relevanten IEC-Normen und berücksichtigt darüber hinaus auch wirtschaftliche Faktoren. Eine wesentliche Entscheidungshilfe stellt etwa Abbildung 1 dar, die die Gründung eines neuen Umspannwerks behandelt und Einblicke in die notwendigen Schritte bietet, von der Standortwahl bis zur endgültigen Betriebsbereitschaft. Wie bereits in den zuvor genannten Papern wird auch in diesem Leitfaden ein besonderes Augenmerk auf das Schaltanlagen-Layout gelegt, das eine entscheidende Rolle in Bezug auf die betriebliche Flexibilität, Systemsicherheit und Zuverlässigkeit spielt.

Das im Jahr 2008 veröffentlichte Dokument *IEEE 605 I.E. Guide for Bus Design in Air Insulated Substations* [6] wurde – im Gegensatz zu den bisher genannten Dokumenten, die von CIGRE erarbeitet wurden – vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) herausgegeben und bietet eine umfassende Anleitung zur Auslegung von Sammelschienen in luftisolierten Umspannwerken, sowohl für starre (Rohre) als auch für flexibel (Seile) Sammelschienenkonstruktionen. **Sammelschienensysteme** in Schaltanlagen erfüllen die folgenden Funktionen:

- Sie ermöglichen den Anschluss von mehr als einem Stromkreis an die Schaltanlage.
- Sie dienen als Anschlusspunkte für ein- und ausgehende Stromkreise.
- Sie ermöglichen die elektrische Verbindung von Schalt- und Betriebsmitteln wie Transformatoren, Kondensatorbänken, Drosselspulen usw.

Ein zentrales Element des Leitfadens ist die Berücksichtigung von Faktoren wie Strombelastbarkeit, Funkstörungen, Vibrationen sowie elektromechanische Kräfte infolge von Schwerkraft, Wind, Kurzschlussstrom und Wärmeausdehnung. Die Designkriterien umfassen auch Berechnungen zur Festigkeit von Leitern und Isolatoren. In Tabelle 1 des Dokuments findet sich ein Vergleich zwischen verschiedenen Sammelschienen-Topologien, bei dem jeweils Vor- und Nachteile sowie Kosten und Platzbedarf aufgeführt werden. Darüber hinaus enthält das Dokument in Abbildung 7 ein Ablaufdiagramm für das Sammelschienendesign, das den Entscheidungsprozess bei der Sammelschienen-Gestaltung visualisiert und die Schritte von der anfänglichen Anforderung über die Auswahl geeigneter Materialien bis hin zur Implementierung und Prüfung aufzeigt.

Im Jahre 2014 wurde die Arbeit *Circuit Configuration Optimization* [7] der Joint Working Group B3/C1/C2.14 veröffentlicht. Darin wird, auf Basis von untenstehenden Bewertungskriterien, ein Verfahren zur objektiven Beurteilung und Auswahl einer geeig-

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

neten Schaltanlagen-Konfiguration vorgestellt.

Die Bewertungskriterien lauten:

1. **Versorgungssicherheit:** Die Fähigkeit eines elektrischen Energieversorgungssystems, zu einem bestimmten Zeitpunkt im Falle einer Störung seine Versorgungsfunktion zu erfüllen [IEV 606-05-03]. Die Schaltanlagenkonfiguration muss folglich in der Lage sein, nach internen Fehlern (Sammelschienen- und Leistungsschalter) und externen Fehlern (Abgangsseite des Leistungsschalters) vor Durchführung jeglicher Schaltheftungen seine Versorgungsfunktion zu erfüllen.
2. **Verfügbarkeit während der Instandhaltung:** Die Fähigkeit einer Schaltanlagenkonfiguration, Abgangsleitungen während der Wartung von Trennern und Leistungsschaltern unter Spannung zu halten.
3. **Betriebliche Flexibilität:** Die Fähigkeit einer Schaltanlage, Abgangsleitungen umzuschalten und die Schaltanlage in Teilbereiche aufzuteilen – und das, während die Anlage unter Spannung steht.

Eng mit der Forderung an Versorgungssicherheit sind die Begriffe N-1- und N-2-Fall verflochten:

- **N-1:** Einzelausfall eines beliebigen Systemelements (Leitung, Transformator, Generator oder Drossel).
- **N-2:** Gleichzeitiger Doppelausfall eines beliebigen Systemelements (Leitung, Transformator, Generator oder Drossel).

Als allgemeine Regel können die folgenden Netzbedingungen als akzeptabel eingestuft werden:

- **N-1:** Ein System muss in der Lage sein, einen einzelnen Ausfall zu verkraften, ohne dynamische und statische Grenzwerte zu überschreiten, wie zum Beispiel:
 - zulässige thermische Belastungsgrenze von Leitungen infolge dauerhafter Überströme,
 - zulässiger Dauerüberstrom von Transformatoren in Bezug auf die Nennleistung.
- **N-2:** Ein System muss darüber hinaus in der Lage sein, bestimmte gleichzeitige oder aufeinanderfolgende Ausfälle zu verkraften, wie zum Beispiel:
 - gleichzeitiger Ausfall bestimmter Doppelleitungen,
 - gleichzeitiger oder aufeinanderfolgender Ausfall der größten Erzeugungseinheit in einem Gebiet und einer Kuppelleitung dieses Gebiets zu einem anderen Gebiet.

In der Arbeit [7] wird die Beurteilung der **Versorgungssicherheit** verschiedener Schaltanlagen-Topologien anhand des obersten Abschnitts in Tabelle 1.1 durchgeführt. Dabei

erfolgt die Bewertung nach zwei Kriterien: einerseits nach der Auswirkung eines Primärfehlers² auf das Gesamtsystem und andererseits nach der Auswirkung eines Primärfehlers mit zusätzlichem Versagen des Leistungsschalters. Für beide Kriterien wird ein Wert zwischen 1 (Worst Case) und 6 (Best Case) vergeben. Entsprechend wird jeder der untersuchten Schaltanlagen-Topologien ein Wert zwischen 1 und 6 zugeordnet.

Es fällt auf, dass mit steigenden Anforderungen an die Versorgungssicherheit auch mehr Schaltgeräte wie Leistungsschalter und Sammelschienen erforderlich sind, um dieses Versorgungsniveau zu gewährleisten. Der geringere Beurteilungswert der Doppelsammelschienen im Vergleich zu Dreifach- und Ringsammelschiene sowie 1^{1/2}- und 2-Leistungsschalter-Topologie lässt sich dadurch erklären, dass im Falle eines Primärfehlers mit zusätzlichem Leistungsschalterausfall nicht verhindert werden kann, dass die gesamte Schaltanlage außer Betrieb geht. Ebenso ist erkennbar, dass die H3-Konfiguration die gleiche Bewertung wie die H5-Konfiguration erhält und somit als gute Alternative zur Optimierung des Einsatzes von Leistungsschaltern angesehen werden kann.

Äquivalent wird beim Bewertungskriterium **Verfügbarkeit während der Instandhaltung** vorgegangen (mittlerer Abschnitt in Tabelle 1.1). Der Schweregrad 1 bezeichnet die schlimmste Konsequenz für das Gesamtsystem und entspricht dem Ausfall der gesamten Schaltanlage bei Wartung eines beliebigen Sammelschientrennschalters. Der Schweregrad 7 steht für die mildeste Konsequenz (kein Netzelement wird abgeschaltet und die Netztopologie wird bei Wartung eines beliebigen Sammelschientrennschalters nicht geschwächt). Entsprechend wird jeder der untersuchten Schaltanlagen-Topologien ein Wert zwischen 1 und 7 zugeordnet.

Das kritischste Betriebsmittel für die Instandhaltung ist der Sammelschientrenner, da bei herkömmlicher Instandhaltungspraxis die betreffende Sammelschiene für die Dauer der Arbeiten spannungsfrei geschaltet werden muss. Mehrfachsammschienenensysteme verbessern zwar die Verfügbarkeit der Schaltanlage während der Instandhaltung von Sammelschientrennern, erhöhen jedoch den Flächenbedarf und die Kosten.

Auch beim Bewertungskriterium **betriebliche Flexibilität** wird entsprechend verfahren (unterer Abschnitt in Tabelle 1.1). Der Wert 1 bedeutet, dass die Schaltanlage nicht in Teilbereiche aufgeteilt werden kann, während der Wert 6 angibt, dass es möglich ist, die Schaltanlage in zwei getrennte elektrische Bereiche aufzuteilen und dass zudem ein hoher Grad an Flexibilität hinsichtlich der Art und Weise besteht, wie dies durchgeführt werden kann. Entsprechend wird jeder der untersuchten Schaltanlagen-Topologien ein Wert zwischen 1 und 6 zugeordnet.

Sind für jede der zu untersuchenden Schaltanlagen die Wertigkeiten für Versorgungssicherheit, Verfügbarkeit während der Instandhaltung und betriebliche Flexibilität ermittelt, folgt der nächste Schritt. Die Eigenschaften einer Schaltanlage hängen nämlich nicht nur von ihrer konkreten Ausführung (z.B. Doppelsammelschiene), sondern auch von ihrer Position im Netz sowie von ihrer relativen Bedeutung ab. Deshalb wird eine Unterscheidung zwischen

- (a) Schaltanlagen zum Anschluss von Erzeugern (konventionelle Kraftwerke oder de-

²Primärfehler: Ein Ausfall eines Betriebsmittels, der weder direkt noch indirekt durch den Ausfall oder einen Fehler eines anderen Betriebsmittels verursacht wird [IEV 191-04-15].

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

zentrale Einspeiser),

- (b) Interconnection-Schaltanlagen zum Transport und zur Verteilung von elektrischer Energie und
- (c) Step-up/down Schaltanlagen zum Anschluss von z.B. Verteilnetzbetreibern

vorgenommen. Je nach Typ wird jedes der drei Bewertungskriterien mit einem Gewichtungsfaktor zwischen 0 und 1 beaufschlagt (siehe Tabelle 1.1, unterster linker Teil). So hat eine Schaltanlage zum Anschluss von konventionellen Kraftwerken oder dezentralen Einspeisern einen hohen Gewichtungsfaktor (0,9) für Versorgungssicherheit, aber einen niedrigen für betriebliche Flexibilität. Im Gegensatz dazu wird betriebliche Flexibilität bei Interconnection-Schaltanlagen sehr hoch (0,9) bewertet.

Die Auswertung der einzelnen Topologien erfolgt folgendermaßen: Die im ersten Schritt vergebenen Wertigkeiten für Versorgungssicherheit, Verfügbarkeit während der Instandhaltung und betriebliche Flexibilität werden jeweils durch den entsprechenden Maximalwert (6 bei Kriterium 1 und 3, 7 bei Kriterium 2) dividiert, anschließend mit dem zugehörigen Gewichtungsfaktor multipliziert und die drei gewichteten Wertigkeiten addiert. Beispielsweise berechnet sich die Zuverlässigkeit einer Interconnection-Schaltanlage mit H5-Topologie zu

$$\left(\frac{2}{6} \cdot 0,1 + \frac{3}{7} \cdot 0,1 + \frac{3}{6} \cdot 0,8\right) \cdot 10 = 4,8 \quad . \quad (1.1)$$

Das Ergebnis ist eine Bewertung verschiedener Schaltanlagen-Topologien, jeweils für drei mögliche Arten von Schaltanlagen, dargestellt in Tabelle 1.1 unten, gelb hinterlegt. Von den untersuchten Topologien schneidet die Einfachsammelechiene für alle drei Kategorien a), b) und c) am schlechtesten ab, gefolgt von der Einfachsammelechiene mit Längstrennung und der H4-Schaltung. Es folgen H3- und H5-Schaltung, die aufgrund gleicher Wertigkeiten bei allen Beurteilungskriterien gleich abschneiden. Danach folgt die Doppelsammelschiene ohne Bypass-Sammelschiene, gefolgt von der Variante mit Bypass-Sammelschiene und der Dreifachsammelechiene. Die Ringsammelschiene weist unter diesen Topologien bei Schaltanlagen der Kategorie a) die besten Werte auf, schneidet aber bei Schaltanlagen der Kategorie b) aufgrund der geringen betrieblichen Flexibilität am schlechtesten ab und liegt bei Schaltanlagen der Kategorie c) zwischen den Doppelsammelschiene-Varianten. Am besten schneidet die 2-Leistungsschalter-Topologie ab, am zweitbesten die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie.

				Single busbar (SB)	Sectionalizable single busbar (SSB)	H3 configuration (H3)	H4 configuration (H4)	H5 configuration (H5)	Double bus bar with coupler bay (DB)	Double busbar with coupler bay and transfer busbar (DBT)	Triple busbar (TB)	Ring configuration (R)	One and a half circuit breaker (OHCB)	Two circuit breaker configuration (2CB)
Service security	Score	Possible consequences in the network because of a primary fault	Possible consequences in the network because of a primary fault when breaker fails to open											
	1	Possible loss of the whole substation	Loss of the whole substation	1	1		1							
	2	Loss of one or more feeder but not the whole substation	Loss of more than one feeder or the whole substation			2		2	2	2				
	3	Loss of one or more feeder but not the whole substation	Loss of more than one feeder but not the whole substation								3			
	4	Loss of one feeder	Loss of one feeder and always one feeder more but not the whole substation									4		
	5	Loss of none or one feeder	Loss of one feeder and possibly one feeder more but not the whole substation										5	
	6	Loss of none or one feeder	Loss of one feeder											6
Availability during maintenance	Score	Maintenance of:	Consequence											
	1	Any busbar disconnecting switch	Outage of whole substation	1										
	2	Sectionalizer disconnecting switch	Outage of whole substation		2		2							
	3	Any busbar or sectionalizer disconnecting switch	Outage of half the substation			3		3						
	4	Any busbar disconnecting switch	Outage of one busbar, remaining objects in service on the same busbar						4					
	5	Any busbar disconnecting switch	Outage of one busbar, remaining objects in double busbar configuration								5			
	6	Any busbar disconnecting switch Circuit breaker	Remaining circuits in service and open ring split-up substation Split-up of the substation and all circuits in service									6	6	
7	Any busbar disconnecting switch Circuit breaker	Outage of one busbar, all objects in service on the same busbar All circuits remain in service							7				7	
Operational flexibility	Score	Definition												
	1	Not possible to split		1										
	2	Non-energized split (DS only), no flexibility			2		2							
	3	Energized split (with CB), no flexibility				3		3						
	4	Energized split (with CB), low flexibility										4	4	
	5	Energized split (with CB), high flexibility, switching with DS							5	5				
6	Energized split (with CB)									6			6	
	Weighting factor													
	Service security	Availability during maintenance	Operational flexibility	Assessment of circuit configurations										
Substations attached to power	0.9	0.05	0.05	1.7	1.8	3.5	1.8	3.5	3.7	3.9	5.4	6.8	8.3	10.0
Interconnection	0.1	0.1	0.8	1.6	3.1	4.8	3.1	4.8	7.6	8.0	9.2	6.9	7.0	10.0
Step-up/ Step-down substations	0.3	0.3	0.4	1.6	2.7	4.3	2.7	4.3	6.0	7.3	7.6	7.2	7.7	10.0

Tabelle 1.1.: Ergebnisse der Beurteilung von Schaltanlagen-Topologien laut [7] 11

1.1.1. Schaltanlagen-Topologien

Ausgehend von den Ergebnissen der Zuverlässigkeitsanalyse in den zuvor besprochenen Papern und den Ergebnissen der Beurteilung laut [7], dargestellt in Tabelle 1.1, haben sich insbesondere die Topologien H3- und H5-Schaltung, Doppel- und Dreifachsammelschiene, Ringsammelschiene sowie die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie als vielversprechend für weitere Betrachtungen herauskristallisiert.

Obwohl die 2-Leistungsschalter-Topologie in sämtlichen vorangegangenen Untersuchungen als die zuverlässigste Topologie identifiziert wurde, wurde sie aufgrund der signifikant höheren Kosten (zurückzuführen auf die höchste Anzahl an Betriebsmitteln pro Stromkreis) im Vergleich zu allen anderen Topologien und des hohen Flächenbedarfs nicht für weitere Untersuchungen berücksichtigt.

Zum Vergleich: In Paper [1] werden die Errichtungskosten der 2-Leistungsschalter-Topologie mit 160,5 % der Kosten der Doppelsammelschiene angegeben, während die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie mit lediglich 103 % beziffert wird. In Handbuch [6] werden die Kosten der 2-Leistungsschalter-Topologie im Vergleich zur Doppelsammelschiene mit 135,7 % angegeben, während die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie – ähnlich wie in [1] – mit 103,6 % bewertet wird.

H3- und H5-Schaltung

H-Schaltungen sind Einsammelschienen-Anordnungen und werden typischerweise eingesetzt, um eine Kundenanlage oder eine Erzeugungsanlage an eine bestehende Höchstspannungsleitung anzuschließen. Die H-Konfiguration ist auf vier Abzweige beschränkt – normalerweise zwei Leitungen und zwei Leistungstransformatoren – und ist nicht für eine zukünftige Erweiterung vorgesehen.

Der Leistungsschalter im Querzug, welcher bei der H4-Schaltung nicht vorhanden ist, bietet wesentliche betriebliche Vorteile. Er ermöglicht es, die Hälfte der Schaltanlage in Betrieb zu halten, wenn ein Fehler auf der Sammelschiene, an einem Sammelschienen-trenner oder an einem Abzweig-Leistungsschalter auftritt. Außerdem erlaubt er auf einfache Weise, für die Wartung von Sammelschientrennern eine Sammelschienen-hälfte abzuschalten [7][8].

Die H5-Schaltung, dargestellt in Abbildung 1.2b, ähnelt der H3-Schaltung (Abbildung 1.2a) – mit dem entscheidenden Unterschied, dass alle Abzweige jeweils mit einem eigenen Leistungsschalter ausgestattet sind. Dieser Umstand hat jedoch keinen Einfluss auf die Bewertungskriterien.

Versorgungssicherheit

- Die Einsparung zweier Leistungsschalter bei der H3- im Gegensatz zur H5-Schaltung erfolgt auf Kosten einer komplexeren Abzweigschutztechnik. Tritt auf einem Abzweig ohne eigenen Leistungsschalter ein Fehler auf, muss der Schutz zwei Schalter ansprechen, um den Fehler abzuschalten. Dies führt dazu, dass bei einem Primärfehler auf einem solchen Abzweig zusätzlich noch ein weiterer Abzweig verloren geht.
- Da es keinen gemeinsamen elektrischen Punkt für die Abzweige gibt, geht durch

einen Primärfehler auf einem der Abzweige nicht die gesamte Schaltanlage verloren.

- Ein Fehler des Leistungsschalters im Querzweig oder ein Versagen beim Öffnen führt jedoch zum Ausfall der gesamten Schaltanlage.

Verfügbarkeit während der Instandhaltung

- Die Wartung eines beliebigen Sammelschientrenners oder eines Trenners im Querzweig erfordert die Außerbetriebnahme einer Hälfte der Schaltanlage.
- Die Wartung des Leistungsschalters im Querzweig macht es erforderlich, die Schaltanlage in zwei unabhängige Hälften zu teilen.

Betriebliche Flexibilität

- Die Schaltanlage kann, während sie unter Spannung steht, durch das Öffnen des Leistungsschalters im Querzweig geteilt werden.
- Es besteht jedoch keine Flexibilität bei der Auswahl, welche Abzweige an welchen Teil der Sammelschiene angeschlossen werden [7].

Doppelsammelschiene

Die Doppelsammelschienen-Anlage – dargestellt in Abbildung 1.1a und Abbildung 1.2c – ist eine Schaltanlage, in der die Leitungen und Transformatoren über Sammelschienen-Trennschalter wahlweise mit einer der beiden Sammelschienen verbunden werden. Die beiden Sammelschienen sind dabei über einen Kuppelschalter³ miteinander verbunden. Diese Anordnung wird für große Schaltanlagen empfohlen, bei denen die Versorgungssicherheit von besonderer Bedeutung ist. Sie eignet sich insbesondere für stark vermaschte Netze, in denen Schaltflexibilität erforderlich ist und mehrere Einspeisewege vorhanden sind. Außerdem wird sie zur Trennung von Netzen eingesetzt (ein Netz pro Sammelschiene) [7][8].

Versorgungssicherheit

- Die Konfiguration basiert auf zwei Sammelschienen, die über ein Kuppelfeld miteinander verbunden sind. Das bedeutet, dass ein Primärfehler – mit Ausnahme eines Fehlers am Kuppelschalter – nicht zum Ausfall der gesamten Schaltanlage führt.
- Ein Primärfehler auf einer Sammelschiene, bei dem der Kuppelschalter nicht öffnet, führt jedoch zum Ausfall der gesamten Schaltanlage.

³Leistungsschalter zum Verbinden zweier Sammelschienen; auch: Querkuppler

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

Verfügbarkeit während der Instandhaltung

- Die Wartung eines beliebigen Sammelschienentrenners erfordert die Außerbetriebnahme des entsprechenden Abzweigs und der zugehörigen Sammelschiene. Die anderen Abzweige werden zuvor mit der anderen Sammelschiene verbunden und bleiben somit in Betrieb.
- Die Wartung des Querkupplers macht es erforderlich, die beiden Sammelschienen (durch Öffnen der entsprechenden Trenner) zu trennen und die Schaltanlage als zwei Einfachsammelschienen-Anlagen zu betreiben.

Betriebliche Flexibilität

- Die Schaltanlage kann, während sie unter Spannung steht, durch das Öffnen des Kuppelschalters in zwei Einsammelschienen-Anlagen geteilt werden.
- Die beiden Sammelschienentrenner an jedem Stromkreis ermöglichen es, den Abzweig wahlweise mit der einen, oder der anderen Sammelschiene zu verbinden, ohne die Versorgung zu unterbrechen [7].

Dreifachsammelschiene

Die Dreifachsammelschienen-Anlage – dargestellt in Abbildung 1.1b und Abbildung 1.2d – ist eine Schaltanlage, in der die Leitungen und Transformatoren über Sammelschienen-Trennschalter wahlweise mit einer der drei Sammelschienen verbunden werden.

Versorgungssicherheit

- Ein Primärfehler – selbst ein Fehler am Kuppelschalter – führt nicht zum Ausfall der gesamten Schaltanlage. In diesem Fall fallen zwei Sammelschienen aus, aber eine Sammelschiene bleibt weiterhin in Betrieb.
- Während der Wartung eines Abzweigs bleibt eine vollständige Doppelsammelschiene erhalten. Daher führt ein Primärfehler in dieser Zeit (mit Ausnahme eines Fehlers am verbleibenden Kuppelschalter) ebenfalls nicht zum Ausfall der gesamten Schaltanlage.

Verfügbarkeit während der Instandhaltung

- Die Wartung eines beliebigen Sammelschienentrenners erfordert die Außerbetriebnahme des entsprechenden Abzweigs und der zugehörigen Sammelschiene. Alle anderen Abzweige bleiben über die beiden verbleibenden Sammelschienen in Betrieb.
- Bei Wartung des Kuppelschalters werden alle Abzweige an die beiden unter Spannung stehenden Sammelschienen gelegt, welche als Doppelsammelschiene mit Kuppelschalter fungieren.

Betriebliche Flexibilität

- Durch das Öffnen der Leistungsschalter in den Querscheiden kann die Schaltanlage, während sie unter Spannung steht, in drei Einsammelschienen-Anlagen oder verschiedene Varianten von Doppel- und Einfachsammeleisen geteilt werden.
- Die beiden Sammeleisenentrenner an jedem Stromkreis ermöglichen es, den Abzweig wahlweise mit einer der drei Sammeleisen zu verbinden, ohne die Versorgung zu unterbrechen [7].

Transferschiene

Die Transferschiene (auch als Umgehungsschiene oder Bypass-Sammeleisen bezeichnet) ist eine zusätzliche Sammeleisen, die nicht für die Hauptstromverteilung in der Schaltanlage genutzt wird. Sie dient dazu, Wartungsarbeiten an Leistungsschaltern durchführen zu können, ohne dass dafür eine Abschaltung von Stromkreisen erforderlich ist. Das Feld, dessen Leistungsschalter gewartet werden muss, wird mitsamt den Schutzeinrichtungen auf die Transfersammeleisen umgeschaltet. Der Leistungsschalter in der ursprünglichen Feldposition kann nun abgeschaltet und gewartet werden, während das Leitungs- oder Transformatorfeld in Betrieb bleibt und der Kunde keine Versorgungsunterbrechung erfährt. Die Transfersammeleisen ist normalerweise über ein Kuppelfeld mit den anderen Sammeleisen der Schaltanlage verbunden [7].

In den vorliegenden Untersuchungen wird auf den Einsatz einer Transferschiene verzichtet, da sie keinen unmittelbaren Einfluss auf die Versorgungssicherheit hat und primär der Wartung des Leistungsschalters im Abzweigfeld dient. Da Wartungsaspekte nicht zum Betrachtungsumfang dieser Arbeit gehören, wird die Transferschiene hier nicht weiter berücksichtigt.

Ringsammeleisen

Die Ringsammeleisen, dargestellt in Abbildung 1.2e, ist eine Einsammelschienen-Schaltanlage, bei der die Sammeleisen als geschlossener Ring ausgebildet ist und Leistungsschalter in Serie angeordnet sind [IEV 605-01-20].

Diese Konfiguration erfordert genauso viele Leistungsschalter wie Abzweige, ermöglicht jedoch den Betrieb aller Stromkreise, während ein Leistungsschalter gewartet wird.

Häufig dient die Ringsammeleisen als erste Ausbaustufe für eine spätere 1 1/2-Leistungsschalter-Konfiguration.

Zur Abdeckung aller Schaltfälle müssen die Leistungsschalter und zugehörigen Betriebsmittel den kombinierten Laststrom der verschiedenen Stromkreise plus einen Zuschlag für den Stromfluss entlang der Sammeleisen aufnehmen können.

Die Steuerungs- und Schutztechnik ist komplexer, da jeder Leitungsschutz auf zwei Leistungsschalter wirken muss und jeder Leistungsschalter von zwei Schutzsystemen angesteuert wird.

Im Gegensatz zu Mehrfachsammeleisenkonfigurationen mit Trennern ist die Auslegung des Sammeleisen-schutzes und des Leistungsschalters-schutzes jedoch einfacher, da der Schutz nicht entscheiden muss, welche Leistungsschalter im Falle eines Sammeleisen-fehlers oder beim Versagen eines Leistungsschalters abzuschalten sind.

Bei der Errichtung eines zusätzlichen Stromkreises muss der Ring geöffnet betrieben

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

werden, wodurch auch die beiden benachbarten Stromkreise an der Anschlussstelle ausfallen. Mehr als sechs Leistungsschalter in einem Ring werden aufgrund betrieblicher Schwierigkeiten nicht empfohlen. Daher sollte bei einer Erweiterung die Umstellung des Rings auf eine 1 1/2-Leistungsschalter-Konfiguration in Betracht gezogen werden [7][8].

Versorgungssicherheit

- Alle Abzweige sind über zwei Leistungsschalter an die Schaltanlage angeschlossen, wobei sich je zwei Abzweige einen Leistungsschalter teilen. Im Falle eines Fehlers in einem Abzweig öffnen die beiden benachbarten Leistungsschalter, die diesem Abzweig zugeordnet sind. Dadurch wird der Rest des Rings in eine Art Einsammelschienenkonfiguration überführt. Sobald der fehlerhafte Stromkreis isoliert ist, kann der Ring – sofern sich der Fehler nicht auf der Sammelschienenenseite des Trenners befindet – durch Schließen der beiden Leistungsschalter wiederhergestellt werden.
- Ein Primärfehler führt nicht zum Ausfall der gesamten Schaltanlage, sondern lediglich zum Ausfall des fehlerhaften Abzweigs.
- Ein Primärfehler, bei dem ein Leistungsschalter nicht öffnet, führt stets zum Ausfall eines zweiten Abzweigs, jedoch nicht zum Ausfall der gesamten Schaltanlage. Der Ring kann jedoch erst dann wiederhergestellt werden, wenn der defekte Leistungsschalter repariert ist.

Verfügbarkeit während der Instandhaltung

- Da zwei Leistungsschalter pro Abzweig vorhanden sind, ist es möglich, jeden Leistungsschalter zu warten, ohne dass der Abzweig außer Betrieb genommen werden muss.
- Die Wartung eines Ringtrenners erfordert jedoch die Außerbetriebnahme des entsprechenden Abzweigs.
- Die Wartung eines beliebigen Betriebsmittels in der Schaltanlage erfordert das Öffnen des Rings, was eine Verringerung der Versorgungssicherheit zur Folge hat.

Betriebliche Flexibilität

- Theoretisch könnte die Schaltanlage durch das Öffnen zweier Leistungsschalter in zwei Einsammelschienen-Anlagen aufgeteilt werden. Dies wird allerdings nicht empfohlen, da jedem Objekt dann weniger als ein Leistungsschalter zugeordnet wäre und die Schaltanlage für Primärfehler innerhalb und außerhalb der Anlage anfällig wäre.
- Sämtliche Schalter im Ring müssen der Bemessung der Sammelschiene entsprechen, um den Lastfluss durch den Ring zu ermöglichen.
- Um bei geöffnetem Ring die maximale Versorgungssicherheit zu gewährleisten, werden die Stromkreise üblicherweise so angeordnet, dass sich Einspeisungen und Abgänge im Ring abwechseln [7].

1 1/2-Leistungsschalter-Konfiguration

Die 1 1/2-Leistungsschalter-Konfiguration – dargestellt in Abbildung 1.1c und Abbildung 1.2f – ist eine Doppelsammelschienen-Anlage, bei der für zwei Stromkreise drei Leistungsschalter in Serie zwischen den beiden Sammelschienen angeordnet sind, wobei die Stromkreise jeweils auf beiden Seiten des mittleren Leistungsschalters angeschlossen sind [IEV 605-01-25].

Die 1 1/2-Leistungsschalter-Anordnung ist besonders für Schaltanlagen mit hohen Leistungen geeignet, wie sie z.B. in Kraftwerksanschlüssen auftreten, sowie für Netze mit überwiegend radialer Struktur und nur wenigen Vermaschungen.

Zur Abdeckung aller Schaltfälle müssen die Leistungsschalter und die zugehörigen Betriebsmittel in der Lage sein, den kombinierten Laststrom von zwei Stromkreisen sowie einen Zuschlag für den Leistungstransfer zwischen den Sammelschienen aufzunehmen. Der Grund dafür ist, dass die 1 1/2-Leistungsschalter-Konfiguration über keine separaten Kuppelschalter verfügt, da jedes Feld selbst als Kuppelschalter fungiert.

Die Steuerung und Schutztechnik ist vergleichsweise komplex, da jeder Leitungsschutz zwei Leistungsschalter ansprechen muss und der mittlere Leistungsschalter von zwei Schutzsystemen gesteuert wird. Die sammelschienenseitigen Leistungsschalter werden hingegen nur durch einen Leitungsschutz sowie den Sammelschienenschutz angesteuert. Wie bereits bei der Ringsammelschiene beschrieben, ist die Auslegung des Sammelschienenschutzes und des Leistungsschalterschutzes jedoch einfacher als bei Mehrfach-sammelschienenkonfigurationen mit Trennern, da der Schutz nicht entscheiden muss, welche Leistungsschalter im Falle eines Sammelschienenfehlers oder eines Leistungsschalterausfalls abzuschalten sind.

Die Schaltanlage wird normalerweise mit geschlossenen Leistungsschaltern betrieben. Bei der Installation eines neuen Abzweigs ist es nicht notwendig, bestehende Abzweige abzuschalten [7][8].

Versorgungssicherheit

- Bei dieser Konfiguration werden zwei Sammelschienen benötigt. Jeder Abzweig ist über zwei Leistungsschalter an die Schaltanlage angeschlossen; der mittlere Leistungsschalter wird von zwei Abzweigen gemeinsam genutzt, während der sammelschienenseitige Leistungsschalter jeweils einem Abzweig zugeordnet ist.
- Ein Primärfehler führt nicht zum Ausfall der gesamten Schaltanlage, sondern lediglich zum Ausfall des fehlerhaften Abzweigs oder zum Ausfall einer Sammelschiene, ohne dass Abzweige verloren gehen.
- Ein Fehler an einem der mittleren Leistungsschalter führt jedoch zum Verlust von zwei Abzweigen.
- Ein Primärfehler, bei dem ein Leistungsschalter nicht öffnet, führt im schlimmsten Fall zum Verlust eines weiteren Abzweigs, jedoch niemals zum Ausfall der gesamten Schaltanlage.

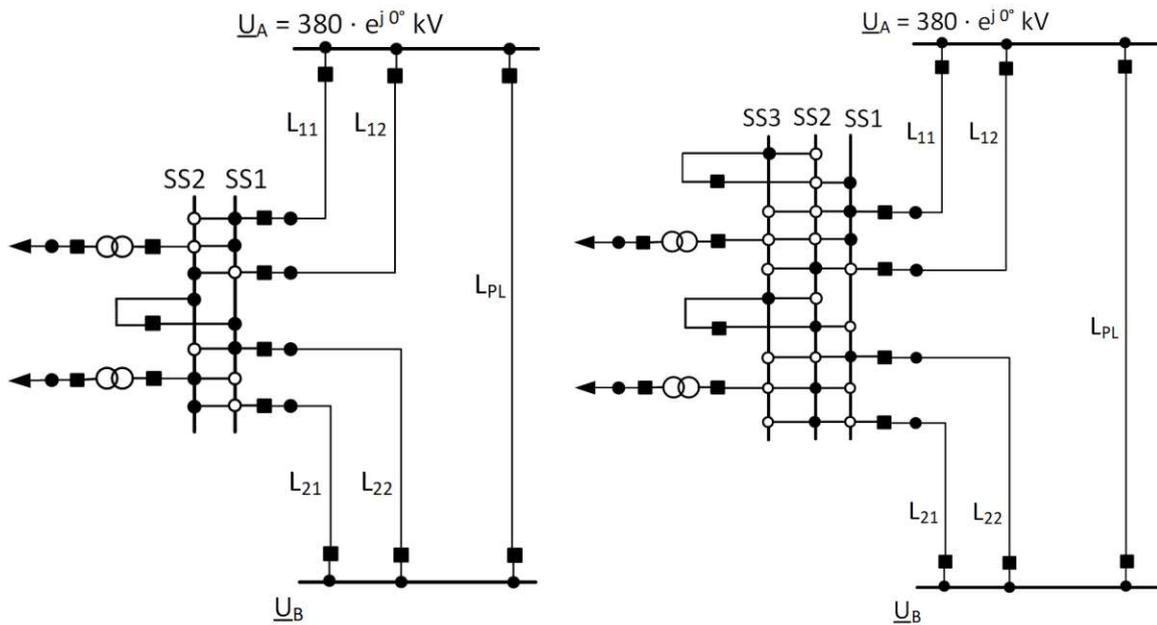
1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

Verfügbarkeit während der Instandhaltung

- Da zwei Leistungsschalter pro Abzweig vorhanden sind, ist es möglich, jeden Leistungsschalter zu warten, ohne dass der Abzweig außer Betrieb genommen werden muss.
- Die Wartung eines Sammelschientrenners erfordert jedoch die Außerbetriebnahme des entsprechenden Abzweigs.
- Die Wartung eines Sammelschientrenners erfordert die Außerbetriebnahme einer Sammelschiene, jedoch keine Außerbetriebnahme eines Abzweigs. Die Wartung eines beliebigen anderen Trenners erfordert die Außerbetriebnahme eines einzelnen Abzweigs.

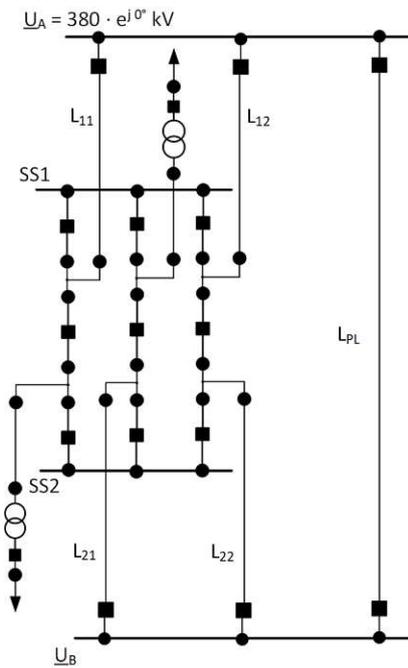
Betriebliche Flexibilität

- Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Schaltanlage zu teilen, jedoch hat jede Variante bestimmte Einschränkungen.
 - Öffnen aller mittleren Leistungsschalter: Dadurch entstehen zwei Einsammelschienenanlagen. Es ist jedoch nicht möglich zu wählen, welcher Abzweig an welche Sammelschiene angeschlossen wird.
 - Zuordnung von Stromkreisen zur gegenüberliegenden Sammelschiene durch Öffnen des benachbarten sammelschienenseitigen Leistungsschalters: In diesem Fall kann jedoch ein Fehler in einem der Stromkreise dazu führen, dass beide Stromkreise auf diesem Strang die Versorgung verlieren.
 - Öffnen der beiden sammelschienenseitigen Leistungsschalter eines Stranges: In diesem Fall bleiben die beiden Stromkreise auf einem Strang miteinander verbunden, sind jedoch von beiden Sammelschienen getrennt [7].



(a) 2-fach-Sammelschiene

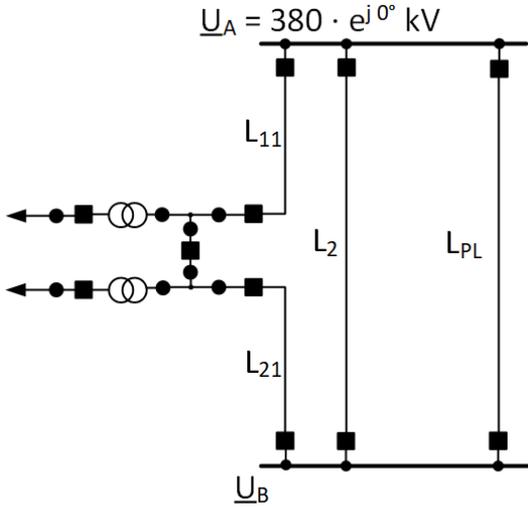
(b) 3-fach-Sammelschiene



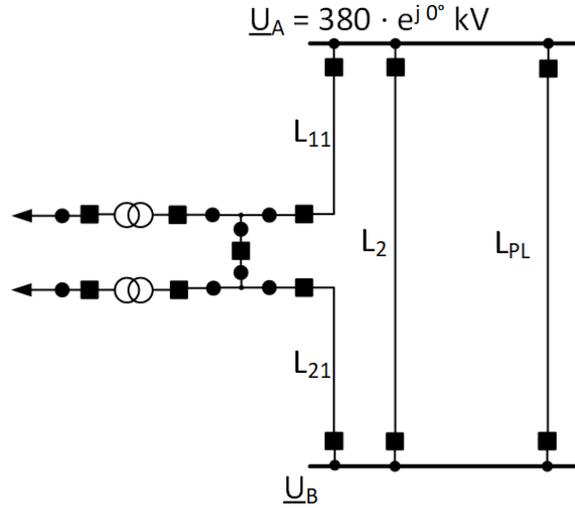
(c) 1 1/2-Leistungsschalter

Abbildung 1.1.: Schaltanlagen-Topologien für Volleinschleifung

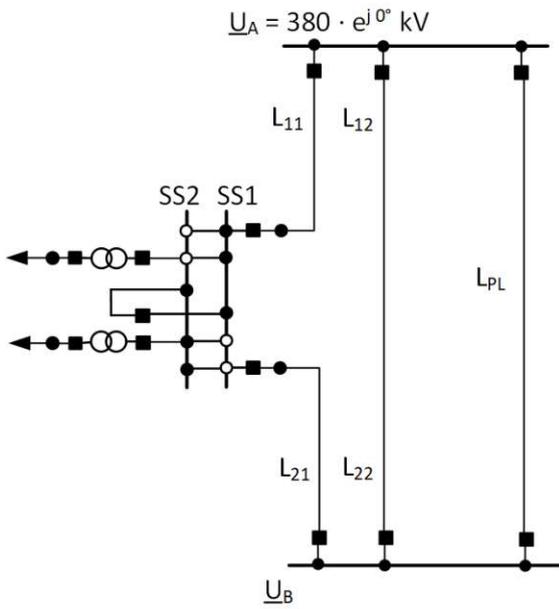
1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien



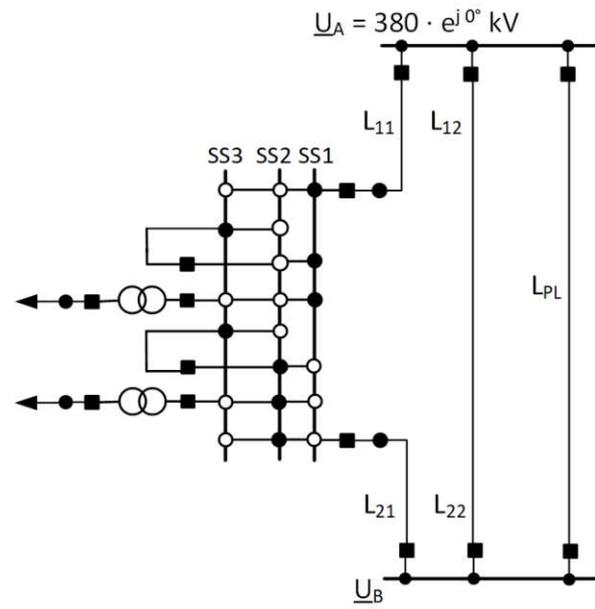
(a) H3-Schaltung



(b) H5-Schaltung



(c) 2-fach-Sammelschiene



(d) 3-fach-Sammelschiene

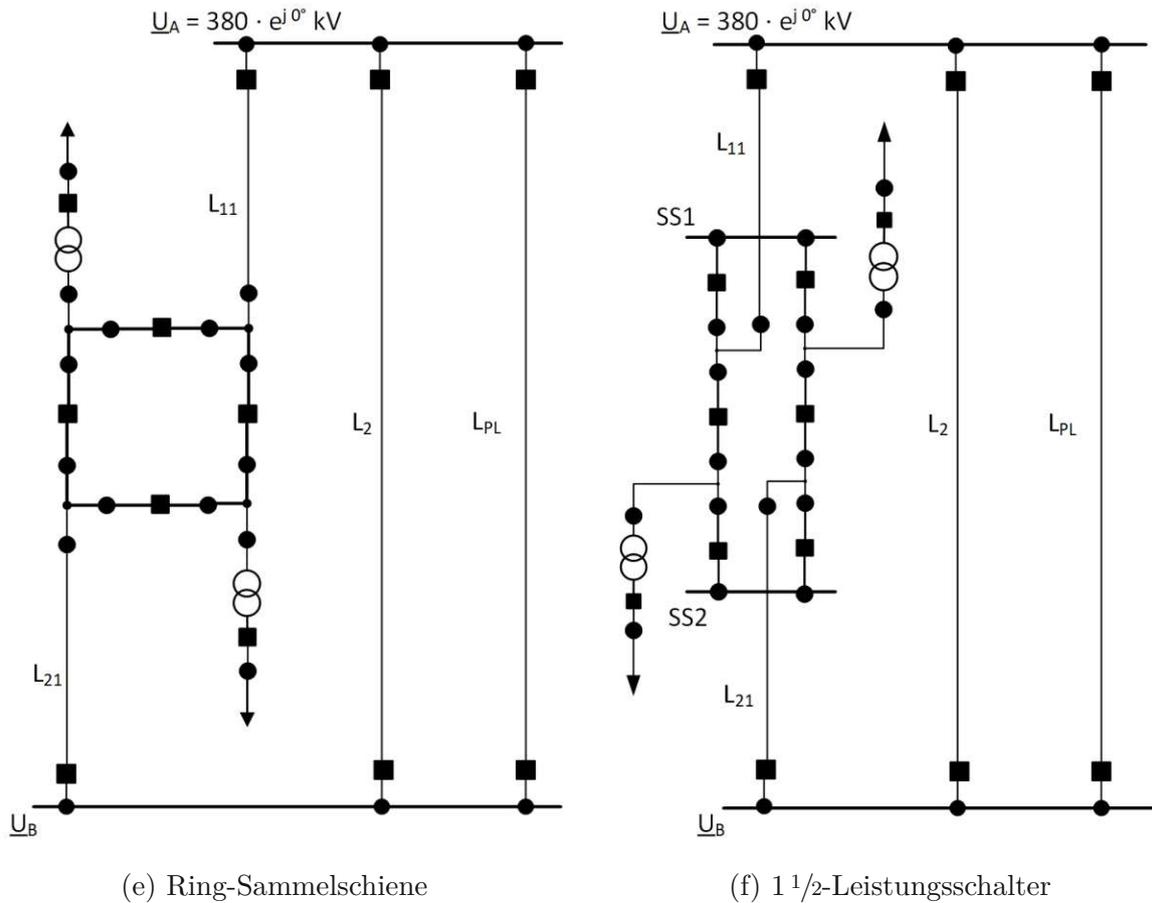


Abbildung 1.2.: Schaltanlagen-Topologien für Einfacheinschleifung

1.2. Notwendigkeit für weitere Untersuchungen

Ausgehend vom Versorgungsauftrag ist ein Übertragungsnetzbetreiber für den Bau und Betrieb des Transportnetzes in der Höchstspannungsebene verantwortlich. Die wesentlichen Aufgaben umfassen dabei zwei Aspekte:

- Transport/Übertragung elektrischer Energie
 - aus Einspeisungen konventioneller Kraftwerke
 - großer Energiemengen aus regenerativer Erzeugung onshore und offshore
- Versorgung/Anschluss
 - regionaler, unterlagerter Netzbetreiber
 - Kundenanschlüsse von Großkunden (z.B. Elektrolyse)
 - Einspeisungen aus regenerativen Erzeugungsanlagen (Rückspeisung)

Die aktuelle Entwicklung des rapide voranschreitenden Netzausbaus im Zuge der Energiewende erfordert die Erhöhung der Anzahl an notwendigen Schaltfeldern im Höchstspannungsnetz zum Anschluss von Leitungsstromkreisen, Erzeugern und Lasten. Sowohl

1. Netzplanung und Schaltanlagen-Topologien

technisch als auch geographisch stößt die Realisierung und der Betrieb derartiger Anlagen bereits in aktuellen Projekten an die Grenzen der Machbarkeit.

1.3. Neuartigkeit des eigenen Beitrags

Als Lösungsansatz zur Reduzierung der Anzahl der Schaltfelder je Anlage bei der Anlagenplanung wird in dieser Arbeit die Typisierung von Schaltanlagen in zwei Kategorien untersucht. Anstatt einer großen Schaltanlage, die sowohl eine Vielzahl von Leitungsstromkreisen aufnehmen als auch dem Anschluss von Kunden dienen soll, sollen diese beiden Aufgaben von zwei räumlich getrennten Schaltanlagen übernommen werden:

- Netzknotenanlagen
 - dienen primär dem Transport bzw. der Übertragung elektrischer Energie
 - unter Einhaltung der maximal zulässigen Anzahl an Schaltfeldern können in diesen Anlagen auch Versorgungs-/Anschlussaufgaben integriert werden
- Versorgungs-/Kundenanlagen
 - dienen ausschließlich der Einbindung von Transformatoren von Verteilnetzbetreibern und Kunden
 - sind räumlich von Transport-/Übertragungsanlagen getrennt
 - die Kombination von Transformatoren zur Versorgung unterlagerter Netzbetreiber und Kunden mit Transformatoren von Einspeisungen aus regenerativen Erzeugungsanlagen sollte berücksichtigt werden

Durch die räumliche Trennung von Netzknotenanlagen zu Versorgungs-/Kundenanlagen besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Transformator-Schaltfelder in Netzknotenanlagen zu reduzieren und damit auch die erforderliche Grundstücksfläche zu verkleinern. Demgegenüber steht, dass sowohl die Gesamtzahl der Schaltfelder im Netz (und damit die erforderliche Anzahl an Betriebsmitteln) als auch die Anzahl der Schaltanlagen im Netz ansteigt.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie sich diese Art der Einbindung von Versorgungs-/Kundenanlagen ins Höchstspannungsnetz auf folgende Gesichtspunkte auswirkt:

- Lastflussaufteilung im (n-0)-Fall
- Transportkapazität im (n-1)-Fall
- Kurzschlussniveau
- Zuverlässigkeit der Anlage
 - für den Netzbetreiber hinsichtlich Transport/Übertragung elektrischer Energie

- für den Kunden hinsichtlich Versorgung und Einspeisung

Für jene Versorgungs-/Kundenanlagen, deren Anbindung ins Höchstspannungsnetz untersucht werden soll, wurden nach gezielter Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 1.1) folgende Topologien für die Analyse ausgewählt:

- voll eingeschleifte Topologien (Netzanbindung laut Abbildung 2.4a und Schaltanlagendesigns laut Abbildung 1.1)
 - 2-fach Sammelschiene
 - 3-fach Sammelschiene
 - 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie
- einfach eingeschleifte Topologien (Netzanbindung laut Abbildung 2.4b und Schaltanlagendesigns laut Abbildung 1.2)
 - H3-Schaltung
 - H5-Schaltung
 - 2-fach-Sammelschiene
 - 3-fach Sammelschiene
 - Ring-Sammelschiene
 - 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie
- Stichanbindung (Abbildung 2.4d)
- Doppelstichanbindung (Abbildung 2.4e)

Diese Designs versprechen einen guten Kompromiss aus platzsparender Bauweise bei begrenztem Flächenangebot und angemessener Zuverlässigkeit – sowohl für den Transport elektrischer Energie auf den Leitungen, an denen die Anlage angebunden ist, als auch für die Versorgung bzw. Einspeisung der angeschlossenen Kunden. Auf die Analyse von 4-Sammelschienen-Anlagen und 2-Leistungsschalter-Topologien wird bewusst verzichtet, da diese für Versorgungs-/Kundenanlagen als reine Einspeise- oder Entnahmepunkte überdimensioniert sind. Ebenso wird auf eine Umgehungschiene verzichtet, da diese zusätzlichen Platz- und Schaltfeldbedarf verursacht und, wie bereits in Abschnitt 1.1.1 erläutert, keinen unmittelbaren Einfluss auf die Versorgungssicherheit hat.

2. Untersuchungsbasis und Methoden

2.1. Untersuchungsumgebung in PowerFactory

Als Ausgangssituation für die nachfolgenden Untersuchungen und Analysen dient das in Abbildung 2.1 dargestellte konzeptionelle Netz. **A** und **B** bilden Netzknoten, wobei **A** als Slack-Knoten konzipiert ist und die mit ihm verbundene Sammelschiene stets auf $\underline{U}_A = 380 \text{ kV} \cdot e^{j0^\circ}$ regelt, unabhängig von der jeweiligen Lastflusssituation. Dagegen ist **B** als PQ-Knoten realisiert. Folglich werden die Wirkleistung P und die Blindleistung Q vorgegeben; die Spannung an der zugehörigen Sammelschiene stellt sich entsprechend der konkreten Lastsituation ein. Bei Wahl von $P > 0$ (Erzeugung) gilt für die reellen Effektivwerte $U_B > U_A$, bei Wahl von $P < 0$ (Last) gilt $U_B < U_A$.

Die Distanz zwischen den Netzknoten beträgt, sofern nicht anders angegeben, 100 km. Die beiden Netzknoten **A** und **B** sind über zwei Freileitungen zu jeweils 100 km miteinander verbunden. Darüber hinaus existiert ein vermaschtes Netz, das in PowerFactory durch die Leitung L_{PL}^1 repräsentiert wird. Die gewünschte Vermaschung wird auf eine entsprechende Länge der Parallel-Leitung umgerechnet, siehe Kapitel 2.2.

Alle Leitungen im konzeptionellen Netz weisen dieselben Leitungsparameter auf, dargestellt in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1.: Leitungsparameter der Freileitungen

Bemessungsstrom	I_r	4 kA
längenbezogene Größen		
Widerstandsbelag	R'	0,01 Ω /km
Induktivitätsbelag	L'	0,7639 mH/km
Kapazitätsbelag	C'	0,01 μ F/km
Ableitungsbelag	G'	0 S/km

¹genannt: Parallel-Leitung

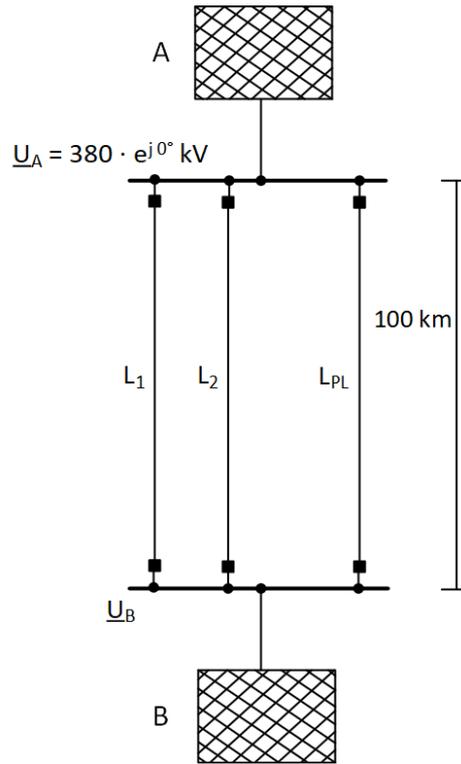


Abbildung 2.1.: Untersuchungsumgebung in PowerFactory

2.2. Vermaschungsgrad

Laut [9] ist der Vermaschungsgrad G_V eines Netzabschnittes von der Anzahl der Knoten N_K und von der Anzahl der die Knoten verbindenden Zweige N_Z entsprechend

$$G_V = \frac{N_Z}{N_K - 1} \quad (2.1)$$

abhängig. Demnach ergibt sich für ein unvermaschtes Netz ein Vermaschungsgrad $G_V = 1$.

Das bereits vorgestellte konzeptionelle Netz beinhaltet zwei Netzknoten, nämlich **A** und **B**. Die beiden Knoten sind durch $2 + N_{Z,var}$ Leitungen miteinander verbunden. Zwei Leitungen sind dabei fix, die übrigen $N_{Z,var}$ Leitungen sind frei wählbar, die konkrete Wahl bestimmt den Vermaschungsgrad.

$$N_K = 2 \quad (2.2)$$

$$N_Z = 2 + N_{Z,var}, \text{ mit } N_{Z,var} \geq 0 \quad (2.3)$$

Der Vermaschungsgrad berechnet sich damit zu

$$G_V = \frac{N_Z}{N_K - 1} = N_Z \quad (2.4)$$

und entspricht bei lediglich zwei Knoten exakt der Anzahl der Zweige. Er variiert, je nach Wahl von $N_{Z,\text{var}}$, zwischen $G_V = 2$ bei $N_{Z,\text{var}} = 2$ und $G_V \rightarrow \infty$ bei $N_{Z,\text{var}} \rightarrow \infty$.

Die Vermaschung V eines Netzabschnittes hängt über den Zusammenhang

$$V = 1 - \frac{1}{N_Z} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

direkt mit der eben vorgestellten Definition des Vermaschungsgrades zusammen und drückt aus, auf wie viel Prozent eine Leitung ausgelastet werden kann, um beim Ausfall einer anderen, im selben Netzabschnitt befindlichen Leitung, noch $(n-1)$ sicher zu sein – die Auslastung der Leitung darf demnach 100% nicht übersteigen.

Die Formel für die Vermaschung resultiert, mit Blick auf Abbildung 2.2, aus folgender Überlegung: Bei N_Z Zweigen teilt sich der Gesamtstrom I_{Ges} auf die einzelnen Zweige gemäß einem Stromteiler auf:

$$\frac{I}{I_{\text{Ges}}} = \frac{1}{N_Z} \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow I = \frac{1}{N_Z} \cdot I_{\text{Ges}} \quad (2.7)$$

Beim Ausfall eines Zweiges müssen gemäß dem $(n-1)$ -Kriterium die verbleibenden $N_Z - 1$ Zweige zusätzlich den Strom laut Gleichung 2.7 übernehmen, ohne dadurch in Überlast zu gehen:

$$\frac{I_{n-1}}{I_r} \leq 1 \quad (2.8)$$

Wird

$$I_{n-1} = I_{n-0} + \frac{I_{n-0}}{N_Z - 1} \quad (2.9)$$

in Gleichung 2.8 eingesetzt, folgt

$$\frac{1}{I_r} \cdot \left(I_{n-0} + \frac{I_{n-0}}{N_Z - 1} \right) = \frac{I_{n-0}}{I_r} \cdot \left(\frac{N_Z}{N_Z - 1} \right) \leq 1 \quad (2.10)$$

und damit die Auslastungsgrenze der einzelnen Zweige, um dem $(n-1)$ -Kriterium zu genügen:

$$\underbrace{\frac{I_{n-0}}{I_r}}_{A_{\text{max}}} \leq \frac{N_Z - 1}{N_Z} = 1 - \frac{1}{N_Z} \quad (2.11)$$

Die maximal mögliche prozentuale Auslastung, die noch dem $(n-1)$ -Kriterium genügt, bezeichnen wir als Vermaschung, vgl. Gleichung 2.5.

In Abbildung 2.2 sind für die Vermaschungsgrade laut Tabelle 2.2 die größtmöglichen Zweigauslastungen entsprechend Gleichung 2.11 angegeben.

2. Untersuchungsbasis und Methoden

Tabelle 2.2.: Zusammenhang zwischen Vermaschungsgrad und Vermaschung

G_V in 1	Formel für V	V in %
2	$(1 - \frac{1}{2}) \cdot 100\%$	50
3	$(1 - \frac{1}{3}) \cdot 100\%$	$66, \bar{6}$
4	$(1 - \frac{1}{4}) \cdot 100\%$	75
5	$(1 - \frac{1}{5}) \cdot 100\%$	80

Bei einem Vermaschungsgrad von G_V dürfen die einzelnen Leitungen im Netzabschnitt auf $(1 - \frac{1}{G_V}) \cdot 100\%$ ausgelastet werden, um noch dem (n-1)-Kriterium zu genügen.

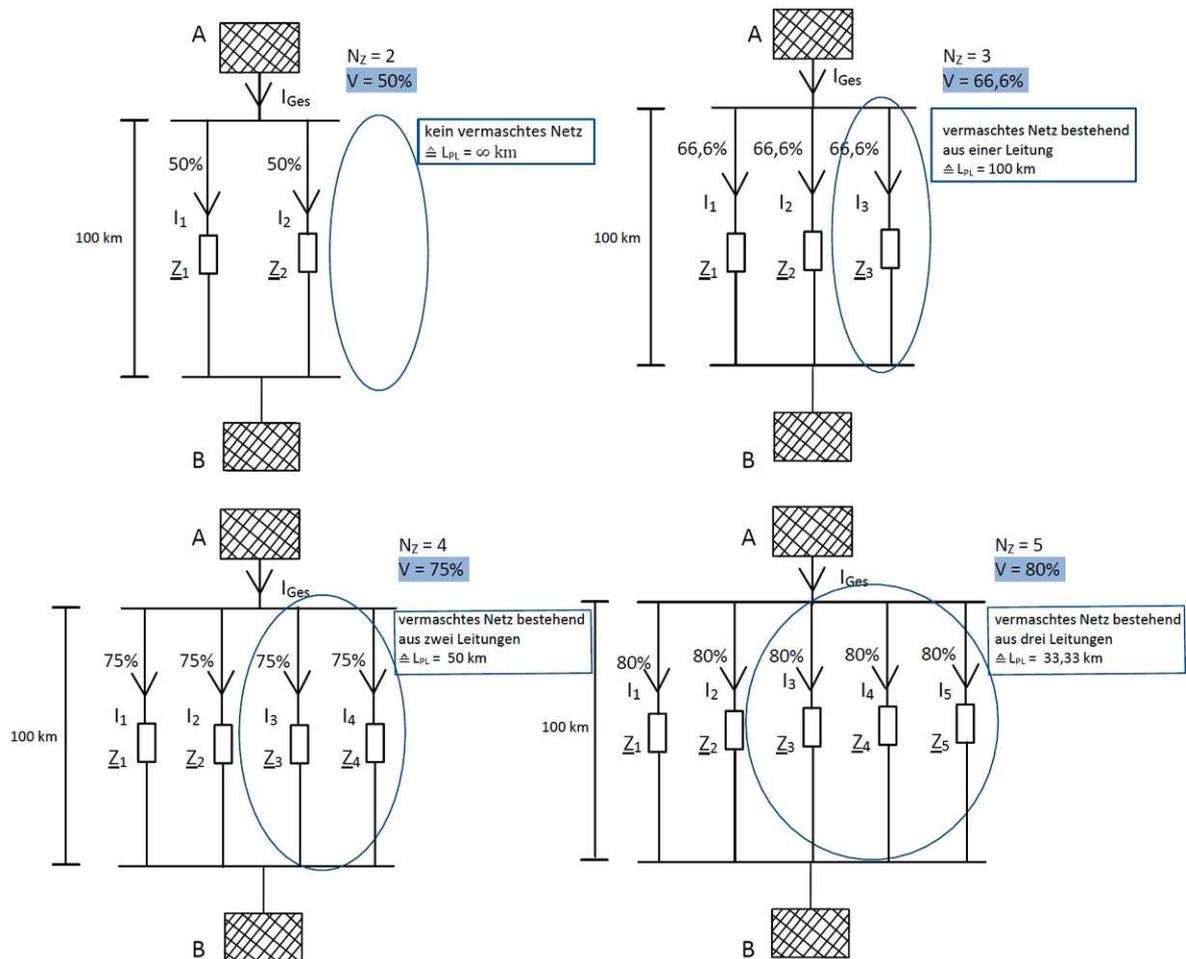


Abbildung 2.2.: Vermaschungsgrad

Anstatt den Vermaschungsgrad über eine variable Anzahl von gleich langen Zweigen zu steuern, wie bereits in Gleichung 2.3 vorgeschlagen, fassen wir im konzeptionellen Netz in PowerFactory die variablen Zweige $N_{Z,var}$ nun zu einem einzigen Zweig L_{PL} zusammen, dessen Länge dieselbe Impedanz wie die Parallel-Schaltung aller Z_{var} Zweige aufweist. Unter Beibehaltung der längenbezogenen Leitungsparameter wird der Vermaschungsgrad demnach über die Leitungslänge der Parallel-Leitung gesteuert. Beträgt die Länge zwischen den beiden Netzknoten **A** und **B** 100 km, so ergeben sich für die Parallel-Leitung folgende Zuordnungen:

Tabelle 2.3.: Zuordnung zwischen Vermaschungsgrad und Länge der Parallel-Leitung für Abbildung 2.2

G_V in 1	L_{PL} in km
2	$\rightarrow \infty$ (keine Parallel-Leitung)
3	100
4	50
5	$33,\bar{3}$

Unter Beibehaltung der Distanz zwischen Netzknoten **A** und **B** gilt: Je kürzer die Parallel-Leitung, desto höher der Vermaschungsgrad, je länger die Parallel-Leitung, desto niedriger der Vermaschungsgrad.

Um für unterschiedliche Netzabschnitte (angefangen von sehr geringer Vermaschung bis hin zu sehr starker Vermaschung) gültige Aussagen ableiten zu können, werden nachfolgenden Untersuchungen mit fünf verschiedenen Vermaschungsgraden durchgeführt, aufgelistet in untenstehender Tabelle.

Tabelle 2.4.: Zusammenhang zwischen Vermaschung und Anzahl der Zweige sowie die aus dem Vermaschungsgrad umgerechnete Länge der Parallel-Leitung

Vermaschung V in %	Anzahl der Zweige N_Z in 1	Länge L_{PL} in km
54,5	2,2	500
60	2,5	200
66,7	3	100
75	4	50
80	5	33,3

2.3. Einbindung von Erzeugern und Lasten

Nun sollen Erzeuger und Lasten geografisch gesammelt ins Netz² integriert werden, wobei deren summierte Wirkleistungsabgabe und -aufnahme durch die Größe P_S charakterisiert ist. Um verschiedene Varianten miteinander vergleichbar zu machen, werden zwei Abzweige betrachtet, die – mit Ausnahme der Stichtanbindung, siehe Abbildung 2.4d – jeweils mit einem eigenen Leistungstransformator ausgestattet sind. Ob diese Abzweige zu Windparks (Erzeugung), industriellen Großkunden (Last) oder aber Verteilnetzbetreibern (Last oder Erzeugung, je nach Netzsituation) führen, ist für diese Untersuchung belanglos. Für die vorliegende Arbeit ist lediglich relevant, wie sich die über diese beiden Abzweige summierte Wirkleistung, quantifiziert durch die Größe P_S (positiv, wenn Wirkleistung ins Netz abgegeben wird; negativ, wenn Wirkleistung aus dem Netz aufgenommen wird), auf den Rest des Netzes auswirkt.

Der konventionelle Ansatz, Erzeuger oder Lasten ins Netz anzubinden, ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Der Netzknoten **B** steht hierbei als Blackbox für eine bestehende Schaltanlage (z.B. eine Mehrfachsammlerschienen-Anlage oder eine 1 1/2-Leistungsschalter-Anlage), die neben den Leitungsstromkreisen L_1 und L_2 auch die zum vermaschten Netz gehörenden (und durch L_{PL} symbolisierten) Stromkreise aufnimmt. Zusätzlich werden innerhalb derselben Schaltanlage – im Zuge von zwei zusätzlichen Schaltfeldern – die beiden Transformatorabzweige, welche in Summe die Wirkleistung P_S abgeben bzw. aufnehmen, angeschlossen.

In dieser Arbeit soll darüber hinaus ein neuer Ansatz untersucht werden, nämlich die Anbindung zwischen den Netzknotenpunkten **A** und **B**, dargestellt in Abbildung 2.4. In den Abbildungen 2.4a und 2.4b fungiert die mit **S** bezeichnete Schaltanlage als Blackbox, wobei in den Abbildungen 1.1 und 1.2 aufgeschlüsselt ist, welche konkreten Schaltanlagen-Topologien in weiterer Folge untersucht werden.

Bei allen nachfolgenden Untersuchungen wird die Länge der Einschleifung bei Voll- und Einfacheinschleifung sowie die Stichtlänge bei Doppelstich und Stich vernachlässigt. Dies betrifft in Abbildung 2.4 die horizontal gezeichneten Leitungslängen.

²Das Netz entspricht in meiner Arbeit der vereinfachten Untersuchungsumgebung laut Abbildung 2.1.

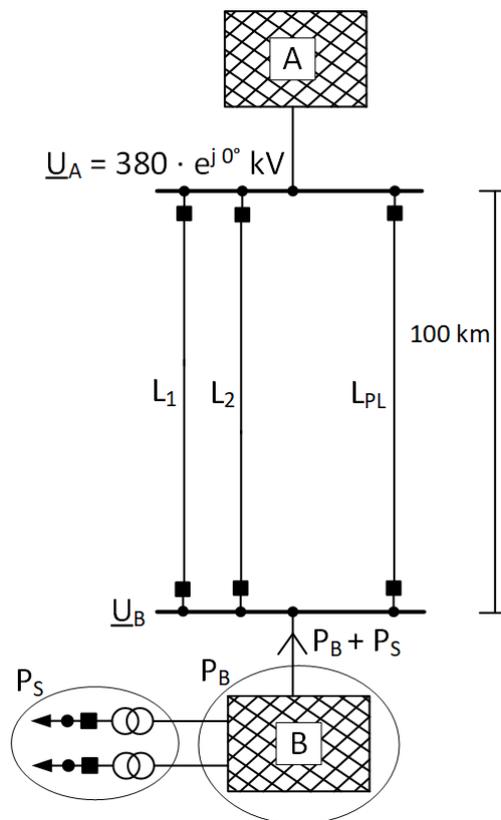


Abbildung 2.3.: Basisszenario: Konventionelle Anbindung von Erzeugern und/ oder Lasten in einem Netzknoten

2. Untersuchungsbasis und Methoden

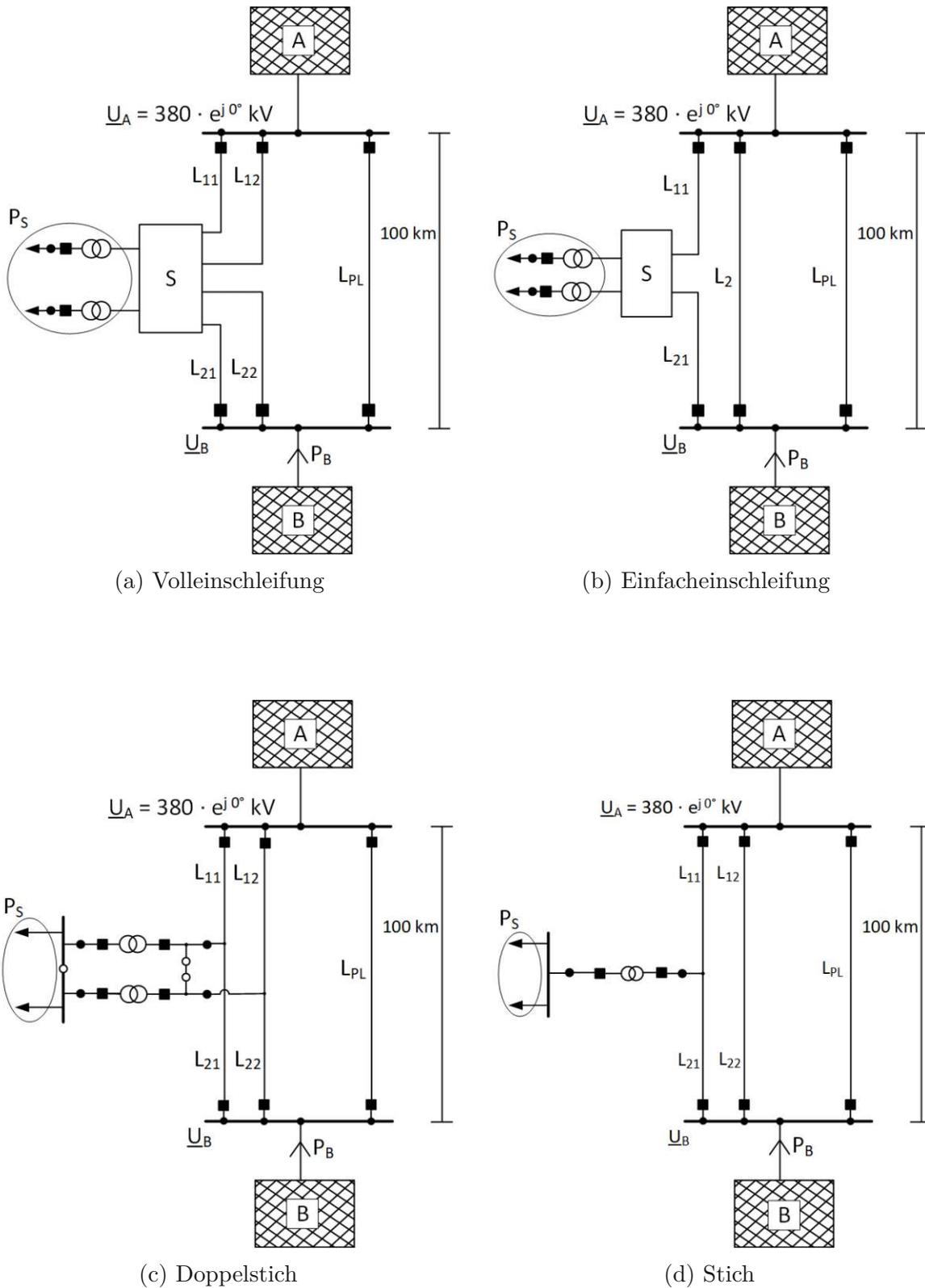


Abbildung 2.4.: Anbindung von Erzeugern und/oder Lasten zwischen A und B

2.4. Untersuchungsvariablen

Die Erzeuger und Lasten sind dadurch charakterisiert, dass ihre Blindleistungsabgabe und -aufnahme gleich null ist, also $Q_S = 0$ MVar. Ebenso wird die Blindleistung im PQ-Netzknoten **B** auf null gehalten, $Q_B = 0$ MVar. Es wird also von lokaler Blindleistungskompensation direkt bei der Erzeugungs-/Last-Einheit sowie am Netzknoten **B** ausgegangen. Folgende Kenngrößen werden im Zuge der Untersuchung variiert:

P_B : Wirkleistungsaufnahme/-abgabe des Netzknotens **B**

Die Wirkleistung P_B wird in einem symmetrischen Intervall um den Nullpunkt von P_{B-} bis P_{B+} ($P_{B-} = -P_{B+}$) in hinreichend kleinen Schritten ΔP_B variiert. Die Bestimmung von P_{B+} erfolgt unter Berücksichtigung zweier Kriterien:

Auf der einen Seite muss P_{B+} ausreichend dimensioniert sein, um mindestens einen Leitungsabschnitt in der Untersuchungsumgebung auf 100% auszulasten. Dies ist erforderlich, um die maximale Übertragungskapazität $P_{B,max}$ zu bestimmen und die Auswirkungen der Leitungsparameter sowie die resultierenden nichtlinearen Effekte in der Auslastungskennlinie sichtbar zu machen. Gleichzeitig darf P_{B+} nicht zu groß gewählt werden, um Konvergenzprobleme, welche durch die mit steigender Belastung zunehmende Blindleistungsaufnahme der Leitung entstehen, zu vermeiden. Folglich ergibt sich für jede Vermaschung ein spezifischer P_{B+} -Wert, dargestellt in Tabelle 2.5.

Die Schrittweite ΔP_B wird so gewählt, dass sie fein genug ist, um eine kontinuierliche Auslastungskennlinie ohne sichtbare Unterbrechungen/Stufen zu erzeugen, aber gleichzeitig groß genug, um eine angemessene Rechenzeit zu gewährleisten. Folgende Werte erwiesen sich als geeignet: $\Delta P_B = 20$ MW für (n-0)-Berechnungen und $\Delta P_B = 50$ MW für (n-1)-Berechnungen.

Tabelle 2.5.: P_{B+} im (n-0)-Fall für verschiedene Vermaschungsgrade

V in %	P_{B+} in MW
54,5	6
60	6,5
66,7	8
75	11
80	14

P_S : Wirkleistungsaufnahme/-abgabe der Erzeugungs-/Last-Anlage³

Für P_S werden die vier in Tabelle 2.6 definierten Szenarien betrachtet. In realen Anwendungen kann eine Kombination von Last- und Erzeugungsanlagen am selben Anschlusspunkt vorliegen. In solchen Fällen repräsentieren die in der Tabelle aufgeführten

³Die Anschluss-topologie der Erzeugungs-/Last-Anlage, sei es innerhalb einer Schaltanlage wie in Abbildung 2.4a oder 2.4b dargestellt, oder als Doppelstich bzw. Stich gemäß Abbildung 2.4c oder 2.4d, ist für diese Betrachtung nicht relevant.

2. Untersuchungsbasis und Methoden

Szenarien die Wirkleistungssumme der einzelnen Einheiten (Wirkleistungsabgabe wird positiv, -aufnahme negativ gezählt). Diese Summe entspricht der Wirkleistung, die über die relevanten Leitungsabschnitte transportiert werden muss: Bei Einfacheinschleifung und Stich sind dies die Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} , bei Volleinschleifung und Doppelstich die Leitungsabschnitte L_{11} , L_{12} , L_{21} und L_{22} .

Tabelle 2.6.: Last- und Erzeugungsszenarien der ins Netz zu integrierenden Einheiten

Szenario	P_S in MW
hohe Last	-1200
mittlere Last	-400
mittlere Erzeugung	400
hohe Erzeugung	1200

Die gesamte Wirkleistung P_S wird stets auf die in Abbildung 2.4 dargestellten Erzeugung-/Last-Einheiten zu gleichen Teilen aufgeteilt, jedem Abzweig wird also die Wirkleistung $P_S/2$ zugeteilt.

V: Vermaschung

Für die Vermaschung werden jene fünf diskreten Werte herangezogen, welche in Tabelle 2.4 spezifiziert sind.

2.5. Kurzschlussberechnung

Die Berechnung von Kurzschlussströmen erfolgt in dieser Arbeit zunächst auf Grundlage der Norm IEC 60909. Dabei gelten folgende Annahmen und Vereinfachungen [10]:

- An der Fehlerstelle wird eine Ersatzspannungsquelle mit dem Effektivwert

$$U_{\text{ers}} = c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}, \quad \text{mit } c = 1,1$$

angesetzt. U_n bezeichnet die Nennspannung des betrachteten Netzknotens. c ist der Spannungsfaktor, der berücksichtigt, dass die höchste Spannung in ungestörten Netzen in den Hochspannungsnetzen im Mittel nicht mehr als (+10%) von der Netzspannung U_n abweicht.

- Die Ersatzspannungsquelle ist die einzige wirksame Spannung des Netzes. Alle Netzeinspeisungen, Synchron- und Asynchronmaschinen werden durch ihre Innenimpedanz ersetzt.
- Betriebsdaten und die Belastungen sind nicht erforderlich; die Lastflusssituation im Augenblick des Kurzschlusseintritts ist für die Berechnung des Fehlerstroms unerheblich. Insbesondere haben die vor dem Fehler auftretenden Wirkleistungen P_S und P_B keinen Einfluss auf die Höhe des Kurzschlussstroms.

- Die eingesetzte Ersatzspannungsquelle treibt – abhängig von der resultierenden Ersatz-Kurzschlussimpedanz des Netzes – den Fehlerstrom über die definierte Kurzschlussstelle.
- Der berechnete Fehlerstrom ist ausschließlich an der Fehlerstelle gültig. Aussagen über Fehlerströme in benachbarten Zweigen lassen sich daraus nicht ableiten.

In weiterer Folge werden die laut Norm berechneten Ergebnisse noch mithilfe der „vollständigen Methode“ überprüft. Die vollständige Methode ist ein Überlagerungsverfahren, das die Auslastungen vor Kurzchlusseintritt berücksichtigt, um genauere Berechnungsergebnisse zu liefern. Für die Berechnung gelten folgende Bedingungen [11]:

- Die Kurzschlussergebnisse werden ermittelt, indem der Satz der fehlerfreien Lastflussergebnisse für den Netzzustand im Moment vor Kurzchlusseintritt mit einem Satz von Ergebnissen überlagert wird, die das Netz im fehlerbetroffenen Zustand darstellen.
- Im fehlerbetroffenen Zustand sind alle Netzspannungsquellen kurzgeschlossen, während eine zusätzliche Spannungsquelle am Fehlerort angeschlossen wird, die eine Spannung einspeist, welche gleich und entgegengesetzt zu der sich aus der Lastflussberechnung ergebenden Vorfehler-Spannung an dieser Stelle ist.

Für die durchgeführten Berechnungen wird stets der 3-polige Kurzschluss betrachtet, und der Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I_k'' untersucht. Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ist der Effektivwert des Wechselstromanteils eines zu erwartenden Kurzschlussstroms im Augenblick des Kurzchlusseintritts [10]. I_k'' stellt den theoretisch höchsten Wert dar, und wird aus diesem Grund zur mechanischen und thermischen Dimensionierung von Betriebsmitteln, insbesondere von Leistungsschaltern, herangezogen [12].

Festlegung der maximalen Kurzschlussstromwerte

Die Festlegung der maximalen Kurzschlussstromwerte $I_{k,\max}''$ an den Netzknoten **A** und **B** sowie an der Schaltanlage **S** erfolgt nach folgenden Überlegungen:

Für die Schaltanlage **S** hängt der Wert $I_{k,S,\max}''$ von der Art der angeschlossenen Netzelemente ab. Verschiedene Netzelemente wie Asynchronmaschinen (ASM), doppelt gespeiste ASM, Maschinen mit Vollumrichter oder Photovoltaikanlagen tragen – trotz identischer Nennleistung – unterschiedlich zum Kurzschlussstrom bei. Eine Unterscheidung ist jedoch weder erforderlich noch zielführend, da die Analyse für eine Vielzahl möglicher Erzeuger und Lasten gültige Ergebnisse liefern soll.

Zur Abschätzung eines geeigneten Werts für den Kurzschlussstrom $I_{k,S,\max}''$, der für alle Last- und Erzeugungssituationen gelten soll, wurde exemplarisch ein Windpark mit einer Einspeiseleistung von $P_S = 1200$ MW in PowerFactory simuliert. Der resultierende Kurzschlussbeitrag betrug $I_{k,S}'' = 3,5$ kA. Zur Vermeidung einer Unterschätzung des

2. Untersuchungsbasis und Methoden

Kurzschlussstroms wurde für den von der Schaltanlage ausgehenden Kurzschlussbeitrag folgender Maximalwert angesetzt:

$$I''_{k,S,\max} = 5 \text{ kA} \quad (2.12)$$

Die maximalen Kurzschlussbeiträge der Netzknoten **A** ($I''_{k,A,\max}$) und **B** ($I''_{k,B,\max}$) wurden auf Grundlage einer Analyse realer Netzknoten im TenneT-Netzgebiet ermittelt. Betrachtet wurden dabei ausschließlich voll eingeschleifte Netzknoten mit exakt vier Leitungsstromkreisen. Für jeden dieser Knoten wurde der Summenwert der vier Leitungskurzschlussbeiträge berechnet, dargestellt in Tabelle 2.7. Aus den Werten der acht betrachteten Netzknoten wurde der Mittelwert gebildet, dargestellt in der letzten Spalte: 33,60 kA. Dieser Wert diente als Richtwert für den zu erwartenden Kurzschlussstrom in der Schaltanlage aufgrund der Beiträge von **A** und **B**. Ziel war es nun, in der Schaltanlage **S** an der Fehlerstelle einen Summenwert der vier Leitungskurzschlussbeiträge von 33,60 kA zu erzielen – und zwar durch geeignete Wahl der Kurzschlussbeiträge der Netzknoten **A** und **B**. Um auf der sicheren Seite zu sein, wurde der Mittelwert von 33,60 kA vorsorglich um 10 % erhöht:

$$I''_{k,\text{gewünscht}} = 33,60 \text{ kA} \cdot 1,1 = 36,96 \text{ kA} \quad (2.13)$$

Unter der Annahme einer mittigen Position der Schaltanlage mit $L_{11} = L_{12} = L_{21} = L_{22}$ sowie der Forderung $I''_{k,A,\max} = I''_{k,B,\max}$ ergibt sich folgender Wert für die erforderlichen Kurzschlussbeiträge der Netzknoten **A** und **B**:

$$I''_{k,A} = I''_{k,B} = 34,18 \text{ kA} \quad , \text{ sodass } I''_k = 36,96 \text{ kA} \quad . \quad (2.14)$$

Zur Vereinfachung wird dieser Wert auf ganze Zahlen gerundet. Daraus resultieren folgende Kurzschlussbeiträge:

$$I''_{k,A,\max} = I''_{k,B,\max} = 34 \text{ kA} \quad . \quad (2.15)$$

Der sich daraus ergebende Gesamt-Kurzschlussstrom beträgt $I''_k = 36,85 \text{ kA}$, was einem Zuschlag von $9,7\% \approx 10\%$ gegenüber dem in Tabelle 2.7 angeführten Mittelwert von 33,60 kA entspricht. Das Abrunden von 34,18 kA auf 34 kA ist daher vertretbar.

Tabelle 2.7.: Voll eingeschleifte Schaltanlagen im TenneT Netz und Summe der Kurzschluss-Beiträge ihrer vier Leitungsstromkreise

	DIPP	LAMS	ALFS	ELSE	BEHS	LAMS	HELM	SD ON	$\Sigma \div 8$
I''_k/kA	42,22	30,60	36,18	25,49	37,06	29,52	34,72	32,98	33,60

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

In diesem Kapitel wird zunächst eine Herangehensweise vorgestellt, um die Auslastung der Leitungsstromkreise L_{11} , L_{12} , L_{21} , L_{22} , L_1 und L_2 analytisch und ohne Netzrechnungsprogramm zu bestimmen. Diese analytische Berechnung soll die Berechnung mittels einer geeigneten Netzrechnungssoftware nicht ersetzen, bietet aber im ersten Schritt eine geeignete Näherung, um unterschiedliche Netzanbindungen miteinander vergleichen und erste Aussagen bezüglich der Auslastung treffen zu können. Anschließend wird die Auslastung der Leitungsstromkreise mithilfe von PowerFactory berechnet und untersucht, unter welchen Bedingungen die Näherung Ergebnisse liefert, die bis auf geringfügige Abweichungen mit den mittels Netzrechnungssoftware ermittelten Resultaten übereinstimmen, sowie unter welchen Voraussetzungen die Auslastung erheblich unterschätzt wird.

Die Auslastung einer Leitung ist definiert als der Strom in der Leitung, bezogen auf den Bemessungsstrom der Leitung. Der Bemessungsstrom fungiert dabei als Richtwert, welcher Strom auf Dauer fließen darf, um einen sicheren Betrieb ohne Überlastung zu ermöglichen. Da der Winkel des Leitungsstroms für die Auslastung nicht relevant ist, wird gemeinhin der Betrag des komplexen Effektivwertes des Leitungsstroms (= reeller Effektivwert) herangezogen:

$$A = \frac{|I|}{I_r} = \frac{|S|}{S_r} \tag{3.1}$$

$$A_{in \%} = A \cdot 100 \% \tag{3.2}$$

Wird eine Leitung vom Bemessungsstrom durchflossen, so ist sie demnach zu 100 % ausgelastet.

3.1.1. analytische Berechnung: Annahmen für die Anbindung zwischen A und B

Wird im Netzknoten **B** und in der Schaltanlage **S** lediglich Wirkleistung verbraucht/erzeugt und ist die Blindleistungsaufnahme/-erzeugung gleich Null, so gilt

$$\underline{S}_B = P_B + j \cdot \underbrace{Q_B}_0 = S_B \tag{3.3}$$

$$\underline{S}_S = P_S + j \cdot \underbrace{Q_S}_0 = S_S \tag{3.4}$$

3. Ergebnisse und Diskussion

Anschließend wird die über einen bestimmten Leitungsstromkreis x übertragene Leistung folgendermaßen dargestellt:

$$S_x = P_x = \sigma_x \cdot P_S + \beta_x \cdot P_B \quad (3.5)$$

Die über die Leitung transportierte Wirkleistung setzt sich demnach aus einem Anteil $\sigma_x \cdot P_S$, der seinen Ursprung in der Schaltanlage **S** hat, sowie einem Anteil $\beta_x \cdot P_B$, der vom Netzknoten **B** kommt, zusammen. Jener Anteil der Wirkleistung, welcher aufgrund der Leitungs-Resistanz R_x additiv zu P_x hinzukommen würde (P_R), sowie jene Anteile der Blindleistung, die durch L_x , C_x und G_x hervorgerufen werden, bleiben hierbei unberücksichtigt und liefern bei der analytischen Berechnung keinen Beitrag.

Damit folgt folgende Formel für die Auslastung A :

$$A_x = \frac{P_x}{S_r} = \frac{\sigma_x \cdot P_S + \beta_x \cdot P_B}{S_r} \quad (3.6)$$

An dieser Stelle ist es von entscheidender Bedeutung, auf den folgenden Sachverhalt hinzuweisen: Während die von den Leitungsparametern verursachten Wirk- und Blindleistungsanteile – wie zuvor erläutert – nicht in die Auslastung einfließen, haben sie dennoch einen signifikanten Einfluss: Die konkrete Aufteilung von P_S und P_B auf die einzelnen Leitungsabschnitte wird einzig und allein von den Leitungsparametern bestimmt.

Ausgehend von dem in Abbildung 3.1 gezeigten Ersatzschaltbild einer Leitung und der Tatsache, dass die Reihenschaltung zweier komplexer Widerstände die Ersatzimpedanz $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$ und die Parallelschaltung komplexer Widerstände die Ersatzadmittanz $\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2$ ergibt, folgt

$$\underline{Z}_x = R_x + j\omega L_x \quad \text{und} \quad (3.7a)$$

$$\underline{Y}_x = G_x + j\omega C_x \quad . \quad (3.7b)$$

Werden die in Tabelle 2.1 angegebenen Zahlenwerte für die Leitungsparameter eingesetzt, folgt

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}'_{x,\text{längs}} &= 2,40 \cdot 10^{-1} \cdot e^{j87,6^\circ} \Omega \\ \underline{Z}'_{x,\text{quer}} &= \frac{1}{\underline{Y}'_x} = 3,18 \cdot 10^5 \cdot e^{-j90^\circ} \Omega \end{aligned} \right\} \frac{|\underline{Z}'_{x,\text{quer}}|}{|\underline{Z}'_{x,\text{längs}}|} = 1,33 \cdot 10^6 \quad .$$

Die Längsimpedanz übersteigt die Querimpedanz um mehr als sechs Größenordnungen. In der analytischen Berechnung wird daher die Vereinfachung

$$\underline{Z}'_{x,\text{quer}} \rightarrow \infty \quad \hat{=} \quad \underline{Y}'_x \rightarrow 0$$

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

getroffen. Folglich wird die Aufteilung der Lastflüsse P_S und P_B auf die einzelnen Leitungsabschnitte ausschließlich von der Längsimpedanz gemäß Gleichung 3.7a bestimmt.

Die Faktoren σ und β bestimmen also, welcher konkrete Anteil von P_S und P_B sich aufgrund der Längsimpedanz $\underline{Z}_x = R_x + j\omega L_x$ in einem gewissen Leitungsabschnitt x einstellt.

Um nun die Faktoren σ und β , die von dem zu betrachtenden Leitungsabschnitt und der konkreten Topologie abhängen, zu bestimmen, wird folgendermaßen vorgegangen: Da in dem konzeptionellem Netz Erzeugung und Last im Netzknoten **B** und in der Schaltanlage **S** unabhängig voneinander sind, darf das Superpositionsprinzip für lineare Systeme angewandt werden:

Im ersten Schritt wird P_S gleich null gesetzt und der Faktor β ermittelt, im zweiten Schritt wird P_B null gesetzt und der Faktor σ ermittelt. Anschließend werden die beiden Anteile $\sigma \cdot P_S$ und $\beta \cdot P_B$ überlagert. Das Ergebnis ist jene Wirkleistung, die bei einem konkreten P_S und P_B über die Leitung fließt. Betragsbildung und Division durch die Bemessungsscheinleistung

$$S_r = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ kV} \cdot 4 \text{ kA} = 2632,7 \text{ MVA} \quad (3.8)$$

liefern anschließend die Auslastung des entsprechenden Leitungsabschnitts.

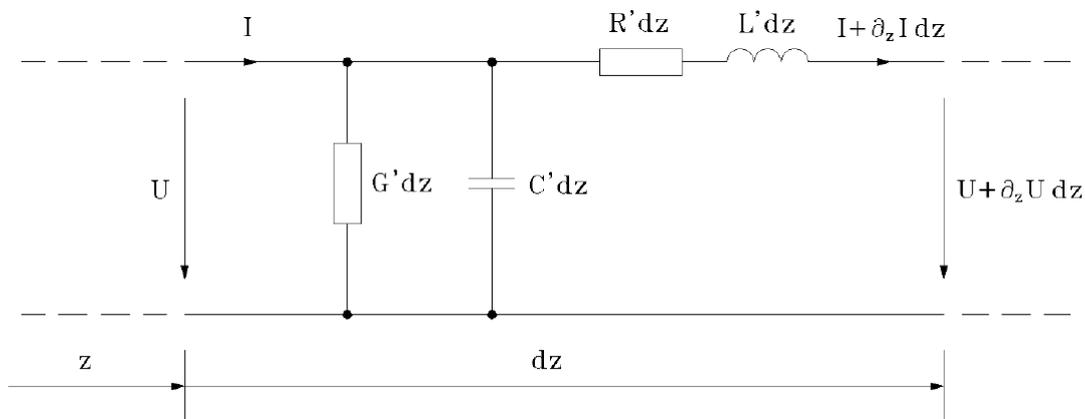


Abbildung 3.1.: Ersatzschaltung für den infinitesimal langen Abschnitt einer verlustbehafteten Doppelleitung [13]

3.1.2. Volleinschleifung und Doppelstich

Im (n-0)-Fall verhalten sich Volleinschleifung und Doppelstich in Bezug auf die Auslastung der einzelnen Stromkreise unter folgenden Voraussetzungen gleich:

- Die korrespondierenden Leitungsabschnitte haben die gleiche Länge:

$$L_{11, \text{Voll.}} = L_{11, \text{Dopp.}}$$

$$L_{12, \text{Voll.}} = L_{12, \text{Dopp.}}$$

$$L_{21, \text{Voll.}} = L_{21, \text{Dopp.}}$$

$$L_{22, \text{Voll.}} = L_{22, \text{Dopp.}}$$

- Die Länge jenes Teils der Einschleifung bzw. des Stichs, der in Abbildung 2.4 horizontal, also normal auf die Leitungsabschnitte, gezeichnet ist, wird vernachlässigt:

$$L_{\text{Einschleifung}} \rightarrow 0$$

$$L_{\text{Stich}} \rightarrow 0$$

- Die Wirkleistungsabgabe/-aufnahme von **B** und **S** ist gleich:

$$P_{\text{B, Voll.}} = P_{\text{B, Dopp.}}$$

$$P_{\text{S, Voll.}} = P_{\text{S, Dopp.}}$$

- Die Wirkleistungsabgabe/-aufnahme von **S** wird zu gleichen Anteilen entsprechend $P_S/2$ auf die Erzeugungs- bzw. Last-Einheiten aufgeteilt.

Die beschriebenen Bedingungen gelten für sämtliche Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden.

Soll nun die Auslastung der Leitungsstromkreise im (n-0)-Fall abgeschätzt werden, kann das etwas übersichtlichere Ersatzschaltbild Abbildung 3.2a herangezogen werden. Es geht aus Abbildung 2.4a und 2.4c unter Berücksichtigung der obigen Bedingungen und Anwendung von Gleichung 3.7 in Kombination mit $C = 0$ und $G = 0$ hervor. Die eingezeichneten Ströme stellen den von mir frei gewählten Bezugssinn dar. Stimmt der Richtungssinn des Leitungsstroms mit dem Bezugssinn überein, wird der Strom positiv gezählt, ansonsten negativ. Die Bezugssinne von I_B und I_S sind im Erzeugerbezugssystem gewählt: Stimmt der momentane Richtungssinn von I_B und I_S mit dem Bezugssystem überein, dann wird die Wirkleistung P positiv gezählt und Leistung wird abgegeben (erzeugt), andernfalls gilt $P < 0$ und Wirkleistung wird aufgenommen (verbraucht).

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

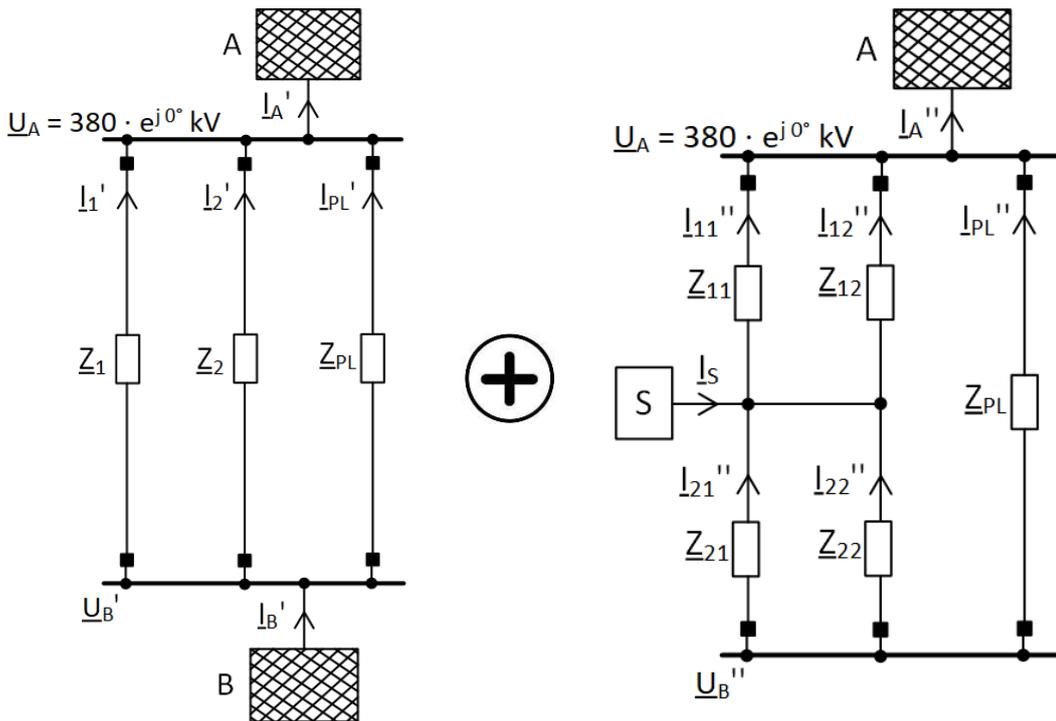
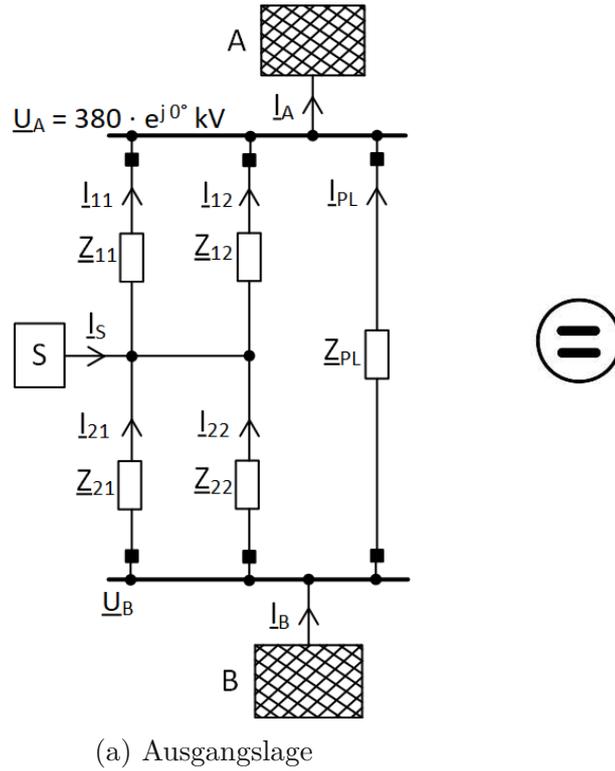


Abbildung 3.2.: Ersatzschaltbild von Volleinschleifung und Doppelstich im (n-0)-Fall bei Vernachlässigung von C' und G'

3. Ergebnisse und Diskussion

Ausgangspunkt ist das in Abbildung 3.2a dargestellte Ersatzschaltbild. Es gilt allgemein:

$$L_{11} = L_{12} \quad \Rightarrow \quad \underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{12} \quad (3.9)$$

$$L_{21} = L_{22} \quad \Rightarrow \quad \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{22} \quad (3.10)$$

und damit

$$\underbrace{L_{11} + L_{21}}_{L_1} = \underbrace{L_{12} + L_{22}}_{L_2} \quad (3.11)$$

$$\Rightarrow \underbrace{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21}}_{\underline{Z}_1} = \underbrace{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22}}_{\underline{Z}_2} \quad (3.12)$$

jedoch im Allgemeinen

$$\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21} \neq \underline{Z}_{PL} \quad (3.13)$$

Um die Auslastung jedes Leitungsstromkreises im Netz zu ermitteln, wird, wie bereits in Kapitel 3.1.1 angekündigt, vorgegangen:

Schritt 1: $P_S = 0$ setzen und β ermitteln:

Mit der Benennung

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21} \quad (3.14)$$

$$\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{22} \quad (3.15)$$

folgt das in Abbildung 3.2b dargestellte Ersatzschaltbild.

Aufgrund von Gleichung 3.12 folgt $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ und damit $\underline{I}_1' = \underline{I}_2'$.

Um $\underline{I}_1' = \underline{I}_2'$ zu ermitteln, wird in Abbildung 3.2b ein Stromteiler angesetzt:

$$\frac{|\underline{I}_1'|}{|\underline{I}_A'|} = \left| \frac{\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_1 + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})} \right| \quad (3.16)$$

$$\Rightarrow |\underline{I}_1'| = \left| \frac{\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_1 + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})} \right| \cdot |\underline{I}_A'| \quad (3.17)$$

Aufgrund der Vernachlässigung von C' und G' ist der Betrag des Stroms $|\underline{I}_1|$ entlang der Leitung konstant, also $|\underline{I}_{1,\text{Anfang}}| = |\underline{I}_{1,\text{Ende}}|$. Der Phasenwinkel $\arg(\underline{I}_1)$ verändert sich entsprechend der Längsinduktivität L' entlang der Leitung: $\arg(\underline{I}_{1,\text{Anfang}}) \neq \arg(\underline{I}_{1,\text{Ende}})$. Bei der Berechnung der Leitungsauslastung gemäß

$$A' = \frac{|\underline{I}_1'|}{I_r} \quad (3.18)$$

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

wird jedoch ausschließlich der Betrag von \underline{I}'_1 berücksichtigt.

Damit gilt:

$$|\underline{I}'_A| = |\underline{I}'_B| \quad (3.19)$$

$$\text{Mit } \underline{S}'_B = \sqrt{3} \cdot \underline{U}'_B \cdot (\underline{I}'_B)^* \quad \text{folgt} \quad (3.20)$$

$$(\underline{I}'_B)^* = \frac{\underline{S}'_B}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}'_B}, \text{ und weiters} \quad (3.21)$$

$$I'_B = \left| \frac{\underline{S}'_B}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}'_B} \right|. \quad (3.22)$$

Unter Vernachlässigung des Spannungsabfalls über die Leitung gilt

$$|\underline{U}'_B| = |\underline{U}_A| \quad (3.23)$$

$$\Rightarrow I'_B = \frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.24)$$

und damit für den Strom $I'_1 = I'_2$:

$$I'_1 = \left| \frac{\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_1 + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})} \right| \cdot \frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_A}. \quad (3.25)$$

Die Auslastung ergibt sich nach Division durch den Bemessungsstrom:

$$A_1' = \frac{I'_1}{I_r} = \left| \frac{\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}} \right| \cdot \underbrace{\frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_A \cdot I_r}}_{S_r} \quad (3.26)$$

Im Nenner des zweiten Faktors erkennen wir die Bemessungsscheinleistung S_r . Nach Koeffizientenvergleich mit Gleichung 3.6 geht hervor, dass es sich beim Quotienten der Leitungsimpedanzen um den Parameter β handelt:

$$\beta = \left| \frac{\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}} \right| = \frac{\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL}} \quad (3.27)$$

$\underline{Z} = \underline{Z}' \cdot L \Rightarrow \underline{Z}'$ kürzen:

$$\beta = \frac{\frac{L_2 \cdot L_{PL}}{L_2 + L_{PL}}}{L_1 + \frac{L_2 \cdot L_{PL}}{L_2 + L_{PL}}} = \frac{1}{\frac{L_2 + L_{PL}}{L_{PL}} + 1} \quad (3.28)$$

Schritt 2: $P_B = 0$ setzen und σ ermitteln:

Mit der Forderung $P_B = 0$ folgt das in Abbildung 3.2c gezeigte Ersatzschaltbild.

3. Ergebnisse und Diskussion

Darauf wird nun, äquivalent zur Herangehensweise in Schritt 1, ein Stromteiler angewandt. Unter Beachtung von Gleichung 3.9 und 3.10 gilt:

$$\frac{|I_{11}''|}{|I_A''|} = \left| \frac{Z_{12} \parallel (Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2})}{Z_{11} + (Z_{12} \parallel (Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2}))} \right| \quad (3.29)$$

$$\Rightarrow |I_{11}''| = \left| \frac{Z_{12} \parallel (Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2})}{Z_{11} + (Z_{12} \parallel (Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2}))} \right| \cdot |I_A''| \quad (3.30)$$

$$\text{Mit } |I_A''| = |I_S''| \quad (3.31)$$

$$\text{und } \underline{S}_S'' = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_S'' \cdot (I_S'')^* \text{ folgt} \quad (3.32)$$

$$(I_S'')^* = \frac{S_S''}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_S''} \text{ , und weiters} \quad (3.33)$$

$$I_S'' = \left| \frac{S_S''}{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_S''} \right| \cdot \quad (3.34)$$

Unter Vernachlässigung des Spannungsabfalls über die Leitung gilt:

$$|U_S''| = |U_A| \quad (3.35)$$

$$\Rightarrow |I_S''| = \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.36)$$

Damit folgt für den Strom $I_{11}'' = I_{12}''$:

$$I_{11}'' = \left| \frac{Z_{12} \parallel (Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2})}{Z_{11} + (Z_{12} \parallel (Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2}))} \right| \cdot \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.37)$$

Mit

$$\frac{I_{21}''}{I_{PL}''} = - \left| \frac{Z_{22}}{Z_{21} + Z_{22}} \right| = -\frac{1}{2} \quad (3.38)$$

und

$$I_{PL}'' = \left| \frac{\frac{Z_{11}}{2}}{\frac{Z_{11}}{2} + Z_{PL} + \frac{Z_{21}}{2}} \right| \cdot \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.39)$$

$$= \left| \frac{\frac{Z_{11}}{2}}{\frac{Z_1}{2} + Z_{PL}} \right| \cdot \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.40)$$

$$= \left| \frac{Z_{11}}{Z_1 + 2 \cdot Z_{PL}} \right| \cdot \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.41)$$

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

folgt für $I_{21}'' = I_{22}''$:

$$I_{21}'' = -\frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_{PL}} \right| \cdot \frac{P_S}{\sqrt{3} \cdot U_A} \quad (3.42)$$

Hierbei ist das negative Vorzeichen zu beachten, das aus dem entgegengesetzten Bezugssinn von I_{21}'' zu I_{PL}'' resultiert.

Die jeweiligen Auslastungen ergeben sich nach Division der Ströme mit I_r , anschließender Koeffizientenvergleich mit Gleichung 3.6 liefert für die Parameter σ :

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} = \left| \frac{\underline{Z}_{12} \parallel (\underline{Z}_{PL} + \frac{\underline{Z}_{21}}{2})}{\underline{Z}_{11} + (\underline{Z}_{12} \parallel (\underline{Z}_{PL} + \frac{\underline{Z}_{21}}{2}))} \right| = \frac{1}{\frac{L_{12} + L_{PL} + \frac{L_{21}}{2}}{L_{PL} + \frac{L_{21}}{2}} + 1} \quad (3.43)$$

$$\sigma_{21} = \sigma_{22} = -\frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_{PL}} \right| = -\frac{1}{2} \cdot \frac{L_{11}}{L_1 + 2 \cdot L_{PL}} \quad (3.44)$$

Wird nun eine der beiden Wirkleistungen auf einen bestimmten Wert fixiert und die andere Wirkleistung variiert, zum Beispiel $P_S = \text{konstant}$ und $P_B = \text{variabel}$, so erkennt man in Gleichung 3.6 den Zusammenhang

$$A(x) = \frac{|\sigma \cdot P_S + \beta \cdot P_B|}{S_r} = |kx + d| \quad , \text{ bzw.} \quad (3.45)$$

$$= |k(x - c)| \quad (3.46)$$

mit den beiden Parameter k und c sowie der Variable x :

$$k = \frac{\beta}{S_r} \quad (3.47)$$

$$c = -\frac{\sigma}{\beta} \cdot P_S \quad (3.48)$$

$$x = P_B \quad (3.49)$$

$$(3.50)$$

3. Ergebnisse und Diskussion

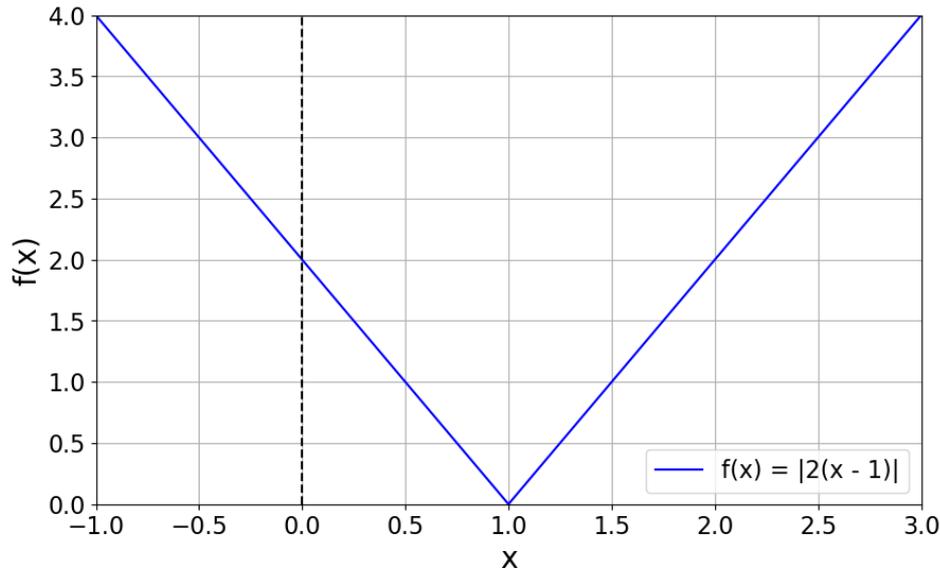


Abbildung 3.3.: Funktion $f(x) = k(x - c)$ mit beispielhaften Werten $k = 2$ und $c = 1$

Abbildung 3.3 veranschaulicht das Zusammenspiel der Parameter: k bestimmt die Steigung der Kennlinie,

$$k = \frac{\partial}{\partial x} f(x) , \quad (3.51)$$

c beschreibt die Verschiebung der Spitze entlang der x -Achse ausgehend vom Ursprung. Ein positiver Wert von c bedeutet dabei eine Verschiebung entlang des positiven Teils der x -Achse, ein negativer Wert von c die Verschiebung in Richtung der negativen x -Achse.

Zusammenfassung:

$k = \frac{\beta}{S_r}$ bestimmt die Steigung der Kennlinie. Sie ist für Leitung L_1 und Leitung L_2 aufgrund derselben Länge gleich. Die Steigung hängt vom Zusammenspiel der Leitungsimpedanzen aller Leitungen im Netz ab, entscheidend sind die Leitungslängen zwischen Netzknoten **A** und Netzknoten **B**. Für die Steigung der Kennlinie ist nicht die Länge eines einzelnen Leitungsabschnitts, wie etwa L_{11} zwischen Netzknoten **A** und Schaltanlage **S**, ausschlaggebend. Vielmehr ist die Gesamtlänge $L_1 = L_{11} + L_{21}$ entscheidend, und zwar in Relation zur Länge von L_2 sowie zur Länge der Parallel-Leitung L_{PL} .

$c = -\frac{\sigma}{\beta} \cdot P_S$ bestimmt die Verschiebung der Spitze entlang der x -Achse, und kennzeichnet das Minimum der Auslastungs-Kennlinie. Für den Parameter c ist es im Gegensatz zum Parameter k sehr wohl ausschlaggebend, auf welcher Länge der Leitung zwischen Netzknoten **A** und Netzknoten **B** sich die Schaltanlage **S** befindet, wie lang also die Teilabschnitte L_{11} und L_{21} bzw. L_{12} und L_{22} sind. Für die Leitungsabschnitte $L_{11} = L_{12}$ bewirkt eine Last in der Schaltanlage **S** ($P_S < 0$) eine Verschiebung der Spitze der Kennlinie entlang der positiven x -Achse, eine Erzeugung in der Schaltanlage bewirkt eine Verschiebung entlang der negativen x -Achse. Im Gegensatz dazu steht

der Abschnitt $L_{21} = L_{22}$, wo eine Last in der Schaltanlage eine Verschiebung entlang der negativen x -Achse, und eine Erzeugung eine Verschiebung entlang der positiven x -Achse bewirkt. Bei gleichbleibenden Leitungsparametern und Leitungslängen hat eine größere Erzeugung bzw. Last eine größere Verschiebung der Spitze weg vom Ursprung zur Folge, bei $P_S = 0$ kommt die Spitze, also das Minimum der Auslastungs-Kennlinie, im Ursprung zu liegen.

Numerische Berechnung mittels PowerFactory

Wie bereits in Kapitel 2.4 erläutert, werden pro Lastfluss-Berechnung drei Parameter variiert:

- P_B : Wirkleistungsabgabe/-aufnahme des Netzknotens **B**
- P_S : Wirkleistungsabgabe/-aufnahme der Erzeugungs-/Last-Anlage **S**
- V : Vermaschung

Für jede Vermaschung wird eine Abbildung erzeugt, exemplarisch für $V = 66,7\%$ in Abbildung 3.4 dargestellt. Jede Abbildung umfasst vier Teilgrafiken (Subplots), die jeweils die Leitungsauslastung für einen spezifischen P_S -Wert darstellen. Die Anordnung der Subplots von links oben nach rechts unten korrespondiert mit der Reihenfolge der P_S -Werte in Tabelle 2.6. In den einzelnen Subplots repräsentiert die x -Achse den Bereich von P_B bis P_{B+} gemäß Tabelle 2.5. Die y -Achse zeigt die prozentuelle Auslastung der jeweiligen Leitungsabschnitte beim zugehörigen P_B -Wert.

Aufgrund der Beziehungen in Gleichung 3.9 und Gleichung 3.10 fallen die Auslastungskennlinien von L_{11} und L_{12} sowie von L_{21} und L_{22} jeweils zusammen. Folglich sind in den Subplots nur zwei Kennlinien sichtbar: eine für L_{11} und L_{12} (blau durchgezogen) sowie eine für L_{21} und L_{22} (rot durchgezogen).

Die beiden Kennlinien spiegeln das in Kapitel 3.1.5 und speziell in Tabelle 3.4 beschriebene Verhalten wider:

$P_S = -1200$ MW (oberer linker Subplot):

- Für $P_B < 0$: Höhere Auslastung der oberen Leitungsabschnitte L_{11} und L_{12}
- Für $P_B > 0$: Höhere Auslastung der unteren Leitungsabschnitte L_{21} und L_{22}

$P_S = -400$ MW (oberer rechter Subplot):

- Qualitativ ähnliches Verhalten wie bei $P_S = -1200$ MW, allerdings rücken die Auslastungskennlinien zusammen

$P_S = 1200$ MW (unterer rechter Subplot):

- Für $P_B < 0$: Höhere Auslastung der unteren Leitungsabschnitte L_{21} und L_{22}
- Für $P_B > 0$: Höhere Auslastung der oberen Leitungsabschnitte L_{11} und L_{12}

$P_S = 400$ MW (unterer linker Subplot):

3. Ergebnisse und Diskussion

- Qualitativ ähnliches Verhalten wie bei $P_S = 1200$ MW, allerdings rücken die Auslastungskennlinien zusammen

Das Minimum der V-Kennlinie liegt an jener Stelle der x -Achse, an der sich die Anteile der Leistungen P_S und P_B exakt kompensieren, sodass der Zähler in Gleichung 3.6 den Wert Null annimmt. Die Tatsache, dass die Auslastung dennoch nicht vollständig verschwindet, ist auf den Blindleistungsfluss in der Leitung zurückzuführen, der durch die kapazitiven Eigenschaften der Leitung verursacht wird.

Die Kennlinien der einzelnen Leitungsabschnitte verlaufen parallel zueinander, was darauf zurückzuführen ist, dass die Leitungsabschnitte L_{11} , L_{12} , L_{21} und L_{22} jeweils denselben Anteil $\beta \cdot P_B$ an der Gesamtleistung übernehmen. Der Offset zwischen den Kennlinien resultiert daraus, dass die Leitungsabschnitte L_{11} und L_{12} unterschiedliche Anteile der von der Schaltanlage benötigten Wirkleistung P_S übernehmen, wobei $\alpha_{11} \neq \alpha_{21} \neq \alpha_2$ gilt. Im linearen Bereich der Kennlinien korrespondiert die Differenz zwischen den Auslastungskennlinien mit der Differenz der Wirkleistungsanteile, also $A_{\text{Diff.}} = (\alpha_{11} \cdot P_S - \alpha_{21} \cdot P_S) / S_r$.

Der lineare Bereich der Kennlinie wird durch Gleichung 3.6 beschrieben. Mit steigender Auslastung eines Leitungsabschnitts wird der Zusammenhang zwischen Auslastung und Wirkleistung P_B zunehmend nichtlinear. Die Leitungsauslastungen laut analytischer Berechnung gemäß den Parametern aus Tabelle 3.2 sind in Abbildung 3.4 durch die gepunkteten Kennlinien veranschaulicht.

Im Bereich niedriger Leitungsauslastungen (bis etwa 40%) herrscht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der simulierten und der berechneten Leitungsauslastung. Mit zunehmendem Wirkleistungstransport über die Leitung steigt jedoch der Blindleistungsbedarf der Leitung an. Dies ist auf den Spannungsabfall über die Längsimpedanz ($R + j\omega L$) zurückzuführen, wodurch die Spannung an den Knoten **B** und **S** geringer wird als dies bei der analytischen Berechnung, bei der $R' = 0$, $L' = 0$, $C' = 0$, $G' = 0$ gesetzt wurde, der Fall gewesen wäre. Daraus folgt, dass ein höherer Strom erforderlich ist, um die gewünschte Wirkleistung P_S an **S** und P_B an **B** bereitzustellen. Der höhere Strom führt direkt zu einer höheren Leitungsauslastung. Anders ausgedrückt muss der Blindleistungsbedarf der Leitung vom Slack-Knoten **A** bereitgestellt und zusätzlich zur Wirkleistung, die von **B** und **S** benötigt wird, über die Leitung (bzw. Teile der Leitung) transportiert werden. Je größer P_S und P_B , desto größer ist der Blindleistungsbedarf der Leitung/der Leitungsinduktivitäten. Dies erklärt, warum die Auslastung im Bereich hoher Transportflüsse in der analytischen Berechnung unterschätzt wird.

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

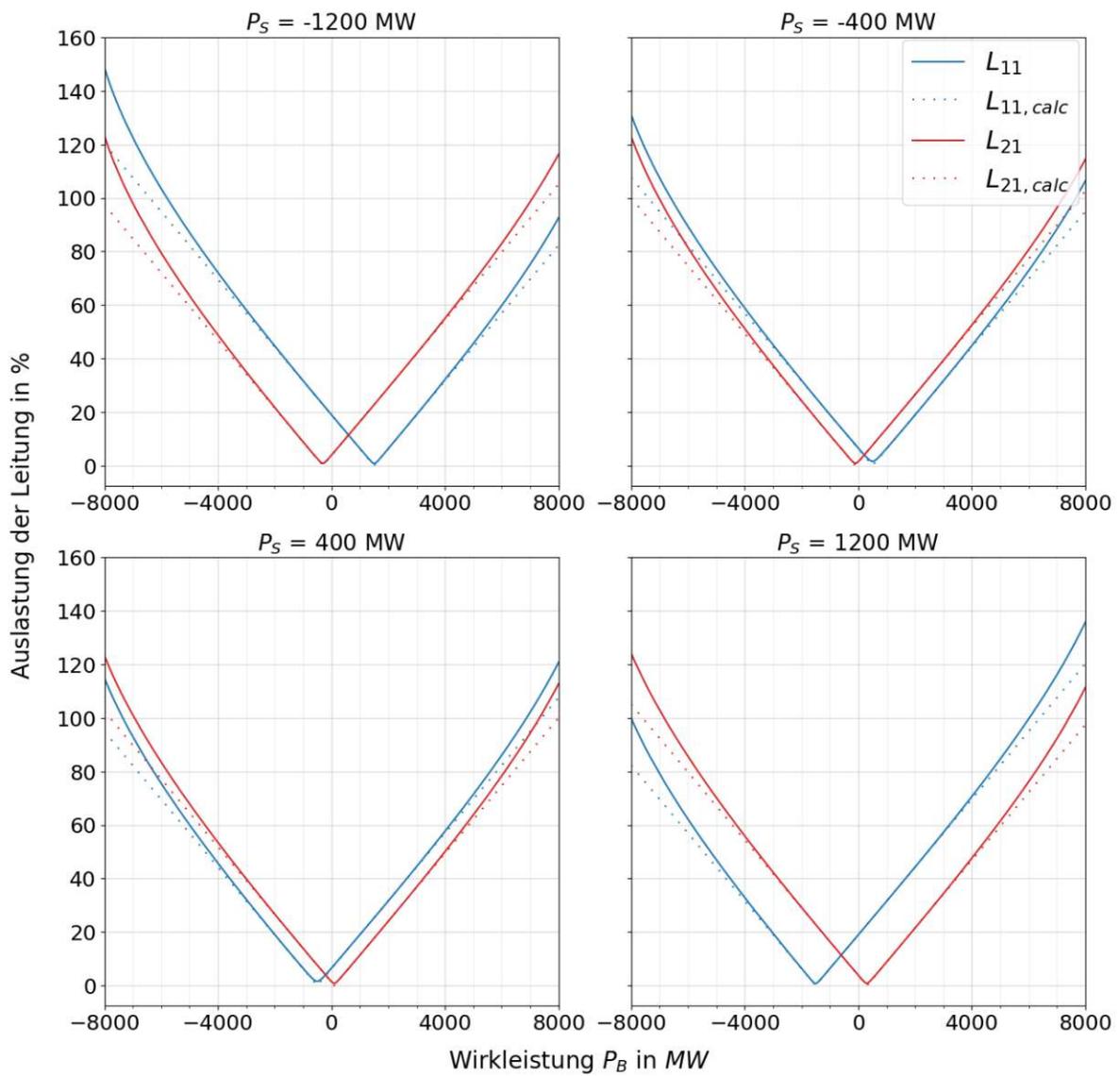
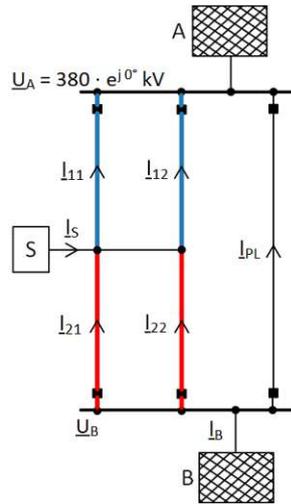


Abbildung 3.4.: Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation (—) und analytischer Berechnung (···)

3.1.3. Einfacheinschleifung und Stich

Im (n-0)-Fall verhalten sich Einfacheinschleifung und Stich in Bezug auf die Auslastung der einzelnen Leitungsstromkreise unter folgenden Voraussetzungen gleich:

- Die korrespondierenden Leitungsabschnitte haben die gleiche Länge:

$$L_{11, \text{Ein.}} = L_{11, \text{Stich}}$$

$$L_{12, \text{Ein.}} = L_{12, \text{Stich.}}$$

$$L_{2, \text{Ein.}} = L_{2, \text{Stich.}}$$

- Die Länge jenes Teils der Einschleifung bzw. des Stichts, der in Abbildung 2.4 horizontal, also normal auf die Leitungsabschnitte, gezeichnet ist, wird vernachlässigt:

$$L_{\text{Einschleifung}} \rightarrow 0$$

$$L_{\text{Stich}} \rightarrow 0$$

- Die Wirkleistungsabgabe/-aufnahme von **B** und **S** ist gleich:

$$P_{\text{B, Ein.}} = P_{\text{B, Stich}}$$

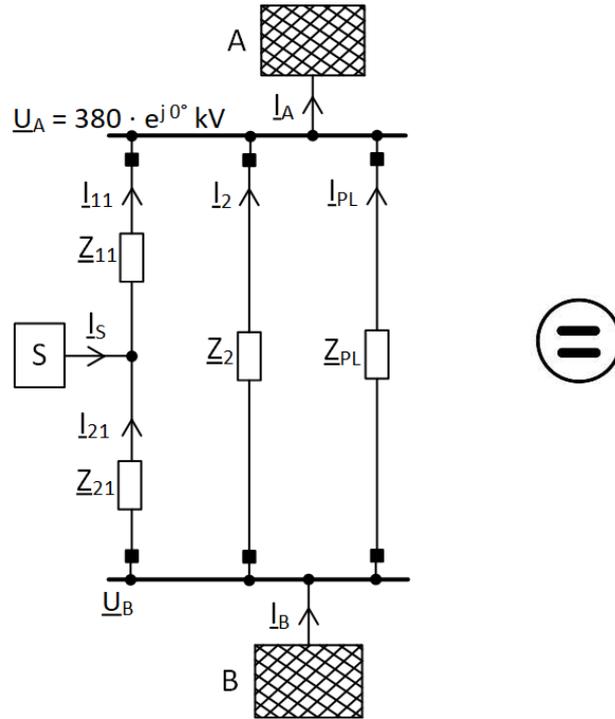
$$P_{\text{S, Ein.}} = P_{\text{S, Stich}}$$

- Die Wirkleistungsabgabe/-aufnahme von **S** wird bei der Einfacheinschleifung zu gleichen Anteilen entsprechend $P_S/2$ auf die Erzeugungs- bzw. Last-Einheiten aufgeteilt, beim Stich übernimmt die einzelne Erzeugungs- bzw. Last-Einheit die volle Leistung P_S .

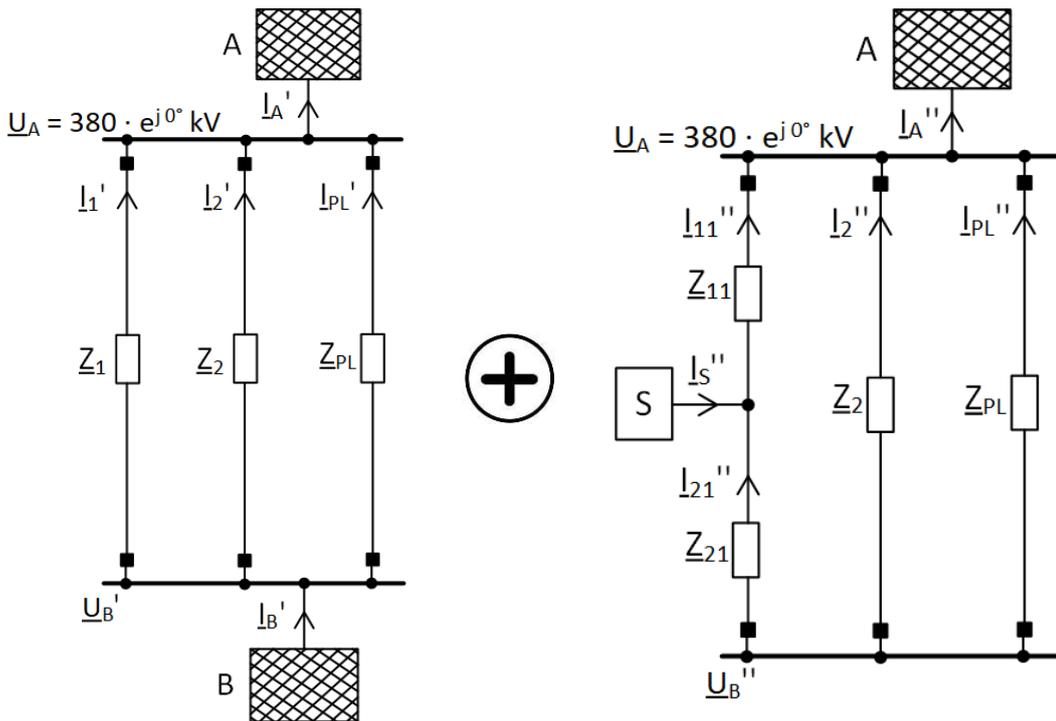
Die beschriebenen Bedingungen gelten für sämtliche Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden.

Soll nun die Auslastung der Leitungsstromkreise im (n-0)-Fall untersucht werden, kann das etwas übersichtlichere Ersatzschaltbild Abbildung 3.5a herangezogen werden, das aus Abbildung 2.4b und 2.4d unter Berücksichtigung der Bedingungen und Anwendung von Gleichung 3.7 in Kombination von $C = 0$ und $G = 0$ hervorgeht.

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise



(a) Ausgangslage



(b) Bestimmung von β durch Setzung von $P_S = 0$

(c) Bestimmung von σ durch Setzung von $P_B = 0$

Abbildung 3.5.: Ersatzschaltbild von Einfacheinschleifung und Stich im (n-0)-Fall bei Vernachlässigung von C' und G'

3. Ergebnisse und Diskussion

Mit Abbildung 3.5a als Ausgangslage werden, unter Beibehaltung der Verhältnisse laut Gleichung 3.9 bis 3.12, die Parameter β und σ im selben Schema wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, ermittelt.

Schritt 1: $P_S = 0$ setzen und β ermitteln:

Mit der Bezeichnung laut Gleichung 3.15 folgt das Ersatzschaltbild Abbildung 3.5b. Ein Blick darauf zeigt, dass Einfacheinschleifung/Stich und Volleinschleifung/Doppelstich bei Setzen von $P_S = 0$ in Bezug auf Impedanz- und Längenverhältnisse exakt übereinstimmen. Somit sind auch die Parameter β der einzelnen Leitungen exakt gleich, und damit auch die Steigung $k = \frac{\beta}{S_r}$ der V-Kennlinie, vgl. Abbildung 3.3.

$$\beta_{1,\text{Ein.}} = \beta_{2,\text{Ein.}} = \beta_{1,\text{Voll.}} = \beta_{2,\text{Voll.}} \quad (3.52)$$

Schritt 2: $P_B = 0$ setzen und σ ermitteln:

Mit Blick auf Abbildung 3.5c und Anwenden von Gleichung 3.14 folgt

$$\sigma_{11} = \left| \frac{\underline{Z}_{21} + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21} + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})} \right| = \frac{1}{\frac{L_{11} \cdot (L_2 + L_{PL})}{L_{21} \cdot (L_2 + L_{PL}) + L_2 \cdot L_{PL}} + 1} \quad (3.53)$$

$$\sigma_{21} = - \left| \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21} + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})} \right| = - \frac{L_{11}}{L_1 + \frac{L_2 \cdot L_{PL}}{L_2 + L_{PL}}} \quad (3.54)$$

Mit

$$\frac{I_2''}{I_{21}''} = - \left| \frac{\underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_{PL} + \underline{Z}_2} \right| \quad (3.55)$$

folgt

$$\sigma_2 = \left| \frac{\underline{Z}_{PL}}{\underline{Z}_{PL} + \underline{Z}_2} \right| \cdot \left| \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{21} + (\underline{Z}_2 \parallel \underline{Z}_{PL})} \right| = \frac{L_{PL}}{L_{PL} + L_2} \cdot \frac{L_{11}}{L_1 + \frac{L_2 \cdot L_{PL}}{L_2 + L_{PL}}} \quad (3.56)$$

Numerische Berechnung mittels PowerFactory

Die (n-0)-Lastfluss-Berechnung für die Einfacheinschleifung (äquivalent zum Stich) wird exemplarisch für $V = 66,7\%$ in Abbildung 3.6 mithilfe der durchgezogenen Kennlinien visualisiert. Für jeden der drei Leitungsabschnitte ist eine distinkte Kennlinie sichtbar: Eine blaue für L_{11} , eine rote für L_{21} und eine orangene für L_2 .

Die drei Kennlinien spiegeln das in Kapitel 3.1.5 und speziell in Tabelle 3.4 beschriebene Verhalten wider. Das bereits bei der Volleinschleifung erläuterte Verhalten hinsichtlich der Auslastung der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} unter den vier unterschiedlichen

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Erzeugungs- und Lastsituationen ist auch in diesem Fall qualitativ zutreffend. Die Auslastung der Leitung L_2 ergibt sich gemäß Gleichung 3.58, sodass die Kennlinie exakt zwischen den Kennlinien der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} zu liegen kommt.

Wie bereits bei der Volleinschleifung erläutert, herrscht auch hier im Bereich niedriger Leitungsauslastungen (bis $\approx 40\%$) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den berechneten Kennlinien. Mit steigendem Wirkleistungstransport über die Leitung wird die Auslastung im Bereich hoher Transportflüsse in der analytischen Berechnung jedoch zunehmend unterschätzt.

In Tabelle 3.1 ist für die Lastflusssituation $P_S = -1200$ MW und $P_B = -8000$ MW der Fehler der analytischen Berechnung aufgeschlüsselt, definiert als Differenz zwischen der simulierten Leitungsauslastung A_{PF} und der analytisch berechneten Leitungsauslastung A_{calc} , jeweils für die Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} . Die Abweichung resultiert zum größten Teil aus dem Blindleistungsfluss über die Leitung, der bei der analytischen Berechnung vernachlässigt wird. Voll- und Einfacheinschleifung sind gleichermaßen von diesem Phänomen betroffen, allerdings fällt der Fehler bei der Einfacheinschleifung für L_{11} geringfügig höher aus als bei der Volleinschleifung (3%), zurückzuführen auf die höhere Leitungsauslastung und den damit einhergehenden größeren Blindleistungsbedarf der Leitung. Wird für eine erste Abschätzung und Evaluierung die analytische Methode herangezogen, sollte berücksichtigt werden, dass die analytische Berechnung für die Einfacheinschleifung die zu erwartende Leitungsauslastung **stärker** unterschätzt als für die Volleinschleifung.

Tabelle 3.1.: Abweichung der simulierten von der analytisch berechneten Leitungsauslastung für $P_S = -1200$ MW und $P_B = -8000$ MW sowie Unterschied der Abweichungen zwischen Voll- und Einfacheinschleifung

	Volleinschleifung			Einfacheinschleifung			$\Delta\Delta_{\text{Voll.-}\Delta\text{Ein.}}$
	A_{PF}	A_{calc}	$\Delta_{PF-calc}$	A_{PF}	A_{calc}	$\Delta_{PF-calc}$	
L_{11}	149 %	120 %	29 %	163 %	132 %	31 %	-3 %
L_{21}	123 %	98 %	26 %	111 %	86 %	25 %	1 %

3. Ergebnisse und Diskussion

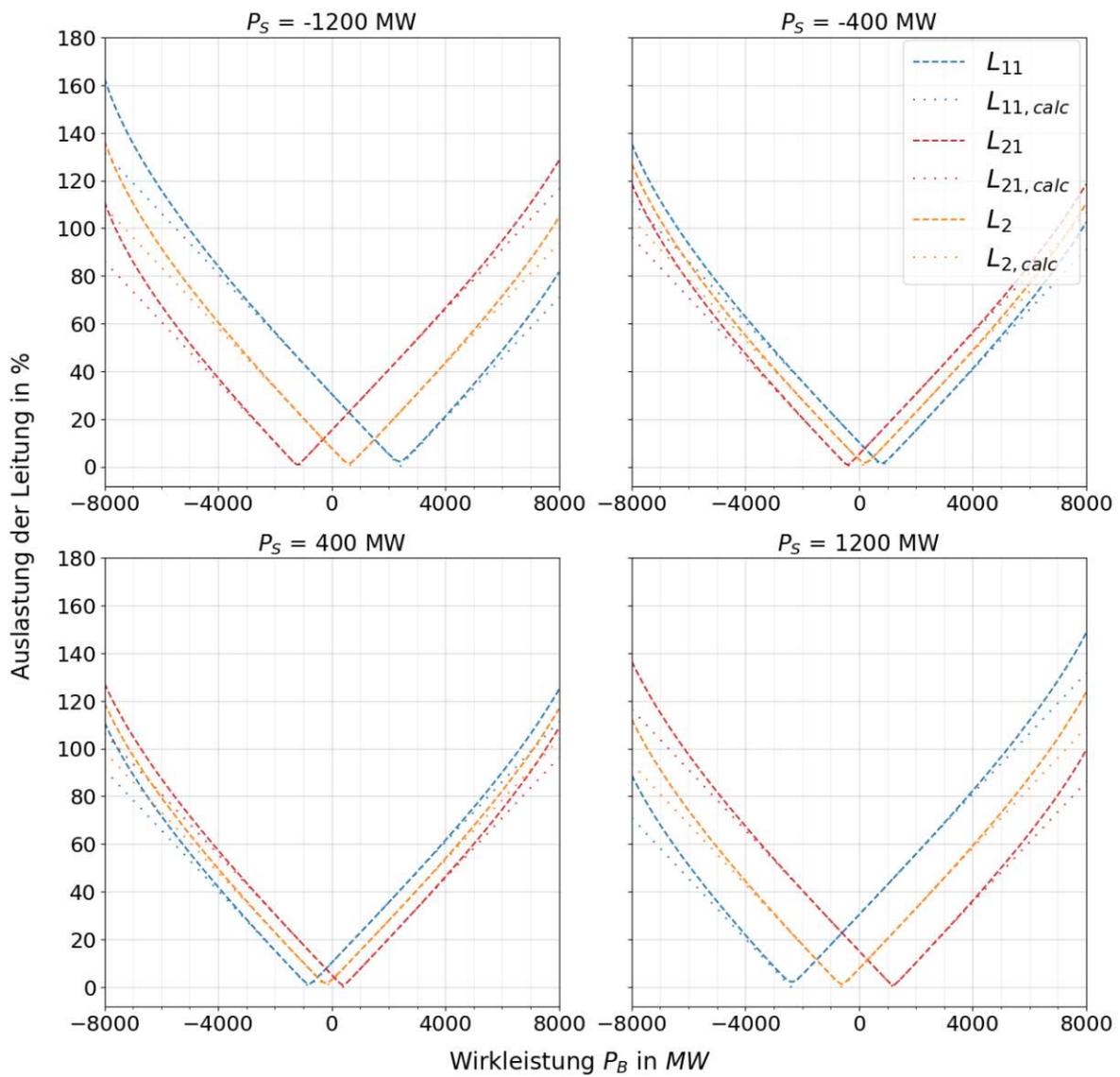
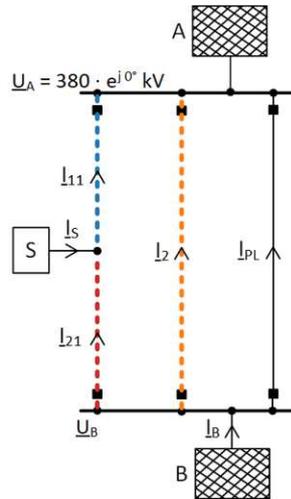


Abbildung 3.6.: Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation (---) und analytische Berechnung (\cdots)

3.1.4. Konventionelle Anbindung im Netzknoten B

Analytische Berechnung

Wird die Erzeugung bzw. Last mit der Wirkleistung P_S direkt im Netzknoten **B** angebunden, so vereinfacht sich Gleichung 3.6 zu

$$A_x = \frac{P_x}{S_r} = \frac{\beta_x \cdot (P_B + P_S)}{S_r} \quad (3.57)$$

Die in Kapitel 3.1.1 getroffenen Annahmen, was die (Nicht-)Berücksichtigung der Leitungsparameter betrifft, bleiben dieselben. Die Ermittlung des Parameters β_x erfolgt nach Gleichung 3.27.

Numerische Berechnung mittels PowerFactory

Die (n-0)-Lastfluss-Berechnung für konventionelle Anbindung im Netzknoten **B** wird exemplarisch für $V = 66,7\%$ in Abbildung 3.7 mithilfe der durchgezogenen Kennlinien visualisiert. Aufgrund der gleichen Länge von L_1 und L_2 ist die Auslastung jener Leitungen ident, $A_1 = A_2$, und aus diesem Grund nur eine distinkte Kennlinie sichtbar. Wie bereits bei der Voll- und Einfacheinschleifung erläutert, herrscht auch hier im Bereich niedriger Leitungsauslastungen (bis $\approx 40\%$) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den berechneten Kennlinien. Mit steigendem Wirkleistungstransport über die Leitung wird die Auslastung im Bereich hoher Transportflüsse in der analytischen Berechnung jedoch zunehmend unterschätzt.

3. Ergebnisse und Diskussion

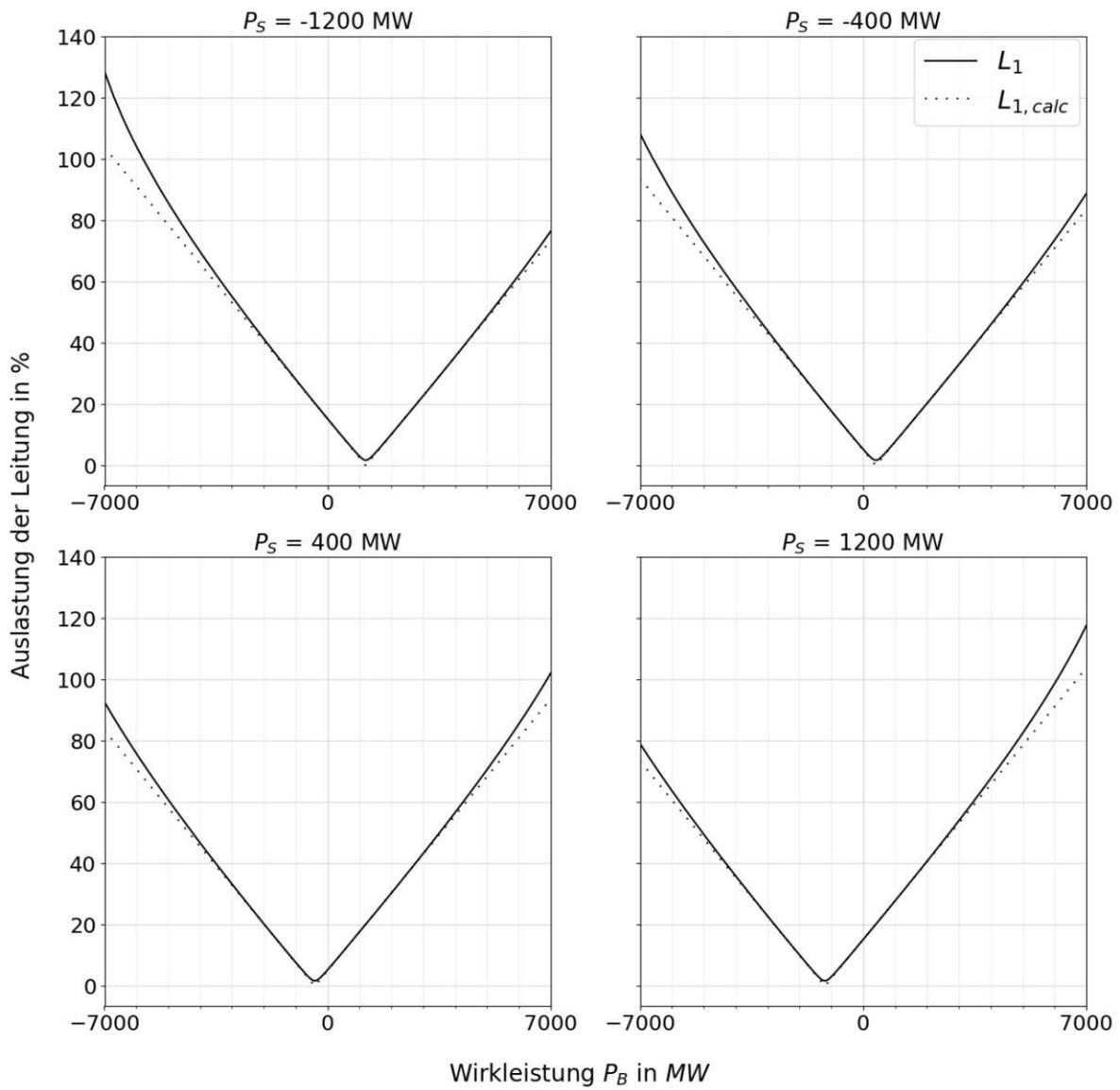
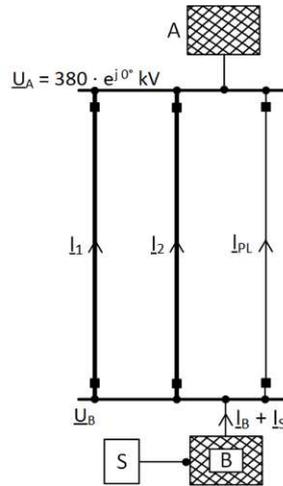


Abbildung 3.7.: Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation (---) und analytische Berechnung (···)

3.1.5. Vergleich der Netzanbindungskonzepte: Parameter, Leitungsauslastung und Übertragungskapazität

Weil sich entsprechend dem Vermaschungsgrad die Impedanz der Parallel-Leitung ändert, wirkt sich der Vermaschungsgrad direkt auf die Parameter β und σ aus. Pro Vermaschungsgrad ergibt sich demnach ein Satz an Parametern, deren Werte für Distanz $\mathbf{A} \leftrightarrow \mathbf{B} = 100$ km und Distanz $\mathbf{A} \leftrightarrow \mathbf{S} = \text{Distanz } \mathbf{S} \leftrightarrow \mathbf{B} = 50$ km in nachfolgender Tabelle dargestellt sind. Der Parameter β ist, wie bereits in Kapitel 3.1.4 erläutert, auch für die Variante der konventionellen (direkten) Anbindung im Netzknoten \mathbf{B} gültig.

Tabelle 3.2.: Parameter σ und β bei verschiedenen Vermaschungsgraden V im (n-0)-Fall

$V/\%$	L_{PL}/km	β	Volleinschleifung		Einfacheinschleifung		
			L_{11}	L_{21}	L_{11}	L_{21}	L_2
			σ_{11}	σ_{21}	σ_{11}	σ_{21}	σ_2
54,5	500	$\frac{5}{11}$	$\frac{21}{44}$	$-\frac{1}{44}$	$\frac{8}{11}$	$-\frac{3}{11}$	$\frac{5}{22}$
60	200	$\frac{2}{5}$	$\frac{9}{20}$	$-\frac{1}{20}$	$\frac{7}{10}$	$-\frac{3}{10}$	$\frac{1}{5}$
66,7	100	$\frac{1}{3}$	$\frac{5}{12}$	$-\frac{1}{12}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$
75	50	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	$-\frac{1}{8}$	$\frac{5}{8}$	$-\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$
80	33,3	$\frac{1}{5}$	$\frac{7}{20}$	$-\frac{3}{20}$	$\frac{3}{5}$	$-\frac{2}{5}$	$\frac{1}{10}$

β :

Der Parameter β gibt an, welchen Anteil der Wirkleistung P_B (bzw. $P_B + P_S$ im Falle der konventionellen Anbindung in \mathbf{B}) eine Leitung jeweils übernimmt. β ist für Volleinschleifung/Doppelstich sowie Einfacheinschleifung/Stich gleich, schließlich herrschen – bei Setzung von $P_S = 0$ – zwischen Netzknoten \mathbf{A} und Netzknoten \mathbf{B} bei allen Varianten dieselben Impedanzverhältnisse. Leitung L_1 und Leitung L_2 haben aufgrund identischer Längen und Leitungsparameter dasselbe β , also $\beta_1 = \beta_2$. Die Parallel-Leitung hat, abhängig von ihrer Länge, ein größeres β (wenn $L_{PL} < (L_1 = L_2)$) oder ein kleineres β (wenn $L_{PL} > (L_1 = L_2)$). Die Summe der β aller Leitungen zwischen Netzknoten \mathbf{A} und Netzknoten \mathbf{B} muss eins ergeben, also $\beta_1 + \beta_2 + \beta_{PL} = 1$, schließlich müssen jene Leitungen in Summe die volle Wirkleistung P_B übernehmen.

Je größer der Vermaschungsgrad, desto kleiner $\beta_1 = \beta_2$ (und desto größer β_{PL}) und entsprechend flacher wird die Steigung der Auslastungs-Kennlinie von Leitung L_1 und L_2 . Mit steigendem Vermaschungsgrad weicht der Lastfluss zwischen \mathbf{A} und \mathbf{B} also immer stärker von den Leitungen L_1 und L_2 auf den restlichen Teil des Netzes, repräsentiert durch L_{PL} , aus. Durch die – gegenüber den Leitungen L_1 und L_2 – verminderte Impedanz des vermaschten Netzes/des Parallel-Pfades wird eben jener Pfad attraktiver. Bei gleichen Wirkleistungen P_B und P_S ist ein bestimmter Leitungsstromkreis demnach umso schwächer ausgelastet, je höher der Vermaschungsgrad ist.

σ :

Der Parameter σ existiert nur für die Variante der Anbindung zwischen \mathbf{A} und \mathbf{B} und

3. Ergebnisse und Diskussion

gibt an, welchen Anteil der Wirkleistung P_S eine Leitung jeweils übernimmt. σ ist abhängig davon, auf welcher Strecke zwischen Netzknoten **A** und Netzknoten **B** die Last-/Erzeugungseinheit angeschlossen ist, sei dies in Form einer Voll- oder Einfacheinschleifung oder in Form eines Doppelstichs oder Stichs. Für Volleinschleifung/Doppelstich gilt: $\sigma_{11} = \sigma_{12}$ sowie $\sigma_{21} = \sigma_{22}$. Für Einfacheinschleifung/Stich gilt: $\sigma_{11} \neq \sigma_{21} \neq \sigma_2$.

Die σ jener Leitungsabschnitte, welche die Last-/Erzeugungseinheit versorgen, müssen in Summe eins ergeben. Für Volleinschleifung und Doppelstich also $\sigma_{11} + \sigma_{12} + |\sigma_{21}| + |\sigma_{22}| = 1$, für Einfacheinschleifung und Stich entsprechend $\sigma_{11} + |\sigma_{21}| = 1$. Schließlich müssen jene Leitungen in Summe die in der Schaltanlage benötigte Wirkleistung P_S bereitstellen.

σ_{11} wird mit steigendem Vermaschungsgrad kleiner. Andersrum verhält es sich mit dem Parameter σ_{21} , welcher mit steigendem Vermaschungsgrad betraglich – unter Beachtung des negativen Vorzeichens – größer wird. Der nur für die Einfacheinschleifung vorhandene Parameter σ_2 wird, wie σ_{11} , mit steigendem Vermaschungsgrad kleiner und liegt überdies exakt zwischen σ_{11} und σ_{21} , also

$$\sigma_2 = \sigma_{11} - \frac{\sigma_{11} - \sigma_{21}}{2} . \quad (3.58)$$

Mit Blick auf Abbildung 3.12a bis 3.12d geht hervor, dass bei der Volleinschleifung die Parallel-Leitung den Lastfluss aufnehmen muss, der in Summe über die Abschnitte L_{21} und L_{22} fließt, also $\sigma_{PL} = \sigma_{21} + \sigma_{22}$. Bei der Einfacheinschleifung (Abbildung 3.13a bis 3.13d) teilen sich die Parallel-Leitung L_{PL} und die Leitung L_2 entsprechend ihrer Impedanzverhältnisse den Anteil des Lastflusses P_S auf, der über den Abschnitt L_{21} fließt.

Die unterschiedlichen Werte der Parameter σ bei Volleinschleifung/Doppelstich und Einfacheinschleifung/Stich sind auch der Grund für die unterschiedliche Auslastung der einzelnen Leitungsabschnitte.

Tabelle 3.3.: Parameter σ für unterschiedliche Leitungsabschnitte im n-0 Fall

Leitungsabschnitt	Vergleich von σ
L_{11}	$\sigma_{11, \text{Voll.}} < \sigma_{11, \text{Ein.}}$
L_{12}	$ \sigma_{21, \text{Voll.}} < \sigma_{21, \text{Ein.}} $ $\sigma_{21, \text{Voll.}} > \sigma_{21, \text{Ein.}}$
L_2	$\sigma_{21, \text{Ein.}} < \sigma_2, \text{Ein.} < \sigma_{11, \text{Ein.}}$

Nach Bestimmung der Parameter σ und β ergibt sich die Auslastung der einzelnen Leitungsabschnitte nun in Abhängigkeit des Betrags, sowie der Richtung von P_B und P_S . In Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13 sind nun jeweils für Volleinschleifung/Doppelstich und Einfacheinschleifung/Stich die vier verschiedenen Kombinationen (a, b, c und d) der Richtungen von P_B und P_S dargestellt. Die Werte von β und σ beziehen sich auf eine Vermaschung von 66,7%, mit einer korrespondierenden Länge der Parallel-Leitung

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

von 100 km. Aufgrund der Distanz $\mathbf{A} \Leftrightarrow \mathbf{B} = 100 \text{ km}$ ergibt sich auch eine Aufteilung von P_B entsprechend $\beta = \frac{1}{3}$.

Bei der Einbindung der Last/Erzeugung zwischen \mathbf{A} und \mathbf{B} ist der entscheidende Punkt nun folgender: Je nachdem, ob sich die aufgrund von P_B und P_S resultierenden Lastflüsse additiv (gleiche Richtung) oder subtraktiv (entgegengesetzte Richtung) überlagern, wird die Auslastung der entsprechenden Leitungsabschnitte durch die Einbindung der Schaltanlage \mathbf{S} zwischen den Netzknoten \mathbf{A} und \mathbf{B} entweder verstärkt oder aber abgeschwächt, bezogen auf die Auslastung der Leitungsabschnitte ohne Vorhandensein der Last/Erzeugung.

Im Folgenden werden die Teilabbildungen von Abbildung 3.12 der Reihe nach analysiert:

Bei einem Lastfluss von \mathbf{A} nach \mathbf{B} führt die Anbindung einer Last (vgl. Abbildung 3.12a) zu folgenden Effekten:

- Die Auslastung der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{12} nimmt durch additive Überlagerung der Anteile $\beta \cdot P_B$ und $\sigma \cdot P_S$ zu.
- Die Auslastung der Leitungsabschnitte L_{21} und L_{22} nimmt durch subtraktive Überlagerung der Anteile $\beta \cdot P_B$ und $\sigma \cdot P_S$ ab.
- Der Lastfluss und somit die Auslastung im vermaschten Netz steigt an.

Folglich wirkt sich die Lastanbindung bei gleichzeitigem Transportfluss zwischen \mathbf{A} und \mathbf{B} ungünstig auf die oberen und günstig auf die unteren Leitungsabschnitte aus.

Bei Anbindung einer Erzeugung (vgl. Abbildung 3.12b) kehren sich diese Effekte um:

- Die Auslastung von L_{11} und L_{12} nimmt ab.
- Die Auslastung von L_{21} und L_{22} nimmt zu.
- Der Lastfluss und somit die Auslastung im vermaschten Netz nimmt ab.

Bei umgekehrter Lastflussrichtung bewirkt die Anbindung einer Last (vgl. Abbildung 3.12c) eine

- Abnahme der Auslastung von L_{11} und L_{12} ,
- Zunahme der Auslastung von L_{21} und L_{22} ,
- Abnahme des Lastflusses im vermaschten Netz.

Wird stattdessen eine Erzeugung angebunden (vgl. Abbildung 3.12d), so ergibt sich:

- eine Zunahme der Auslastung von L_{11} und L_{12} ,
- eine Abnahme der Auslastung von L_{21} und L_{22} ,
- sowie eine Zunahme des Lastflusses im vermaschten Netz.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die für die Volleinschleifung/Doppelstich getätigten Aussagen bezüglich L_{11} und L_{21} und L_{PL} können für die Einfacheinschleifung/Stich (vgl. Abbildung 3.13) übernommen werden. Die Leitungsabschnitte L_{12} und L_{22} fallen allerdings zur Leitung L_2 zusammen, wobei die Richtung des Lastflusses in L_2 stets der Richtung des Lastflusses im vermaschten Netz (L_{PL}) entspricht.

Die für Volleinschleifung/Doppelstich und Einfacheinschleifung/Stich getroffenen Aussagen sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Ein Pfeil nach oben bedeutet dabei eine Steigerung der Auslastung im jeweiligen Leitungsabschnitt durch Einbindung der Schaltanlage im Vergleich zum Zustand ohne Schaltanlage, ein Pfeil nach unten eine Abschwächung der Auslastung.

Tabelle 3.4.: Auslastung der Leitungsabschnitte bei verschiedenen Kombinationen von P_B und P_S

P_B	P_S	A_{11}	A_{21}	A_2	A_{PL}
< 0	< 0	↑	↓	↑	↑
	> 0	↓	↑	↓	↓

> 0	< 0	↓	↑	↓	↓
	> 0	↑	↓	↑	↑

Wie auf einen Blick erkennbar ist, existiert keine optimale Lösung. Die Anbindung der Schaltanlage zwischen **A** und **B** bewirkt stets eine Anhebung der Auslastung von zumindest einem Leitungsabschnitt gegenüber dem Zustand ohne Schaltanlage. Dies ist naheliegend, da die für die Last- bzw. Erzeugungseinheit erforderliche Wirkleistung P_S zusätzlich zur Leistung P_B über die betreffenden Leitungsabschnitte übertragen werden muss.

In Abbildung 3.8 sind die simulierten Kennlinien aus den Abbildungen 3.4 und 3.6 zusammengeführt, um die Unterschiede zwischen Volleinschleifung und Einfacheinschleifung hinsichtlich der Leitungsbelastung hervorzuheben.

Für identische Werte P_S und P_B zeigt sich, dass im Fall der Einfacheinschleifung – abhängig von der spezifischen Lastflusssituation – jeweils ein Leitungsabschnitt höher und ein anderer geringer ausgelastet ist als der korrespondierende Abschnitt bei der Volleinschleifung. Beispielsweise ist für $P_S = 1200$ MW und $P_B < 0$ der obere Leitungsabschnitt $L_{11, \text{Ein}}$ bei der Einfacheinschleifung stärker ausgelastet als der obere Leitungsabschnitt $L_{11, \text{Voll}}$ bei der Volleinschleifung. Umgekehrt zeigt der untere Abschnitt $L_{21, \text{Ein}}$ eine geringere Auslastung im Vergleich zu $L_{21, \text{Voll}}$. Dies führt zu einer größeren Auslastungsdifferenz zwischen den Leitungsabschnitten bei der Einfacheinschleifung. Infolgedessen erreicht bei vorgegebenem P_S bei der Einfacheinschleifung ein Leitungsabschnitt früher seine Auslastungsgrenze als bei der Volleinschleifung. Dies limitiert die maximal übertragbare Wirkleistung zwischen den Knoten **A** und **B** und führt somit zu einer reduzierten Übertragungskapazität im Vergleich zur Volleinschleifung.

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

Nachdem nun geklärt ist, wie sich die Varianten der Voll- und Einfacheinschleifung auf die Leitungsauslastung auswirken, stellt sich die Frage, wie diese im Vergleich zur konventionellen Anbindung von Lasten bzw. Erzeugungseinheiten an einen Netzknoten abschneiden. Aus diesem Grund wurde in Abbildung 3.9 zusätzlich zu den Kennlinien für Voll- und Einfacheinschleifung auch die Kennlinie für den Fall dargestellt, dass die Last/Erzeugung unmittelbar im Netzknoten **B** angebunden ist. Die schematische Darstellung rechts oben in der Abbildung soll dabei nicht implizieren, dass eine separate Schaltanlage **S** im Netzknoten **B** errichtet wird. Vielmehr erfolgt die Anbindung – wie in Abbildung 2.3 (zwar ebenfalls vereinfacht, aber näher an der Realität) dargestellt – über zusätzliche Schaltfelder an die bereits bestehende Anlage des Netzknotens **B**.

Für die konventionelle Anbindung ergibt sich nur eine Auslastungskennlinie, da sich die Kennlinien von L_1 und L_2 aufgrund identischer Leitungslängen und -parameter überlappen. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass diese Variante im Allgemeinen eine geringere Auslastung aufweist als der am stärksten belastete Abschnitt der Volleinschleifung (und damit auch eine geringere Auslastung als der am stärksten belastete Abschnitt der Einfacheinschleifung). Dieses Verhalten lässt sich mit dem vereinfachten analytischen Modell wie folgt erklären: Der Wirkleistungsfluss P_B verteilt sich bei allen drei Varianten identisch, und zwar gemäß dem Parameter β . Der für die Leistung P_S notwendige Wirkleistungsfluss wird jedoch bei Voll- und Einfacheinschleifung bevorzugt entweder über die oberen oder die unteren beiden Leitungsabschnitte geführt. Je nach Lastflusssituation ist somit entweder der obere oder der untere Abschnitt als erstes ausgelastet, während der jeweils andere Abschnitt (deutlich) niedriger ausgelastet ist. Bei der konventionellen Anbindung hingegen teilt sich auch der Wirkleistungsfluss P_S gleichmäßig auf L_1 und L_2 auf, sodass keine einseitige Bevorzugung eines Abschnitts aufgrund einer niedrigeren Impedanz auftritt. Somit ist die Auslastung bei der Variante der direkten Anbindung niedriger als die Auslastung des am stärksten belasteten Abschnitts der Volleinschleifung.

Bemerkenswert ist der Schnittpunkt im ersten Subplot bei etwa -5800 MW, an dem die Auslastung der konventionellen Anbindung jene der Volleinschleifung (bezogen auf den am stärksten belasteten Abschnitt) übersteigt. Hier macht sich der Einfluss der Blindleistungsaufnahme der Leitungen bemerkbar: Da bei der konventionellen Anbindung der Wirkleistungsfluss P_S über eine doppelt so lange Leitung transportiert werden muss, ist auch der Blindleistungsbedarf der Leitung höher. Mit steigender Auslastung verstärkt sich dieser Effekt, sodass der anfängliche Abstand zwischen der blauen Auslastungskennlinie der Volleinschleifung und der schwarzen Kennlinie der konventionellen Anbindung abnimmt und sich schließlich umkehrt.

Die Ähnlichkeit zwischen der Auslastungskennlinie der konventionellen Anbindung und jener des oberen Abschnitts der Volleinschleifung erklärt sich wie folgt: In einem nicht vermaschten Netz würden sich beide Varianten bezüglich des Wirkleistungsflusses in diesem Abschnitt exakt gleich verhalten. Erst durch die Existenz des vermaschten Netzes wird ein Teil des Wirkleistungsflusses P_S über das vermaschte Netz geleitet und erreicht die Schaltanlage über die unteren Leitungsabschnitte. Dieser zusätzliche Anteil bei der direkten Anbindung wäre für einen konstanten Unterschied zwischen der blauen und der schwarzen Kennlinie verantwortlich. Die darüber hinausgehende Verringerung der Differenz bei höheren Auslastungen resultiert aus der zunehmenden Blindleistungsaufnahme der Leitungen.

3. Ergebnisse und Diskussion

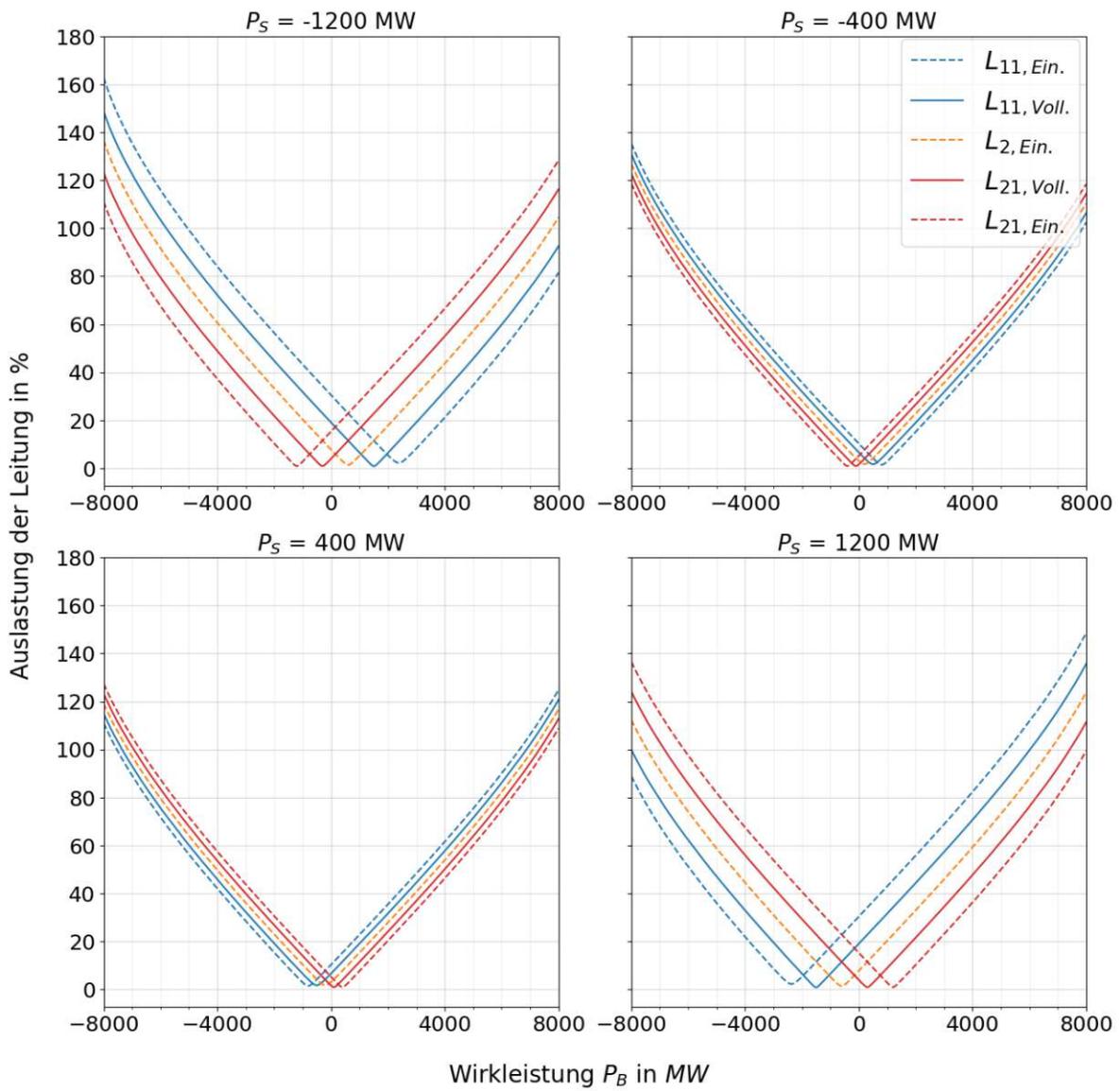
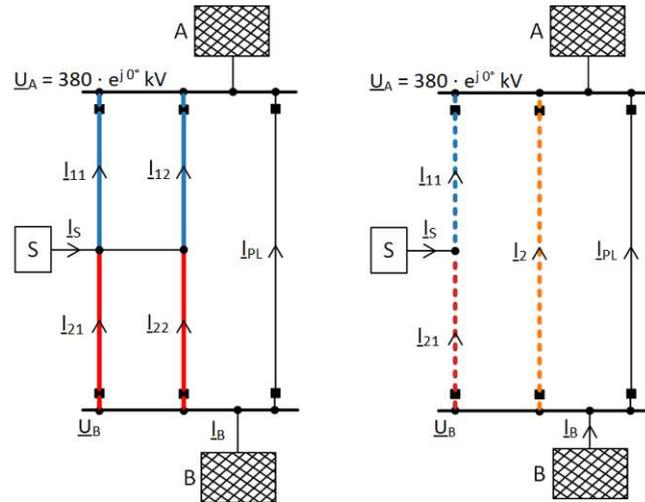


Abbildung 3.8.: Simulierte Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: Voll- und Einfachschleifung

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

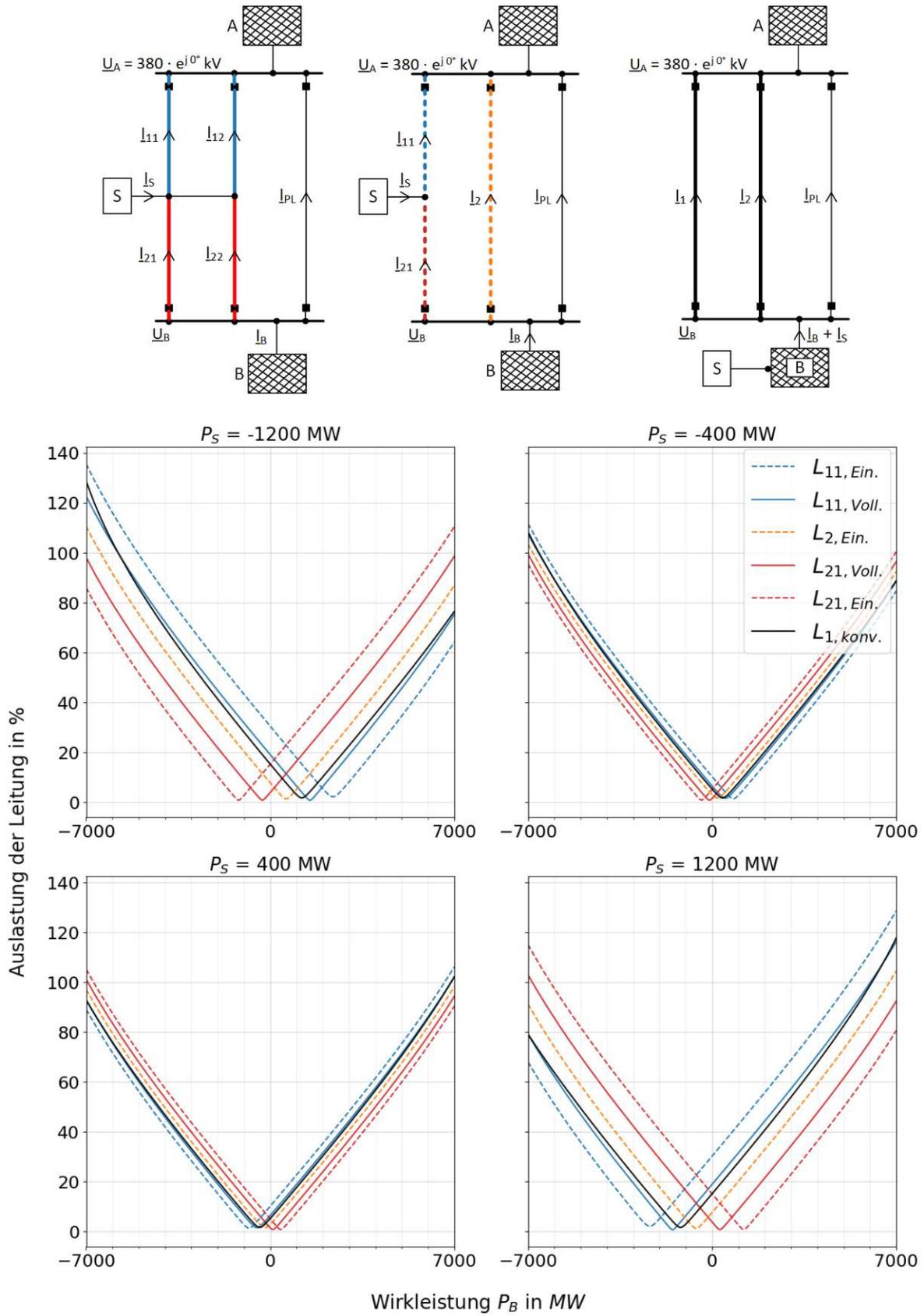


Abbildung 3.9.: Simulierte Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: Voll- und Einfachschleifung sowie konventionelle/direkte Anbindung in B

Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung

In Abbildung 3.10 sind die Auslastungskennlinien für den höchsten ($V = 80\%$) sowie für den niedrigsten ($V = 54,5\%$) Vermaschungsgrad dargestellt, und zwar für den Fall $P_S = -1200$ MW.

Der Vermaschungsgrad des Netzes zeigt einen positiven Einfluss auf die Übertragungskapazität: Ein höherer Vermaschungsgrad korreliert mit einer Steigerung der maximal übertragbaren Wirkleistung $P_{B,max}$ bei konstant gehaltener Wirkleistung P_S . Dieser Effekt äußert sich gleichermaßen bei Volleinschleifung und Einfacheinschleifung, sodass sich die relativen Positionen und der Abstand der jeweiligen Auslastungskennlinien zueinander bei zunehmender Vermaschung nicht signifikant verändern.

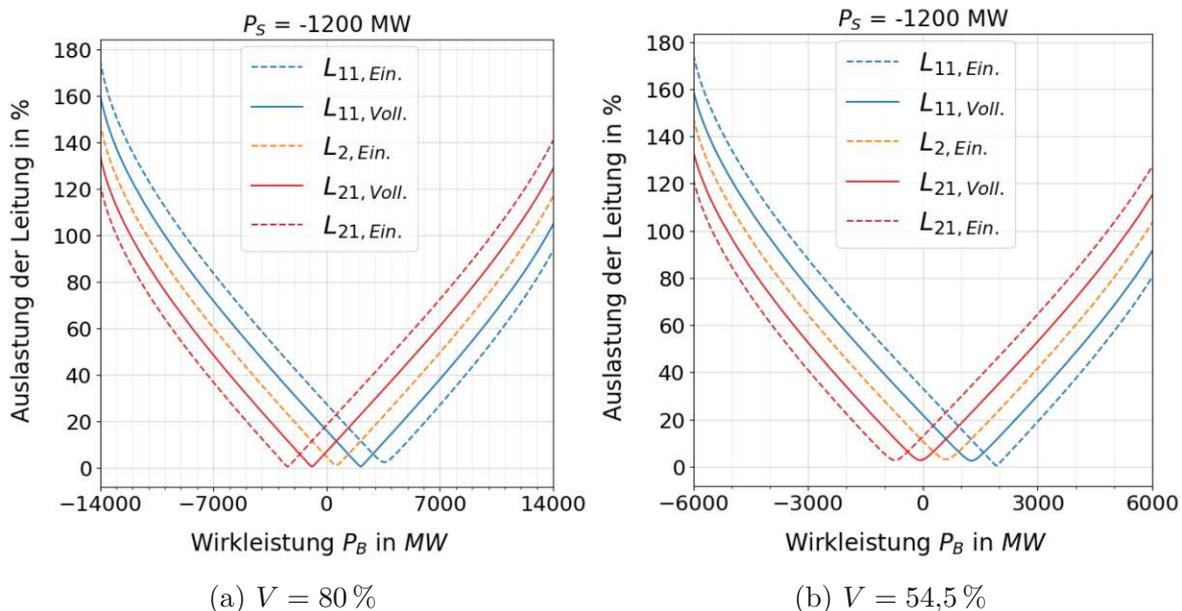


Abbildung 3.10.: Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung – Voll- und Einfacheinschleifung

In Abbildung 3.11 ist zusätzlich zu den in Abbildung 3.10 dargestellten Kennlinien für Voll- und Einfacheinschleifung auch die Auslastungskennlinie für den Fall der konventionellen Anbindung in **B** (schwarz) gezeigt. Dabei wird das in Abbildung 3.9 beschriebene Verhalten deutlich: Je höher der Vermaschungsgrad, desto größer ist der Anteil von P_S , der über das vermaschte Netz fließt – sichtbar an der Differenz zwischen der blauen Kennlinie (Volleinschleifung) und der schwarzen Kennlinie (konventionelle Anbindung). Mit abnehmendem Vermaschungsgrad nähert sich die Auslastungskennlinie des oberen Leitungsabschnitts bei der Volleinschleifung zunehmend jener der direkten Anbindung an, bis sie sich bei einem Vermaschungsgrad von lediglich $V = 54,5\%$ – dargestellt in Abbildung 3.10b – nahezu überlappen.

Hinweis: Der Abfall der schwarzen Kennlinie auf Null bei hohen P_B -Werten ist ein Artefakt der PowerFactory-Simulation. In diesem Bereich war der Blindleistungsbedarf der Leitung so hoch, dass der Lastfluss nicht mehr konvergierte. Dieser Bereich wurde bewusst mit abgebildet, um die Minimal- und Maximalwerte der x-Achse an jene

in Abbildung 3.10 anzugleichen und gleichzeitig den nichtlinearen Bereich der Auslastungskurven von Voll- und Einfacheinschleifung zu zeigen.

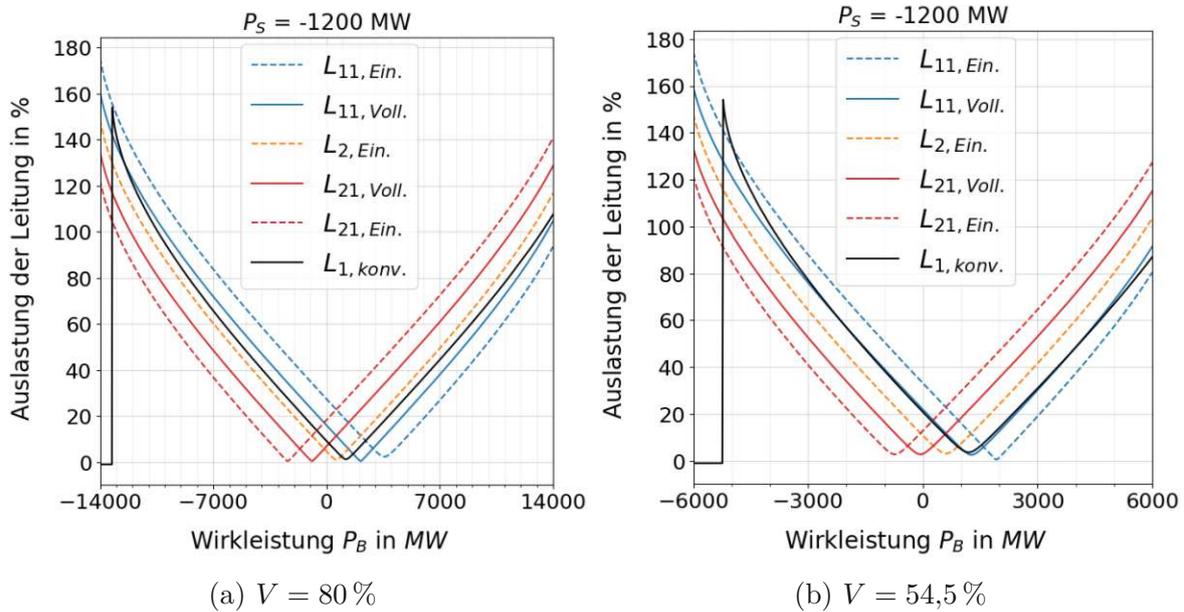


Abbildung 3.11.: Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung – Voll- und Einfacheinschleifung sowie konventionelle Anbindung

3.1.6. Limitationen des vereinfachten/analytischen Modells betreffend optimale Standortwahl

Durch einen Blick auf Abbildung 3.12 und 3.13 sowie Tabelle 3.2 entsteht der fälschliche Eindruck, dass sich die für die Leitungsauslastung optimale Position der Last- oder Erzeugungseinheit entlang der Strecke zwischen **A** und **B** einzig und alleine durch Analyse der Parameter σ bestimmen lässt. Die Resultate dieser Überlegungen sind in Tabelle 3.5 für die vier verschiedenen Kombinationen der Richtungen von P_B und P_S dargestellt.

Dabei resultiert die Änderung der Auslastung unmittelbar aus der Variation der Parameter σ_{11} und σ_{21} . Bei Verschiebung von **S** in Richtung **B** durchläuft $\sigma_{11} = \sigma_{12}$ bei der Volleinschleifung für $V = 66,7\%$ das Intervall $\left[\frac{5}{12}; \frac{1}{3}\right]$, wobei der Ausgangswert $\frac{5}{12}$ der mittigen Position von **S** und der Endwert $\frac{1}{3}$ dem Anschluss direkt an der Sammelschiene **B** entspricht. Bei der Einfacheinschleifung durchläuft σ_{11} für $V = 66,7\%$ das Intervall $\left[\frac{2}{3}; \frac{1}{3}\right]$. Parallel dazu verändert sich $\sigma_{21} = \sigma_{22}$ bei der Volleinschleifung im Bereich $\left[-\frac{1}{12}; -\frac{1}{6}\right]$, bei der Einfacheinschleifung verändert sich σ_{21} im Bereich $\left[-\frac{1}{3}; -\frac{2}{3}\right]$. Die Verschiebung von **S** in Richtung **B** führt zu einer Verringerung von σ_{11} und einer betragsmäßigen Vergrößerung von σ_{21} . Dies spiegelt eine Lastflussumverteilung wider: L_{11} übernimmt weniger, während L_{21} mehr Lastfluss trägt. Je nach Richtung von P_B und P_S kann dieser Effekt die Leitungsauslastung positiv oder negativ beeinflussen.

Vorsicht: Allerdings sind die getätigten Aussagen und die daraus abgeleiteten Empfehlungen in Tabelle 3.5 in dieser allgemeinen Form ausschließlich für das vereinfachte

3. Ergebnisse und Diskussion

Untersuchungsmodell gültig. In realen Netzen würde der beschriebene positive Effekt bei einer Verschiebung von **S** in die empfohlene Richtung durch eine erhöhte Blindleistungsaufnahme der Leitung abgeschwächt, vollständig aufgehoben oder gar umgekehrt werden – abhängig von der Kombination aus Vermaschungsgrad, angeschlossener Wirkleistung P_S , übertragener Wirkleistung P_B und der konkreten Position der Einbindung. Somit sind die in Tabelle 3.5 allgemein gegebenen Empfehlungen in der Realität nicht notwendigerweise (aber durchaus für bestimmte Situationen) gültig.

Die Bestimmung der optimalen Position von **S** stellt ein Optimierungsproblem dar, das von zwei entgegengesetzten Einflüssen bestimmt wird:

- Lastflussaufteilung: Ziel ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Wirkleistungsflusses auf die Leitungsabschnitte L_{11} , L_{12} , L_{21} und L_{22} (bzw. L_{11} , L_{21} und L_2 bei der Einfacheinschleifung), um einen frühzeitigen Engpass einzelner Abschnitte zu vermeiden. Durch Variation der Position von **S** wird die Impedanz einzelner Leitungsabschnitte verändert, wodurch mehr oder weniger Wirkleistung über diesen Abschnitt fließt. Dieser Effekt ist im ersten Absatz dieses Abschnittes beschrieben.
- Blindleistungsaufnahme: Eine Erhöhung der Impedanz eines bestimmten Abschnitts reduziert zwar den dort fließenden Wirkleistungsanteil, erhöht jedoch gleichzeitig die Blindleistungsaufnahme dieses Abschnitts. Dies kann die Leitungsauslastung wiederum erhöhen und wirkt somit dem erstgenannten Effekt entgegen.

Für eine fundierte Bestimmung der optimalen Position von **S** ist somit eine Simulation in einer Netzberechnungssoftware unter Berücksichtigung des jeweiligen Vermaschungsgrades, der Distanz zwischen **A** und **B** sowie der Größen P_S und P_B erforderlich.

Darüber hinaus sind Überlegungen zur idealen Positionierung nur relevant, wenn **S** entlang der Leitung angebunden wird. Besteht die Möglichkeit, die Last- oder Erzeugungseinheit direkt an den Netzknoten **A** oder **B** anzuschließen, ist grundsätzlich der jeweils entgegengesetzte Knoten zu bevorzugen. Betrachten wir beispielsweise den ersten Fall in Tabelle 3.5 ($P_B < 0, P_S < 0$): Die optimale Lösung wäre eine direkte Anbindung in **A**, in diesem Fall müssen die Leitungen L_1 und L_2 lediglich den Transportfluss übernehmen, ohne zusätzlich den Lastfluss für die Einheit zu tragen.

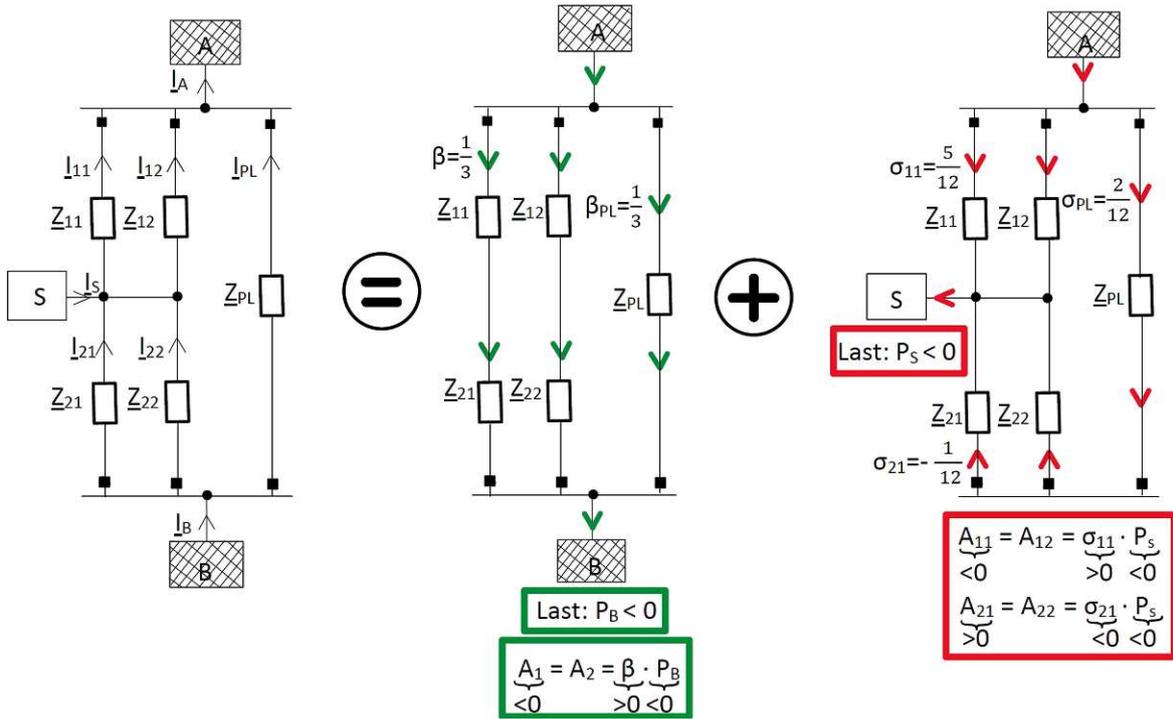
Anmerkung zu Tabelle 3.5: Die Spalten „A bei Verschiebung von **S** in Richtung **B**“ sowie „Empfehlung“ sind für das vereinfachte/analytische Modell gültig, da sie jedoch nicht zwangsweise die Realität widerspiegeln, sind sie rot durchgestrichen.

Tabelle 3.5.: Veränderung der Auslastung bei Verschiebung der Schaltanlage **S**

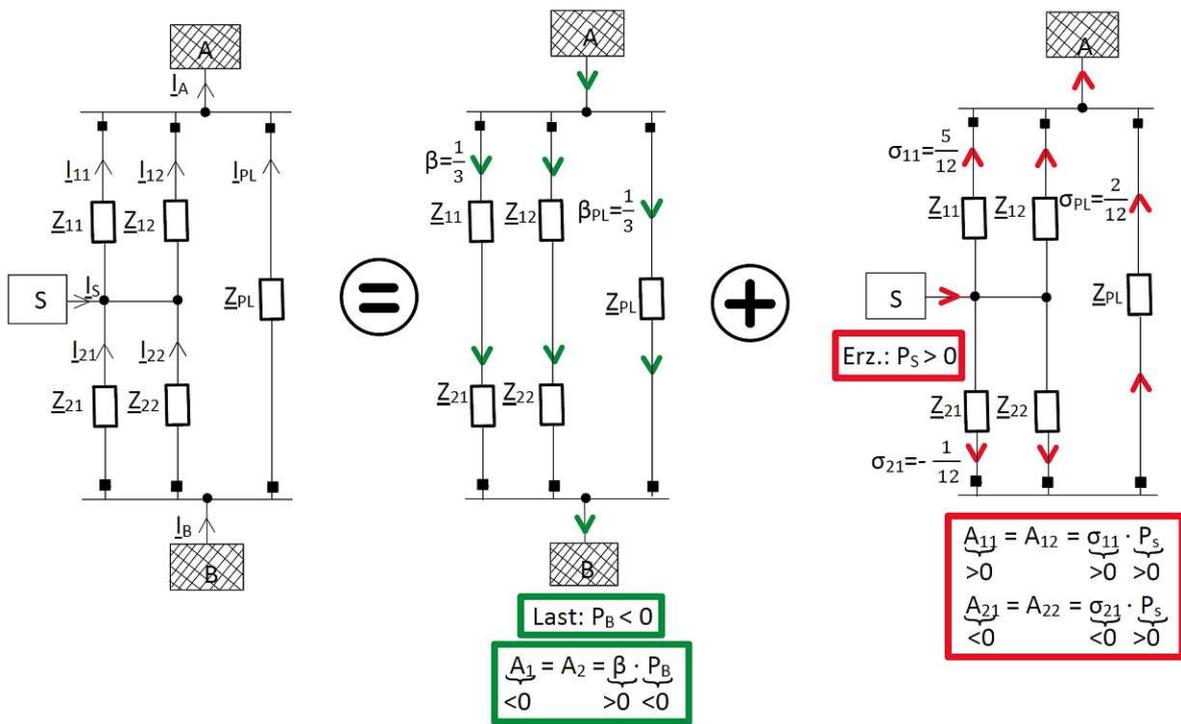
		A bei Verschiebung von S in Richtung B		Empfehlung
$P_B < 0$	$P_S < 0$	$A_{11} \downarrow$	$A_{21} \downarrow$	$S \rightarrow B$
	$P_S > 0$	$A_{11} \uparrow$	$A_{21} \uparrow$	$S \rightarrow A$

$P_B > 0$	$P_S > 0$	$A_{11} \downarrow$	$A_{21} \downarrow$	$S \rightarrow B$
	$P_S < 0$	$A_{11} \uparrow$	$A_{21} \uparrow$	$S \rightarrow A$

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise



(a) $P_B < 0$ und $P_S < 0$



(b) $P_B < 0$ und $P_S > 0$

3. Ergebnisse und Diskussion

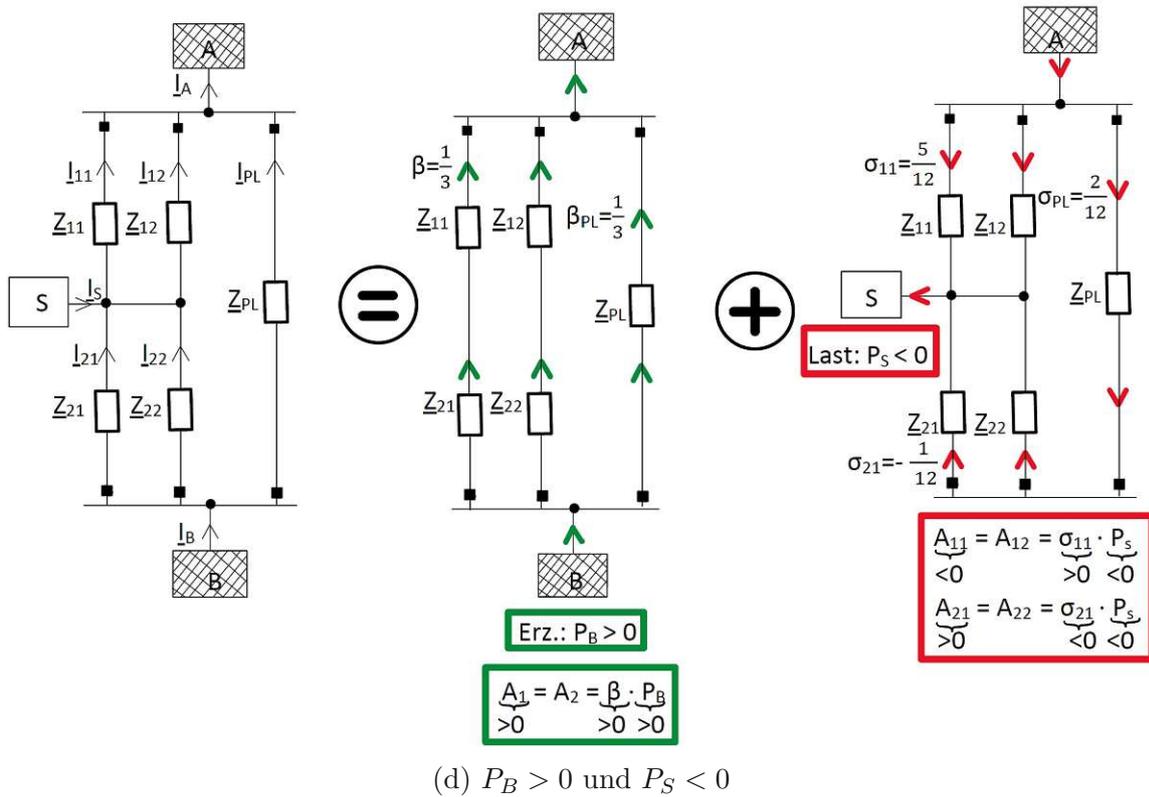
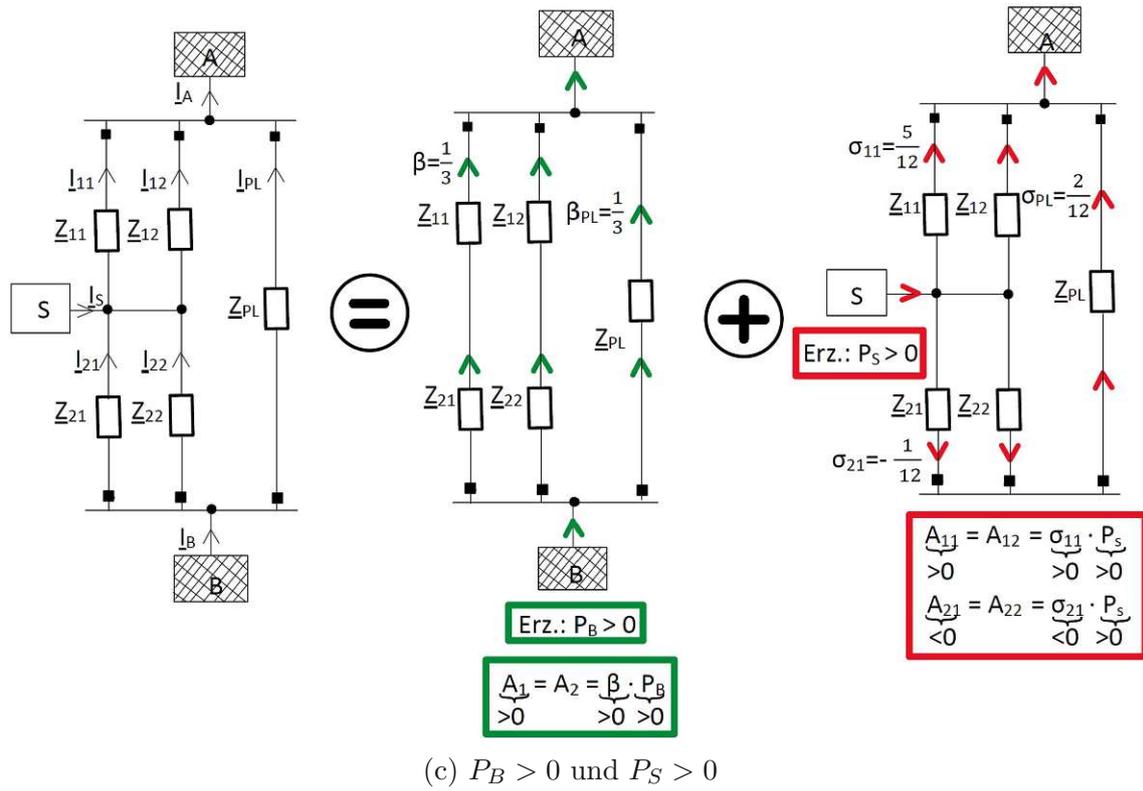
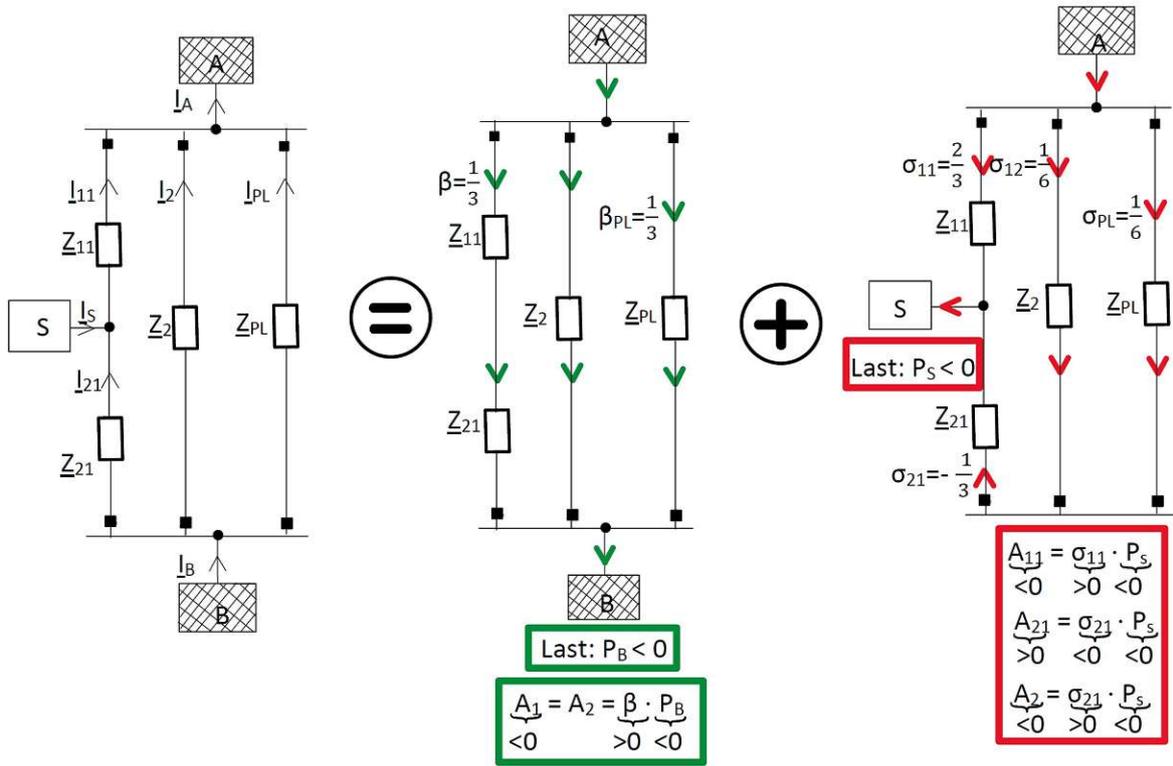
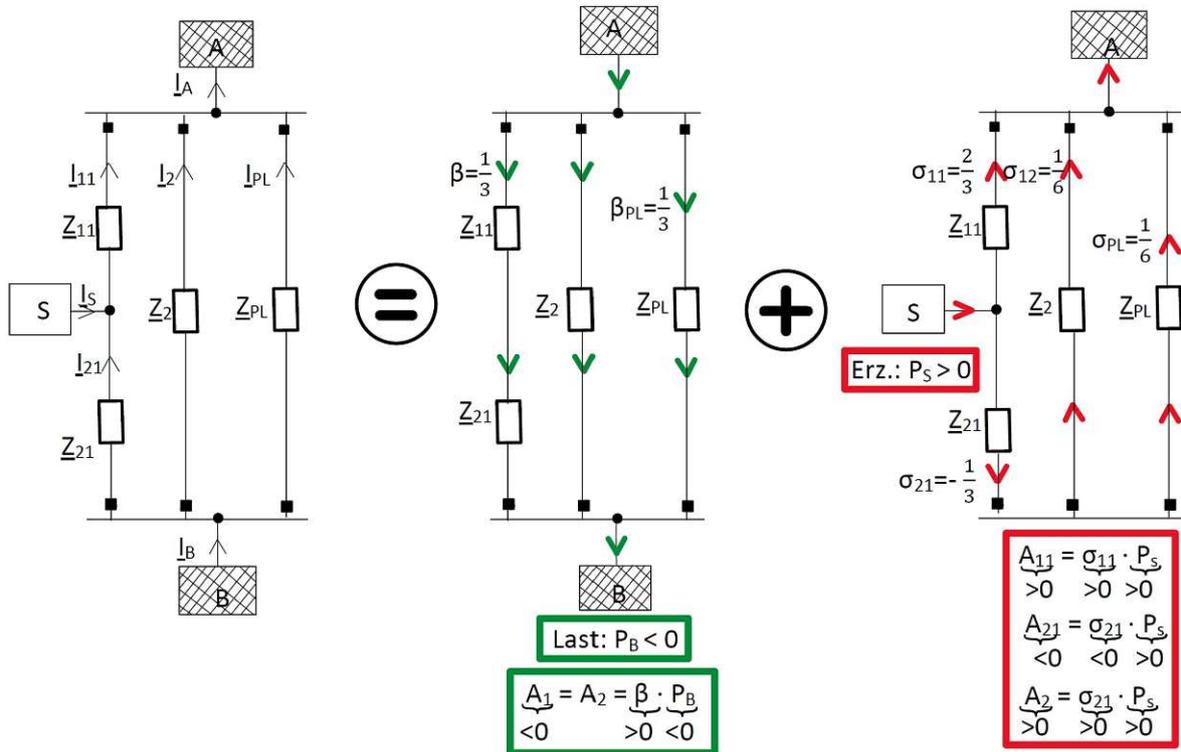


Abbildung 3.12.: Volleinschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz $A \leftrightarrow B = 100$ km

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

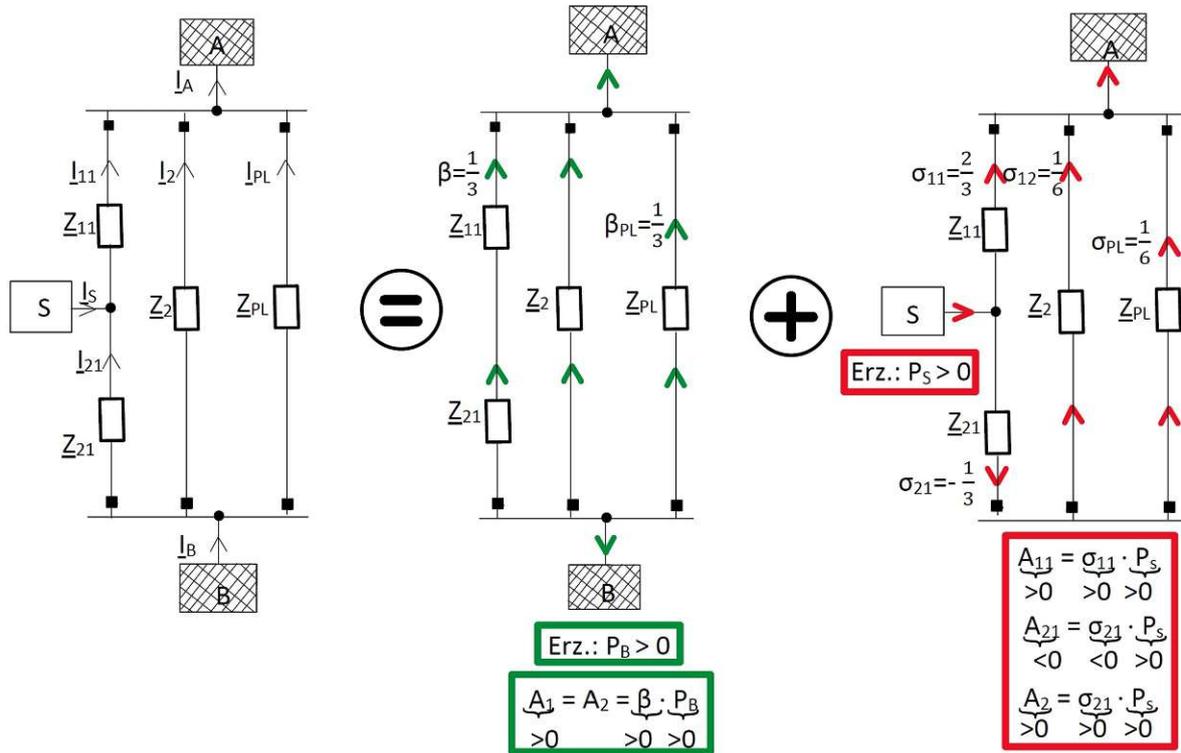


(a) $P_B < 0$ und $P_S < 0$

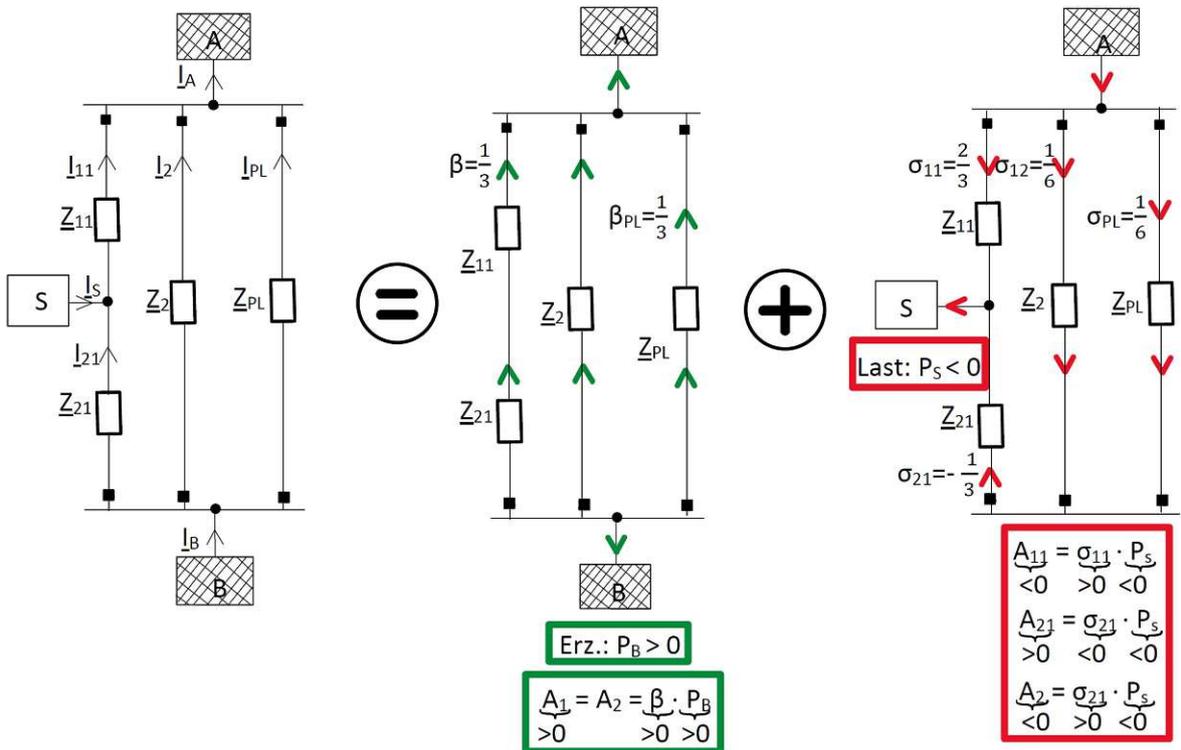


(b) $P_B < 0$ und $P_S > 0$

3. Ergebnisse und Diskussion



(c) $P_B > 0$ und $P_S > 0$



(d) $P_B > 0$ und $P_S < 0$

Abbildung 3.13.: Einfacheinschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz $A \leftrightarrow B = 100$ km

theoretische Übertragungskapazität für den (n-0)-Fall

In Gleichung 3.6 wurde die Auslastung als Größe definiert, die stets positive Werte annimmt – prozentuell ausgedrückt zwischen 0 % und 100 %. Diese Definition ist in Fachkreisen üblich und bleibt dem Sachverhalt treu, dass die Richtung des Lastflusses für die thermische Auswirkung auf die Leitung irrelevant ist.

Für die kommenden Untersuchungen ist jedoch sehr wohl auch die Richtung des Stromflusses über die Leitung von Bedeutung, und wir führen eine angepasste Variante der Auslastungs-Definition ein. In den folgenden Beobachtungen spiegelt sich das Vorzeichen des Stromflusses im Vorzeichen der Auslastung wider:

$$A_{\pm} = \text{VZ} \cdot \frac{|I|}{I_r} \quad \text{mit } \text{VZ} = \begin{cases} +1 & -90^\circ \leq \arg(I) \leq 90^\circ \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.59)$$

$$= \text{VZ} \cdot \frac{|S|}{S_r} \quad (3.60)$$

Daraus folgt:

$$A_{\pm} = \frac{\sigma \cdot P_S + \beta \cdot P_B}{S_r} \quad \text{für Anbindung zwischen } \mathbf{A} \text{ und } \mathbf{B} \quad (3.61)$$

$$A_{\pm} = \frac{\beta \cdot (P_B + P_S)}{S_r} \quad \text{für Anbindung in } \mathbf{B} \quad (3.62)$$

Nun stellt sich aus netzplanerischer Sicht die Frage, wie viel Wirkleistung P_B für den Transport zur Verfügung steht, wenn in der Schaltanlage \mathbf{S} bzw. im Netzknoten \mathbf{B} die Wirkleistung P_S angeschlossen ist. Um dies zu beantworten, muss lediglich Gleichung 3.61 bzw. Gleichung 3.62 umgeformt werden:

$$P_B = \frac{A_{\pm} \cdot S_r - \sigma \cdot P_S}{\beta} \quad \text{für Anbindung zwischen } \mathbf{A} \text{ und } \mathbf{B} \quad (3.63)$$

$$P_B = \frac{A_{\pm} \cdot S_r}{\beta} - P_S \quad \text{für Anbindung in } \mathbf{B} \quad (3.64)$$

Dies liefert zwei Lösungen für P_B : eine Lösung für $A > 0$, und eine Lösung für $A < 0$.

Für jeden der fünf Vermaschungsgrade und für jedes der vier Szenarien kann nun jedem Leitungsabschnitt eine Übertragungskapazität zugeordnet werden. Die Übertragungskapazität definieren wir als jene maximal mögliche Wirkleistung $P_{B,\max}$, die, zusätzlich zu einem vorgegebenen P_S , noch über die Leitungsabschnitte zwischen \mathbf{A} und \mathbf{B} transportiert werden kann. Wird jene maximal mögliche Wirkleistung $P_{B,\max}$ zwischen \mathbf{A} und \mathbf{B} übertragen, dann beträgt die Auslastung des am stärksten ausgelasteten Leitungsabschnittes genau 100 %.

Nach diesem Kriterium wurde auch Tabelle 3.7 ermittelt: Für die in Tabelle 2.6 aufgelisteten Last- und Erzeugungssituationen wurde für jeden Leitungsabschnitt jene Wirkleistung $P_{B,\max}$ ermittelt, bei der eine Auslastung von 100 % erreicht wird. Diese Methodik wurde jeweils für Volleinschleifung/Doppelstich und Einfacheinschleifung/Stich

3. Ergebnisse und Diskussion

angewandt. Anschließend wurde für jedes P_S der limitierende Leitungsabschnitt, der als Engpass fungiert, farblich hervorgehoben. Dieser Engpass bestimmt die maximal zulässige Wirkleistung $P_{B,max}$ für die gesamte Untersuchungs Umgebung, ungeachtet höherer $P_{B,max}$ -Werte der anderen Leitungsabschnitte.

Der den Engpass bildende Leitungsabschnitt kann auch in Tabelle 3.4 abgelesen werden: Je nach Richtung der Wirkleistungsflüsse P_B und P_S ist entweder L_{11} oder aber L_{21} stärker ausgelastet. Bei der Einfacheinschleifung liegt die Auslastung von Leitung L_2 , wie bereits in Gleichung 3.58 gezeigt, stets zwischen den Werten von A_{11} und A_{21} . Der höher ausgelastete Leitungsabschnitt wird durch den nach oben zeigenden Pfeil angezeigt und korrespondiert mit dem in Tabelle 3.7 farblich hervorgehobenen Leitungsabschnitt.

Nach Bestimmung von $P_{B,max}$ wird für jede Zeile die relative Abweichung von $P_{B,max,Voll.}$ und $P_{B,max,Ein.}$ gebildet:

$$\Delta = \frac{P_{B,max,Voll.} - P_{B,max,Ein.}}{P_{B,max,Voll.}} \cdot 100 \% \quad (3.65)$$

Die Spalte „ $\Delta/\%$ “ offenbart signifikante Vorteile der Volleinschleifung gegenüber der Einfacheinschleifung im (n-0)-Fall hinsichtlich der maximal übertragbaren Wirkleistung $P_{B,max}$ von **B** nach **A**:

- Die Übertragungskapazität ist demnach bei der Volleinschleifung größer, und zwar für jede Last- und Erzeugungssituation P_S .
- Je größer P_S , umso ausgeprägter ist die positive Wirkung der Volleinschleifung gegenüber der Einfacheinschleifung. Bei $P_S = 0$ schneiden Volleinschleifung und Einfacheinschleifung betreffend Übertragungskapazität gleich ab, die Abweichung wäre 0%.
- Der Vermaschungsgrad des Netzes zeigt einen positiven Einfluss auf die Übertragungskapazität: Ein höherer Vermaschungsgrad korreliert mit einer Steigerung der maximal übertragbaren Wirkleistung $P_{B,max}$ bei konstant gehaltener Wirkleistung P_S . Dieser Effekt äußert sich gleichermaßen bei Volleinschleifung und Einfacheinschleifung, sodass der Vermaschungsgrad keinen signifikanten Einfluss auf die Abweichung laut Gleichung 3.65 hat. Daraus folgt, dass sich die relativen Positionen und der Abstand der jeweiligen Auslastungskennlinien zueinander bei zunehmender Vermaschung nicht signifikant verändern, veranschaulicht in Abbildung 3.10.

Die in Tabelle 3.8 dargestellten Übertragungskapazitäten basieren – im Unterschied zu Tabelle 3.7 – auf Ergebnissen der PowerFactory-Simulation. Eingetragen wurden ausschließlich die Übertragungskapazitäten jener Leitungsabschnitte, die als Engpass fungieren. Die Werte der übrigen Leitungen fehlen bewusst: Zum einen sind sie für die Auslegung nicht relevant, zum anderen wurde die Lastflussberechnung aufgrund von Konvergenzproblemen frühzeitig abgebrochen, noch bevor eine Auslastung von 100 % erreicht werden konnte. Ursache hierfür sind hohe Blindleistungsflüsse aufgrund der hohen Auslastung der Engpass-Abschnitte.

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Die simulierten Übertragungskapazitäten fallen geringer aus als die zuvor analytisch abgeschätzten Werte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Blindleistungsfluss für eine konstante Auslastung von 100 % die nutzbare Transportkapazität reduziert. Dieses Verhalten wurde bereits in den Abbildungen 3.4 und 3.6 beobachtet, in denen die Abweichungen zwischen berechneten und simulierten Auslastungen dargestellt sind.

Die Unterschiede zwischen Voll- und Einfacheinschleifung sind auch in den simulierten Werten erkennbar, jedoch etwas geringer ausgeprägt als in den analytisch berechneten Ergebnissen. Das bedeutet, dass der Vorteil der Volleinschleifung gegenüber der Einfacheinschleifung für alle betrachteten Last-/Einspeisesituationen sowie Vermaschungsgrade geringer ausfällt, als es die rein rechnerische Betrachtung vermuten lässt.

Zur Erklärung dieses Phänomens wurde eine gezielte Lastflussberechnung für die in Tabelle 3.10 identifizierten $P_{B,max}$ -Werte bei $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$ durchgeführt. In diesem Szenario bildet der obere Leitungsabschnitt L_{11} (bzw. L_{11} und L_{12} bei der Volleinschleifung) den Engpass. Die resultierenden Wirk- und Blindleistungsflüsse sind in Tabelle 3.6 dargestellt:

Tabelle 3.6.: Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} bei $P_{B,max,Voll.} = -5800$ MW, $P_{B,max,Ein.} = -5060$ MW, $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$

	P /MW, Q /MVA, A /%									
	Volleinschleifung					Einfacheinschleifung				
	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A
L_{11}	2476	887	-2452	-332	100	2528	744	-2503	-187	100
L_{21}	1852	332	-1838	-17	76	1303	187	-1297	-48	53

Es zeigt sich, dass die Blindleistung am Anfang des Leitungsabschnitts L_{21} bei der Volleinschleifung mit 332 MVA höher ausfällt als bei der Einfacheinschleifung mit 187 MVA. Grund dafür ist die höhere Auslastung des Abschnitts L_{21} bei der Volleinschleifung (76 % gegenüber 53 % bei der Einfacheinschleifung), wodurch auch mehr Blindleistung verbraucht wird ($\Delta Q_{Voll.} = 315$ MVA $>$ $\Delta Q_{Ein.} = 139$ MVA). Dieser Blindleistungsbedarf muss über den oberen Leitungsabschnitt, welcher den Engpass darstellt und somit für die Bestimmung der maximalen Übertragungskapazität relevant ist, transportiert werden.

Da dieser zusätzliche Blindleistungsfluss in der analytischen Berechnung nicht berücksichtigt wird, kommt es zu einer Abweichung zwischen der analytisch berechneten und der simulierten maximalen Übertragungskapazität. Aufgrund der höheren Blindleistungsflüsse fällt diese Abweichung bei der Volleinschleifung größer aus als bei der Einfacheinschleifung. In der Folge wird der Vorteil der Volleinschleifung in der analytischen Berechnung überschätzt.

Dies spiegelt sich in den Abweichungen der jeweiligen Kennwerte wider: Die Werte in der Spalte „ Δ /%“ von Tabelle 3.7 sind entsprechend größer als jene in Tabelle 3.8.

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.7.: Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-0)-Fall laut analytischer Berechnung

P_S /MW	Volleinschleifung		Einfacheinschleifung			Δ /%
	L_{11}	L_{21}	L_{11}	L_{21}	L_2	
$V = 55\% \hat{=}$ $L_{PL} = 500$ km	$\beta = \frac{5}{11}$		$\beta = \frac{5}{11}$			
	$\sigma_{11} = \frac{21}{44}$	$\sigma_{21} = -\frac{1}{44}$	$\sigma_{11} = \frac{8}{11}$	$\sigma_{21} = -\frac{3}{11}$	$\sigma_2 = \frac{5}{22}$	
-1200	7052	5732	7712	5072	6392	11,5
-400	6212	5772	6432	5552	5992	3,8
400	5372	5812	5152	6032	5592	4,1
1200	4532	5852	3872	6512	5192	14,6
$V = 60\% \hat{=}$ $L_{PL} = 200$ km	$\beta = \frac{2}{5}$		$\beta = \frac{2}{5}$			
	$\sigma_{11} = \frac{9}{20}$	$\sigma_{21} = -\frac{1}{20}$	$\sigma_{11} = \frac{7}{10}$	$\sigma_{21} = -\frac{3}{10}$	$\sigma_2 = \frac{1}{5}$	
-1200	7932	6432	8682	5682	7182	11,7
-400	7032	6532	7282	6282	6782	3,8
400	6132	6632	5882	6882	6382	4,1
1200	5232	6732	4482	7482	5982	14,3
$V = 67\% \hat{=}$ $L_{PL} = 100$ km	$\beta = \frac{1}{3}$		$\beta = \frac{1}{3}$			
	$\sigma_{11} = \frac{5}{12}$	$\sigma_{21} = -\frac{1}{12}$	$\sigma_{11} = \frac{2}{3}$	$\sigma_{21} = -\frac{1}{3}$	$\sigma_2 = \frac{1}{6}$	
-1200	9398	7598	10298	6698	8498	11,8
-400	8398	7798	8698	7498	8098	3,8
400	7398	7998	7098	8298	7698	4,1
1200	6398	8198	5498	9098	7298	14,1
$V = 75\% \hat{=}$ $L_{PL} = 50$ km	$\beta = \frac{1}{4}$		$\beta = \frac{1}{4}$			
	$\sigma_{11} = \frac{3}{8}$	$\sigma_{21} = -\frac{1}{8}$	$\sigma_{11} = \frac{5}{8}$	$\sigma_{21} = -\frac{3}{8}$	$\sigma_2 = \frac{1}{8}$	
-1200	12331	9931	13531	8731	11131	12,1
-400	11131	10331	11531	9931	10731	3,9
400	9931	10731	9531	11131	10331	4,0
1200	8731	11131	7531	12331	9931	13,7
$V = 80\% \hat{=}$ $L_{PL} = 33,3$ km	$\beta = \frac{1}{5}$		$\beta = \frac{1}{5}$			
	$\sigma_{11} = \frac{7}{20}$	$\sigma_{21} = -\frac{3}{20}$	$\sigma_{11} = \frac{3}{5}$	$\sigma_{21} = -\frac{2}{5}$	$\sigma_2 = \frac{1}{10}$	
-1200	15264	12264	16764	10764	13764	12,2
-400	13864	12864	14364	12364	13364	3,9
400	12464	13464	11964	13964	12964	4,0
1200	11064	14064	9564	15564	12564	13,6

Tabelle 3.8.: Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-0)-Fall laut Simulation

	P_S /MW	Volleinschleifung		Einfacheinschleifung			Δ /%
		L_{11}	L_{21}	L_{11}	L_{21}	L_2	
$V = 55\% \hat{=}$ $L_{PL} = 500$ km	-1200		5360		4820		10,1
	-400		5380		5200		3,4
	400	5020		4840			3,6
	1200	4300		3720			13,5
$V = 60\% \hat{=}$ $L_{PL} = 200$ km	-1200		6000		5380		10,3
	-400		6040		5840		3,3
	400	5700		5500			3,5
	1200	4940		4280			13,4
$V = 67\% \hat{=}$ $L_{PL} = 100$ km	-1200		7100		6360		10,4
	-400		7220		6980		3,3
	400	6880		6640			3,5
	1200	6040		5240			13,3
$V = 75\% \hat{=}$ $L_{PL} = 50$ km	-1200		9280		8280		10,8
	-400		9560		9240		3,4
	400	9220		8900			3,5
	1200	8220		7180			12,7
$V = 80\% \hat{=}$ $L_{PL} = 33,3$ km	-1200		11460		10220		10,8
	-400		11900		11500		3,4
	400	11560		11160			3,5
	1200	10380		9100			12,3

Die Erstellung von Tabelle 3.9 erfolgte nach dem gleichen Schema wie bei Tabelle 3.7, mit dem einzigen Unterschied, dass nun ein Leistungsfluss von **A** nach **B** angenommen wird, wobei der Netzknoten **B** als Last ($P_B < 0$) fungiert. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß ein symmetrisches Verhalten betreffend der Übertragungskapazität, wobei sich diese Symmetrie anhand folgender Beziehungen beschreiben lässt:

$$P_{B,\max} \Big|_{>0} \text{ bei } P_S \Big|_{<0} = P_{B,\max} \Big|_{<0} \text{ bei } P_S \Big|_{>0} \quad (3.66a)$$

$$P_{B,\max} \Big|_{>0} \text{ bei } P_S \Big|_{>0} = P_{B,\max} \Big|_{<0} \text{ bei } P_S \Big|_{<0} \quad (3.66b)$$

Folglich gilt auch:

$$\Delta \text{ bei } P_B \Big|_{>0} \text{ und } P_S \Big|_{<0} = \Delta \text{ bei } P_B \Big|_{<0} \text{ und } P_S \Big|_{>0} \quad (3.67a)$$

$$\Delta \text{ bei } P_B \Big|_{>0} \text{ und } P_S \Big|_{>0} = \Delta \text{ bei } P_B \Big|_{<0} \text{ und } P_S \Big|_{<0} \quad (3.67b)$$

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.9.: Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-0)-Fall laut analytischer Berechnung

P_S /MW	Volleinschleifung		Einfacheinschleifung			Δ /%
	L_{11}	L_{21}	L_{11}	L_{21}	L_2	
$V = 55\% \hat{=}$ $L_{PL} = 500$ km	$\beta = \frac{5}{11}$ $\sigma_{11} = \frac{21}{44}$ $\sigma_{21} = -\frac{1}{44}$		$\beta = \frac{5}{11}$ $\sigma_{11} = \frac{8}{11}$ $\sigma_{21} = -\frac{3}{11}$ $\sigma_2 = \frac{5}{22}$			
-1200	-4532	-5852	-3872	-6512	-5192	14,6
-400	-5372	-5812	-5152	-6032	-5592	4,1
400	-6212	-5772	-6432	-5552	-5992	3,8
1200	-7052	-5732	-7712	-5072	-6392	11,5
$V = 60\% \hat{=}$ $L_{PL} = 200$ km	$\beta = \frac{2}{5}$ $\sigma_{11} = \frac{9}{20}$ $\sigma_{21} = -\frac{1}{20}$		$\beta = \frac{2}{5}$ $\sigma_{11} = \frac{7}{10}$ $\sigma_{21} = -\frac{3}{10}$ $\sigma_2 = \frac{1}{5}$			
-1200	-5232	-6732	-4482	-7482	-5982	14,34
-400	-6132	-6632	-5882	-6882	-6382	4,1
400	-7032	-6532	-7282	-6282	-6782	3,8
1200	-7932	-6432	-8682	-5682	-7182	11,7
$V = 67\% \hat{=}$ $L_{PL} = 100$ km	$\beta = \frac{1}{3}$ $\sigma_{11} = \frac{5}{12}$ $\sigma_{21} = -\frac{1}{12}$		$\beta = \frac{1}{3}$ $\sigma_{11} = \frac{2}{3}$ $\sigma_{21} = -\frac{1}{3}$ $\sigma_2 = \frac{1}{6}$			
-1200	-6398	-8198	-5498	-9098	-7298	14,1
-400	-7398	-7998	-7098	-8298	-7698	4,1
400	-8398	-7798	-8698	-7498	-8098	3,9
1200	-9398	-7598	-10298	-6698	-8498	11,8
$V = 75\% \hat{=}$ $L_{PL} = 50$ km	$\beta = \frac{1}{4}$ $\sigma_{11} = \frac{3}{8}$ $\sigma_{21} = -\frac{1}{8}$		$\beta = \frac{1}{4}$ $\sigma_{11} = \frac{5}{8}$ $\sigma_{21} = -\frac{3}{8}$ $\sigma_2 = \frac{1}{8}$			
-1200	-8731	-11131	-7531	-12331	-9931	13,6
-400	-9931	-10731	-9531	-11131	-10331	4,0
400	-11131	-10331	-11531	-9931	-10731	3,9
1200	-12331	-9931	-13531	-8731	-11131	12,1
$V = 80\% \hat{=}$ $L_{PL} = 33,3$ km	$\beta = \frac{1}{5}$ $\sigma_{11} = \frac{7}{20}$ $\sigma_{21} = -\frac{3}{20}$		$\beta = \frac{1}{5}$ $\sigma_{11} = \frac{3}{5}$ $\sigma_{21} = -\frac{2}{5}$ $\sigma_2 = \frac{1}{10}$			
-1200	-11064	-14064	-9564	-15564	-12564	13,6
-400	-12464	-13464	-11964	-13964	-12964	4,0
400	-13864	-12864	-14364	-12364	-13364	3,9
1200	-15264	-12264	-16764	-10764	-13764	12,2

3.1. (n-0)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Auch die in Tabelle 3.10 dargestellten Übertragungskapazitäten beruhen auf Ergebnissen der PowerFactory-Simulation; die Tabelle wurde analog zu Tabelle 3.8 erstellt. Wie bereits vom vorhergehenden Lastfluss-Szenario bekannt, zeigen sich auch hier im Vergleich zu den analytisch ermittelten Werten erwartungsgemäß niedrigere Übertragungskapazitäten. Die Tendenz, dass die Volleinschleifung gegenüber der Einfacheinschleifung höhere Übertragungskapazitäten aufweist, bleibt bestehen, fällt jedoch nach wie vor weniger stark aus als in der analytischen Abschätzung.

Tabelle 3.10.: Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-0)-Fall laut Simulation

	P_S /MW	Volleinschleifung		Einfacheinschleifung			Δ /%
		L_{11}	L_{21}	L_{11}	L_{21}	L_2	
$V = 55\% \hat{=}$ $L_{PL} = 500$ km	-1200	-4120		-3580			13,1
	-400	-4820		-4660			3,3
	400		-5160		-5000		3,1
	1200		-5180		-4680		9,7
$V = 60\% \hat{=}$ $L_{PL} = 200$ km	-1200	-4740		-4120			13,1
	-400	-5480		-5280			3,6
	400		-5820		-5640		3,1
	1200		-5780		-5220		9,7
$V = 67\% \hat{=}$ $L_{PL} = 100$ km	-1200	-5800		-5060			12,8
	-400	-6620		-6400			3,3
	400		-6940		-6740		2,9
	1200		-6840		-6160		9,9
$V = 75\% \hat{=}$ $L_{PL} = 50$ km	-1200	-7900		-6920			12,4
	-400	-8860		-8560			3,4
	400		-9200		-8900		3,3
	1200		-8940		-8020		10,3
$V = 80\% \hat{=}$ $L_{PL} = 33,3$ km	-1200	-10000		-8860			11,4
	-400	-11120		-10740			3,4
	400		-11440		-11080		3,1
	1200		-11040		-9900		10,3

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

Im Rahmen der (n-1)-Betrachtung für Leitungsstromkreisfehler ist zwischen zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten zu unterscheiden:

- dem ungünstigsten Ausfall aus Kundensicht (d.h. hinsichtlich der Versorgungszuverlässigkeit),
- dem ungünstigsten Ausfall aus Netzsicht, bezogen auf die Übertragungskapazität zwischen zwei Netzknoten (hier: **A** und **B**).

Diese Unterscheidung ist insbesondere bei der Einfacheinschleifung und beim Stich von Bedeutung, da der aus Kundensicht kritischste Ausfall nicht mit dem betreffend Übertragungskapazität ungünstigsten Leitungsfehler übereinstimmt.

Kundenversorgung im Fehlerfall

Im Falle der Volleinschleifung ist die Versorgungssicherheit für angeschlossene Kunden stets gewährleistet – unabhängig davon, an welcher Sammelschiene sie angeschlossen sind oder ob die Querkupplung geöffnet ist. Bei der Einfacheinschleifung ist die Versorgungssicherheit nur dann gewährleistet, wenn die Querkupplung geschlossen ist. Ist sie geöffnet, hängt die Versorgung von der konkreten Anbindung des Kunden an der Sammelschiene ab. Beim Stich ist die Versorgung bei Ausfall eines Leitungsstromkreises nicht gegeben. Im Falle eines Doppelstichs ist bei einem Leitungsfehler genau ein Kunde direkt vom Ausfall betroffen, nämlich derjenige, der an die beschädigte Leitung angebunden ist. Der zweite Kunde, welcher über die intakte Leitung versorgt wird, ist nicht betroffen. Sofern es die betrieblichen Rahmenbedingungen zulassen – insbesondere in Hinblick auf Spannungshaltung, thermische Auslastung oder Stabilitätskriterien – ermöglicht es die Topologie, den leitungsseitigen Trenner zur fehlerbehafteten Leitung zunächst zu öffnen und anschließend die beiden Trenner im Querzweig zu schließen. Dadurch kann die Versorgung des betroffenen Kunden über die verbleibende, intakte Leitung sichergestellt werden. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass in diesem Betriebszustand die intakte Leitung beide Kunden gleichzeitig versorgen muss. Dies kann zu einer signifikanten Reduktion der Übertragungskapazität zwischen den Netzknoten **A** und **B** führen.

tatsächliche Übertragungskapazität, bestimmt durch den ungünstigsten Fehlerfall

Die maximale Übertragungskapazität im (n-0)-Fall ist nicht ausschlaggebend, da die Auslegung durch den ungünstigsten (n-1)-Fall bestimmt wird. Um eine Überlastung im Fehlerfall – also beim Ausfall eines Betriebsmittels – zu vermeiden, darf auch im regulären Betrieb nur so viel Wirkleistung übertragen werden, wie es der kritischste (n-1)-Fall zulässt.

Der für die Übertragungskapazität zwischen **A** und **B** ungünstigste Ausfall unterscheidet sich ebenfalls je nach Anbindung der Schaltanlage: Bei der Volleinschleifung kann je nach Lastflusssituation entweder ein Ausfall eines oberen oder eines unteren Leitungsstromkreises die maximale Einschränkung darstellen. Für Einfacheinschleifung

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

und Stich ist der Ausfall von L_2 am ungünstigsten, im Fall des Doppelstichs sind die Auswirkungen eines Ausfalls von L_1 oder L_2 hinsichtlich der Übertragungskapazität äquivalent. Bemerkenswert ist, dass sich beim Ausfall von L_2 die verbleibenden Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} in allen drei Varianten (Einfacheinschleifung, Stich, Doppelstich) hinsichtlich Übertragungskapazität identisch verhalten.

Tabelle 3.11.: Auswirkungen von (n-1)-Leistungsfehlern auf Versorgung und Übertragungskapazität

Anbindung der SA	Versorgung der Kunden im ungünstigsten Fehlerfall	ungünstigster Ausfall für Übertragung A–B
Volleinschleifung	ja (unabh. von QK und SS)	oberer od. unterer Abschn. (abh. von Lastfluss)
Einfacheinschleifung	ja, falls QK geschlossen; sonst abh. von Anb. an SS	L_2
Stich	nein	L_2
Doppelstich	nein K_1 od. K_2 betroffen	L_1 od. L_2 (unabh. von Lastfluss)

In Hinblick auf die Leitungsauslastung und Übertragungskapazität erwies sich der (n-0)-Fall als aufschlussreich für das Verständnis der Lastflussverteilung bei diversen Netz-anbindungsvarianten und Vermaschungsgraden. Jedoch sind die in Tabelle 3.8 und Tabelle 3.10 ermittelten Werte von $P_{B,max}$ für die Bestimmung der tatsächlichen, maximal möglichen Übertragungskapazität ungeeignet. Die Ermittlung der maximal übertragbaren Leistung muss gemäß dem (n-1)-Kriterium erfolgen!

Für die analytische Berechnung des (n-1)-Falles wird ähnlich wie beim (n-0)-Fall vorgegangen, allerdings ist die Ausgangslage eine andere: Anstatt des vollen Netzes, bei dem jede Leitung in Betrieb ist, steht lediglich das um einen Leitungsabschnitt verminderte Netz zur Verfügung. Um die Auslastung eines Leitungsabschnittes bei Wegfall eines anderen Leitungsabschnittes zu berechnen, wird weiterhin Gleichung 3.6 herangezogen. Allerdings sind die Parameter $\sigma_{(n-1)}$ und $\beta_{(n-1)}$ nun anders, abhängig davon, welcher Leitungsabschnitt ausgefallen ist. Zur Bestimmung der Parameter wird, wie bereits vom (n-0)-Fall bekannt, vorgegangen: P_S gleich 0 setzen und β bestimmen, anschließend P_B gleich 0 setzen und σ bestimmen.

3.2.1. Volleinschleifung

Ausgehend von den Darstellungen laut Abbildung 2.4a und Abbildung 1.1 sollen die möglichen Ausfallszenarien betrachtet werden. Jeder der vier Leitungsabschnitt L_{11} , L_{12} , L_{21} und L_{22} ist an beiden Enden mit einem Leistungsschalter ausgestattet, der im Störfall den fehlerbehafteten Leitungsabschnitt selektiv abschalten kann. Daraus ergeben sich vier unterschiedliche Ausfallszenarien, wobei gemäß den Gleichungen 3.9 und 3.10 jeweils zwei der Szenarien zu identischen Auslastungen im jeweiligen Parallel-Stromkreis sowie in den übrigen Stromkreisen führen:

Tabelle 3.12.: Äquivalente (n-1)-Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise hinsichtlich der resultierenden Leitungsauslastung

Ausfall	Auslastung $\hat{=}$	Ausfall	Auslastung
L_{12}	A_{11} $A_{21} = A_{22}$	L_{11}	A_{12} $A_{21} = A_{22}$

L_{22}	A_{21} $A_{11} = A_{12}$	L_{21}	A_{22} $A_{11} = A_{12}$

Die erste Zeile jeder Gruppe repräsentiert die Auslastung des verbleibenden Stromkreises bei Ausfall seines Parallel-Stromkreises. Der verbleibende Stromkreis fungiert dabei als Engpass für das gesamte System und ist rot hervorgehoben. Die jeweils zweite Zeile dient lediglich zur Vervollständigung der Darstellung. Für die beiden Ausfallszenarien „Ausfall L_{12} “ und „Ausfall L_{21} “ werden die Parameter β und σ analog zur Vorgehensweise bei der (n-0)-Berechnung bestimmt.

Ausfall von L_{12}

Auslastung A_{11} :

$$\beta_{11, L_{12}} = \frac{Z_{PL}}{Z_{11} + (Z_{21} \parallel Z_{22}) + Z_{PL}} \quad (3.68)$$

$$\sigma_{11, L_{12}} = \frac{(Z_{21} \parallel Z_{22}) + Z_{PL}}{Z_{11} + (Z_{21} \parallel Z_{22}) + Z_{PL}} \quad (3.69)$$

Auslastung $A_{21} = A_{22}$:

$$\beta_{21, L_{12}} = \frac{Z_{22}}{Z_{21} + Z_{22}} \cdot \frac{Z_{PL}}{(Z_{21} \parallel Z_{22}) + Z_{11} + Z_{PL}} \quad (3.70)$$

$$\sigma_{21, L_{12}} = -\frac{Z_{22}}{Z_{21} + Z_{22}} \cdot \frac{Z_{11}}{Z_{11} + (Z_{21} \parallel Z_{22}) + Z_{PL}} \quad (3.71)$$

Ausfall von L_{22} Auslastung A_{21} :

$$\beta_{21, \cancel{L_{22}}} = \frac{Z_{PL}}{(Z_{11} \parallel Z_{12}) + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.72)$$

$$\sigma_{21, \cancel{L_{22}}} = -\frac{Z_{11} \parallel Z_{12}}{(Z_{11} \parallel Z_{12}) + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.73)$$

Auslastung $A_{11} = A_{12}$:

$$\beta_{11, \cancel{L_{22}}} = \frac{Z_{12}}{Z_{11} + Z_{12}} \cdot \frac{Z_{PL}}{(Z_{11} \parallel Z_{12}) + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.74)$$

$$\sigma_{11, \cancel{L_{22}}} = \frac{Z_{12}}{Z_{11} + Z_{12}} \cdot \frac{Z_{21} + Z_{PL}}{(Z_{11} \parallel Z_{12}) + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.75)$$

Ausfall von L_{12}

In Abbildung 3.14 sind für den Ausfall von L_{12} die Auslastungen der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} als durchgezogene Kennlinien dargestellt. Um die Auswirkungen dieses Ausfalls anschaulich darzustellen, wurden zusätzlich die entsprechenden Auslastungen im (n-0)-Fall für dieselben Abschnitte als gepunktete Kennlinien dargestellt. In Tabelle 3.13 ist ersichtlich, unter welchen Netzbedingungen – d.h. für welche Kombinationen der Lastflussrichtungen von P_B und P_S – der Ausfall von L_{12} , wie in Abbildung 3.14 behandelt, den kritischsten (n-1)-Zustand darstellt. Dies ist einerseits der Fall bei gleichzeitig negativen Leistungen $P_B < 0$ und $P_S < 0$, andererseits bei positiven Leistungen $P_B > 0$ und $P_S > 0$. In diesen Konstellationen ist der obere Leitungsabschnitt L_{11} am höchsten ausgelastet. Der Ausfall des Parallelstromkreises von L_{11} , also L_{12} , stellt somit den kritischsten (n-1)-Ausfall dar.

Im Kontext von Abbildung 3.14 bedeutet dies, dass bei $P_S = -1200$ MW und $P_S = -400$ MW in Verbindung mit $P_B < 0$ (linker Bereich der x -Achse) sowie bei $P_S = 1200$ MW und $P_S = 400$ MW in Verbindung mit $P_B > 0$ (rechter Bereich der x -Achse) die Kennlinie $L_{11,x12}$ den für die Untersuchungsstrecke limitierenden Ausfall repräsentiert. In allen übrigen Netzsituationen stellt der Ausfall der Leitung L_{22} den limitierenden Ausfall dar.

Wie auch aus Tabelle 3.12 hervorgeht, ist beim Ausfall von L_{12} der Leitungsabschnitt L_{11} am höchsten ausgelastet (blaue Kennlinie), während der Leitungsabschnitt $L_{21} \hat{=} L_{22}$ (rote Kennlinie) deutlich geringer ausgelastet ist. Die gepunkteten Kennlinien zeigen jeweils die Auslastung im ungestörten (n-0)-Betriebsfall. Erwartungsgemäß ist dabei der Abschnitt L_{11} im (n-0)-Fall geringer ausgelastet als im (n-1)-Fall. Für den Abschnitt L_{21} zeigt sich jedoch im (n-1)-Fall eine geringere Auslastung als im (n-0)-Fall. Zur Analyse dieses Verhaltens erfolgt ein Vergleich der zugehörigen Parameter aus Tabelle 3.2

3. Ergebnisse und Diskussion

für den (n-0)-Fall und Tabelle 3.19 für den (n-1)-Fall für $V = 66,7\% \hat{=} L_{PL} = 100 \text{ km}$:

$$L_{21,(n-0)} : \beta = \frac{1}{3}, \quad \sigma = -\frac{1}{12}$$
$$L_{21,(n-1)} : \beta = \frac{2}{7}, \quad \sigma = -\frac{1}{7} ,$$

folglich

$$\beta_{(n-0)} > \beta_{(n-1)} \quad \text{und}$$
$$\sigma_{(n-0)} < \sigma_{(n-1)} \quad .$$

Durch den Ausfall von L_{12} steigt die Impedanz der Übertragungsstrecke $L_{11} + L_{21} \parallel L_{22}$ gegenüber dem (n-0)-Fall an und der Abschnitt L_{21} übernimmt einen geringeren Anteil des Transportflusses als im (n-0)-Fall ($2/7$ anstatt $1/3$). Gleichzeitig steigt zwar die über die unteren Leitungsabschnitte zur Schaltanlage **S** übertragene Wirkleistung von $\frac{1}{12}$ auf $\frac{1}{7}$ an. Diese Erhöhung fällt jedoch weniger ins Gewicht, da der Beitrag des Terms $\sigma \cdot P_S$ im Vergleich zum Term $\beta \cdot P_B$ relativ gering bleibt. Das ist der Grund, warum die Auslastung von L_{21} im (n-1)-Fall geringer ist als im (n-0)-Fall.

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Tabelle 3.13.: Bei Lastflussrichtung laut Kästchen: ungünstigster Ausfall ist L_{21}

P_B	P_S	A_{11}	A_{21}	A_2	A_{PL}
< 0	< 0	↑	↓	↑	↑
	> 0	↓	↑	↓	↓
> 0	< 0	↓	↑	↓	↓
	> 0	↑	↓	↑	↑

Ausfall von L_{12}

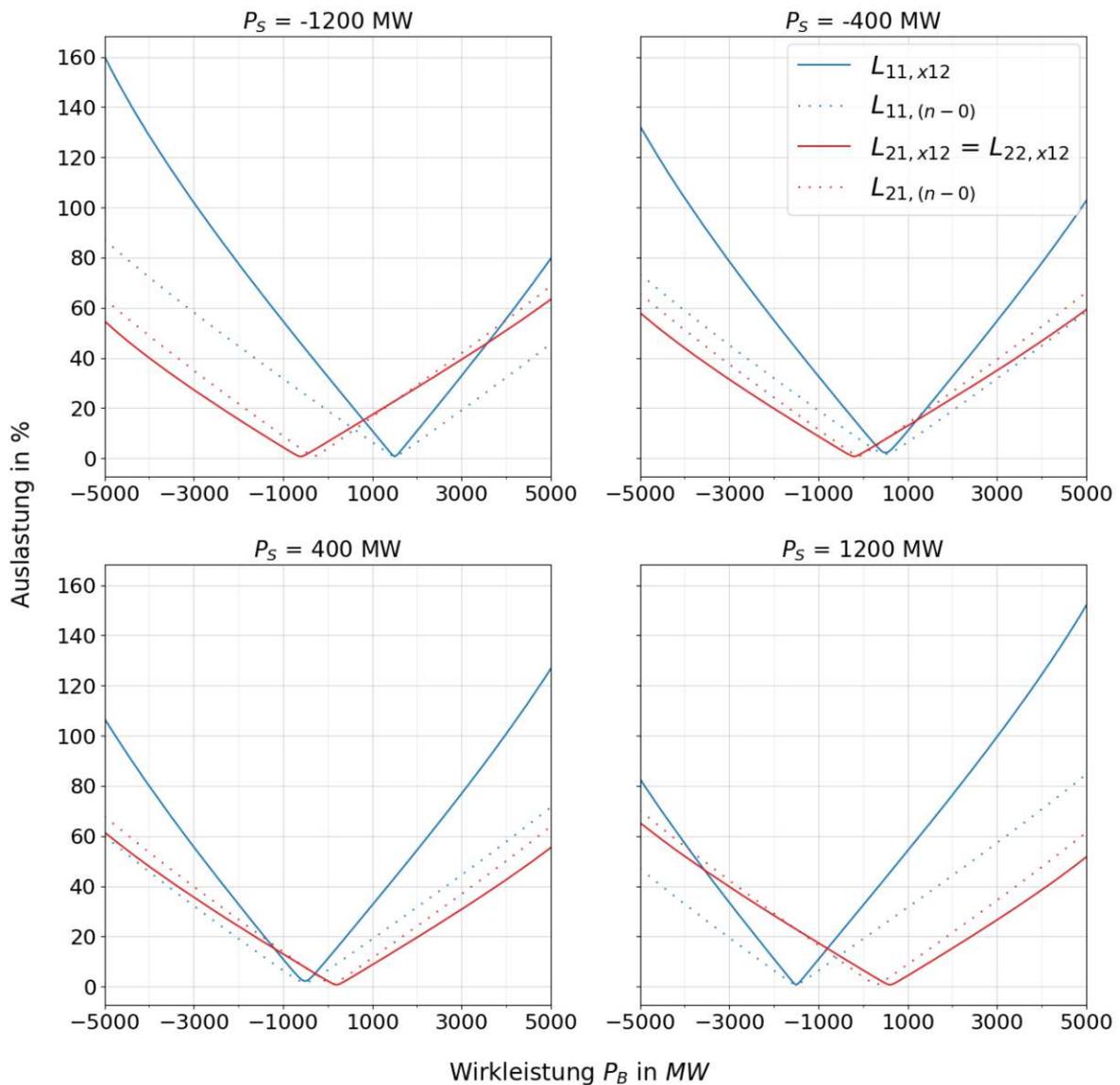


Abbildung 3.14.: Volleinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_{12} sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$

3. Ergebnisse und Diskussion

Ausfall von L_{22}

In Abbildung 3.15 sind analog zur vorhergehenden Abbildung die Auslastungsverläufe der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} als durchgezogene Kennlinien dargestellt – in diesem Fall jedoch für den Ausfall des Leitungsabschnitts L_{22} . Der Ausfall stellt einerseits für die Netzsituationen $P_B < 0$ und $P_S > 0$, andererseits für $P_B > 0$ und $P_S < 0$ den kritischsten (n-1)-Ausfall dar. Im Kontext von Abbildung 3.15 bedeutet dies, dass bei $P_S = 1200$ MW und $P_S = 400$ MW in Verbindung mit $P_B < 0$ (linker Bereich der x -Achse) sowie bei $P_S = -1200$ MW und $P_S = -400$ MW in Verbindung mit $P_B > 0$ (rechter Bereich der x -Achse) die Kennlinie $L_{21,x22}$ den für die Untersuchungsstrecke limitierenden Ausfall darstellt.

Wie auch aus Tabelle 3.12 hervorgeht, ist beim Ausfall von L_{22} der Leitungsabschnitt L_{21} am höchsten ausgelastet (rote Kennlinie), während der Leitungsabschnitt $L_{11} \hat{=} L_{12}$ (blaue Kennlinie) deutlich geringer ausgelastet ist. Die zusätzlich dargestellten gepunkteten Kennlinien zeigen jeweils die Auslastung im ungestörten (n-0)-Betriebsfall. Erwartungsgemäß ist dabei der Abschnitt L_{21} im (n-0)-Fall geringer ausgelastet als im (n-1)-Fall. Im Gegensatz dazu zeigt der Abschnitt L_{11} im (n-1)-Fall eine niedrigere Auslastung als im ungestörten Zustand – die Erklärung hierfür ergibt sich analog zum zuvor betrachteten Ausfall von L_{12} .

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Tabelle 3.14.: Bei Lastflussrichtung laut Kästchen: ungünstigster Ausfall ist L_{22}

P_B	P_S	A_{11}	A_{21}	A_2	A_{PL}
< 0	< 0	↑	↓	↑	↑
	> 0	↓	↑	↓	↓
> 0	< 0	↓	↑	↓	↓
	> 0	↑	↓	↑	↑

Ausfall von L_{22}

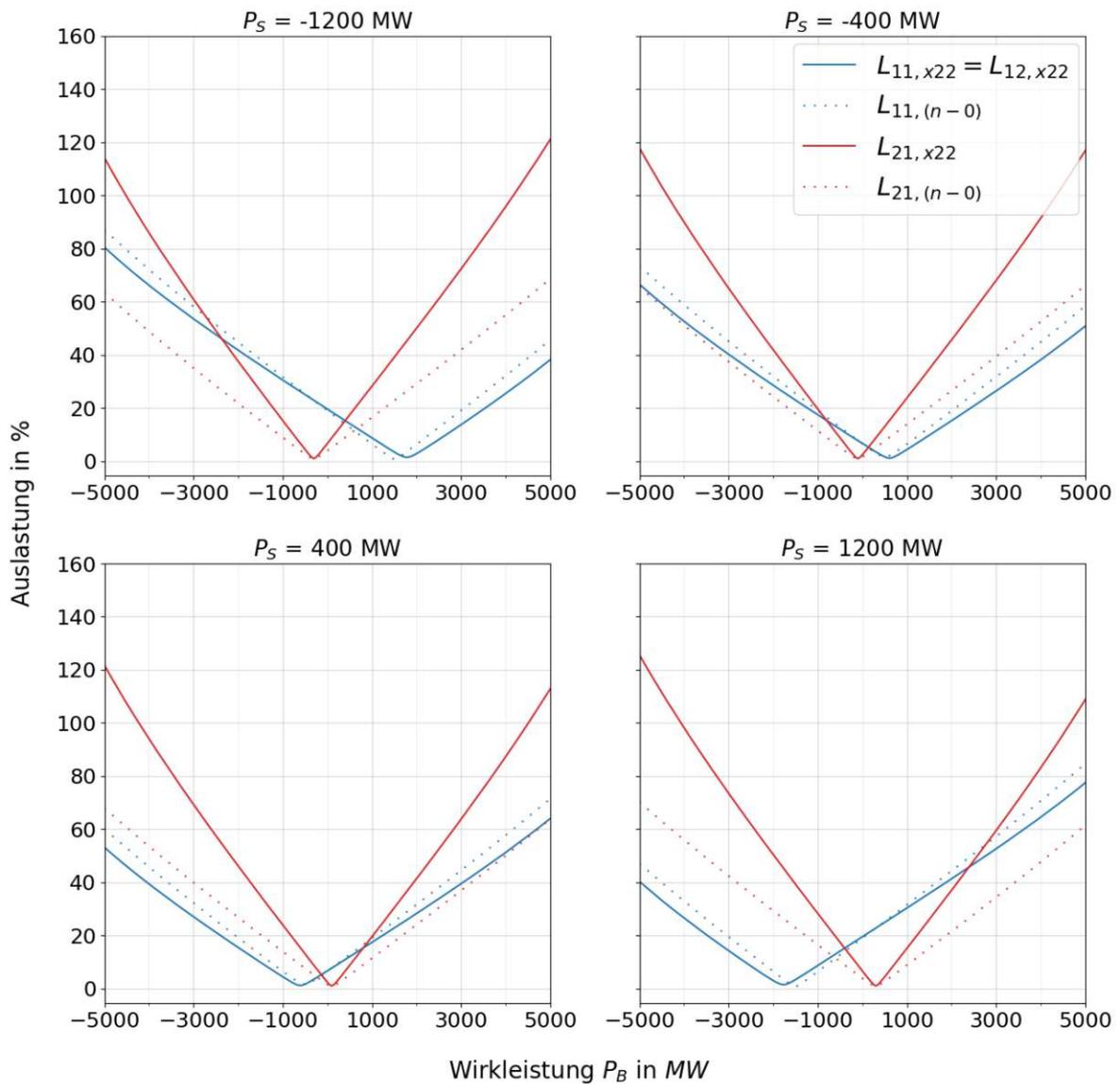


Abbildung 3.15.: Volleinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_{12} sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$

3.2.2. Einfacheinschleifung

Ausgehend von den Darstellungen Abbildung 2.4b und Abbildung 1.2 sollen die möglichen Ausfallszenarien betrachtet werden. Jeder der drei Leitungsabschnitte L_{11} , L_{12} und L_2 ist an beiden Enden mit einem Leistungsschalter ausgestattet, der im Störfall den fehlerbehafteten Leitungsabschnitt selektiv abschalten kann. Daraus ergeben sich drei unterschiedliche Ausfallszenarien:

Tabelle 3.15.: (n-1)-Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise

Ausfall	Auslastung
L_2	A_{11}
	A_{21}
L_{11}	A_2
	A_{21}
L_{21}	A_2
	A_{11}

Der Ausfall von Leitung L_2 stellt betreffend Übertragungskapazität den kritischsten Ausfall dar. Abhängig von der Richtung des Lastflusses P_B und P_S bildet dabei entweder der Leitungsabschnitt L_{11} oder L_{21} den limitierenden Engpass fürs Gesamtsystem. Im Vergleich dazu führen Ausfälle von L_{11} und L_{21} zu einer geringeren Reduktion der Übertragungskapazität und dienen lediglich zur Vervollständigung der Darstellung.

Ausfall von L_2

Auslastung von L_{11} :

$$\beta_{11, \cancel{L_2}} = \frac{Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.76)$$

$$\sigma_{11, \cancel{L_2}} = \frac{Z_{21} + Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.77)$$

Auslastung von L_{21} :

$$\beta_{21, \cancel{L_2}} = \beta_{11, \cancel{L_2}} \quad (3.78)$$

$$\sigma_{21, \cancel{L_2}} = -\frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} \quad (3.79)$$

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

Ausfall von L_{11}

Auslastung von L_2 :

$$\beta_{2, \cancel{L_{11}}} = \frac{Z_{PL}}{Z_2 + Z_{PL}} \quad (3.80)$$

$$\sigma_{2, \cancel{L_{11}}} = \frac{Z_{PL}}{Z_2 + Z_{PL}} \quad (3.81)$$

Auslastung von L_{21} :

$$\beta_{21, \cancel{L_{11}}} = 0 \quad (3.82)$$

$$\sigma_{21, \cancel{L_{11}}} = -1 \quad (3.83)$$

Ausfall von L_{21}

Auslastung von L_2 :

$$\beta_{2, \cancel{L_{21}}} = \frac{Z_{PL}}{Z_2 + Z_{PL}} = \beta_{2, \cancel{L_{11}}} \quad (3.84)$$

$$\sigma_{2, \cancel{L_{21}}} = 0 \quad (3.85)$$

Auslastung von L_{11} :

$$\beta_{11, \cancel{L_{21}}} = 0 \quad (3.86)$$

$$\sigma_{11, \cancel{L_{21}}} = 1 \quad (3.87)$$

Die Bestimmung der Auslastungen A_{21} im Falle eines Ausfalls von L_{11} sowie A_{11} bei einem Ausfall von L_{21} ist trivial: Der Ausfall unterbindet jeglichen Lastfluss P_B über den betroffenen Pfad, was zu einem Parameter β von Null führt. Gleichzeitig muss der intakte, zur Schaltanlage führende Leitungsabschnitt die gesamte Last P_S bewältigen, wodurch σ den Betrag eins annimmt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Ausfall von L_2

In Abbildung 3.16 sind die Auslastungsverläufe der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} als gestrichelte Kennlinien dargestellt, bezogen auf den Ausfall des Leitungsabschnitts L_2 . Dieser Ausfall stellt, unabhängig von der jeweiligen Lastflusssituation, den kritischsten (n-1)-Ausfall dar. Je nach Richtung der Leistungsflüsse ist entweder L_{11} oder L_{21} der limitierende Abschnitt, wie aus Tabelle 3.4 hervorgeht: Für $P_S < 0$ in Kombination mit $P_B < 0$ sowie für $P_S > 0$ in Kombination mit $P_B > 0$ stellt L_{11} (blaue Kennlinie) den begrenzenden Abschnitt dar, in allen übrigen Fällen ist dies L_{21} (rote Kennlinie).

Die zusätzlich dargestellten gepunkteten Kennlinien zeigen jeweils die Auslastung im ungestörten (n-0)-Betriebsfall. Im Gegensatz zur Volleinschleifung ist bei großen Werten von P_B für beide Abschnitte eine geringere Auslastung im (n-1)-Fall im Vergleich zum (n-0)-Fall zu beobachten. Zur Analyse dieses Verhaltens erfolgt ein Vergleich der zugehörigen Parameter aus Tabelle 3.2 (n-0-Fall) und Tabelle 3.19 (n-1-Fall) für $V = 66,7\% \hat{=} L_{PL} = 100 \text{ km}$:

$$\left. \begin{array}{l} L_{11,(n-0)} : \beta = \frac{1}{3}, \sigma = \frac{2}{3} \\ L_{11,(n-1)} : \beta = \frac{1}{2}, \sigma = \frac{3}{4} \\ L_{21,(n-0)} : \beta = \frac{1}{3}, \sigma = -\frac{1}{3} \\ L_{21,(n-1)} : \beta = \frac{1}{2}, \sigma = -\frac{1}{4} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \beta_{(n-0)} > \beta_{(n-1)}, \sigma_{(n-0)} > \sigma_{(n-1)} \\ \beta_{(n-0)} > \beta_{(n-1)}, |\sigma_{(n-0)}| < |\sigma_{(n-1)}| \end{array}$$

Der Parameter β ist im (n-0)-Fall größer als im (n-1)-Fall, ersichtlich an der steileren Auslastungskennlinie. Für große Werte von P_B dominiert der Term $\beta \cdot P_B$ gegenüber dem Anteil $\sigma \cdot P_S$, sodass die Auslastung im (n-1)-Fall unterhalb jener des (n-0)-Falls liegt. Bei niedrigen P_B -Werten hingegen entscheidet der Term $\sigma \cdot P_S$ in Kombination mit der jeweiligen Lastflussrichtung darüber, ob ein Leitungsabschnitt im (n-0)- oder im (n-1)-Fall stärker ausgelastet ist.

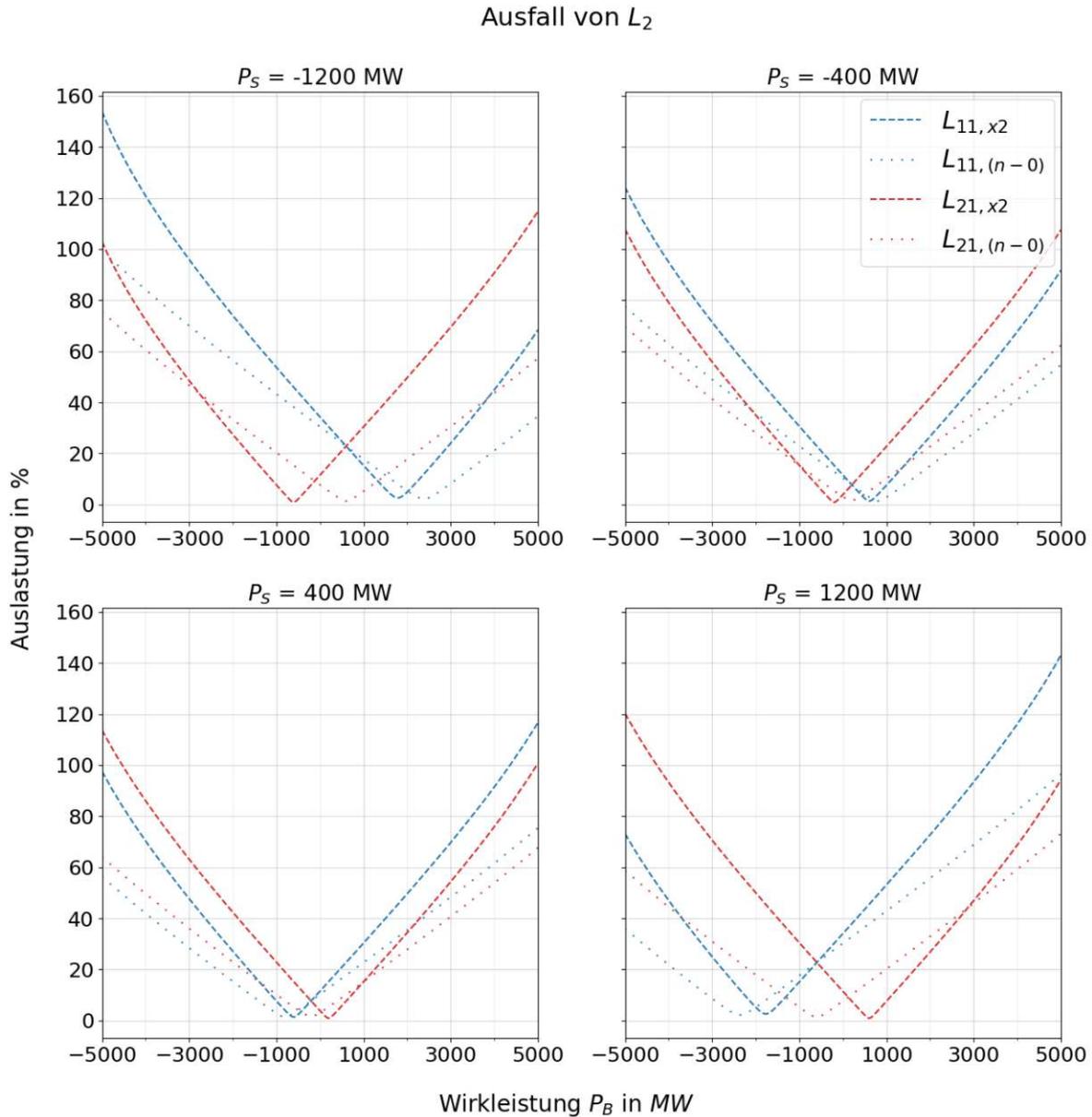


Abbildung 3.16.: Einfacheinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_2 sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$

3.2.3. Doppelstich

Ausgehend von Abbildung 2.4c sollen die möglichen Ausfallszenarien betrachtet werden. Im Gegensatz zur Volleinschleifung können die Leitungsabschnitte L_{11} , L_{12} , L_{21} und L_{22} nicht selektiv abgeschaltet werden. Ein Fehler auf Abschnitt L_{11} oder L_{21} führt zum Ausfall der Leitung L_1 , ein Fehler auf Abschnitt L_{21} oder L_{22} führt zum Ausfall der Leitung L_2 . Daraus ergeben sich zwei unterschiedliche Ausfallszenarien, welche entsprechend Gleichung 3.9 und 3.10 zu identischen Auslastungen $A_{12} = A_{11}$ bzw. $A_{22} = A_{21}$ führen:

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.16.: Äquivalente (n-1)-Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise hinsichtlich der resultierenden Leitungsauslastung

Fehler	Ausfall	Auslastung	$\hat{=}$	Fehler	Ausfall	Auslastung
L_{11}	L_1	A_{12}		L_{12}	L_2	A_{11}
L_{21}		A_{22}		L_{22}		A_{21}

Ausfall von L_2

Auslastung von L_{11} :

$$\beta_{11, \cancel{\times}} = \frac{Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \beta_{11, \cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.88)$$

$$\sigma_{11, \cancel{\times}} = \frac{Z_{21} + Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \sigma_{11, \cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.89)$$

Auslastung von L_{21} :

$$\beta_{21, \cancel{\times}} = \beta_{11, \cancel{\times}} \quad (3.90)$$

$$\sigma_{21, \cancel{\times}} = -\frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \sigma_{21, \cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.91)$$

Bei Ausfall von L_2 sind die Parameter $\beta_{11, \cancel{\times}}$ und $\sigma_{11, \cancel{\times}}$ sowie $\beta_{21, \cancel{\times}}$ und $\sigma_{21, \cancel{\times}}$ identisch mit jenen der Einfacheinschleifung. Dieser Sachverhalt resultiert aus der Vernachlässigung der Stichtabbindungsänge. Sollte der linksseitige Sammelschientrenner in Abbildung 2.4c bei Fehlereintritt geöffnet sein, fällt eine der beiden Last-/Erzeugungseinheiten aus und dadurch reduziert sich $P_{S, \cancel{\times}}$ in Gleichung 3.6 auf $P_S/2$. Dies erhöht in weiterer Folge die Übertragungskapazität $P_{B, \max}$ im Vergleich zur Einfacheinschleifung, wo bei Fehlereintritt beide Last-/Erzeugungseinheiten am Netz bleiben. Diese scheinbare Verbesserung resultiert jedoch aus dem Verlust einer Einheit und stellt daher keinen tatsächlichen Vorteil dar.

Im Falle eines geöffneten Sammelschientrenners bei Fehlereintritt würde dieser geschlossen werden, um die Versorgung der zweiten Einheit über die intakte Leitung sicherzustellen. Dann, und auch wenn der Trenner vor Fehlereintritt zu war, sind die Verhältnisse identisch zu jenen der Einfacheinschleifung. Abbildung 3.16 ist in diesen Fällen gleichermaßen für den Doppelstich gültig.

3.2.4. Stich

Basierend auf Abbildung 2.4d lassen sich zwei Ausfallszenarien identifizieren: Ein Fehler auf den Leitungsabschnitten L_{11} oder L_{12} führt aufgrund fehlender selektiver Abschaltmöglichkeit zum Komplettausfall der Leitung L_1 . Außerdem führt ein Fehler auf

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

Leitung L_2 zu dessen Abschaltung. Von diesen beiden Szenarien stellt der Ausfall von L_2 die kritischere Situation dar, da er die Übertragungskapazität $P_{B, \max}$ stärker einschränkt. Bei diesem Ausfall sind die Parameter $\beta_{11, \cancel{\times}}$ und $\sigma_{11, \cancel{\times}}$ sowie $\beta_{21, \cancel{\times}}$ und $\sigma_{21, \cancel{\times}}$ aufgrund der Vernachlässigung der Stichtanbindungslänge identisch mit jenen der Einfacheinschleifung. Abbildung 3.16 ist in diesen Fällen gleichermaßen für den Stich gültig.

Tabelle 3.17.: (n-1)-Fehler- und Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise

Fehler	Ausfall	Auslastung
L_2	L_2	A_{11} A_{21}
L_{11} L_{21}	L_1	A_2

Ausfall von L_2

Auslastung von L_{11} :

$$\beta_{11, \cancel{\times}} = \frac{Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \beta_{11, \cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.92)$$

$$\sigma_{11, \cancel{\times}} = \frac{Z_{21} + Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \sigma_{11, \cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.93)$$

Auslastung von L_{21} :

$$\beta_{21, \cancel{\times}} = \beta_{11, \cancel{\times}} \quad (3.94)$$

$$\sigma_{21, \cancel{\times}} = -\frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \sigma_{21, \cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.95)$$

Ausfall von L_1

Auslastung von L_2 :

$$\beta_{2, \cancel{\times}} = \frac{Z_{PL}}{Z_2 + Z_{PL}} \quad (3.96)$$

$$\sigma_{2, \cancel{\times}} = 0 \quad (3.97)$$

3.2.5. Konventionelle Anbindung in B

Basierend auf Abbildung 2.3 lassen sich zwei Ausfallszenarien identifizieren: Ein Fehler auf Leitung L_1 oder L_2 führt zum Ausfall eben jener Leitung. Diese beiden Ausfälle sind betreffend ihrer Schwere exakt gleich, die Parameter $\beta_{1,\cancel{\times}}$ sowie $\beta_{2,\cancel{\times}}$ sind gleich und darüber hinaus identisch mit dem Parameter $\beta_{11,\cancel{\times}} = \beta_{21,\cancel{\times}}$ der Einfacheinschleifung.

Tabelle 3.18.: (n-1)-Fehler- und Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise

Fehler	Ausfall	Auslastung
L_1	L_1	A_2
L_2	L_2	A_1

Ausfall von L_1

Auslastung von L_2 :

$$\beta_{1,\cancel{\times}} = \frac{Z_{PL}}{Z_{11} + Z_{21} + Z_{PL}} = \beta_{11,\cancel{\times}}, \text{ Ein.} \quad (3.98)$$

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

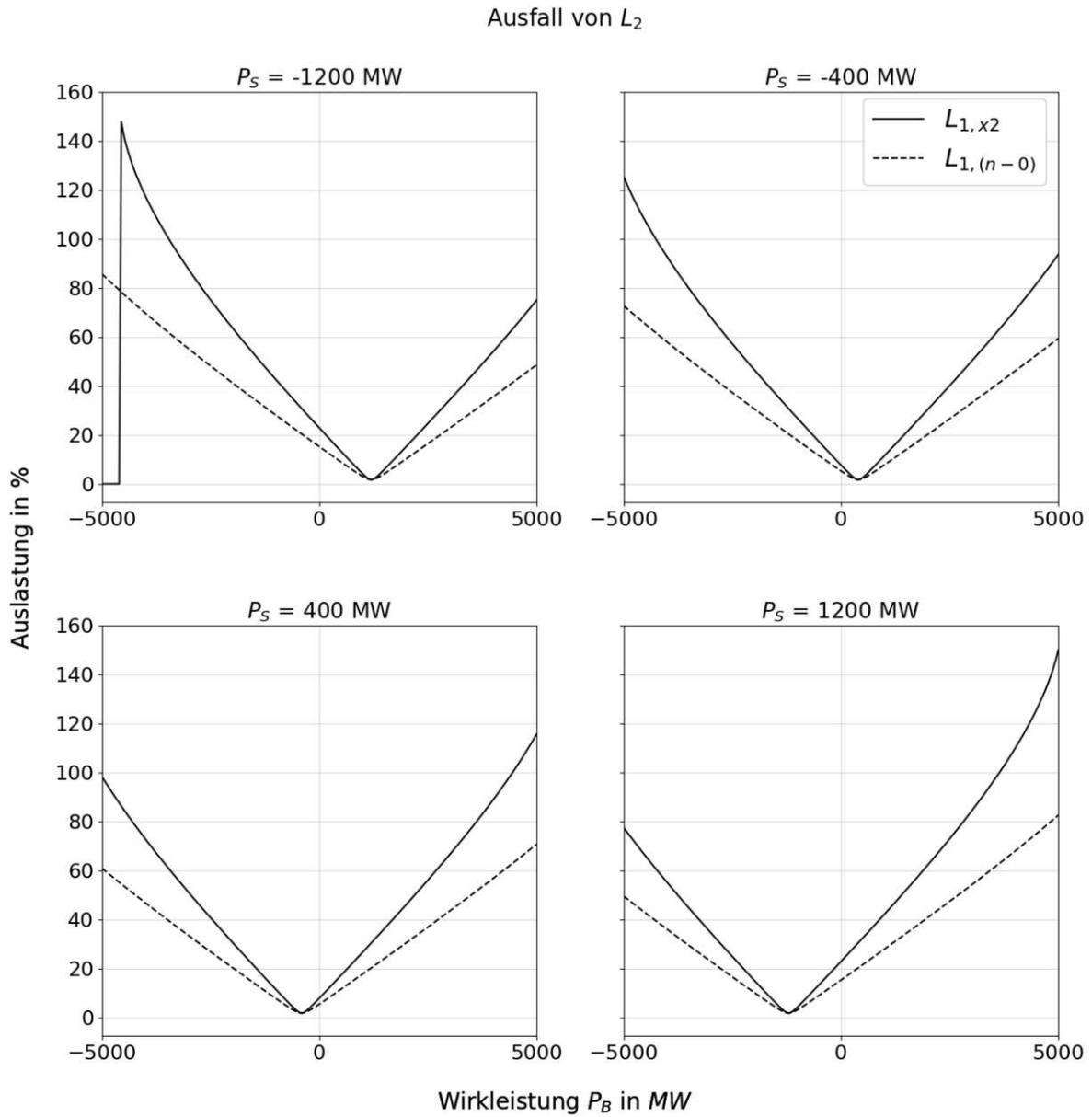


Abbildung 3.17.: Einfacheinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_2 sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$

3.2.6. Vergleich der Netzanbindungskonzepte: Parameter, Leitungsauslastung und (n-1)-Übertragungskapazität

Die folgende Tabelle listet die Parameter σ und β für diverse Vermaschungsgrade und Leitungsausfallszenarien auf. Der kritischste Ausfall in Kombination mit dem Engpass-Abschnitt hinsichtlich der Übertragungskapazität ist rot markiert. Da die Parameter von Doppelstich und Stich bei Ausfall von L_2 äquivalent zu jenen der Einfacheinschleifung sind, werden diese nicht separat angeführt. Der Parameter β bei der Einfacheinschleifung ist darüber hinaus indent mit jenem Parameter β für die konventionelle Anbindung.

Tabelle 3.19.: Parameter σ und β bei verschiedenen Vermaschungsgraden V im (n-1)-Fall

L_{PL}	Volleinschleifung				Einfacheinschleifung			
	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{11}	L_{11}	L_{21}	L_2	L_2
500 km	$\beta = \frac{20}{23}$	$\beta = \frac{10}{23}$	$\beta = \frac{20}{23}$	$\beta = \frac{10}{23}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$
	$\sigma = \frac{21}{23}$	$\sigma = -\frac{1}{23}$	$\sigma = -\frac{1}{23}$	$\sigma = \frac{11}{23}$	$\sigma = \frac{11}{12}$	$\sigma = -\frac{1}{12}$	$\sigma = \frac{5}{6}$	$\sigma = 0$
200 km	$\beta = \frac{8}{11}$	$\beta = \frac{4}{11}$	$\beta = \frac{8}{11}$	$\beta = \frac{4}{11}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$
	$\sigma = \frac{9}{11}$	$\sigma = -\frac{1}{11}$	$\sigma = -\frac{1}{11}$	$\sigma = \frac{5}{11}$	$\sigma = \frac{5}{6}$	$\sigma = -\frac{1}{6}$	$\sigma = \frac{2}{3}$	$\sigma = 0$
100 km	$\beta = \frac{4}{7}$	$\beta = \frac{2}{7}$	$\beta = \frac{4}{7}$	$\beta = \frac{2}{7}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$
	$\sigma = \frac{5}{7}$	$\sigma = -\frac{1}{7}$	$\sigma = -\frac{1}{7}$	$\sigma = \frac{3}{7}$	$\sigma = \frac{3}{4}$	$\sigma = -\frac{1}{4}$	$\sigma = \frac{1}{2}$	$\sigma = 0$
50 km	$\beta = \frac{2}{5}$	$\beta = \frac{1}{5}$	$\beta = \frac{2}{5}$	$\beta = \frac{1}{5}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$
	$\sigma = \frac{3}{5}$	$\sigma = -\frac{1}{5}$	$\sigma = -\frac{1}{5}$	$\sigma = \frac{2}{5}$	$\sigma = \frac{2}{3}$	$\sigma = -\frac{1}{3}$	$\sigma = \frac{1}{3}$	$\sigma = 0$
33,3 km	$\beta = \frac{4}{13}$	$\beta = \frac{2}{13}$	$\beta = \frac{4}{13}$	$\beta = \frac{2}{13}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$
	$\sigma = \frac{7}{13}$	$\sigma = -\frac{3}{13}$	$\sigma = -\frac{3}{13}$	$\sigma = \frac{5}{13}$	$\sigma = \frac{5}{8}$	$\sigma = -\frac{3}{8}$	$\sigma = \frac{1}{4}$	$\sigma = 0$

In Abbildung 3.18 sind die simulierten Auslastungen von Volleinschleifung und Einfacheinschleifung für den betreffend Übertragungskapazität ungünstigsten Ausfall dargestellt. Jener Ausfall wurde in Tabelle 3.19 rot hervorgehoben und ist entscheidend, da er den Grenzwert für die Kombination aus P_S und P_B für den (n-0)-Fall bestimmt. Bei der Volleinschleifung ist der ungünstigste Ausfall von der Richtung des Lastflusses abhängig: Bei Lastflussrichtung von **A** nach **B** stellt der Ausfall von L_{12} (bzw. äquivalent L_{11}) das kritischste Szenario dar, dargestellt im oberen linken Teilbild (Volleinschleifung: Ausfall L_{12}). Umgekehrt gilt bei Lastflussrichtung von **B** nach **A**, dass der Ausfall von L_{22} (bzw. äquivalent L_{21}) den ungünstigsten Ausfall darstellt, dargestellt im oberen mittleren Teilbild (Volleinschleifung: Ausfall L_{22}). Bei der Einfacheinschleifung stellt der

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Ausfall von L_2 unabhängig von der Lastflussrichtung den limitierenden Fall dar, dargestellt im oberen rechten Teilbild (Einfacheinschleifung: Ausfall L_2).

Die durchgezogenen Auslastungskennlinien gehören zur Volleinschleifung, die gestrichelten zur Einfacheinschleifung. Aus der Lage der Kennlinien zueinander geht klar hervor, dass der ungünstigste Leitungsausfall bei der Volleinschleifung zu einer höheren Auslastung des den Engpass bildenden Abschnitts führt als bei der Einfacheinschleifung (gültig für große Werte von P_B). Daraus folgt, dass bei konstantem P_S bei der Einfacheinschleifung mehr Wirkleistung P_B zwischen **A** und **B** übertragen werden kann, bevor ein Leitungsabschnitt die maximale Auslastung von 100 % erreicht.

Im Vergleich zum (n-0)-Fall weist die Einfacheinschleifung hier eine höhere Übertragungskapazität auf. Der Unterschied wird anhand der auf der x -Achse vermerkten Werte deutlich: Die maximale übertragbare Wirkleistung $P_{B,\max}$ – definiert als jener Wert, bei dem die jeweilige Kennlinie die 100 %-Grenze erreicht – ist bei der Einfacheinschleifung stets der (betragsmäßig) größere Wert. Dieser ist jeweils eine Zeile unterhalb des entsprechenden Werts für die Volleinschleifung vermerkt. Die betreffenden Werte entsprechen den farblich hervorgehobenen Zellen (gelb für $P_B > 0$, blau für $P_B < 0$) in Tabelle 3.23 bzw. Tabelle 3.25 für den Fall $L_{PL} = 100 \text{ km} \stackrel{\Delta}{=} V = 66,7 \%$.

Grund für die höhere Übertragungskapazität bei der Einfacheinschleifung ist, dass der ungünstigste Leitungsausfall (L_2) bei der Einfacheinschleifung eine höhere Impedanz der Übertragungsstrecke ($Z_{11} + Z_{21}$) zur Folge hat als bei der Volleinschleifung ($Z_{11} + (Z_{21} \parallel Z_{22})$). Dies führt dazu, dass ein größerer Teil der Wirkleistung über das vermaschte Netz umgeleitet wird, wodurch die Belastung der Leitungen innerhalb der Untersuchungsstrecke geringer ausfällt.

Nachdem in Abbildung 3.18 gezeigt wurde, wie sich die Varianten der Voll- und Einfacheinschleifung auf die Leitungsauslastung im ungünstigsten (n-1)-Fall auswirken, stellt sich die Frage, wie diese im Vergleich zur konventionellen Anbindung von Lasten bzw. Erzeugungseinheiten an einen Netzknoten abschneiden. Aus diesem Grund wurde in Abbildung 3.19 – zusätzlich zu den Kennlinien für Voll- und Einfacheinschleifung – auch die Kennlinie für den Fall dargestellt, dass die Last/Erzeugung unmittelbar im Netzknoten **B** angebunden ist. Die entsprechende Auslastungskurve ist in Schwarz dargestellt.

Wie bereits beim (n-0)-Fall in Bezug auf Abbildung 3.9 festgestellt, weist auch im (n-1)-Fall die direkte Anbindung der Erzeugung/Last im Netzknoten **B** eine geringere Auslastung auf als die Varianten der Voll- und Einfacheinschleifung. Wird etwa die direkte Anbindung mit der Einfacheinschleifung verglichen – die sich im Gegensatz zur Volleinschleifung durch eine geringere Auslastung des engpassbildenden Leitungsabschnitts auszeichnet –, so zeigt sich: Die Aufteilung des Wirkleistungsflusses P_B , ausgedrückt durch den Parameter β , ist dieselbe. Daher verlaufen die gestrichelte blaue und die schwarze Kennlinie weitgehend parallel, wobei die Abweichungen auf die Blindleistungsaufnahme der Leitung zurückzuführen sind, die mit steigender Auslastung ansteigt. Bei direkter Anbindung in **B** weicht jedoch aufgrund veränderter Impedanzverhältnisse ein größerer Anteil der Wirkleistung P_S über das vermaschte Netz aus, was die Differenz zwischen der gestrichelten blauen und der schwarzen Kennlinie erklärt. Infolgedessen ist die Auslastung des engpassbildenden Leitungsabschnitts im (n-1)-Fall bei direkter Anbindung in **B** geringer als bei den Varianten der Anbindung zwischen **A** und **B**.

3. Ergebnisse und Diskussion

Für den Fall, dass $P_B > 0$ und $P_S < 0$ oder $P_B < 0$ und $P_S > 0$ ist, bietet die Anbindung im Netzknoten **B** besonders deutliche Vorteile gegenüber den Varianten zwischen **A** und **B**: In diesem Szenario werden die Leitungen bzw. Leitungsabschnitte zwischen **A** und **B** ausschließlich mit der Wirkleistung P_B belastet, während die Last direkt aus dem Netzknoten versorgt wird.

Bei der konventionellen Anbindung direkt im Netzknoten **B** sind grundsätzlich zwei Konstellationen zu unterscheiden:

$(P_B < 0, P_S > 0)$ oder $(P_B > 0, P_S < 0)$

- Die Last bzw. Erzeugung wird direkt aus dem Netzknoten versorgt.
 - ⇒ Die Wirkleistung P_S muss nicht über die Leitungen transportiert werden.
 - ⇒ Deutlicher Vorteile der direkten Anbindung gegenüber einer Anbindung zwischen **A** und **B**.
 - ⇒ Geringere Auslastung bei gleichem P_S und P_B oder gleiche Auslastung bei höherem P_S und P_B .

$(P_B < 0, P_S < 0)$ oder $(P_B > 0, P_S > 0)$

- Die aus P_S resultierende Wirkleistung muss zwar über die Leitungen transportiert werden,
- teilt sich jedoch gleichmäßig auf L_1 und L_2 auf.
 - ⇒ Vorteil der direkten Anbindung gegenüber der Anbindung zwischen **A** und **B**.
 - ⇒ Etwas geringere Auslastung bei gleichem P_S und P_B oder gleiche Auslastung bei etwas höherem P_S und P_B .

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

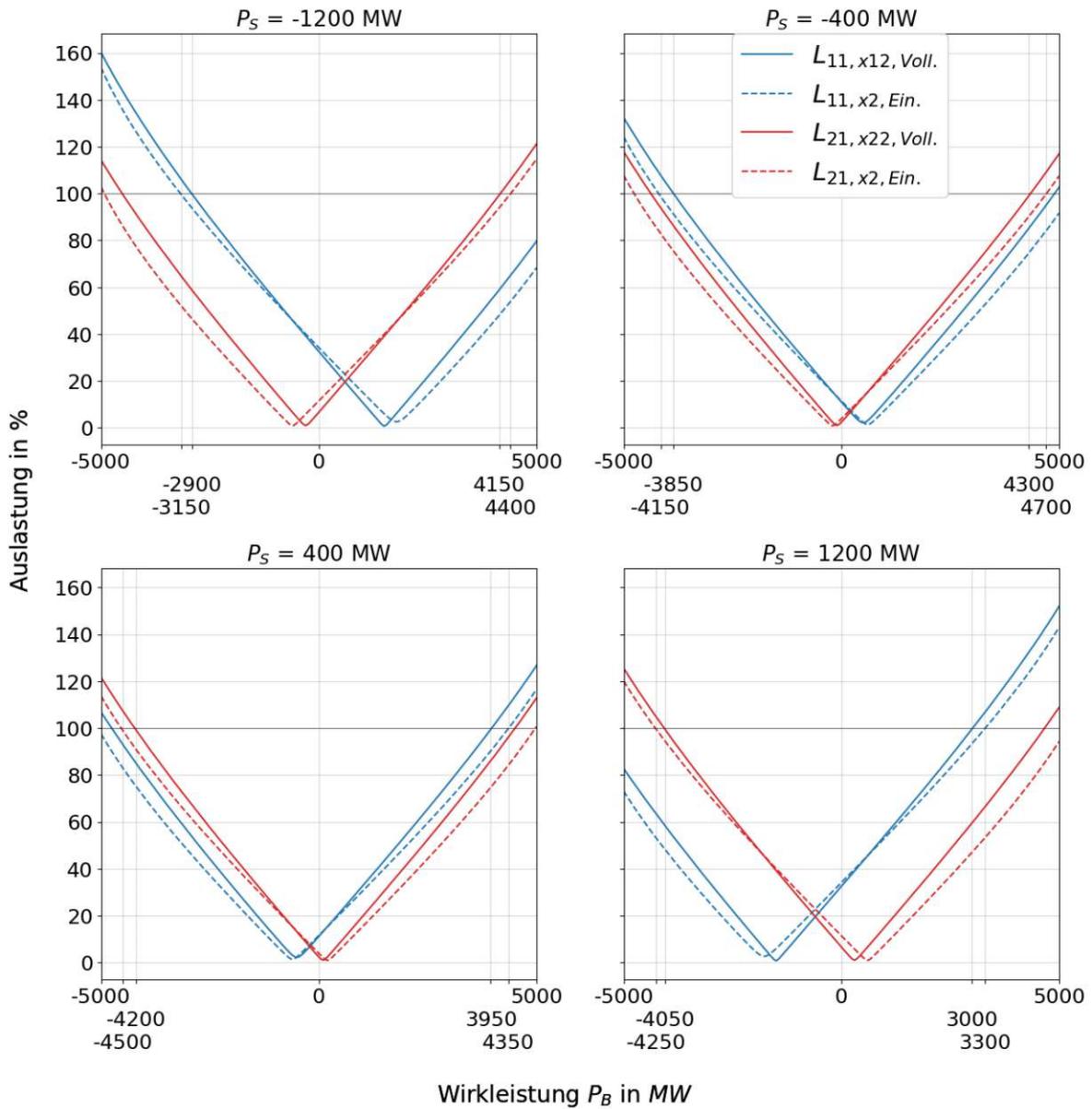
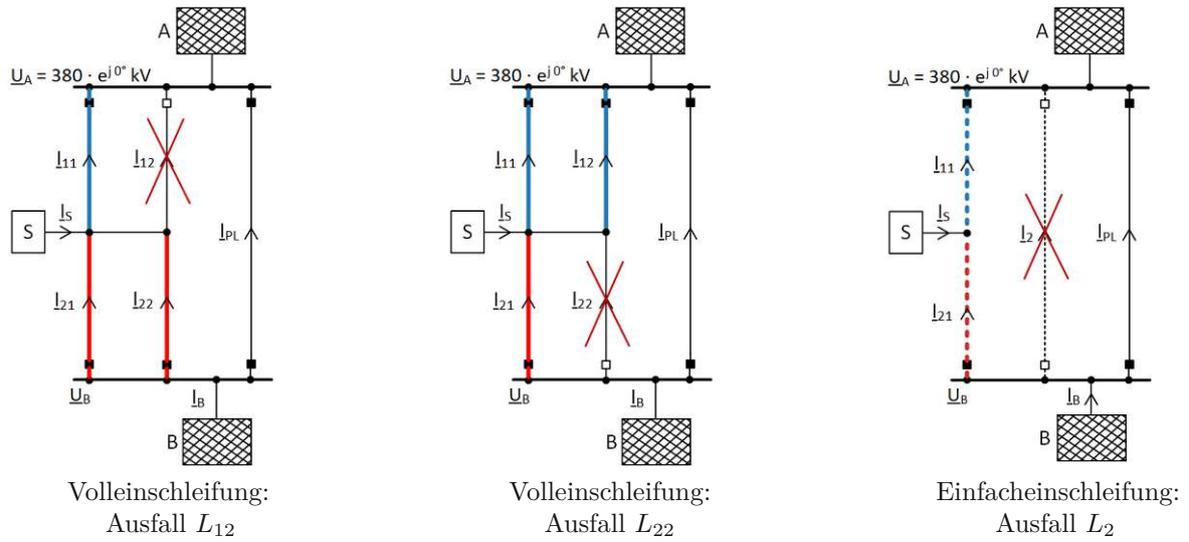


Abbildung 3.18.: (n-1)-Worst-Case: Voll- und Einfacheinschleifung im direkten Vergleich, $V = 66,7\%$

3. Ergebnisse und Diskussion

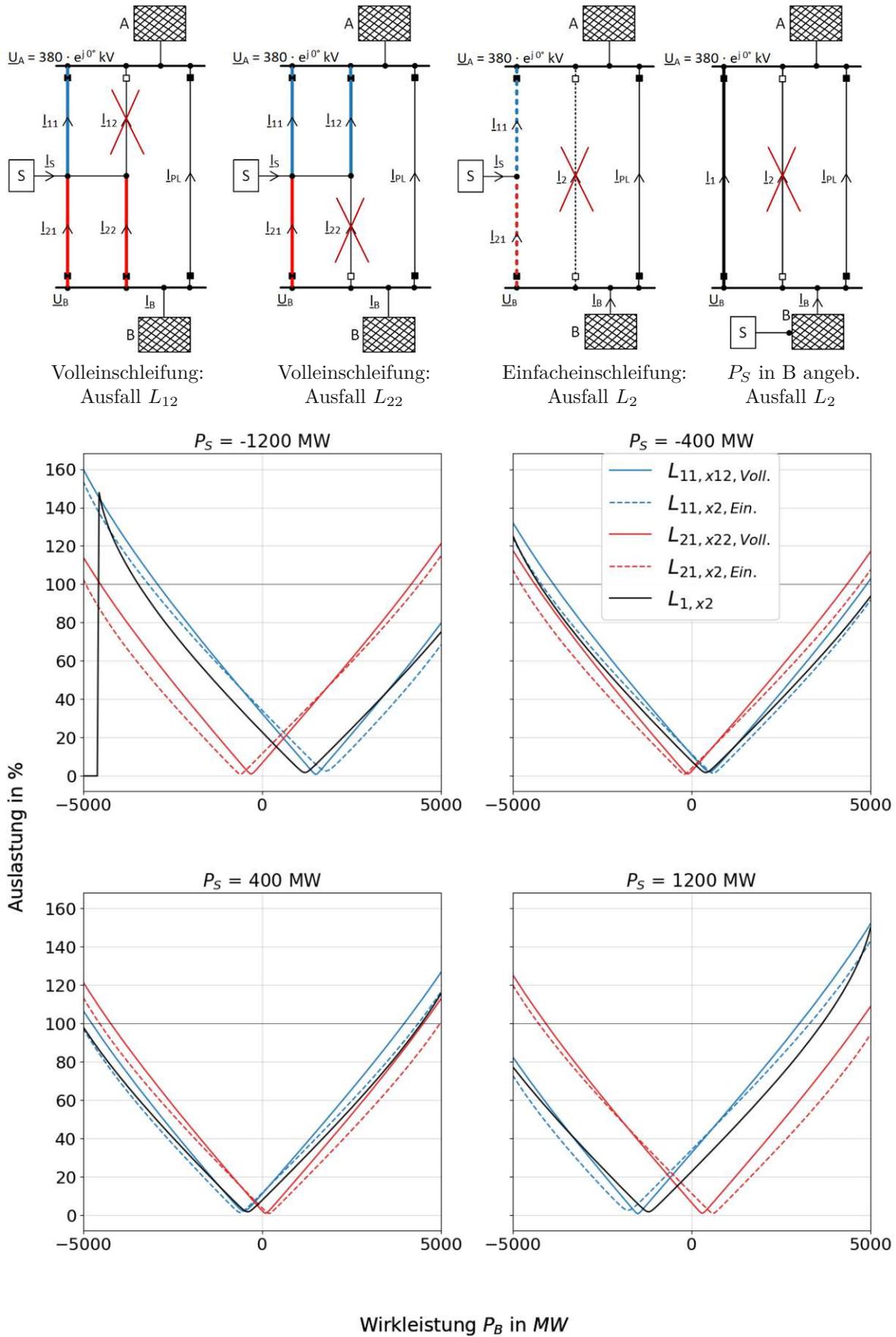


Abbildung 3.19.: (n-1)-Worst-Case: Voll- und Einfacheinschleifung sowie Anbindung der Last/Erzeugung in B im direkten Vergleich, $V = 66,7\%$

Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung

Analog zum (n-0)-Fall zeigt der Vermaschungsgrad des Netzes einen positiven Einfluss auf die Übertragungskapazität, visualisiert in Abbildung 3.20: Mit zunehmender Vermaschung steigt die maximale Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ bei konstant gehaltener Wirkleistung P_S , sowohl im Fall der Volleinschleifung als auch bei der Einfacheinschleifung. Dieser Effekt äußert sich bei der Einfacheinschleifung stärker als bei der Volleinschleifung. Die Abweichung zwischen den beiden Varianten gemäß Gleichung 3.65 ist somit abhängig vom Grad der Vermaschung. Daraus folgt, dass sich die relativen Positionen und der Abstand der jeweiligen Auslastungskennlinien zueinander bei zunehmender Vermaschung verändern, konkret wird der Abstand der Auslastungskennlinien zueinander mit steigender Vermaschung größer.

Der Unterschied wird anhand der auf der x -Achse vermerkten Werte deutlich: Die maximale übertragbare Wirkleistung $P_{B,\max}$ – definiert als jener Wert, bei dem die jeweilige Kennlinie die 100 %-Grenze erreicht – ist bei der Einfacheinschleifung stets der (betragsmäßig) größere Wert. Dieser ist jeweils eine Zeile unterhalb des entsprechenden Werts für die Volleinschleifung vermerkt. Die betreffenden Werte entsprechen den farblich hervorgehobenen Zellen (gelb für $P_B > 0$, blau für $P_B < 0$) in Tabelle 3.23 bzw. Tabelle 3.25. Für $V = 80\%$ (Abbildung 3.20a) ist ein deutlicher Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung betreffend Übertragungskapazität zu erkennen, bei abnehmender Vermaschung nimmt der Unterschied ab (Abbildung 3.20b) und verschwindet für geringe Vermaschungen beinahe vollständig (Abbildung 3.20c).

Abbildung 3.21 basiert auf Abbildung 3.20, zeigt jedoch zusätzlich die (n-1)-Auslastung für die direkte Anbindung in **B** bei verschiedenen Vermaschungsgraden. Mit steigendem Vermaschungsgrad wird der Vorteil der direkten Anbindung in Form einer niedrigeren Auslastung zunehmend deutlich.

Sinkt hingegen der Vermaschungsgrad, nähern sich die Auslastungskennlinien der direkten Anbindung und der Varianten der Voll- bzw. Einfacheinschleifung (hier im Vergleich zu den oberen Leitungsabschnitten) zunehmend an. Ursache hierfür ist, dass der Wirkleistungsfluss im Worst Case (n-1)-Fall bei geringer Vermaschung verstärkt über die Abschnitte

- $L_{11} + L_{21} \parallel L_{22}$ (Volleinschleifung),
- $L_{11} + L_{21}$ (Einfacheinschleifung) oder
- L_1 (direkte Anbindung)

geführt werden muss, wodurch der obere Abschnitt L_{11} bzw. die Leitung L_1 jeweils gleich belastet wird.

Hinweis: Der Abfall der schwarzen Kennlinie auf Null bei hohen P_B -Werten ist ein Artefakt der PowerFactory-Simulation. In diesem Bereich wurde der Blindleistungsbedarf der Leitung so groß, dass der Lastfluss nicht mehr konvergierte. Dieser Bereich wurde bewusst mit abgebildet, um die Minimal- und Maximalwerte der x -Achse an jene in Abbildung 3.18 und Abbildung 3.20 anzugleichen und den nichtlinearen Bereich der Auslastungskurven von Voll- und Einfacheinschleifung mit darzustellen.

3. Ergebnisse und Diskussion

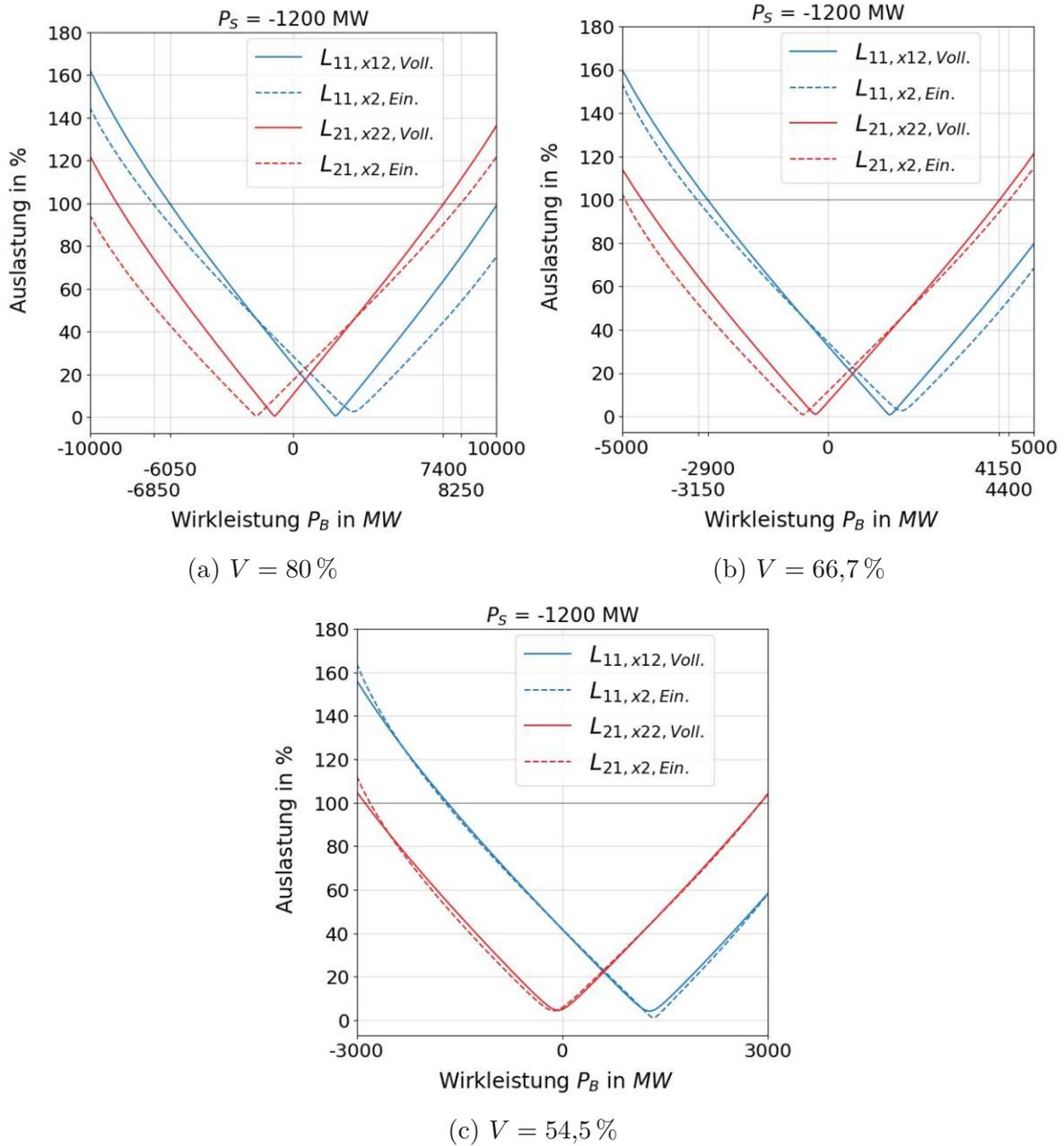


Abbildung 3.20.: (n-1)-Worst-Case: Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung: Voll- und Einfacheinschleifung

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

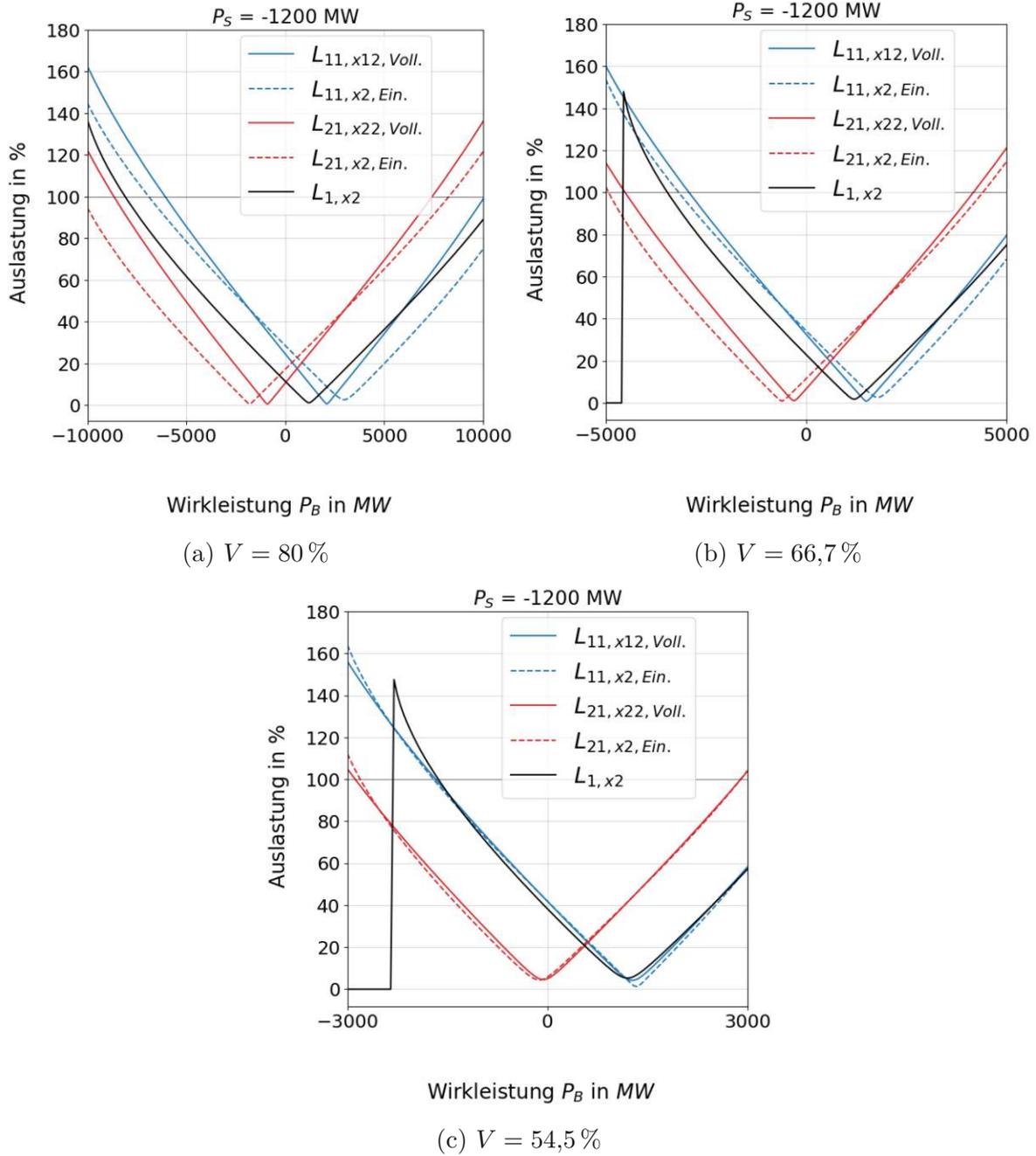


Abbildung 3.21.: (n-1)-Worst-Case: Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung: Voll- und Einfacheinschleifung sowie direkte Anbindung in **B**

Unterschied zwischen analytischer Berechnung und Simulation

In Abbildung 3.22 ist der Unterschied zwischen den simulierten Leitungsauslastungen (durchgezogene Kennlinien) und den analytisch berechneten Auslastungen (gestrichelte Kennlinien) dargestellt. Abbildung 3.22a zeigt diesen Vergleich für die Volleinschleifung, Abbildung 3.22b für die Einfacheinschleifung. Aus Platzgründen wurden dabei exemplarisch nur die Abweichungen bei $P_S = -1200$ MW und $P_S = 1200$ MW visualisiert.

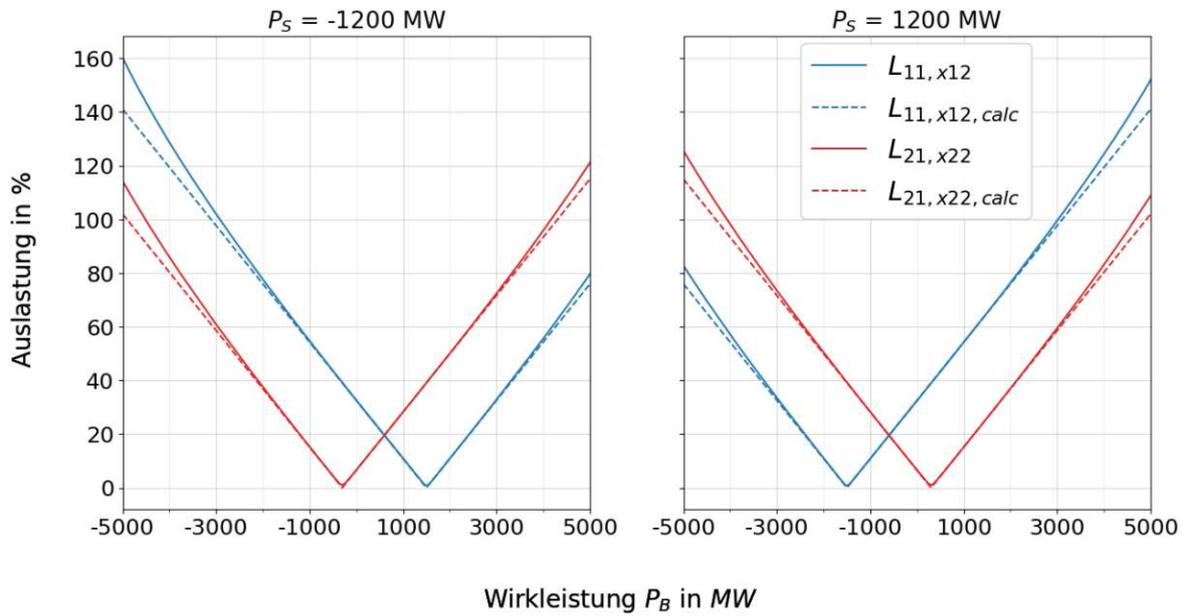
Analog zum (n-0)-Fall zeigt sich bei niedrigen Leitungsauslastungen (bis etwa 40%) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und analytischer Berechnung. Mit zunehmendem Wirkleistungstransport steigt jedoch der Blindleistungsbedarf der Leitung an, wodurch die Leitungsauslastung mit der analytischen Berechnung zunehmend unterschätzt wird. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei der Einfacheinschleifung, wo die Abweichung bei hohen P_B -Werten stärker ausfällt als bei der Volleinschleifung – erkennbar am größeren Abstand der jeweiligen Kennlinien in Abbildung 3.22. Zur Erklärung dieses Phänomens wurde eine gezielte Lastflussberechnung für $P_B = -5000$ MW und $P_S = -1200$ MW durchgeführt. Die resultierenden Wirk- und Blindleistungsflüsse sind in Tabelle 3.20 dargestellt:

Tabelle 3.20.: Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} bei $P_B = -5000$ MW, $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$

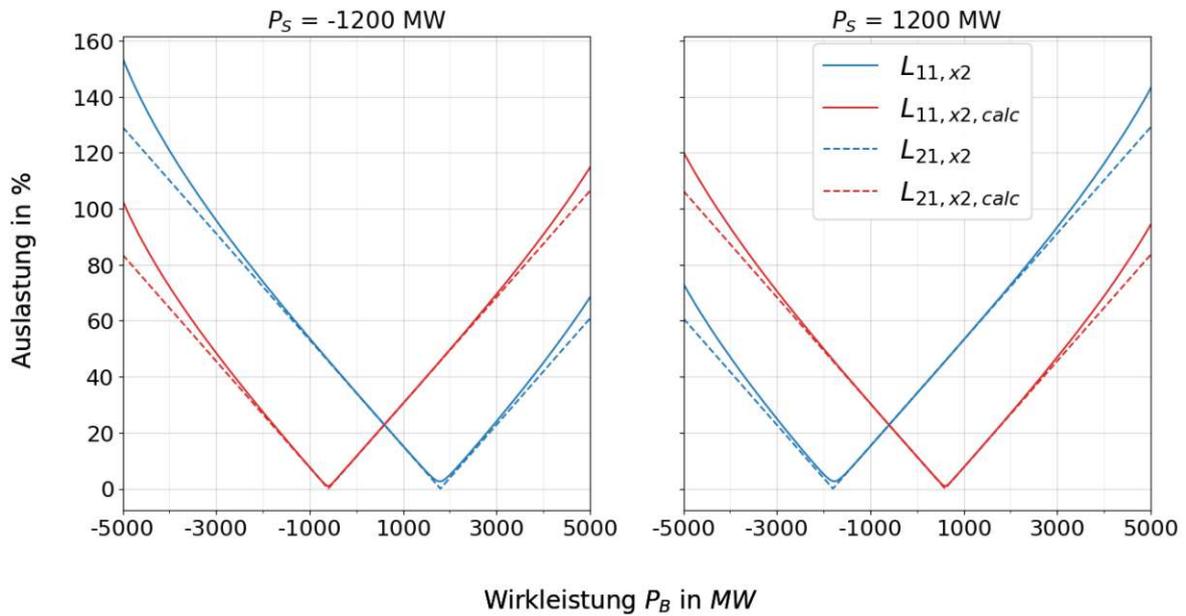
	$P/\text{MW}, Q/\text{MVA}, A/\%$									
	Volleinschleifung					Einfacheinschleifung				
	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A
L_{11}	3800	1818	-3738	-360	160	3509	2010	-3452	-668	154
L_{21}	1269	180	-1262	-25	55	2252	668	-2227	-74	103

Es zeigt sich, dass die Blindleistung am Anfang des Leitungsabschnitts L_{11} bei der Einfacheinschleifung mit 2010 MVA höher ist als bei der Volleinschleifung mit 1818 MVA. Dies wirkt auf den ersten Blick widersprüchlich, da die Auslastung A_{11} bei der Einfacheinschleifung geringer ist (154% gegenüber 160%) und somit auch der Blindleistungsverbrauch in diesem Abschnitt niedriger ausfällt ($\Delta Q_{\text{Ein.}} = 1343$ MVA $<$ $\Delta Q_{\text{Voll.}} = 1458$ MVA). Die Erklärung liegt im Leitungsabschnitt L_{21} : Aufgrund der deutlich höheren Auslastung bei der Einfacheinschleifung (103% gegenüber 55% bei der Volleinschleifung) entsteht dort ein erheblicher Blindleistungsbedarf, der ausgehend vom Netzknoten **A** über den oberen Leitungsabschnitt L_{11} transportiert werden muss. Daher gilt auch für L_{11} : $Q_{A,\text{Ein.}} > Q_{A,\text{Voll.}}$. Da der zusätzliche Blindleistungsfluss in der analytischen Berechnung nicht berücksichtigt wird, weicht die analytisch berechnete Kennlinie von der simulierten Kennlinie ab. Aufgrund der höheren Blindleistungsflüsse bei der Einfacheinschleifung ist die Abweichung folglich größer als bei der Volleinschleifung.

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise



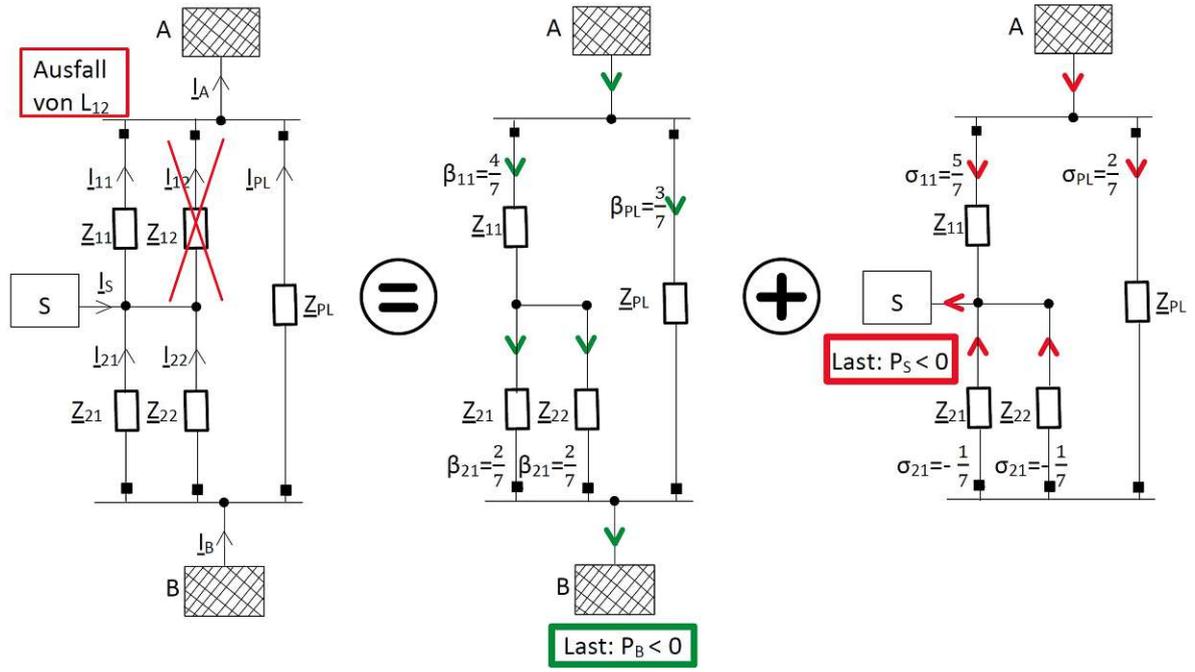
(a) Volleinschleifung



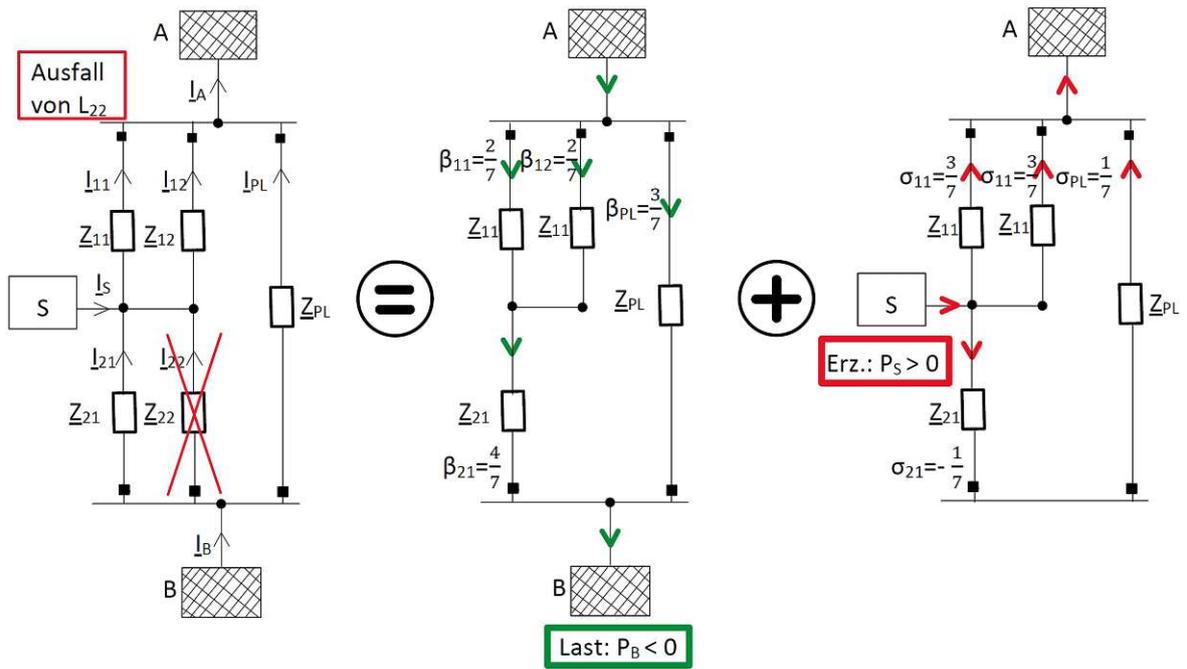
(b) Einfacheinschleifung

Abbildung 3.22.: (n-1)-Worst-Case bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation und analytische Berechnung im Vergleich

3. Ergebnisse und Diskussion

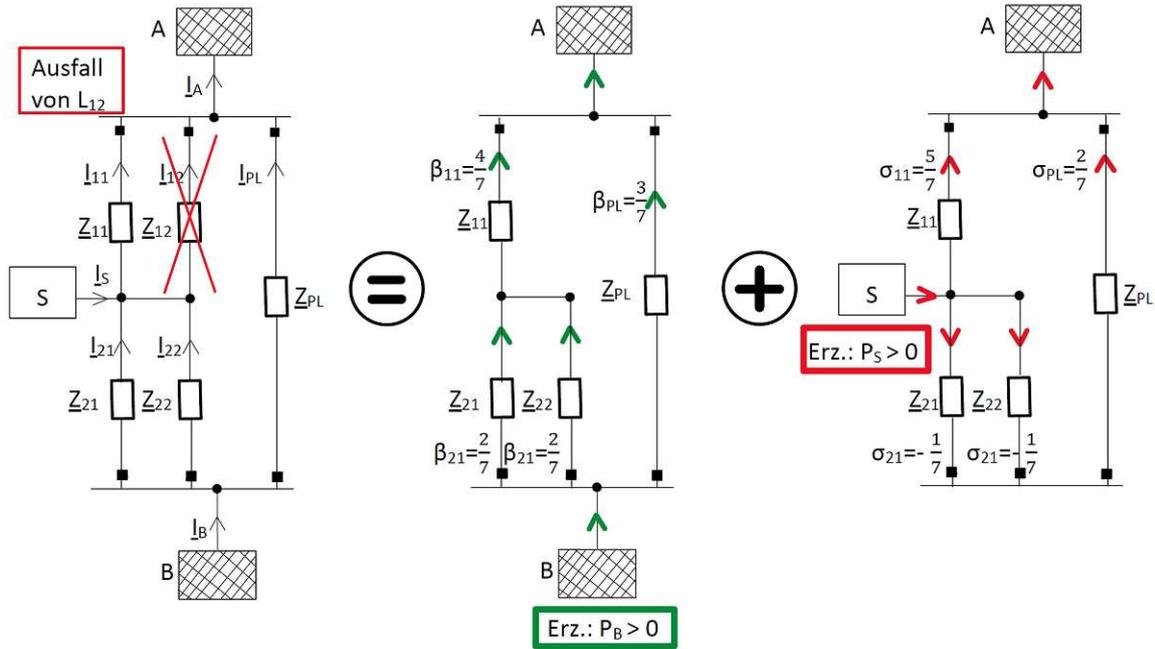


(a) $P_B < 0$ und $P_S < 0$

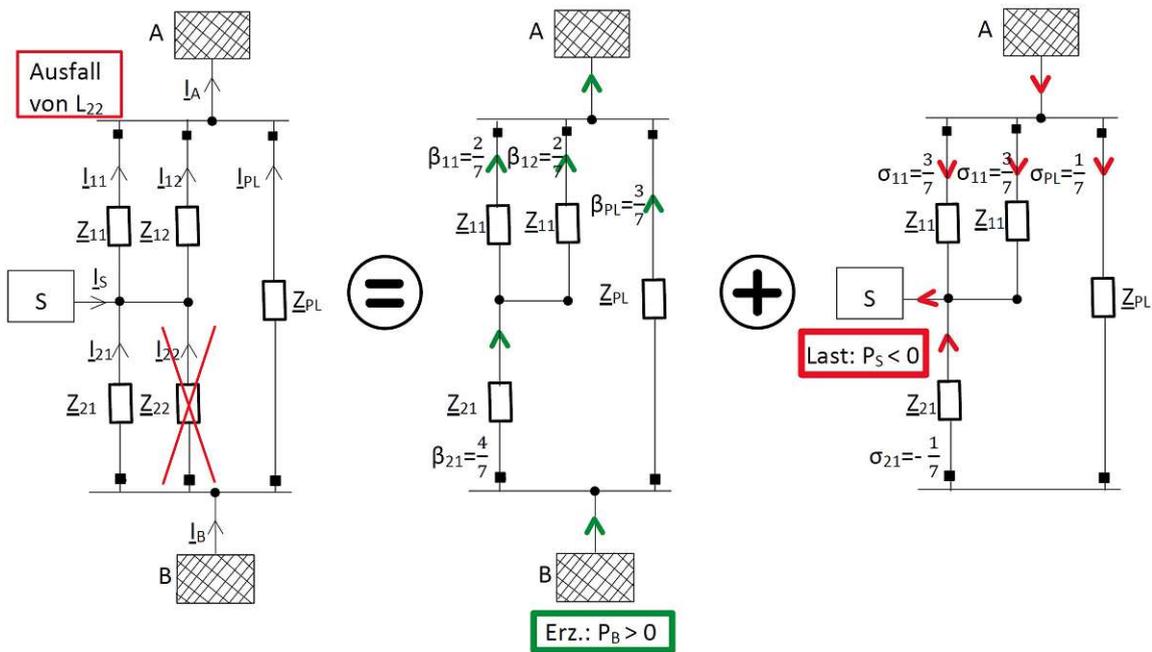


(b) $P_B < 0$ und $P_S > 0$

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise



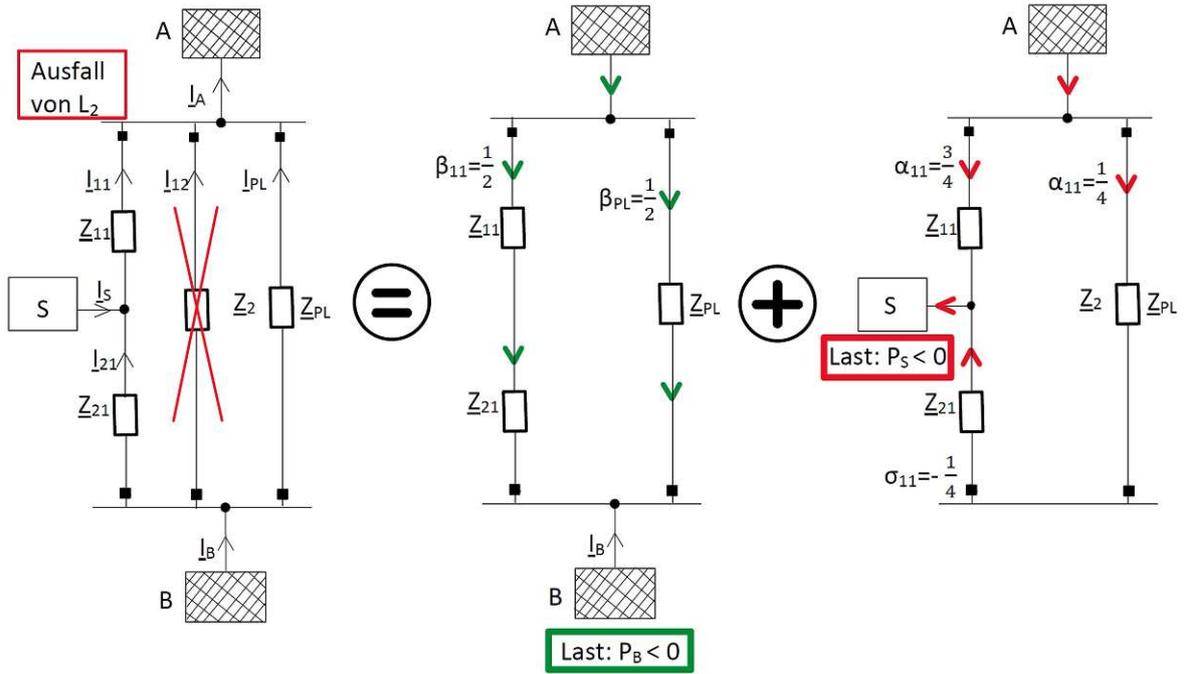
(c) $P_B > 0$ und $P_S > 0$



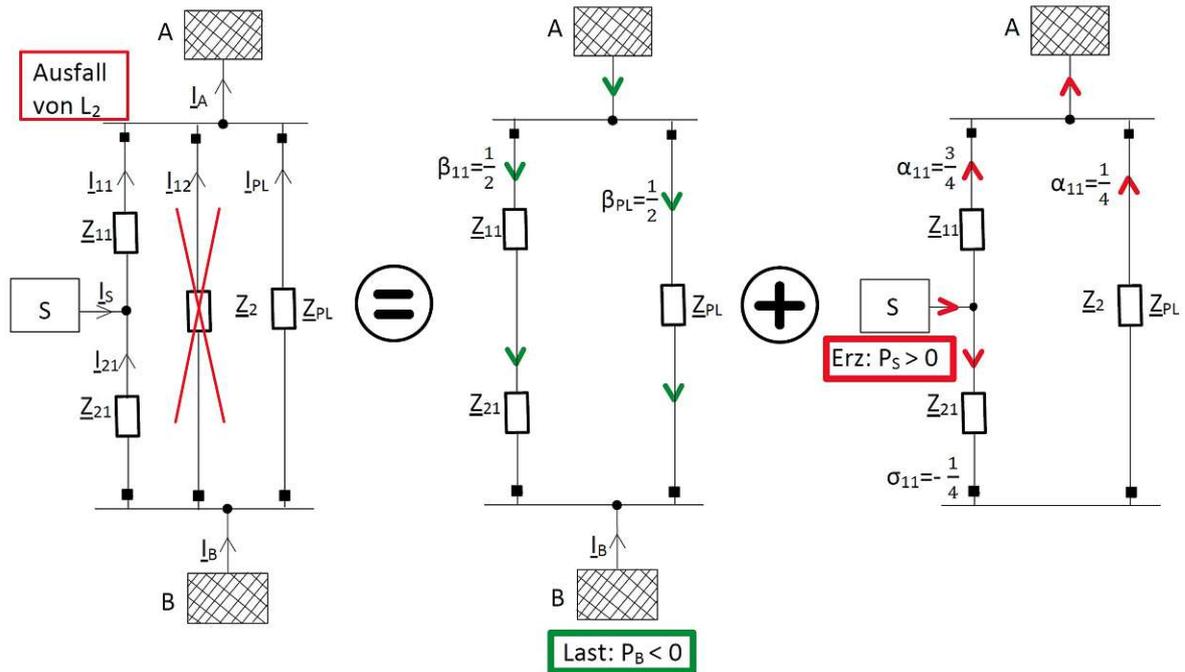
(d) $P_B > 0$ und $P_S < 0$

Abbildung 3.23.: (n-1)-Worst-Case, Vollenstschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz $A \leftrightarrow B = 100$ km

3. Ergebnisse und Diskussion



(a) $P_B < 0$ und $P_S < 0$



(b) $P_B < 0$ und $P_S > 0$

(n-1)-Übertragungskapazität laut analytischer Berechnung

Tabelle 3.22 präsentiert die Übertragungskapazität $P_{B,max}$ pro Leitungsabschnitt für fünf Vermaschungsgrade, vier Last- und Erzeugungssituationen P_S sowie diverse Ausfallsituationen. Die Tabelle basiert auf den zuvor aufgelisteten Kombinationen der Parameter β und σ . Farblich hervorgehobene Zellen kennzeichnen jenen als Engpass fürs gesamte System fungierenden Leitungsabschnitt, der bei dem angegebenen $P_{B,max}$ -Wert eine Auslastung von 100 % erreicht.

Die Spalte „ $\Delta/\%$ “ zeigt die relative Abweichung der $P_{B,max}$ -Werte zwischen Voll- und Einfacheinschleifung für die engpassbildenden Leitungsabschnitte, berechnet nach Gleichung 3.65. Das Ergebnis unterscheidet sich klar von jenem des (n-0)-Falls, vgl. Tabelle 3.7. Die Einfacheinschleifung weist nun eine höhere Übertragungskapazität auf als die Volleinschleifung, erkennbar am negativen Vorzeichen. Der Vorteil der Einfacheinschleifung verstärkt sich mit zunehmendem Vermaschungsgrad. Dieses Verhalten lässt sich wie folgt erklären:

Bei der Einfacheinschleifung führt der ungünstigste Leitungsausfall zu einer höheren Gesamtimpedanz ($Z_{11} + Z_{21}$) als bei der Volleinschleifung ($Z_{11} + (Z_{21} || Z_{22})$). Folglich weicht bei der Einfacheinschleifung ein größerer Anteil des Lastflusses P_B ins vermaschte Netz aus, was die Belastung der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} reduziert.

Einfluss des Vermaschungsgrades:

Mit steigendem Vermaschungsgrad sinkt die Impedanz des vermaschten Netzes, während die Impedanz der direkten Übertragungsstrecke konstant bleibt. Das macht den Weg über das vermaschte Netz attraktiver, wobei der Effekt bei der Einfacheinschleifung aufgrund der höheren Impedanz stärker ausgeprägt ist.

Bei einem Vermaschungsgrad von $V = 50\%$, also im Grenzfall eines nicht vermaschten Netzes, verhalten sich die Voll- und die Einfacheinschleifung hinsichtlich der maximalen Übertragungskapazität im (n-1)-Worst-Case laut analytischer Berechnung identisch. Dies spiegelt sich unter anderem an den Parametern β und σ wider:

$$\beta_{11, \text{Voll.}} = \beta_{11, \text{Ein.}} = 1 \quad (3.99a)$$

$$\sigma_{11, \text{Voll.}} = \sigma_{11, \text{Ein.}} = 1 \quad (3.99b)$$

$$\beta_{21, \text{Voll.}} = \beta_{21, \text{Ein.}} = 1 \quad (3.99c)$$

$$\sigma_{21, \text{Voll.}} = \sigma_{21, \text{Ein.}} = 0 \quad (3.99d)$$

Aus Platzgründen wurden die zugehörigen Übertragungskapazitäten für $V = 50\%$ in Tabelle 3.22 nicht angeführt. Sie lassen sich jedoch bei Bedarf anhand der angegebenen Parameter β und σ berechnen.

Einfluss von P_S :

Aus Tabelle 3.22 lässt sich zudem entnehmen, dass der positive Effekt der Einfacheinschleifung bei angebundenen Anlagen mit geringer Leistung P_S ausgeprägter ist als bei leistungsstärkeren Anlagen. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass lediglich der Transportfluss zwischen **A** und **B** über das vermaschte Netz ausweichen kann¹,

¹Wie bereits erläutert, geschieht dies bei der Einfacheinschleifung in stärkerem Maße als bei der Volleinschleifung.

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

jedoch nicht jener von der Schaltanlage benötigte Wirkleistungsfluss P_S . Mit zunehmendem P_S nimmt der Anteil $\alpha \cdot P_S$ im Vergleich zu $\beta \cdot P_B$ zu, wodurch der Einfluss der „Wirkleistungs-Ausweichung“ über das vermaschte Netz verringert wird. Infolgedessen wird der positive Effekt der Einfacheinschleifung zunehmend abgeschwächt.

Da der Vorteil der Einfacheinschleifung mit steigendem P_S abnimmt, stellt sich die Frage, ob ein $P_S > P_{S,Umkehr}$ existiert, ab dem die Volleinschleifung hinsichtlich der maximalen Übertragungskapazität $P_{B,max}$ im Vorteil ist. Zur Beantwortung dieser Frage wird Gleichung 3.65 gleich null gesetzt. Es ergibt sich:

$$P_{B,max, Voll.} \stackrel{!}{=} P_{B,max, Ein.} \quad (3.100)$$

Wird $P_{B,max}$ gemäß Gleichung 3.63 unter Berücksichtigung von $A_{\pm} = \pm 1$ in Gleichung 3.100 eingesetzt, folgt

$$\frac{\pm S_r - \sigma_{Voll.} \cdot P_S}{\beta_{Voll.}} = \frac{\pm S_r - \sigma_{Ein.} \cdot P_S}{\beta_{Ein.}} \quad (3.101)$$

Auflösen nach P_S ergibt

$$P_S = \pm S_r \cdot \frac{\beta_{Voll.} - \beta_{Ein.}}{\sigma_{Ein.} \cdot \beta_{Voll.} - \sigma_{Voll.} \cdot \beta_{Ein.}} \quad (3.102)$$

Werden die in Tabelle 3.19 angegebenen Parameter für die rot hinterlegten (n-1)-Worst-Case-Fälle in die Gleichung eingesetzt, ergibt sich eine bemerkenswerte Beobachtung: Für sämtliche untersuchten Vermaschungsgrade im Bereich von $V = 55\%$ bis $V = 80\%$ ergibt sich derselbe Wert $P_{S,Umkehr}$, und zwar

$$P_{S,Umkehr} = \mp 2632,7 \text{ MW} \quad \text{bei } A_{\pm} = \pm 1 \quad (3.103)$$

Dieser Wert entspricht exakt der in Gleichung 3.8 definierten Bemessungsscheinleistung S_r .

Der gleichbleibende Wert des Umkehrpunkts bei unterschiedlichen Vermaschungsgraden liefert einen wichtigen Hinweis. Liegt die Leistung P_S unterhalb von $P_{S,Umkehr}$, bietet die Einfacheinschleifung einen Vorteil hinsichtlich maximaler Übertragungskapazität. Überschreitet P_S jedoch diesen Wert, ist die Volleinschleifung die bessere Option hinsichtlich maximaler Übertragungskapazität.

(n-1)-Übertragungskapazität laut PowerFactory-Simulation

Die in Tabelle 3.23 dargestellten Übertragungskapazitäten basieren – im Unterschied zu Tabelle 3.22 – auf Ergebnissen der PowerFactory-Simulation. Zusätzlich zu den bereits bekannten Vermaschungsgraden wurde auch jener Fall untersucht, dass kein vermaschtes Netz, also in meinem Fall keine Parallel-Leitung, existiert. Eingetragen wurden, wie bereits von Tabelle 3.8 bekannt, ausschließlich die Übertragungskapazitäten jener Leitungsabschnitte, die als Engpass fungieren.

3. Ergebnisse und Diskussion

$V = 55\%$ bis $V = 80\%$:

Die simulierten Übertragungskapazitäten fallen erwartungsgemäß geringer aus als die zuvor analytisch abgeschätzten Werte (vgl. Erklärungstext zu Tabelle 3.8).

Die Unterschiede zwischen Voll- und Einfacheinschleifung ($|\Delta/\%|$) sind auch in den simulierten Werten erkennbar, jedoch etwas geringer ausgeprägt als in den analytisch berechneten Ergebnissen. Das bedeutet, dass der Vorteil der Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung für alle betrachteten Last-/Einspeisesituationen sowie Vermaschungsgrade geringer ausfällt, als es die rein rechnerische Betrachtung vermuten lässt.

Zur Erklärung wurde eine Lastflussberechnung für die in Tabelle 3.25 identifizierten $P_{B,max}$ -Werte bei $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$ durchgeführt. In diesem Szenario bildet der obere Leitungsabschnitt L_{11} (bzw. L_{11} und L_{12} bei der Volleinschleifung) den Engpass. Die resultierenden Wirk- und Blindleistungsflüsse sind in Tabelle 3.20 dargestellt:

Tabelle 3.21.: Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} bei $P_{B,max,Voll.} = -2900$ MW, $P_{B,max,Ein.} = -3150$ MW, $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$

	$P/\text{MW}, Q/\text{MVA}, A/\%$									
	Volleinschleifung					Einfacheinschleifung				
	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A
L_{11}	2544	611	-2520	-63	100	2512	716	-2489	-170	100
L_{21}	660	31	-659	-13	26	1289	170	-1282	-35	52

Die Blindleistung am Anfang des Leitungsabschnitts L_{21} fällt bei der Einfacheinschleifung mit 170 MVA höher aus als bei der Volleinschleifung mit 31 MVA. Grund dafür ist die höhere Auslastung des Abschnitts L_{21} bei der Einfacheinschleifung (52 % gegenüber 26 % bei der Volleinschleifung), wodurch auch mehr Blindleistung verbraucht wird ($\Delta Q_{Ein.} = 135$ MVA $>$ $\Delta Q_{Voll.} = 18$ MVA). Dieser Blindleistungsbedarf muss über den oberen Leitungsabschnitt, welcher den Engpass darstellt und somit für die Bestimmung der maximalen Übertragungskapazität relevant ist, transportiert werden.

Da dieser zusätzliche Blindleistungsfluss in der analytischen Berechnung nicht berücksichtigt wird, kommt es zu einer Abweichung zwischen der analytisch berechneten und der simulierten maximalen Übertragungskapazität. Aufgrund der höheren Blindleistungsflüsse fällt diese Abweichung bei der Einfacheinschleifung größer aus als bei der Volleinschleifung. Deshalb ist der tatsächliche (simulierte) Vorteil der Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung – dargestellt in der Spalte „ $\Delta/\%$ “ in Tabelle 3.23 – etwas schwächer ausgeprägt es als die analytische Abschätzung (Spalte „ $\Delta/\%$ “ in Tabelle 3.22) vermuten lässt.

Grenzfall $V = 50\%$:

Im Sonderfall eines nicht vermaschten Netzes zeigt sich ein anderes Verhalten:

Im Gegensatz zur analytischen Berechnung, bei der gemäß Gleichung 3.99 für Voll- und Einfacheinschleifung die gleiche Übertragungskapazität ermittelt wird, zeigt die Simulation Unterschiede, und zwar zugunsten der Volleinschleifung.

Je nach Höhe von P_S schneidet sie besser ab als die Einfacheinschleifung, nämlich um bis zu 4,7% (vgl. Spalte „ $\Delta\%$ “ in Tabelle 3.8). Dies steht im klaren Gegensatz zu den anderen untersuchten Vermaschungsgraden, bei denen die Einfacheinschleifung stets vorteilhafter ist.

Zwischen $V = 50\%$ und $V = 55\%$ – vermutlich näher an 55% – liegt somit ein Vermaschungsgrad, bei dem sich beide Topologien hinsichtlich der maximalen Übertragungskapazität gleich verhalten.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt im Blindleistungsfluss, der in der analytischen Berechnung nicht berücksichtigt wurde. Wie bereits in Tabelle 3.20 gezeigt, ist dieser im (n-1)-Worst-Case bei der Einfacheinschleifung höher als bei der Volleinschleifung. Dieser zusätzliche Blindleistungsfluss führt dazu, dass der reale – also simulierte – Vorteil der Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung auch bei den Vermaschungsgraden von $V = 55\%$ bis $V = 80\%$ geringer ausfällt als rechnerisch angenommen. Im Grenzfall $V = 50\%$ verschiebt sich das Bild weiter: Da der theoretische Vorteil der Einfacheinschleifung bezüglich des reinen Wirkleistungstransports bei $V = 0\%$ liegt, bewirkt die durch den höheren Blindleistungsanteil verursachte Reduktion dieses Vorteils nun eine Umkehr der Verhältnisse – zugunsten der Volleinschleifung.

Einfluss von P_S :

In der analytischen Berechnung ergab sich der Umkehrpunkt der Einspeiseleistung bei $P_{S,Umkehr} = \mp S_r = \mp 2632,7 \text{ MW}$. Dieser theoretische Wert markiert jenen Punkt, ab dem die Volleinschleifung gegenüber der Einfacheinschleifung hinsichtlich der maximal übertragbaren Wirkleistung $P_{B,max}$ im Vorteil ist.

Da der theoretische Ansatz jedoch den Blindleistungsfluss über die Leitung vernachlässigt, ist zu erwarten, dass der reale (simulierte) Umkehrpunkt $P_{S,Umkehr,real}$ betragsmäßig etwas darunter liegt. Zur quantitativen Bestimmung dieses Werts wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Für die beispielhafte (n-1)-Lastflusssituation $P_S < 0$ und $P_B < 0$ und Ausfall der Leitung L_{12} (wodurch L_{11} zum Engpass wird), wird eine Lastflussrechnung durchgeführt.
2. Dabei wird P_S in Schritten von 5 MW und P_B in Schritten von 10 MW variiert.
3. Für jeden diskreten P_S -Wert wird der zugehörige Wert von $P_{B,max}$ bestimmt – also jener P_B -Wert, bei dem L_{11} zu exakt 100% ausgelastet ist.
4. Die so ermittelten Wertepaare ($P_{B,max}$ in Abhängigkeit von P_S) werden für beide Topologien (Voll- und Einfacheinschleifung) grafisch dargestellt.
5. Der Schnittpunkt der beiden Kennlinien markiert den gesuchten Wert $P_{S,Umkehr,real}$.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.25 für den kleinsten ($V = 54,5\%$) sowie den größten ($V = 80\%$) Vermaschungsgrad dargestellt. Dabei lassen sich zunächst zwei bekannte Zusammenhänge bestätigen, die bereits in vorangegangenen Kapiteln diskutiert wurden:

- Die maximale Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ steigt mit dem Vermaschungsgrad.
- Der Unterschied zwischen den Topologien nimmt bei höherem Vermaschungsgrad zu – sichtbar an der zunehmenden Distanz zwischen den beiden Kennlinien (Achtung: unterschiedliche Skalierung der y -Achsen).

Erstmalig ergeben sich aus der grafischen Auswertung folgende Erkenntnisse:

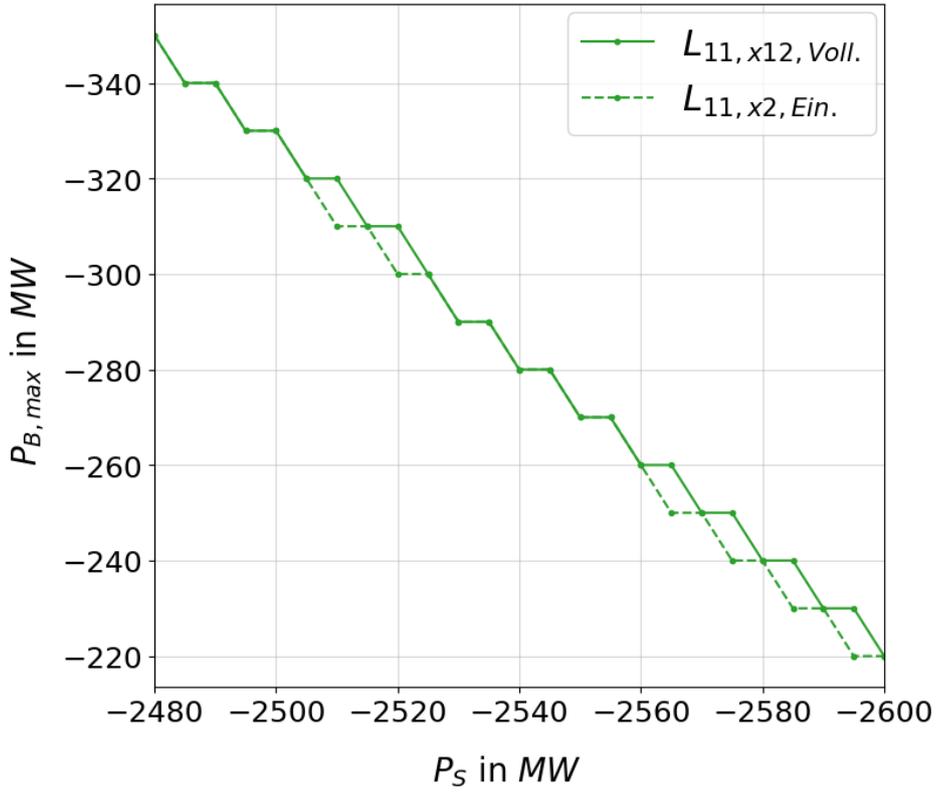
- Der reale Umkehrpunkt liegt bei etwa $P_{S,\text{Umkehr,real}} \approx -2540\text{ MW}$ und damit betragsmäßig unterhalb des theoretischen Werts von $-2632,7\text{ MW}$.
- Der Wert zeigt sich weitgehend unabhängig vom Vermaschungsgrad – eine systematische Tendenz ist nicht erkennbar.

Das in Abbildung 3.25a beobachtbare Zusammenfallen der beiden Kennlinien im Bereich von $P_S = -2480\text{ MW}$ bis -2555 MW ist ein Artefakt der diskreten Schrittweiten bei der Simulation. Tatsächlich existiert – abgesehen von einem symmetrischen Gegenstück für $P_S > 0$ – nur ein eindeutiger Schnittpunkt, der den realen Umkehrwert markiert.

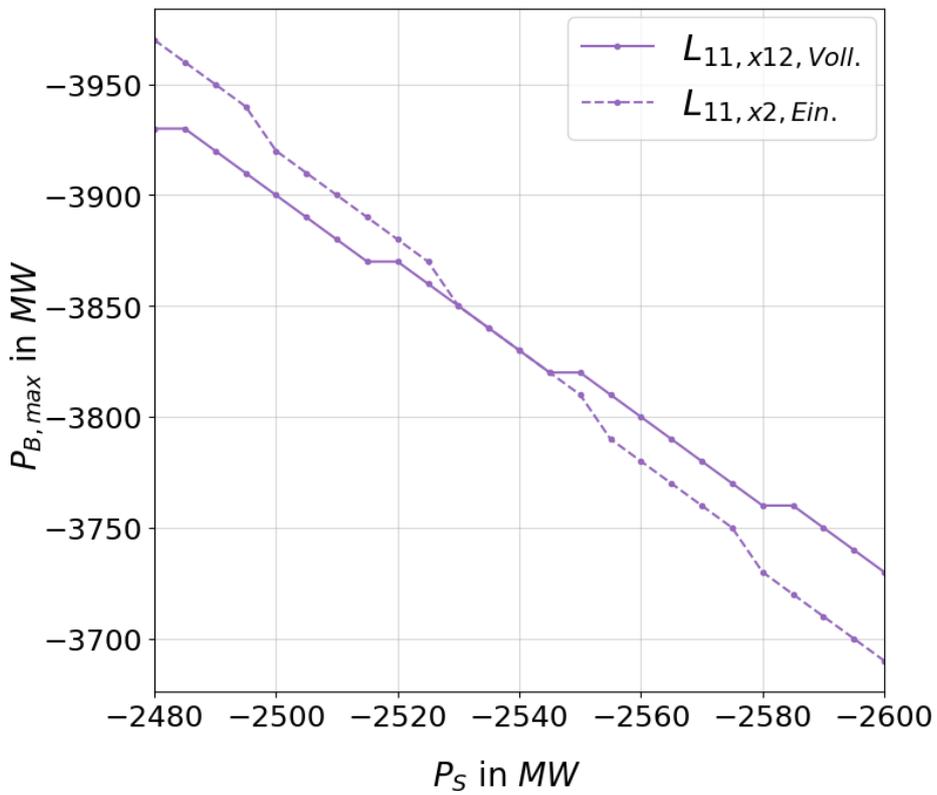
Dass $P_{S,\text{Umkehr,real}}$ unterhalb von S_r liegt, lässt sich mit dem zusätzlichen Blindleistungsbedarf der Leitungen erklären. Dieser steigt mit der Leitungslänge zwischen den Netzknoten **A** und **B**. In Netzen mit längeren Übertragungstrecken (z.B. $> 100\text{ km}$) wäre folglich ein noch niedrigerer $P_{S,\text{Umkehr,real}}$ zu erwarten.

Die Schlussfolgerung deckt sich mit jener aus der analytischen Berechnung: Liegt die Einspeiseleistung P_S unterhalb des realen Umkehrpunkts $P_{S,\text{Umkehr,real}}$, ist die Einfacheinschleifung vorteilhaft hinsichtlich der maximal übertragbaren Wirkleistung. Wird dieser Wert hingegen überschritten, bietet die Volleinschleifung die höhere Übertragungskapazität.

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise



(a) $V = 54,5\%$



(b) $V = 80\%$

Abbildung 3.25.: Bestimmung von $P_{S,Umkehr,real}$: bei ≈ -2540 MW

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.22.: Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-1)-Fall laut händischer Berechnung

P_S /MW	Volleinschleifung				Einfachschleifung				$\Delta/\%$
	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{11}	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{21}	
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{20}{23}$	$\beta = \frac{10}{23}$	$\beta = \frac{20}{23}$	$\beta = \frac{10}{23}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$V =$
500 km	$\sigma = \frac{21}{23}$	$\sigma = -\frac{1}{23}$	$\sigma = -\frac{1}{23}$	$\sigma = \frac{11}{23}$	$\sigma = \frac{11}{12}$	$\sigma = -\frac{1}{12}$	$\sigma = \frac{5}{6}$	$\sigma = 0$	55%
-1200	4288	5935	2968	7375	4479	3039	4359	3159	-2,4
-400	3448	6015	3008	6495	3599	3119	3559	3159	-3,7
400	2608	6095	3048	5615	2719	3199	2759	3159	-4,3
1200	1768	6175	3088	4735	1839	3279	1959	3159	-4,1
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{8}{11}$	$\beta = \frac{4}{11}$	$\beta = \frac{8}{11}$	$\beta = \frac{4}{11}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$V =$
200 km	$\sigma = \frac{9}{11}$	$\sigma = -\frac{1}{11}$	$\sigma = -\frac{1}{11}$	$\sigma = \frac{5}{11}$	$\sigma = \frac{5}{6}$	$\sigma = -\frac{1}{6}$	$\sigma = \frac{2}{3}$	$\sigma = 0$	60%
-1200	4970	6940	3470	8740	5449	3649	5149	3949	-5,2
-400	4070	7140	3570	7740	4449	3849	4349	3949	-7,8
400	3170	7340	3670	6740	3449	4049	3549	3949	-8,8
1200	2270	7540	3770	5740	2449	4249	2749	3949	-7,9
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{4}{7}$	$\beta = \frac{2}{7}$	$\beta = \frac{4}{7}$	$\beta = \frac{2}{7}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$V =$
100 km	$\sigma = \frac{5}{7}$	$\sigma = -\frac{1}{7}$	$\sigma = -\frac{1}{7}$	$\sigma = \frac{3}{7}$	$\sigma = \frac{3}{4}$	$\sigma = -\frac{1}{4}$	$\sigma = \frac{1}{2}$	$\sigma = 0$	67%
-1200	6107	8615	4307	11015	7065	4665	6465	5265	-8,3
-400	5107	9015	4507	9815	5865	5065	5665	5265	-12,4
400	4107	9415	4707	8615	4665	5465	4865	5265	-13,6
1200	3107	9815	4907	7415	3465	5865	4065	5265	-11,5
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{2}{5}$	$\beta = \frac{1}{5}$	$\beta = \frac{2}{5}$	$\beta = \frac{1}{5}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$V =$
50 km	$\sigma = \frac{3}{5}$	$\sigma = -\frac{1}{5}$	$\sigma = -\frac{1}{5}$	$\sigma = \frac{2}{5}$	$\sigma = \frac{2}{3}$	$\sigma = -\frac{1}{3}$	$\sigma = \frac{1}{3}$	$\sigma = 0$	75%
-1200	8382	11964	5982	15564	10298	6698	9098	7898	-12,0
-400	7182	12764	6382	13964	8698	7498	8298	7898	-17,5
400	5982	13564	6782	12364	7098	8298	7498	7898	-18,7
1200	4782	14364	7182	10764	5498	9098	6698	7898	-15,0
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{4}{13}$	$\beta = \frac{2}{13}$	$\beta = \frac{4}{13}$	$\beta = \frac{2}{13}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$V =$
33,3 km	$\sigma = \frac{7}{13}$	$\sigma = -\frac{3}{13}$	$\sigma = -\frac{3}{13}$	$\sigma = \frac{5}{13}$	$\sigma = \frac{5}{8}$	$\sigma = -\frac{3}{8}$	$\sigma = \frac{1}{4}$	$\sigma = 0$	80%
-1200	10656	15313	7656	20113	13531	8731	11731	10531	-14,0
-400	9256	16513	8256	18113	11531	9931	10931	10531	-20,3
400	7856	17713	8856	16113	9531	11131	10131	10531	-21,3
1200	6456	18913	9456	14113	7531	12331	9331	10531	-16,6

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Tabelle 3.23.: Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-1)-Fall laut Simulation

V, L_{PL}	P_S /MW	Volleinschleifung				Einfacheinschleifung				Δ /%
		L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{11}	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{21}	
50 %	-1200			2500			2400		4,0	
	-400			2500			2400		4,0	
$\rightarrow \infty$	400	2150				2050			4,7	
	1200	1350				1350			0,0	
55 %	-1200			2850			2850		0,0	
	-400			2900			2900		0,0	
500 km	400	2550				2550			0,0	
	1200	1700				1750			-2,9	
60 %	-1200			3350			3450		-3	
	-400			3400			3550		-4,4	
200 km	400	3050				3200			-4,9	
	1200	2200				2350			-6,8	
67 %	-1200			4150			4400		-6,0	
	-400			4300			4700		-9,3	
100 km	400	3950				4350			-10,1	
	1200	3000				3300			-10,0	
75 %	-1200			5750			6300		-9,6	
	-400			6100			6950		-13,9	
50 km	400	5750				6600			-14,8	
	1200	4600				5200			-13,0	
80 %	-1200			7400			8250		-11,5	
	-400			7900			9200		-16,5	
33,3 km	400	7550				8850			-17,2	
	1200	6250				7150			-14,4	

Tabelle 3.24 gleicht Tabelle 3.22, mit dem entscheidenden Unterschied, dass der Lastfluss P_B nun in umgekehrter Richtung verläuft, also von **A** nach **B**. Analog zum (n-0)-Fall zeigen die Ergebnisse ein symmetrisches Verhalten betreffend der Übertragungskapazität, wobei sich die Symmetrie anhand Gleichung 3.66 und 3.67 beschreiben lässt. Die in Tabelle 3.25 dargestellten Übertragungskapazitäten beruhen auf Ergebnissen der PowerFactory-Simulation; die Tabelle wurde analog zu Tabelle 3.23 erstellt. Wie bereits vom vorhergehenden Lastfluss-Szenario bekannt, zeigen sich auch hier im Vergleich zu den analytisch ermittelten Werten erwartungsgemäß niedrigere Übertragungskapazitäten. Die Tendenz, dass die Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung höhere Übertragungskapazitäten aufweist, bleibt bestehen, fällt jedoch nach wie vor weniger stark aus als in der analytischen Abschätzung.

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.24.: Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-1)-Fall laut händischer Berechnung

P_S /MW	Volleinschleifung				Einfacheinschleifung				Δ /%
	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{11}	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{21}	
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{20}{23}$	$\beta = \frac{10}{23}$	$\beta = \frac{20}{23}$	$\beta = \frac{10}{23}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$\beta = \frac{5}{6}$	$V =$
500 km	$\sigma = \frac{21}{23}$	$\sigma = -\frac{1}{23}$	$\sigma = -\frac{1}{23}$	$\sigma = \frac{11}{23}$	$\sigma = \frac{11}{12}$	$\sigma = -\frac{1}{12}$	$\sigma = \frac{5}{6}$	$\sigma = 0$	55%
-1200	-1768	-6175	-3088	-4735	-1839	-3279	-2749	-3159	-4,1
-400	-2608	-6095	-3048	-5615	-2719	-3199	-3549	-3159	-4,3
400	-3448	-6015	-3008	-6495	-3599	-3119	-4349	-3159	-3,7
1200	-4288	-5935	-2968	-7375	-4479	-3039	-5149	-3159	-2,4
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{8}{11}$	$\beta = \frac{4}{11}$	$\beta = \frac{8}{11}$	$\beta = \frac{4}{11}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\beta = \frac{2}{3}$	$V =$
200 km	$\sigma = \frac{9}{11}$	$\sigma = -\frac{1}{11}$	$\sigma = -\frac{1}{11}$	$\sigma = \frac{5}{11}$	$\sigma = \frac{5}{6}$	$\sigma = -\frac{1}{6}$	$\sigma = \frac{2}{3}$	$\sigma = 0$	60%
-1200	-2270	-7540	-3770	-5740	-2449	-4249	-2749	-3949	-7,9
-400	-3170	-7340	-3670	-6740	-3449	-4049	-3549	-3949	-8,8
400	-4070	-7140	-3570	-7740	-4449	-3849	-4349	-3949	-7,8
1200	-4970	-6940	-3470	-8740	-5449	-3649	-5149	-3949	-5,2
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{4}{7}$	$\beta = \frac{2}{7}$	$\beta = \frac{4}{7}$	$\beta = \frac{2}{7}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$\beta = \frac{1}{2}$	$V =$
100 km	$\sigma = \frac{5}{7}$	$\sigma = -\frac{1}{7}$	$\sigma = -\frac{1}{7}$	$\sigma = \frac{3}{7}$	$\sigma = \frac{3}{4}$	$\sigma = -\frac{1}{4}$	$\sigma = \frac{1}{2}$	$\sigma = 0$	67%
-1200	-3107	-9815	-4907	-7415	-3465	-5865	-4065	-5265	-11,5
-400	-4107	-9415	-4707	-8615	-4665	-5465	-4865	-5265	-13,6
400	-5107	-9015	-4507	-9815	-5865	-5065	-5665	-5265	-12,4
1200	-6107	-8615	-4307	-11015	-7065	-4665	-6465	-5265	-8,3
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{2}{5}$	$\beta = \frac{1}{5}$	$\beta = \frac{2}{5}$	$\beta = \frac{1}{5}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$\beta = \frac{1}{3}$	$V =$
50 km	$\sigma = \frac{3}{5}$	$\sigma = -\frac{1}{5}$	$\sigma = -\frac{1}{5}$	$\sigma = \frac{2}{5}$	$\sigma = \frac{2}{3}$	$\sigma = -\frac{1}{3}$	$\sigma = \frac{1}{3}$	$\sigma = 0$	75%
-1200	-4782	-14364	-7182	-10764	-5498	-9098	-6698	-7898	-15,0
-400	-5982	-13564	-6782	-12364	-7098	-8298	-7498	-7898	-18,7
400	-7182	-12764	-6382	-13964	-8698	-7498	-8298	-7898	-17,5
1200	-8382	-11964	-5982	-15564	-10298	-6698	-9098	-7898	-12,0
$L_{PL} =$	$\beta = \frac{4}{13}$	$\beta = \frac{2}{13}$	$\beta = \frac{4}{13}$	$\beta = \frac{2}{13}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$\beta = \frac{1}{4}$	$V =$
33,3 km	$\sigma = \frac{7}{13}$	$\sigma = -\frac{3}{13}$	$\sigma = -\frac{3}{13}$	$\sigma = \frac{5}{13}$	$\sigma = \frac{5}{8}$	$\sigma = -\frac{3}{8}$	$\sigma = \frac{1}{4}$	$\sigma = 0$	80%
-1200	-6456	-18913	-9456	-14113	-7531	-12331	-9331	-10531	-16,6
-400	-7856	-17713	-8856	-16113	-9531	-11131	-10131	-10531	-21,3
400	-9256	-16513	-8256	-18113	-11531	-9931	-10931	-10531	-20,3
1200	-10656	-15313	-7656	-20113	-13531	-8731	-11731	-10531	-14,0

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Tabelle 3.25.: Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-1)-Fall laut Simulation

V, L_{PL}	P_S /MW	Volleinschleifung				Einfacheinschleifung				Δ /%
		L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{11}	L_{11}	L_{21}	L_{21}	L_{21}	
50 %	-1200	-1300				-1300				0,0
	-400	-2050				-2000				2,4
	400			-2450			-2300			6,1
	→ ∞	1200			-2450		-2300			6,1
55 %	-1200	-1650				-1700				-3,0
	-400	-2450				-2450				0,0
	400			-2800			-2800			0,0
	500 km	1200			-2800		-2800			0,0
60 %	-1200	-2100				-2250				-7,1
	-400	-2950				-3100				-5,1
	400			-3350			-3450			-3,0
	200 km	1200			-3250		-3300			-1,5
67 %	-1200	-2900				-3150				-8,6
	-400	-3850				-4150				-7,8
	400			-4200			-4500			-7,1
	100 km	1200			-4050		-4250			-4,9
75 %	-1200	-4450				-5000				-12,4
	-400	-5600				-6350				-13,4
	400			-5950			-6700			-12,6
	50 km	1200			-5650		-6050			-8,0
80 %	-1200	-6100				-6900				-14,1
	-400	-7350				-8500				-15,7
	400			-7700			-8850			-14,9
	33,3 km	1200			-7200		-8000			-11,1

3.2.7. Veränderung der Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ bei Verschiebung der Schaltanlage

Wie bereits in Abschnitt 3.1.6 für den (n-0)-Fall erläutert, wird die optimale Position der Anbindung von Last oder Erzeugung zwischen **A** und **B** maßgeblich von zwei entgegengesetzten Effekten bestimmt: Einerseits ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Wirkleistungsflusses auf die einzelnen Leitungsabschnitte anzustreben, andererseits soll die Blindleistungsaufnahme dieser Abschnitte möglichst gering bleiben. Diese Ziele stehen insofern im Widerspruch, als eine Erhöhung der Impedanz des am stärksten belasteten Abschnitts – durch Veränderung der Position der Schaltanlage – zwar den Wirkleistungsfluss über diesen Abschnitt reduziert (vermaschtes Netz vorausgesetzt), gleichzeitig jedoch dessen Blindleistungsaufnahme erhöht. Letzteres wirkt sich wiederum negativ auf die Leitungsauslastung aus.

Um den tatsächlichen Einfluss der Position der Schaltanlage aufzuzeigen, muss eine Simulation durchgeführt werden.

In Abbildung 3.26 ist für den Fall, dass sowohl die Schaltanlage **S** als auch der Netzknoten **B** Wirkleistung abgeben ($P_S > 0$ und $P_B > 0$), der ungünstigste (n-1)-Leitungsausfall dargestellt. Unter Beibehaltung dieser Netzsituation wird nun die Veränderung der maximalen Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ ² bei Verschiebung der Schaltanlage **S** ausgehend von ihrer Mittelposition bei

$$\text{Distanz von S ab A} = \frac{1}{2} \cdot \text{Distanz von A-B} = 50 \text{ km} \quad (3.104)$$

in Richtung des Netzknotens **B**, der sich bei

$$\text{Distanz von S ab A} = 100 \text{ km} \quad (3.105)$$

befindet, untersucht. Die durchgezogene blaue Linie in Abbildung 3.26 beschreibt die Veränderung der maximalen Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ für die Volleinschleifung, die gestrichelte Linie für die Einfacheinschleifung. Bei einer Distanz von $S = 50$ km entsprechen die maximalen Übertragungskapazitäten den in Abbildung 3.18, rechter unterer Subplot, hervorgehobenen Werten, welche die Schnittpunkte zwischen Auslastungskennlinien und der 100%-Grenze markieren. Bei der Volleinschleifung sind dies $P_{B,\max} = 3000$ MW, bei der Einfacheinschleifung $P_{B,\max} = 3300$ MW. Bei Verschiebung von **S** bleibt $P_{B,\max}$ zunächst konstant, bis bei einer gewissen Position ein diskreter Sprung auf den nächsthöheren Wert erfolgt (Volleinschleifung: 53 km, Einfacheinschleifung: 56 km). Durch weitere Verschiebung resultiert eine Treppenfunktion. Die Sprungstellen sind auf die diskrete Schrittweite der Wirkleistungserhöhung von $\Delta P_B = 50$ MW zurückzuführen, vgl. Kapitel 2.4. Im Gegensatz zu den Abbildungen 3.14, 3.15, 3.16 und 3.18 erscheinen diese Sprünge ausgeprägter, da die y-Achse in Abbildung 3.26 auf den Bereich von 3000 MW bis 3300 MW beschränkt ist, während die x-Achse in den anderen Abbildungen von -5000 MW bis 5000 MW reicht und somit einzelne ΔP_B -Schritte dort visuell weniger auffallen.

Die Ursache für die Zunahme der maximalen Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ – sowohl

²Hier ist L_{11} zu exakt 100 % ausgelastet.

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise

bei der Volleinschleifung als auch bei der Einfacheinschleifung – bei Verschiebung der Schaltanlage in Richtung des Netzknotens **B** ist die Zunahme der Impedanz von Leitung L_{11} . Dadurch verlagert sich ein zunehmender Anteil der von der Schaltanlage eingespeisten Wirkleistung auf den Pfad über das vermaschte Netz. Infolgedessen erreicht die Leitung L_{11} ihre vollständige Auslastung erst bei höheren P_B -Werten. Dieses Verhalten entspricht dem in Abschnitt 3.1.6 für den (n-0)-Fall beschriebenen Verhalten. Die Erhöhung der Blindleistungsaufnahme der Leitung ist zwar vorhanden, dieser Effekt ist aber im (n-1)-Fall deutlich schwächer ausgeprägt als die positive Wirkung der Wirkleistungsfluss-Umverteilung.

Um die durch das diskrete ΔP_B verursachten Sprünge in den Kennlinien zu glätten, wurde neben den blauen Datenpunkten eine Regressionskurve dargestellt. Da die polynomiale Regression zweiten Grades im Vergleich zur linearen Regression höhere R^2 -Werte erzielte (vgl. Tabelle 3.26), wurde diese Regression gewählt. Die bessere Anpassung der polynomialen Regression gegenüber der linearen verdeutlicht, dass mit zunehmender Distanz von **S** die Blindleistungsaufnahme der Leitung steigt und dadurch der positive Effekt einer höheren Übertragungskapazität zunehmend kompensiert wird. Folglich vergrößert sich mit wachsender Distanz die Abweichung der Kennlinie von einem linearen Verlauf, der ausschließlich durch den Wirkleistungsfluss bestimmt wäre.

Tabelle 3.26.: R^2 -Werte der linearen Regression sowie der polynomialen Regression

	Volleinschleifung	Einfacheinschleifung
Lineare Regression	0,989	0,977
Polynomielle Regression (Grad 2)	0,994	0,980

Ein Vergleich der beiden Netzvarianten hinsichtlich $P_{B,\max}$ bei zunehmender Distanz von **S** zeigt: Während in der Mittelstellung die Einfacheinschleifung eine um 300 MW höhere Übertragungskapazität aufweist, nimmt bei Verschieben der Schaltanlage in Richtung **B** die Übertragungskapazität im Falle der Volleinschleifung stärker zu, verdeutlicht durch die höhere Steigung der durchgezogenen Kurve im Vergleich zur gestrichelten Kurve in Abbildung 3.26. Der Grund hierfür ist die zusätzlich vorhandene Leitung L_{22} , die im Fall der Volleinschleifung die Impedanz des unteren Übertragungspfades ($L_{21} \parallel L_{22} + L_{PL}$) reduziert. Im Vergleich dazu ist die Impedanz des entsprechenden Pfades bei der Einfacheinschleifung ($L_{21} + L_{PL}$) höher, was zu einer geringeren Entlastung von L_{11} führt. Dies resultiert in einer steileren Zunahme der Übertragungskapazität bei der Volleinschleifung.

Der zunächst bestehende Unterschied von $\Delta P_{B,\max} = 300$ MW verringert sich daher kontinuierlich, bis bei einer Distanz von 100 km – also wenn die Schaltanlage direkt im Netzknoten **B** angeschlossen ist – kein Unterschied mehr zwischen den beiden Topologien besteht. Dass der Ausgleich Abbildung 3.26 bereits bei 95 km eintritt, ist ein Artefakt der diskreten P_B -Schritte, wie eingangs erläutert.

3. Ergebnisse und Diskussion

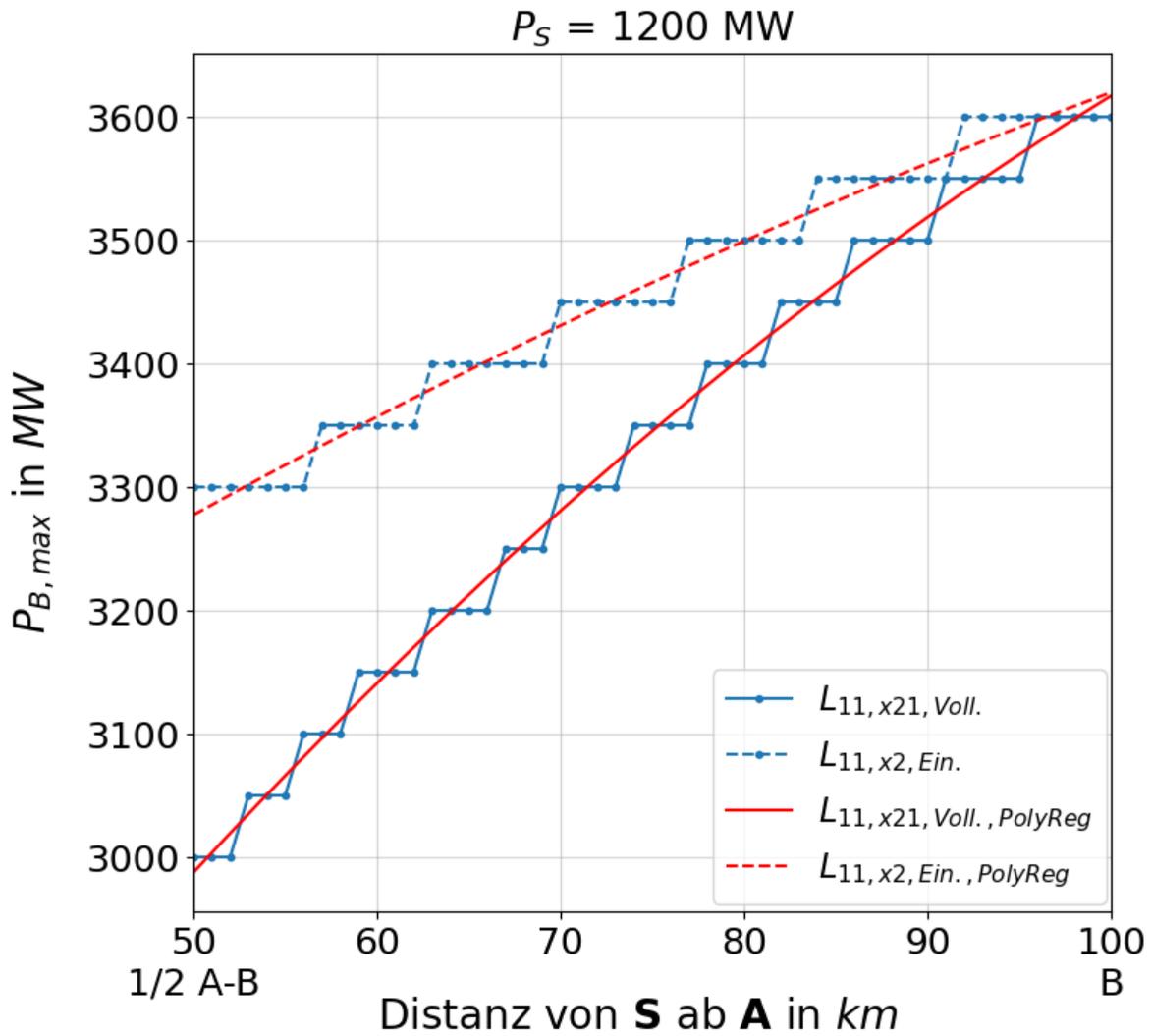
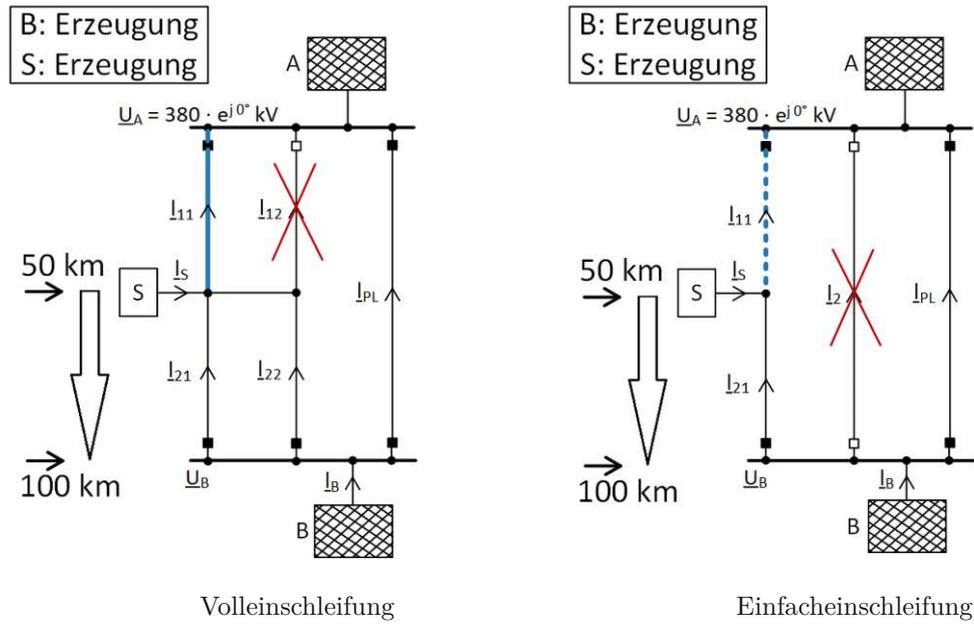


Abbildung 3.26.: Veränderung der Übertragungskapazität $P_{B,max}$ bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung eines Netzknotens; $V = 66,7\%$

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

In Abbildung 3.27 ist für dieselbe Netzsituation ($P_S > 0$ und $P_B > 0$) in Kombination mit dem ungünstigsten (n-1)-Leitungsausfall die Veränderung der maximalen Übertragungskapazität $P_{B,\max}$ bei Verschiebung der Schaltanlage **S** in Richtung des Netzknotens **B** für verschiedene Vermaschungsgrade dargestellt. Wie bereits bekannt, beschreiben die durchgezogenen Kennlinien die Volleinschleifung, die gestrichelten Kennlinien die Einfacheinschleifung. Die beiden blauen Kennlinien ($V = 66,7\%$) entsprechen exakt den Kennlinien in Abbildung 3.26.

Die Änderung der Vermaschung zeigt folgende Effekte: Mit zunehmender Vermaschung steigt die maximal übertragbare Leistung $P_{B,\max}$ bei gleicher Position der Schaltanlage an. Dieses Verhalten ist bereits aus Abbildung 3.20 und Tabelle 3.23 bekannt. Ebenso nimmt mit wachsender Vermaschung der Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung zu, was sich ebenfalls in den genannten Abbildungen und Tabellen zeigt.

Wird die Schaltanlage in Richtung des Netzknotens **B** verschoben, steigen die Übertragungskapazitäten an – bei der Volleinschleifung stärker als bei der Einfacheinschleifung, und bei höherem Vermaschungsgrad steiler als bei geringerem. Der Grund dafür liegt in der Veränderung der Impedanz des unteren Pfades: Bei hoher Vermaschung bewirkt eine Verschiebung um eine Strecke Δs eine deutlich stärkere Reduktion der Impedanz des unteren Pfades (Volleinschleifung: $Z_{21} \parallel Z_{22} + Z_{PL}$, Einfacheinschleifung: $Z_{21} + Z_{PL}$) als bei geringer Vermaschung. Dadurch fließt bei höherem Vermaschungsgrad bei Verschiebung um Δs ein größerer Anteil der Leistung über den unteren Pfad. Der obere Pfad L_{11} , der den Engpass darstellt, erreicht folglich erst bei höheren $P_{B,\max}$ -Werten seine volle Auslastung von 100 %.

3. Ergebnisse und Diskussion

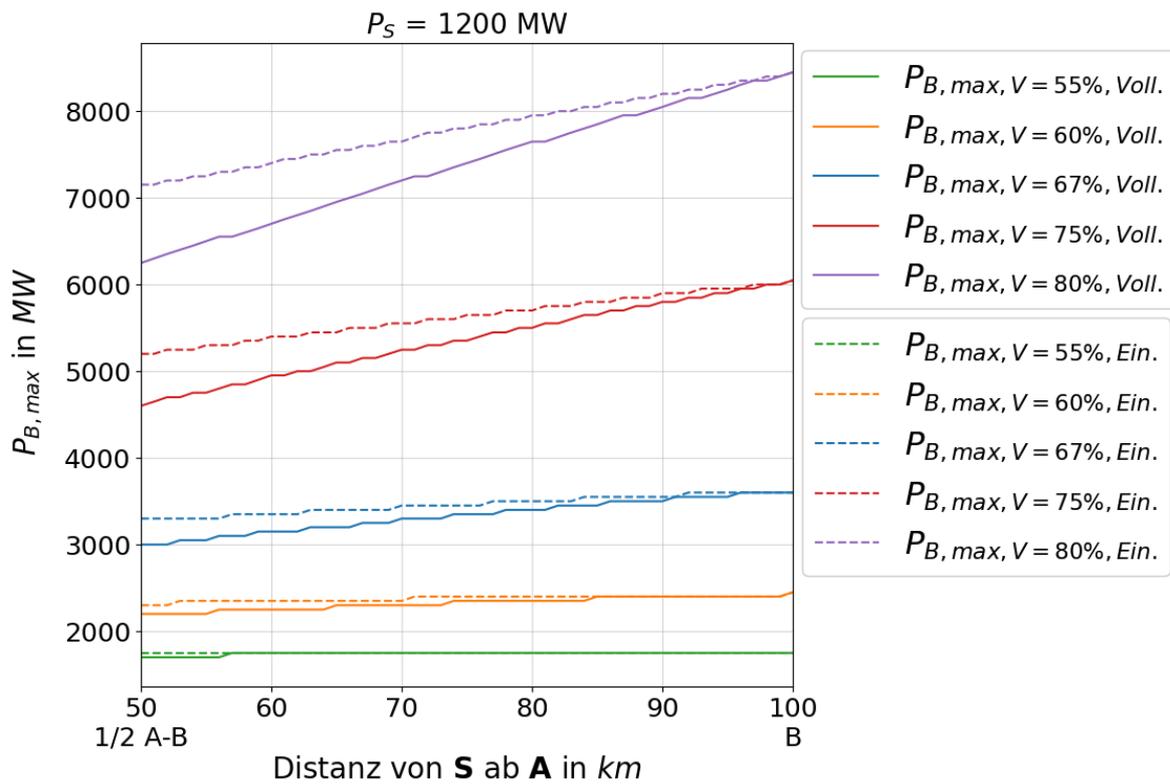
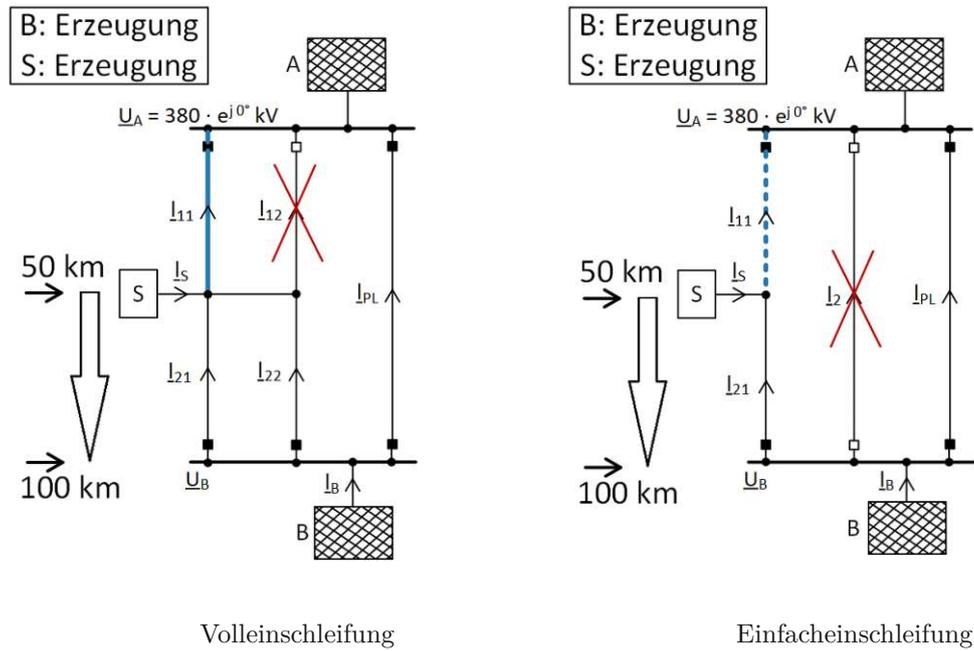


Abbildung 3.27.: Veränderung der Übertragungskapazität $P_{B,max}$ für unterschiedliche Vermaschungsgrade

3.2.8. Anwendung der analytischen Berechnung in praktischen Planungsaufgaben

Die maximale Übertragungskapazität im (n-0)-Fall allein ist nicht maßgeblich, da die Auslegung durch den ungünstigsten (n-1)-Fall bestimmt wird. Um im Fehlerfall – also beim Ausfall eines Betriebsmittels – eine Überlastung zu vermeiden, darf auch im ungestörten Netz nur so viel Wirkleistung übertragen werden, wie es der kritischste (n-1)-Fall zulässt.

Die analytische (n-1)-Berechnung eignet sich als erste Abschätzung für die maximal mögliche Transportkapazität, basierend auf:

- Art der Anbindung (Voll- oder Einfacheinschleifung³),
- gewünschter Anbindungsleistung P_S ,
- gegebenem Vermaschungsgrad V ,
- Distanz zwischen den Netzknoten **A** und **B**.

Ist die maximal mögliche Transportkapazität für die jeweilige Anbindungsart ermittelt, kann daraus der potenzielle Vorteil der Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung im Stil von Gleichung 3.65 abgeschätzt werden, sowie der Vorteil von der konventionellen Anbindung im Vergleich zur Anbindung zwischen zwei Netzknoten.

Systematische Fehler der Näherung

Zwei Fehlerquellen sind bei der Anwendung der analytischen Berechnung zu beachten:

- Überschätzung der Übertragungskapazität:
Die analytisch berechnete maximale Übertragungskapazität fällt höher aus als die tatsächliche, sowohl bei Voll- als auch bei Einfacheinschleifung. Die maximale Übertragungskapazität wird also bei beiden Varianten bei der analytischen Berechnung überschätzt.
- Überschätzung des Vorteils der Einfacheinschleifung:
Aufgrund des höheren Blindleistungsflusses über den Engpass bildenden Leitungsabschnitt bei der Einfacheinschleifung (vgl. Tabelle 3.20 und Tabelle 3.21) wird der Vorteil gegenüber der Volleinschleifung systematisch überschätzt. Die Differenz zwischen tatsächlichem und analytisch berechnetem Vorteil ist in Tabelle 3.27 dargestellt.

³Bezüglich der maximal möglichen Transportkapazität gilt bei Vernachlässigung der Stichenbindungs-länge: Einfacheinschleifung $\hat{=}$ Stich $\hat{=}$ Doppelstich

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.27.: Differenz zwischen berechnetem und simuliertem Vorteil der Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung betreffend der maximalen Übertragungskapazität für $P_B > 0$ im kritischsten (n-1)-Fall

V, L_{PL}	P_S/MW	$(\Delta_{calc} - \Delta_{PF})/\%$
55 %	-1200	-2,4
	-400	-3,7
500 km	400	-4,3
	1200	-1,1
60 %	-1200	-2,2
	-400	-3,4
200 km	400	-3,9
	1200	-1,1
67 %	-1200	-2,3
	-400	-3,1
100 km	400	-3,5
	1200	-1,5
75 %	-1200	-2,4
	-400	-3,6
50 km	400	-3,9
	1200	-1,9
80 %	-1200	-2,5
	-400	-3,8
33,3 km	400	-4,1
	1200	-2,2

Ein Blick auf Tabelle 3.27 zeigt, dass der Fehler weitgehend unabhängig vom Veranschlagungsgrad ist – geringe Abweichungen lassen sich durch die diskrete Schrittweite ΔP_B erklären. Allerdings besteht eine Abhängigkeit von der Höhe der Anbindeleistung P_S : Je kleiner P_S , desto größer ist der beobachtete Fehler.

Die Ursache für diese Tendenz lässt sich anhand von Tabelle 3.28 nachvollziehen, wo exemplarisch zwei Lastflussrechnungen dokumentiert sind – für $P_S = -1200$ MW und $P_S = -400$ MW – jeweils in Kombination mit dem entsprechenden simulierten $P_{B,max}$. Der Engpass wird in diesem Szenario durch den Leitungsabschnitt L_{11} gebildet. Da dieser Abschnitt in allen vier Kombinationen aus P_S und $P_{B,max}$ auf 100 % ausgelastet ist, ergibt sich auch ein nahezu identischer Blindleistungsbedarf $\Delta Q_{11} = Q_{11,A} - Q_{11,E}$. Die kleinen Abweichungen resultieren lediglich aus der diskreten Schrittweite von ΔP_B . Der wesentliche Unterschied liegt im unteren Leitungsabschnitt L_{21} : Bei $P_S = -400$ MW ist dieser deutlich stärker ausgelastet als bei $P_S = -1200$ MW. Der Grund: Bei kleinerem P_S kann eine höhere maximale Übertragungskapazität $P_{B,max}$ realisiert werden, wodurch ein größerer Lastfluss über den unteren Leitungsabschnitt erfolgt – und damit eine höhere Auslastung und ein erhöhter Blindleistungsbedarf entsteht.

3.2. (n-1)-Fall: Auslastung der Leitungstromkreise

Kombiniert man diesen Effekt mit der Tatsache, dass bei Einfacheinschleifung der Blindleistungsfluss über den unteren Abschnitt generell höher ist als bei Volleinschleifung, ergibt sich folgendes Bild: Bei kleinem P_S wird der Vorteil der Einfacheinschleifung stärker überschätzt als bei großem P_S .

In der Praxis ist dieser Effekt allerdings eher von untergeordneter Bedeutung, da Planungsaufgaben meist auf die Anbindung größerer Leistungen abzielen. Werte wie $P_S = -400$ MW sind vergleichsweise gering. Mit zunehmender Anbindeleistung nimmt der Fehler ab – die Genauigkeit der analytischen Abschätzung verbessert sich entsprechend.

Tabelle 3.28.: Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} für $P_S = -1200$ MW bzw. $P_S = -400$ MW und $V = 66,7\%$ für den kritischsten (n-1)-Leitungsausfall

	P/MW, Q/MVA, A/%									
	Volleinschleifung					Einfacheinschleifung				
	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A	P_A	Q_A	P_E	Q_E	A
$P_S = -1200$	$\Rightarrow P_{B,max,Voll.} = -2900$					$\Rightarrow P_{B,max,Ein.} = -3150$				
L_{11}	2544	611	-2520	-63	100	2512	716	-2489	-170	100
L_{21}	660	31	-659	-13	26	1289	170	-1282	-35	52
$P_S = -400$	$\Rightarrow P_{B,max,Voll.} = -3850$					$\Rightarrow P_{B,max,Ein.} = -4150$				
L_{11}	2520	731	-2497	-179	100	2420	935	-2397	-395	100
L_{21}	1048	90	-1044	-8	42	1997	395	-1981	-19	83

Darüber hinaus ist zu beachten, dass beide Fehler (sowohl die Überschätzung der Übertragungskapazität als auch die Überschätzung des Vorteils der Einfacheinschleifung) von der Distanz $\mathbf{A} \leftrightarrow \mathbf{B}$ abhängen: Je länger die Strecke, desto höher ist der Blindleistungsbedarf der Leitungsabschnitte, und desto größer ist auch die Abweichung der analytisch berechneten von der tatsächlichen Transportkapazität. Da dieser Effekt bei der Einfacheinschleifung stärker zum Tragen kommt, wird insbesondere bei längeren Entfernungen ihr Vorteil systematisch überschätzt. Für Distanzen $\mathbf{A} \leftrightarrow \mathbf{B} > 100$ km ist der Fehler dementsprechend größer als jener, der in Tabelle 3.27 dargestellt ist.

Fazit und Vorgehensweise

Die analytische (n-1)-Berechnung ist ein hilfreiches Werkzeug für die erste Planungsabschätzung. Sie liefert eine schnelle, analytisch nachvollziehbare Aussage darüber, ob und in welchem Umfang sich Einfacheinschleifungen gegenüber Volleinschleifungen lohnen – abhängig von P_S , V , Distanz und Einbindungspunkt.

Um die bewusst eingegangene Ungenauigkeit möglichst gering zu halten, sollte zusätzlich zum berechneten Vorteil auch der zu erwartende Fehler abgeschätzt werden. Hierzu bietet Tabelle 3.27 eine gute Orientierung: Für Anbindeleistungen $|P_S| \geq 1200$ MW

3. Ergebnisse und Diskussion

scheint der Fehler unterhalb von 2,5 % zu liegen.

Daher sollte der berechnete Vorteil für $|P_S| \geq 1200$ MW wie folgt korrigiert werden:

$$\Delta_{\text{real}} \approx \Delta_{\text{calc.}} + 2,5 \% \quad (3.106)$$

Nachdem auf Basis der analytischen Berechnung erste Überlegungen angestellt wurden, sollte zur exakten Bewertung selbstverständlich eine weiterführende Analyse mit einer geeigneten Netzberechnungssoftware erfolgen.

3.3. Kurzschluss-Berechnung

3.3.1. IEC 60909

In Abbildung 3.28 ist die Situation dargestellt, dass sich der Kurzschluss in der per Voll-einschleifung (Abbildung 3.28a) beziehungsweise Einfach-einschleifung (Abbildung 3.28b) angeordneten Schaltanlage **S** ereignet. Unter Beibehaltung des Kurzschlussortes wird, in Anlehnung an die in Kapitel 3.2.7 beschriebene Vorgehensweise, die Schaltanlage schrittweise in Richtung des Netzknotens **B** verschoben. Der dabei auftretende Kurzschlussstrom wird auf der y -Achse aufgetragen.

Die durchgezogenen Kurven in der Abbildung repräsentieren den Kurzschlussstrom an der Fehlerstelle. Dieser setzt sich aus drei Komponenten zusammen: dem Beitrag des Netzknotens **A** ($I''_{k,A}$), dargestellt als Strich-Punkt-Linie, dem Beitrag des Netzknotens **B** ($I''_{k,B}$), dargestellt als gestrichelte Linie, sowie dem Beitrag der Schaltanlage **S** ($I''_{k,S}$). Da sich der Kurzschluss in der Schaltanlage selbst ereignet, ist deren Beitrag zum Gesamtstrom unabhängig von der Vermaschung, der Lage der Schaltanlage entlang der Strecke zwischen **A** und **B** sowie der Art der Anbindung (Voll-einschleifung oder Einfach-einschleifung). Folglich ergibt sich für diesen Anteil ein konstanter Wert gemäß

$$I''_{k,S} = I''_{k,S,\max} \quad , \quad (3.107)$$

mit $I''_{k,S,\max}$ laut Gleichung 2.12. Aus diesem Grund wurde die Kennlinie $I''_{k,S}$ in Abbildung 3.28a und Abbildung 3.28b nicht dargestellt.

Die farbliche Kodierung der Kurven entspricht dem in Abbildung 3.27 eingeführten Schema zur Kennzeichnung des Vermaschungsgrades. Befindet sich die Schaltanlage **S** exakt in der Mitte zwischen den Netzknoten **A** und **B**, ist der Kurzschlussstrom an der Fehlerstelle unabhängig vom Vermaschungsgrad. Dieses Verhalten resultiert aus der Festlegung $I''_{k,A,\max} = I''_{k,B,\max}$ in Kombination mit der mittigen Positionierung von **S**, wodurch sich die über die Parallel-Leitung fließenden Beiträge von **A** und von **B** exakt kompensieren – und zwar unabhängig vom Grad der Vermaschung.

An dieser Stelle muss jedoch betont werden, dass diese Beobachtung eine Folge der vereinfachten Netzmodellierung darstellt: In der Realität ist das Netz weitaus komplexer aufgebaut – es existieren nicht nur drei Einspeisepunkte **A**, **B** und **S**, sondern eine Vielzahl dezentraler Einspeiser, die ebenfalls zum Kurzschlussstrom I''_k beitragen. Mit zunehmender Vermaschung sinkt in der Praxis der Netzzinnenwiderstand, was zu einem Anstieg des resultierenden Kurzschlussstroms führt. Die beschriebene Unabhängigkeit des Kurzschlussstroms vom Vermaschungsgrad ist folglich ein Artefakt aus der gewählten Modellierung.

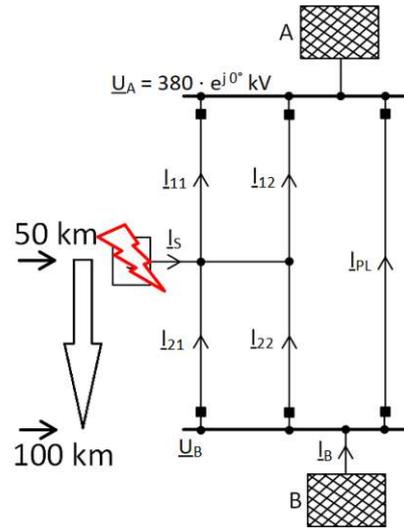
Auch bei einer Positionierung der Schaltanlage direkt am Netzknoten **B** (Distanz = 100 km) ist der Kurzschlussstrom unabhängig von der Vermaschung, weil $I''_{k,B}$ dort seinen Maximalwert gemäß Gleichung 2.15 erreicht.

Mit zunehmender Verschiebung der Schaltanlage in Richtung **B** wird der Einfluss des Vermaschungsgrades jedoch deutlich: Sowohl $I''_{k,A}$ als auch $I''_{k,B}$ nehmen mit steigendem Vermaschungsgrad zu. Bei einer Distanz von 100 km ergibt sich beispielsweise ein Unterschied von

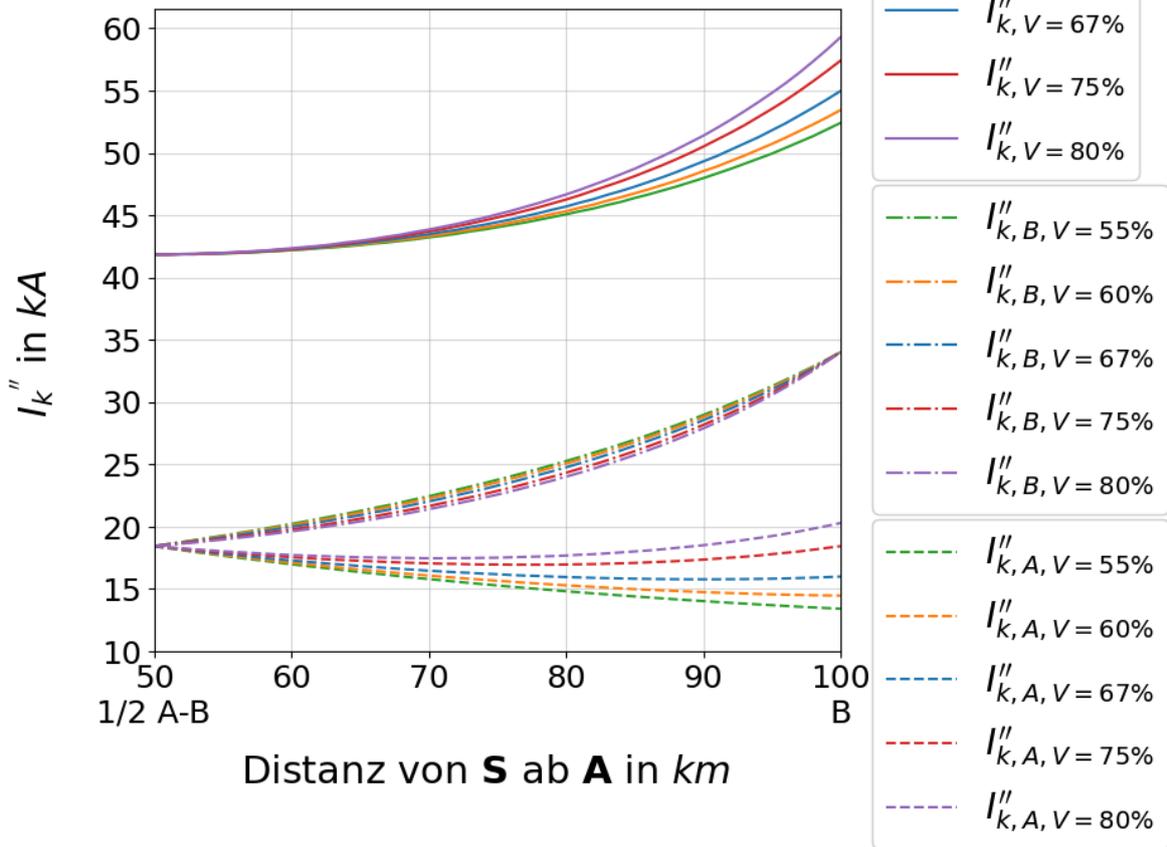
3. Ergebnisse und Diskussion

$$I''_{k,V=80\%,\text{Voll.}} - I''_{k,V=55\%,\text{Voll.}} = 20,29 \text{ kA} - 13,40 \text{ kA} = 6,89 \text{ kA} . \quad (3.108)$$

Diese Zunahme ist auf die mit höherem Vermaschungsgrad verbundene Verringerung der Impedanz der Parallel-Leitung zurückzuführen.

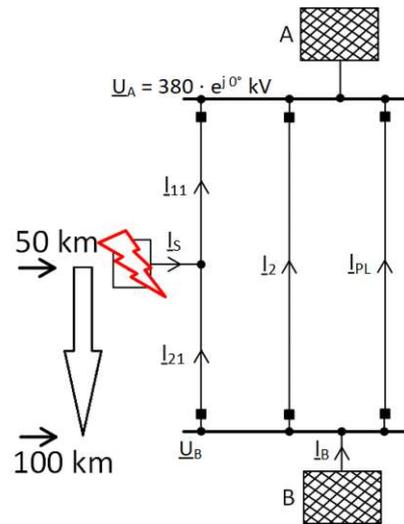


Volleinschleifung
Kurzschluss ereignet sich in S

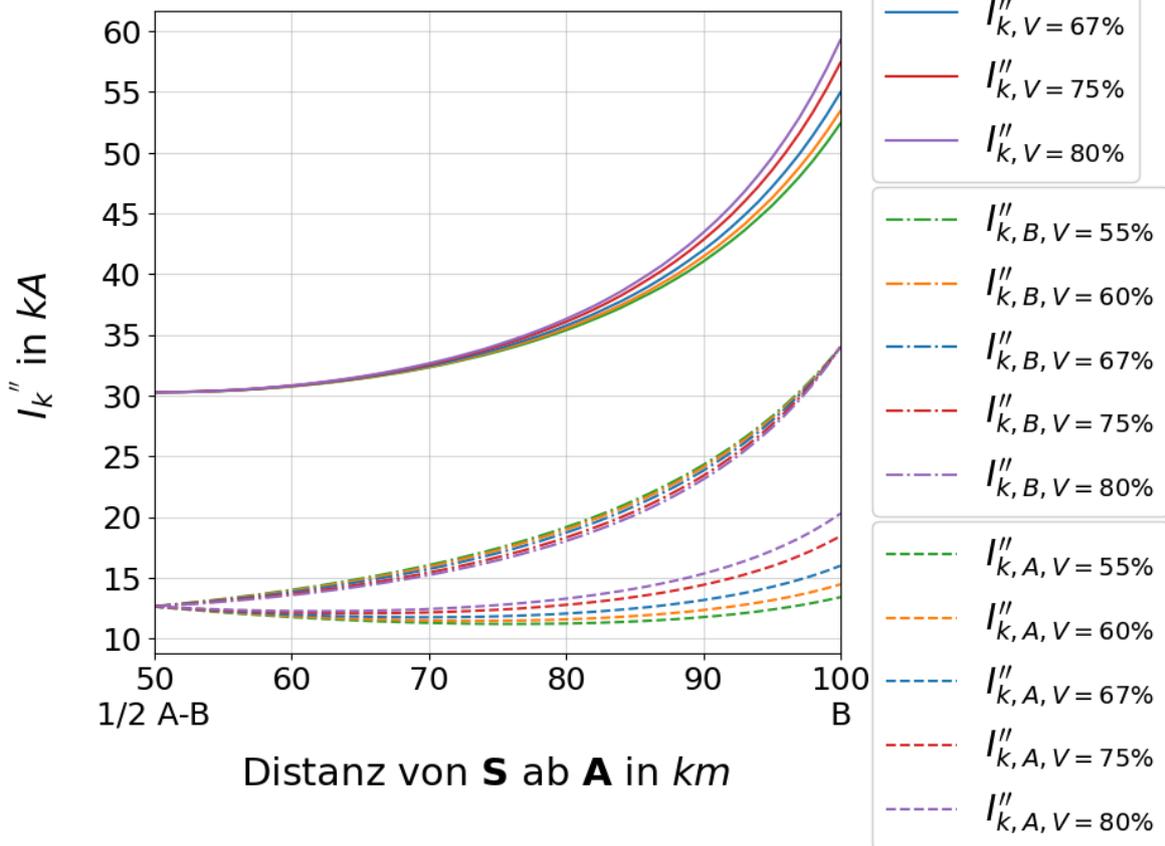


(a) Volleinschleifung

3. Ergebnisse und Diskussion



Einfacheinschleifung
Kurzschluss ereignet sich in S



(b) Einfacheinschleifung

Abbildung 3.28.: Veränderung des Kurzschlussstroms $I_k'' = I_{k,A}'' + I_{k,B}'' + I_{k,S}''$ an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung B

Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung

Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen Voll- und Einfacheinschleifung wurden in Abbildung 3.29 die entsprechenden Kurzschlussstromverläufe gemeinsam dargestellt. Es zeigt sich, dass bei mittiger Positionierung der Schaltanlage (Distanz = 50 km) der Kurzschlussstrom an der Fehlerstelle im Fall der Einfacheinschleifung signifikant niedriger ist als bei der Volleinschleifung:

$$\left. \begin{array}{l} I''_{k,\text{Voll.}} \Big|_{50 \text{ km}} = 41,85 \text{ kA} \\ I''_{k,\text{Ein.}} \Big|_{50 \text{ km}} = 30,27 \text{ kA} \end{array} \right\} \Delta = 11,58 \text{ kA} \quad ,$$

woraus sich eine Differenz von 11,58 kA ergibt. Ursache für diesen Unterschied ist die erhöhte Impedanz zur Fehlerstelle im Fall der Einfacheinschleifung, bedingt durch die lediglich einfach statt voll eingeschleifte Leitung. Dies führt zu einem geringeren Beitrag der Netzknoten **A** und **B** ($I''_{k,A} = I''_{k,B}$ bei 50 km) und damit zu einem kleineren Summenwert $I''_k = I''_{k,A} + I''_{k,B} + I''_{k,S}$.

Aufgrund dieses niedrigeren Ausgangswerts, jedoch identischer Kurzschlussimpedanz bei einer Distanz von **S** = 100 km, steigt der Kurzschlussstrom bei der Einfacheinschleifung mit zunehmender Verschiebung in Richtung **B** stärker an als im Fall der Volleinschleifung. Beide Varianten erreichen bei 100 km dieselben Werte. Der Unterschied zwischen den beiden Anbindungsarten nimmt folglich bei Verschiebung in Richtung **B** zunehmend ab und verschwindet am Netzknoten **B** vollständig.

Bezüglich des Beitrags des Netzknotens **A** ($I''_{k,A}$) ergibt sich im Fall der Volleinschleifung folgendes Bild: Bei einer Verschiebung der Schaltanlage in Richtung **B** nimmt $I''_{k,A}$ zunächst leicht ab – insbesondere bei geringeren Vermaschungsgraden ($V = 54,5\%$, $V = 60\%$, $V = 66,7\%$). Bei höheren Vermaschungen ($V = 75\%$, $V = 80\%$) steigt $I''_{k,A}$ nach Erreichen eines Minimums jedoch wieder an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ab einer bestimmten Distanz die Impedanz des übers vermaschte Netz führenden Pfades $L_{PL} + (L_{21} \parallel L_{22})$ geringer ist als die des direkten Pfades ($L_{11} \parallel L_{12}$) zur Fehlerstelle. Für $L_{PL} = 50 \text{ km} \hat{=} V = 75\%$ (rote Kurve) gilt exemplarisch:

$$I''_{k,A,\text{Voll.}} \Big|_{50 \text{ km}} = I''_{k,A,\text{Voll.}} \Big|_{100 \text{ km}} \quad (3.109)$$

$$I''_{k,A,\text{Voll.}} \Big|_{75 \text{ km}} \hat{=} I''_{k,A,\text{Min.,Voll.}} \quad (3.110)$$

Im Gegensatz dazu beginnt bei der Einfacheinschleifung der Beitrag $I''_{k,A}$ bereits bei kürzeren Distanzen zu steigen – und dies ausgeprägter sowie für alle betrachteten Vermaschungsgrade. In Kombination mit dem steileren Anstieg von $I''_{k,B}$ erklärt dies die insgesamt stärkere Steigung des Kurzschlussstroms I''_k im Fall der Einfacheinschleifung im Vergleich zur Volleinschleifung.

3. Ergebnisse und Diskussion

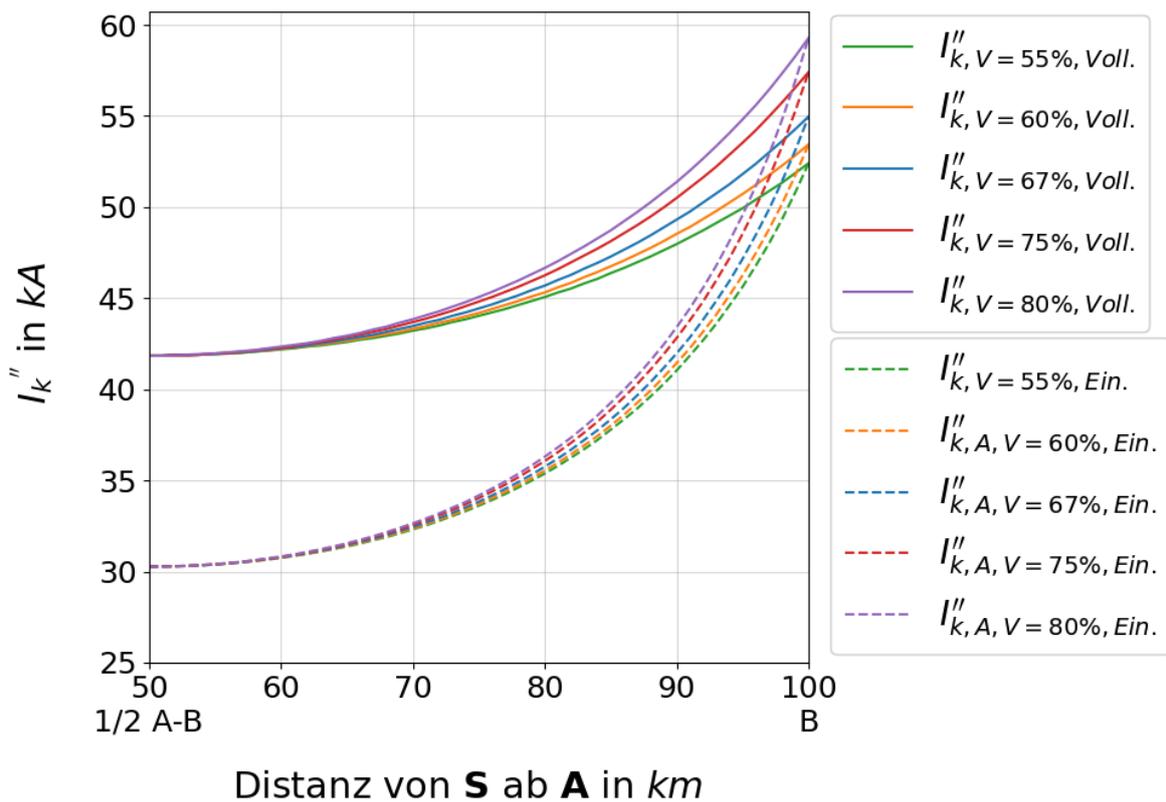
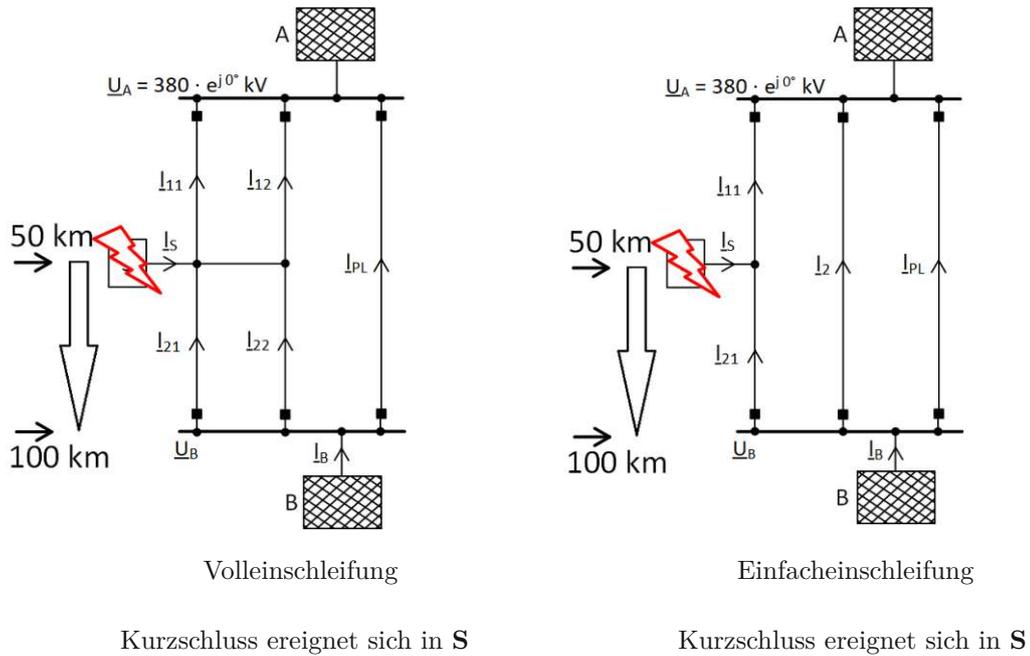


Abbildung 3.29.: Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussstroms $I''_k = I''_{k,A} + I''_{k,B} + I''_{k,S}$ an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung **B**

Verringerung der Distanz zwischen A und B

Insbesondere in städtischen Versorgungsgebieten kann die Entfernung zwischen zwei Netzknoten im Vergleich zur Ausdehnung des vermaschten Netzes sehr gering ausfallen. Um einen derartigen Fall abzubilden, wurde unter Beibehaltung sämtlicher Parameter eine erneute Berechnung durchgeführt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Distanz zwischen den Netzknoten **A** und **B** nun auf lediglich 5 km festgesetzt wurde:

$$\underbrace{L_{11} + L_{21}}_{L_1} = \underbrace{L_{12} + L_{22}}_{L_2} = 5 \text{ km}$$

Die in Tabelle 2.4 definierten fünf verschiedenen Längen der Parallel-Leitung L_{PL} bleiben unverändert, der ursprüngliche Zusammenhang zwischen (n-1)-Kriterium und prozentueller Vermaschung ist jedoch nicht mehr gültig. Die bisherigen Bezeichnungen (z.B. $L_{PL} = 100 \text{ km}$ entspricht einer Vermaschung von $V = 66,7\%$) sollen aber beibehalten werden.

In Abbildung 3.30 ist die Veränderung des Kurzschlussstroms I''_k an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung des Netzknotens **B** für die Voll- (durchgezogene Kennlinie) und Einfacheinschleifung (gestrichelte Kennlinie) dargestellt. Es ist direkt ersichtlich, dass der Kurzschlussstrom aufgrund der deutlich reduzierten Leitungslängen – und damit einhergehend geringeren Impedanzen – zwischen Fehlerstelle und den Netzknoten **A** und **B** deutlich höher ausfällt:

$$\left. \begin{array}{l} I''_{k,\text{Voll.}} \Big|_{50 \text{ km}} = 70,24 \text{ kA} \\ I''_{k,\text{Ein.}} \Big|_{50 \text{ km}} = 67,70 \text{ kA} \end{array} \right\} \Delta = 2,54 \text{ kA}$$

sowie

$$I''_{k,\text{Voll.}} \Big|_{100 \text{ km}} = I''_{k,\text{Ein.}} \Big|_{100 \text{ km}} = 70,52 \text{ kA} \quad . \quad (3.111)$$

Der Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung in der mittigen Position fällt mit lediglich 2,54 kA vergleichsweise sehr gering aus. Mit zunehmender Annäherung der Schaltanlage an den Netzknoten **B** nimmt dieser Unterschied weiter ab und verschwindet vollständig, sobald sich die Schaltanlage direkt am Netzknoten **B** befindet – analog zum Verhalten bei einer Distanz **A–B** von 100 km.

Aufgrund der nun signifikant verkürzten Leitungslänge des direkten Pfades zur Fehlerstelle im Vergleich zum alternativen Pfad über das vermaschte Netz ergibt sich keine nennenswerte Abhängigkeit des Kurzschlussstroms vom Vermaschungsgrad. Infolgedessen fallen die fünf Kennlinien der Volleinschleifung sowie jene der Einfacheinschleifung jeweils zu einer gemeinsamen Kennlinie zusammen.

3. Ergebnisse und Diskussion

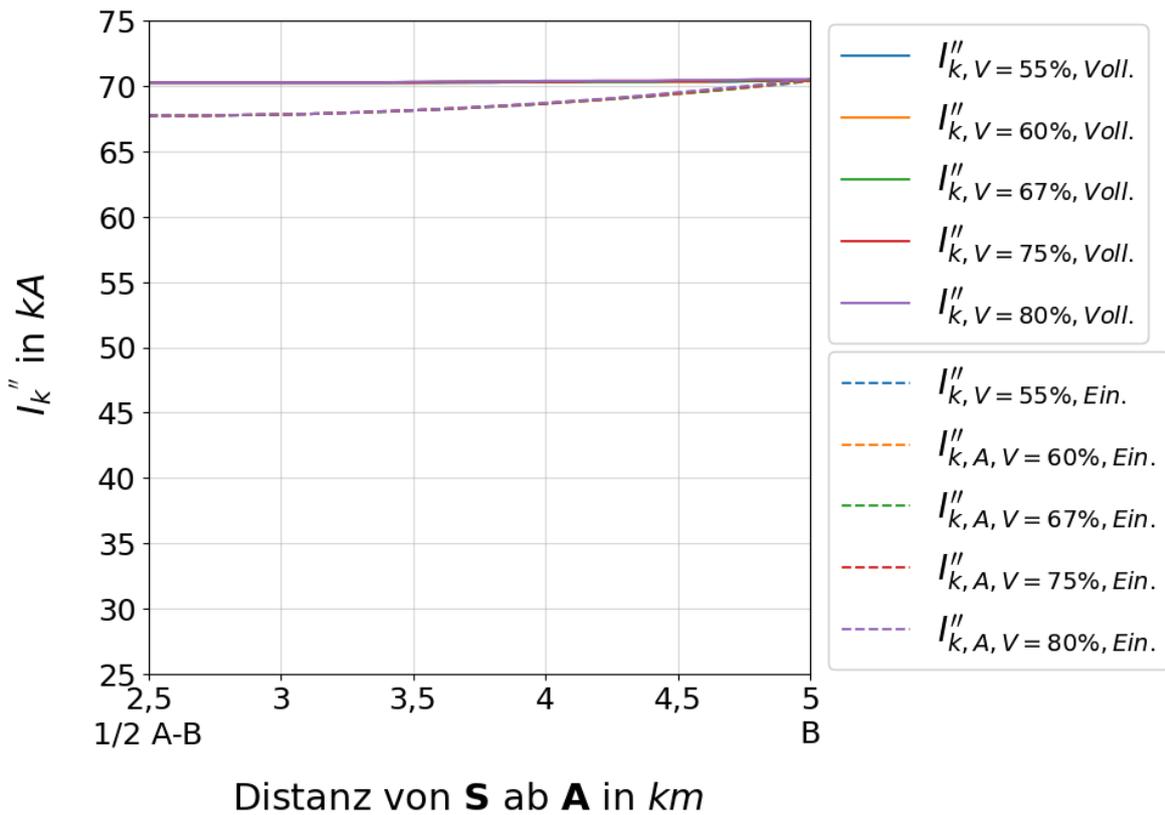
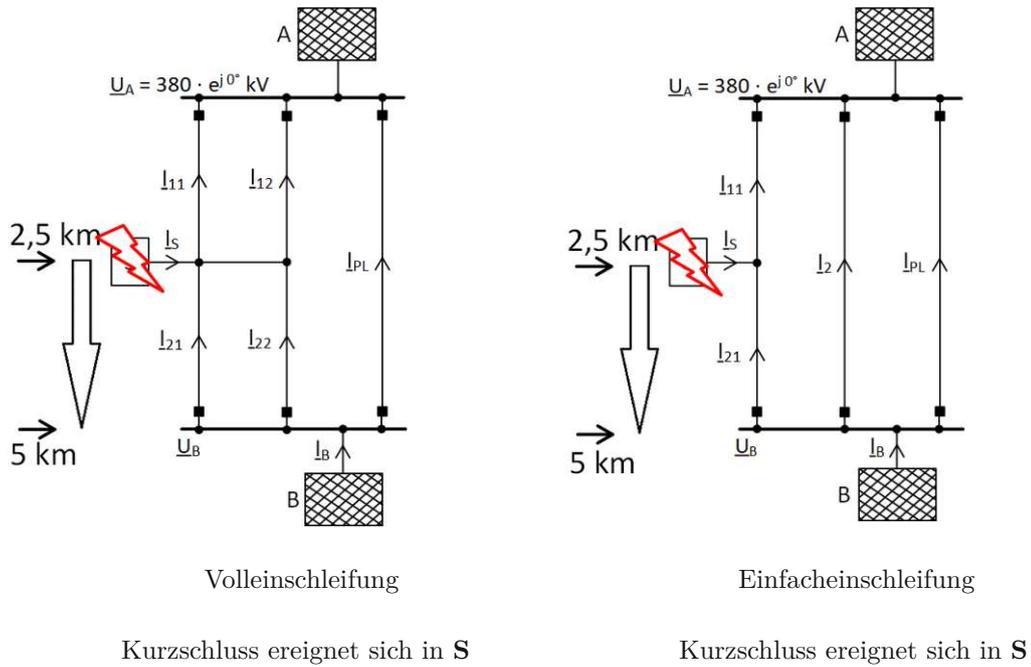


Abbildung 3.30.: Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussstroms I''_k an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung **B**

Kurzschluss im Netzknoten **B**

In diesem Abschnitt wird die Situation betrachtet, dass sich der Kurzschluss nicht in der angeordneten Schaltanlage, sondern direkt im Netzknoten **B** ereignet. Der Abstand zwischen den Netzknoten **A** und **B** beträgt dabei 100 km. Ziel ist es, zu analysieren, inwieweit sich die Art der Anbindung der Schaltanlage (Volleinschleifung vs. Einfacheinschleifung) auf den resultierenden Kurzschlussstrom an der Fehlerstelle auswirkt.

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 3.31 dargestellt. Ein zentrales Ergebnis ist, dass der Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung am Fehlerort **B** vernachlässigbar ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der von der Schaltanlage kommende Beitrag $I''_{k,S}$ im Vergleich zu den übrigen Anteilen relativ klein ausfällt – insbesondere im Vergleich zum konstanten Beitrag des unmittelbar betroffenen Netzknotens **B** sowie dem stark vom Vermaschungsgrad abhängigen Beitrag von **A**.

Während der Kurzschlussbeitrag des Netzknotens **B** unabhängig von der Position der Schaltanlage, vom Vermaschungsgrad sowie von der konkreten Einbindungsart ist, variiert der Kurzschlussbeitrag der Schaltanlage, $I''_{k,S}$, sowohl mit dem Vermaschungsgrad als auch mit ihrer Position. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 3.32 exemplarisch für den minimalen ($V = 54,5\%$) und maximalen ($V = 80\%$) Vermaschungsgrad hervorgehoben. Bei einer Positionierung der Schaltanlage direkt am Fehlerort (d.h. bei $S = 100$ km) erreicht $I''_{k,S}$ gemäß Gleichung 2.12 seinen Maximalwert.

Die Kurzschlussstromwerte bei einer Entfernung von 100 km entsprechen exakt den in Abbildung 3.29 dargestellten Werten, bei denen der Kurzschluss in der Schaltanlage auftritt. Schließlich handelt es sich bei einer Distanz von 100 km aus elektrischer Sicht um denselben Punkt, unabhängig davon, ob der Kurzschluss in der Schaltanlage oder im Netzknoten **B** auftritt.

Der Unterschied des Kurzschlussstroms bei mittiger Position und der Position am Netzknoten **B** verdeutlicht, dass der Kurzschlussstrom am Netzknoten **B** – je nach Vermaschungsgrad um etwa 2–3 kA – höher ausfällt, wenn Erzeugung oder Last unmittelbar im Netzknoten angeordnet werden, als wenn der Anschluss in der Leitung zwischen **A** und **B** erfolgt.

3. Ergebnisse und Diskussion

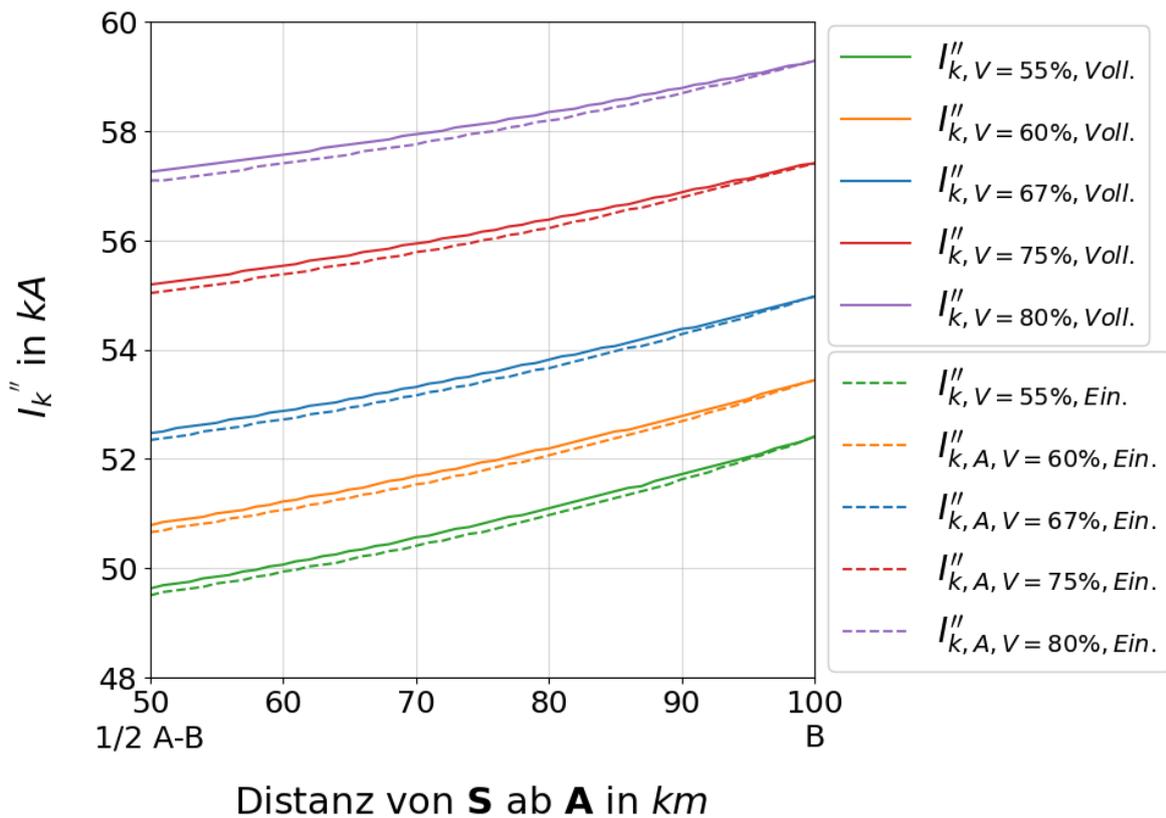
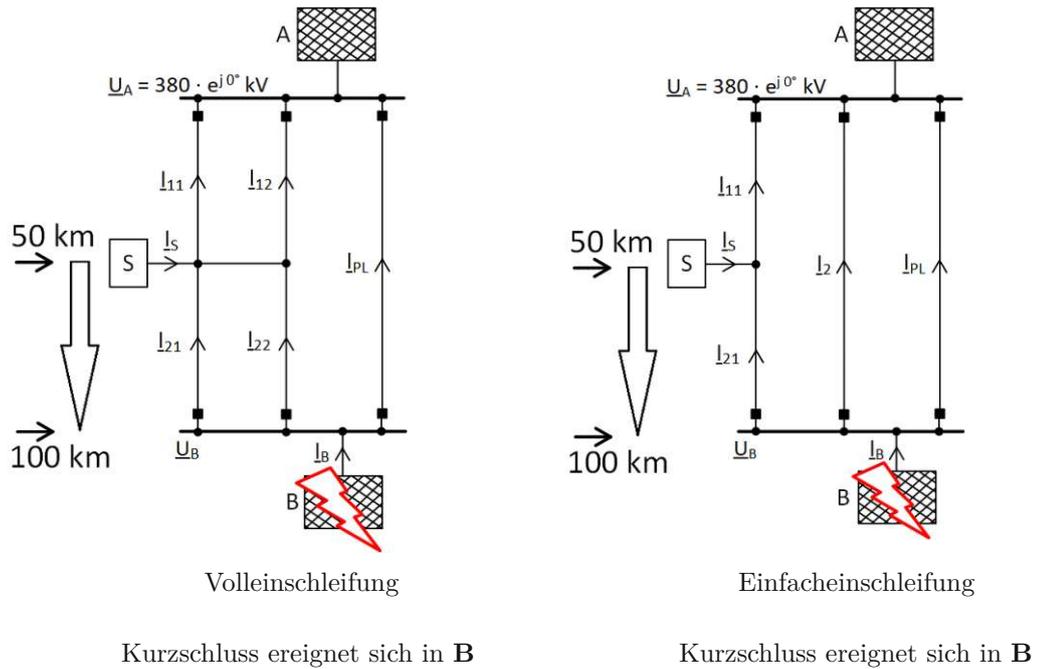


Abbildung 3.31.: Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussstroms I''_k an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung **B**

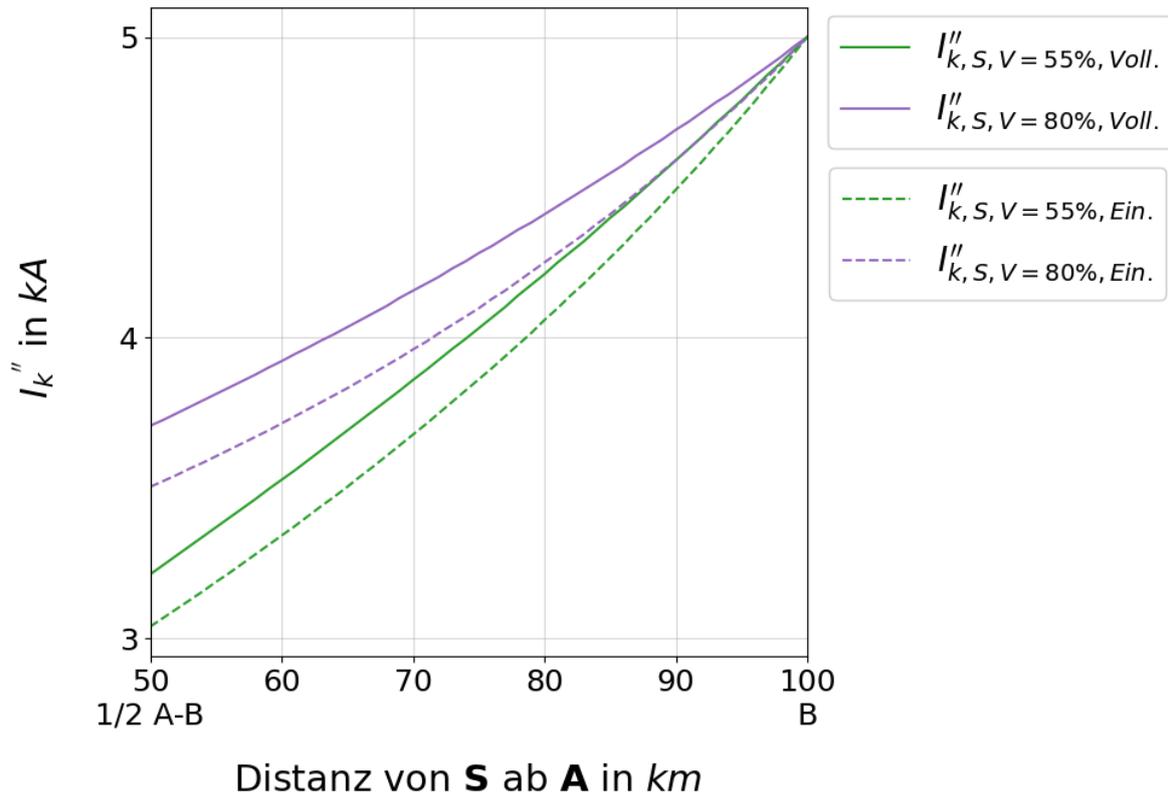


Abbildung 3.32.: Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussbeitrags $I''_{k,S}$ bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung **B**

3.3.2. Vollständige Methode

Um sicherzustellen, dass die nach Norm durchgeführte Kurzschlussberechnung konservative – also hinreichend hohe – Ergebnisse liefert, wurde ergänzend eine Berechnung mithilfe der „vollständigen Methode“ durchgeführt. Dabei wurde für den Netzknoten **S** eine Einspeiseleistung von $P_S = 1200$ MW angenommen. Für die Leistung am Netzknoten **B** wurde die in Abbildung 3.26 dargestellte maximale Einspeiseleistung $P_{B,max}$ als Funktion der Distanz zwischen **S** und **B** verwendet. Diese Werte entsprechen den maximal zulässigen Einspeisewerten im (n-0)-Zustand, bei denen das (n-1)-Kriterium weiterhin eingehalten wird.

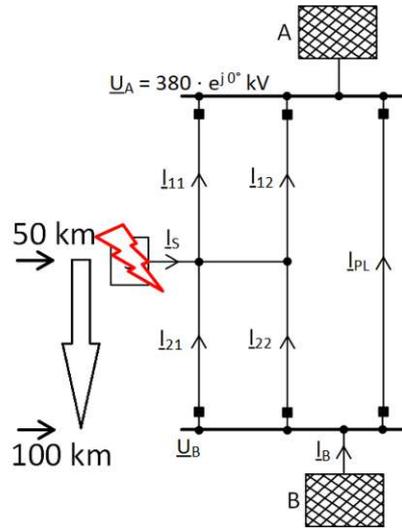
Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 3.33 dargestellt, für die Volleinschleifung in Abbildung 3.33a, für die Einfacheinschleifung in Abbildung 3.33b. Zum besseren Vergleich wurden die bereits aus Abbildung 3.29 bekannten Kennlinien der Berechnung nach Norm (durchgezogene Linien) jenen gegenübergestellt, die aus der Superpositionsmethode mit Lastfluss resultieren (gestrichelte Linien).

Die Analyse zeigt, dass die vollständige Methode das durch die Berechnung nach Norm ermittelte qualitative Verhalten bestätigt: Der Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung, die fehlende Abhängigkeit vom Vermaschungsgrad bei mittlerer Positionierung der Schaltanlage sowie die zunehmende Abhängigkeit bei Verschiebung in Richtung Netzknoten **B** werden auch in den Ergebnissen der vollständigen Methode deutlich.

Außerdem liefert die Berechnung nach Norm durchwegs höhere Kurzschlussströme als die komplexere Berechnung unter Berücksichtigung des Lastflusses – und liegt damit auf der sicheren Seite. Diese Differenz bleibt dabei in einem überschaubaren Rahmen: In der Mittelstellung beträgt die Abweichung weniger als 5 kA, bei Annäherung an den Netzknoten **B** steigt sie leicht an, überschreitet jedoch nie 8 kA. Insgesamt bestätigt sich damit, dass die Kurzschlussberechnung nach Norm eine praxisnahe Annäherung liefert, die zudem den sicherheitsrelevanten Anforderungen genügt.

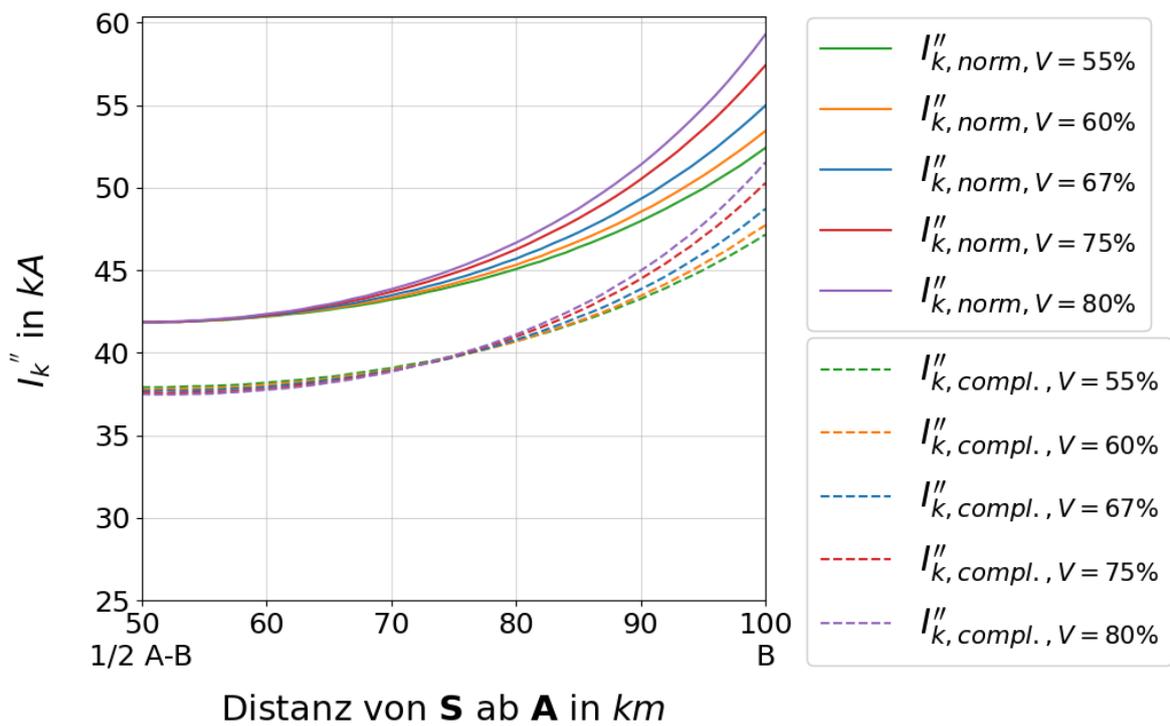
Gleichzeitig lässt sich jedoch einwenden, dass eine Differenz von 5 kA bis 8 kA durchaus erheblich sein kann – insbesondere vor dem Hintergrund, dass P_B bereits so hoch wie möglich gewählt wurde, ohne das (n-1)-Kriterium zu verletzen. Eine Überschätzung kann problematisch werden, etwa wenn dadurch die Schaltvermögen bestehender Leistungsschalter rechnerisch überschritten werden und leistungsstärkere Schaltgeräte erforderlich erscheinen.

Ob die Berechnung nach Norm in solchen Fällen noch gerechtfertigt ist, wäre eine eigenständige Fragestellung, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit ist. Für die vorliegende Untersuchung ist entscheidend, dass die Berechnung nach Norm einerseits konservative Werte liefert und andererseits das qualitative Verhalten der betrachteten Topologien zuverlässig widerspiegelt.



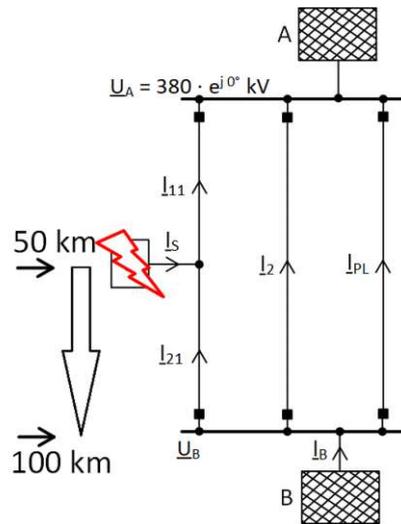
Volleinschleifung

Kurzschluss ereignet sich in S



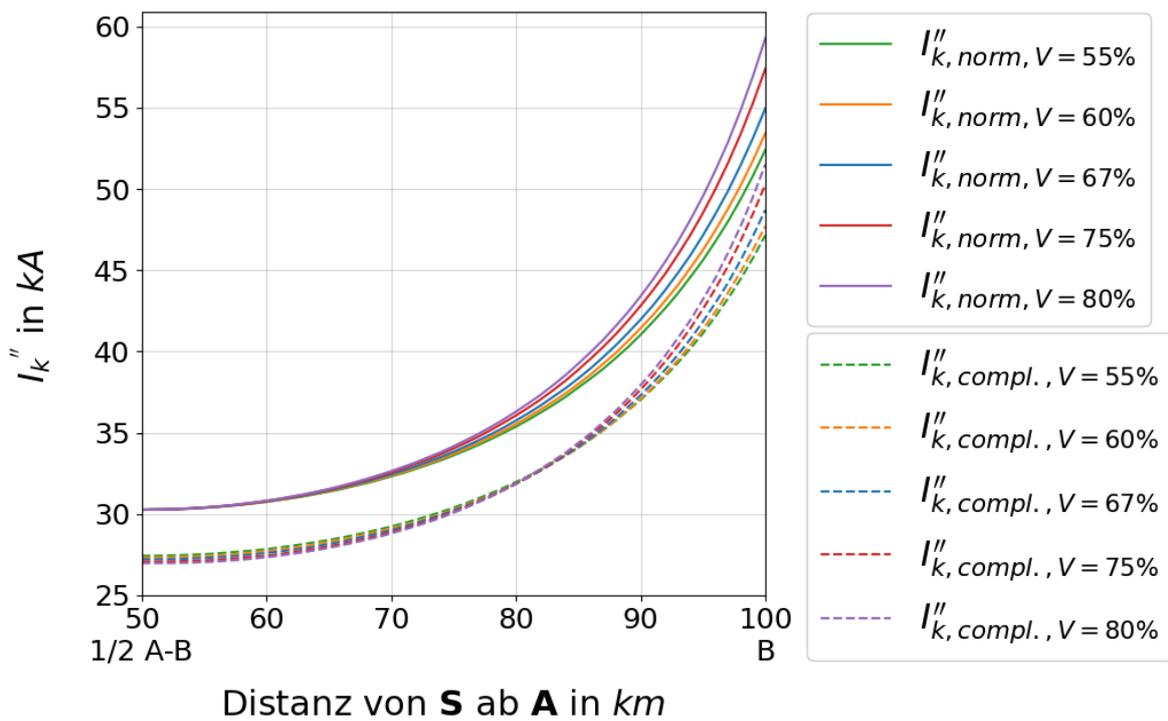
(a) Volleinschleifung

3. Ergebnisse und Diskussion



Einfacheinschleifung

Kurzschluss ereignet sich in S



(b) Einfacheinschleifung

Abbildung 3.33.: Kurzschlussstrom I''_k an der Fehlerstelle: Vergleich zwischen der Berechnung nach „Norm IEC 60909“ und der Berechnung nach der „vollständigen Methode“

3.4. Zuverlässigkeitsanalyse

Die nachfolgend aufgelisteten Topologien sollen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeitskennwerte – Ausfallhäufigkeit H und Nichtverfügbarkeit NV – analysiert werden:

- voll eingeschleifte Topologien (Netzanbindung laut Abbildung 2.4a und Schaltanlagenlayouts laut Abbildung 1.1)
 - 2-fach Sammelschiene
 - 3-fach Sammelschiene
 - 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie
- einfach eingeschleifte Topologien (Netzanbindung laut Abbildung 2.4b und Schaltanlagenlayouts laut Abbildung 1.2)
 - H3-Schaltung
 - H5-Schaltung
 - 2-fach-Sammelschiene
 - 3-fach Sammelschiene
 - Ring-Sammelschiene
 - 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie
- Stichanbindung (Abbildung 2.4d)
- Doppelstichanbindung (Abbildung 2.4c)

In Tabelle 3.29 sind für all jene Netzelemente, die in einer der aufgelisteten Topologien verbaut sind, die jeweiligen Ausfallhäufigkeiten sowie die zugehörigen Ausfalldauern angeführt. Die Ausfallhäufigkeit beschreibt die Anzahl der jährlichen Ausfälle eines Netzelements infolge eines Fehlers. Die Ausfalldauer gibt an, wie lange das betreffende Element im Fehlerfall außer Betrieb bleibt, bis es repariert oder ersetzt wird. Sofern im Fehlerfall eine Korrekturschaltung möglich ist, die eine rasche Wiederherstellung der Versorgung des fehlerbehafteten Abzweigs ermöglicht, ist diese durchzuführen. Die Korrekturschaltdauer beschreibt die Zeitspanne vom Auftreten des Fehlers bis zur erfolgreichen Umschaltung und Wiederherstellung der Versorgung des betroffenen Abzweigs.

Die grün hinterlegten Ausfallhäufigkeiten von Trenner, Leistungsschalter und Wandler wurden im Rahmen einer zwischen 2004 und 2007 international durchgeführten Untersuchung erhoben und 2012 in der mehrteiligen CIGRE-Berichtsreihe *2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment* [14][15][16][17] veröffentlicht. Die Ausfallhäufigkeit des 380/110 kV-Transformators basiert auf dem 2015 veröffentlichten CIGRE-Bericht *Transformer Reliability Survey* [18], jene der 380 kV-Freileitung auf dem Technischen Bericht *High Voltage Equipment Reliability Data* [19], der 2023 von der *Energiforsk* veröffentlicht wurde. Da in diesen Veröffentlichungen keine Angaben zur Ausfalldauer gemacht wurden, wurden die hellgrün hinterlegten Ausfalldauern ergänzend durch TenneT bereitgestellt. Für Sammelschienen sowie für die Ausfalldauer

3. Ergebnisse und Diskussion

der 380/110 kV-Transformatoren wurden die Werte aufgrund fehlender Daten plausibel geschätzt.

Die Länge der 380 kV-Freileitung, welche den Netzknoten **A** mit dem Netzknoten **B** verbindet, wurde zu Beginn der Untersuchung mit 100 km festgelegt. Bei Voll- oder Einfacheinschleifung der Schaltanlage – unter der Annahme einer mittigen Positionierung – ergeben sich für die eingeschleiften Leitungsabschnitte jeweils Entfernungen von 50 km. Im Fall einer Doppelstich- oder Stichanbindung ist hingegen die gesamte Leitungslänge von 100 km maßgeblich.

Die Netzknoten **A** und **B** werden in der nachfolgenden Analyse als ideal zuverlässig angenommen. Dies schließt auch die zu **A** bzw. **B** gehörenden, zwischen Sammelschiene und Leitung gelegenen Betriebsmittel, wie Wandler, Trenner und Leistungsschalter mit ein. Fehlerereignisse werden ausschließlich innerhalb der betrachteten Schaltanlage sowie auf den zur Schaltanlage führenden Leitungsabschnitten/Leitungen berücksichtigt.

Tabelle 3.29.: Ausfallhäufigkeit und Ausfalldauer verschiedener Netzelemente

Netzelement	Ausfallhäufigkeit in 1/a bzw. 1/(km · a)	Ausfalldauer in h	Länge in km
380 kV-Freileitung	0,0034	80	100 / 50
380/110 kV-Trafo	0,007521	28	–
Trenner	0,042	60	–
Leistungsschalter	0,0113	91	–
Wandler	0,001389	46,15	–
Sammelschiene	0,000148	72	–
Korrekturschaltdauer	–	0,25	–

3.4.1. (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse

Vorausgehende Überlegungen

Wenn vom Kunden eine (n-1)-sichere Anbindung gewünscht wird, müssen – unabhängig von der konkreten Schaltanlagentopologie – die beiden Abzweige A1 und A2 in Abbildung 1.1, 1.2 und 2.4c demselben Kunden zugeordnet sein bzw. in dieselbe Netzgruppe einspeisen. Andernfalls führt der Ausfall eines abzweigseitigen Netzelements zwangsläufig zu einer Unterbrechung der Versorgung – und zwar so lange, bis der Fehler behoben ist.

Bei der Stichanbindung (Abbildung 2.4d) ist der Abzweig im Gegensatz zu den übrigen Topologien lediglich einfach und nicht redundant ausgeführt. Diese Topologie erfüllt daher bereits grundsätzlich keine (n-1)-Sicherheit im Hinblick auf Fehler in abzweigseitig gelegenen Netzelementen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bewusst entschieden, die Zuverlässigkeitskennwerte pro Abzweig, und nicht pro Kunde zu ermitteln. Die Zuordnung konkreter Abzweige

zu bestimmten Kunden soll allgemein gehalten und erst im jeweiligen Einzelfall evaluiert werden. Schließlich steht im Vorhinein nicht fest, ob ein Kunde über einen, zwei, drei oder sogar vier Abzweige angeschlossen wird. Je nach Ausführung ändern sich die Zuverlässigkeitskenngrößen für den Kunden entsprechend – je mehr Abzweige einem Kunden zugeordnet sind, desto höher die Zuverlässigkeit für den Kunden. Die Ermittlung der Kennwerte pro Abzweig gewährleistet hingegen eine breite Anwendbarkeit der Ergebnisse. Dies ist insbesondere deshalb vorteilhaft, weil sich bei der 2-fach- und 3-fach-Sammelschienen-Topologie sowie der $1\frac{1}{2}$ -Leistungsschalter-Topologie die Zuverlässigkeitskennwerte eines einzelnen Abzweigs durch das Hinzufügen weiterer Abzweige zur Schaltanlage nicht verändern – die Zuverlässigkeit eines einzelnen Abzweigs bleibt gleich, unabhängig davon, ob die 3-fach-Sammelschiene vier oder sieben Abzweige umfasst.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Einhaltung der (n-1)-Sicherheit bei hoher Wirkleistung: Um bei einer Last- oder Einspeisung von $|P_S| = 1200$ MVA eine (n-1)-sichere Versorgung zu gewährleisten – beispielsweise bei Trafos mit $P_n = 300$ MVA und einer Überlastfähigkeit von 133 % im Fehlerfall – wären zwei Trafos, wie in den Abbildungen dargestellt, nicht ausreichend. Realistisch wären in diesem Fall vier Trafos, die in dieselbe Netzgruppe einspeisen. Jeder Trafo würde im (n-0)-Betrieb 300 MVA übertragen. Im (n-1)-Fall, also bei Ausfall eines Transformators, müsste jeder verbleibende Trafo 400 MVA übernehmen, was exakt $300 \text{ MVA} \cdot 133 \%$ entspricht.

Die in den vorherigen Kapiteln durchgeführten Analysen zur Leitungsauslastung und Kurzschlussberechnung gehen jedoch von zwei Abzweigen mit je einem Trafo aus. Streng genommen müsste daher jeder Abzweig in Wirklichkeit zwei Abzweige symbolisieren. Da sich an den grundsätzlichen Aussagen und Ergebnissen dadurch nichts ändert, wurde diese vereinfachende Annahme in Kauf genommen.

Bei der H-Schaltung sowie beim Doppelstich ist der Anschluss auf zwei Abzweige begrenzt. Um unter Berücksichtigung der oben genannten Nennleistung und Überlastfähigkeit eine (n-1)-sichere Betriebsweise zu ermöglichen, dürfte die Einspeise- bzw. Entnahmelast $|P_S|$ hier maximal 400 MVA betragen. Wird auf (n-1)-Sicherheit verzichtet, wären theoretisch bis zu 600 MVA möglich. Beim Stich ist nur ein Abzweig vorhanden, womit eine (n-1)-sichere Anbindung grundsätzlich ausgeschlossen ist. Im (n-0)-Fall wären nur 300 MVA übertragbar.

Die Aussagen zur Leitungsauslastung im (n-0)- und (n-1)-Fall, wie sie für die H-Schaltung, den Doppelstich und den Stich abgeleitet wurden, bleiben zwar korrekt, jedoch ist zu beachten, dass ein P_S von ± 1200 MVA in diesen Topologien nicht umsetzbar ist. Ein P_S von ± 400 MVA wäre hingegen – bei entsprechend dimensionierten Trafos – realistisch.

Ein dritter Gesichtspunkt betrifft die Ausfalldauern: Infolge aktueller Entwicklungen (etwa der COVID-19-Pandemie, geopolitischer Krisen und der angespannten Marktlage) haben sich die Lieferzeiten für Ersatztransformatoren erheblich verlängert. Durchschnittlich ist mit einer Lieferzeit von rund 1,5 Jahren zu rechnen; in Einzelfällen sind auch bis zu 3 Jahre möglich. Vor diesem Hintergrund sind die in Tabelle 3.29 angegebenen, vergleichsweise kurzen Ausfalldauern kritisch zu hinterfragen und im heutigen Kontext neu zu bewerten.

Vorgehensweise am Beispiel der einfach eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene

Die Vorgehensweise der (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse wird exemplarisch für die einfach eingeschleifte 2-fach-Sammelschiene erläutert. Zunächst werden sämtliche in der Topologie enthaltenen Netzelemente aufgelistet. Diese Auflistung ist in der ersten Spalte von Tabelle 3.30 dargestellt. Obwohl die Struktur dieser Topologie bereits aus Abbildung 1.2c bekannt ist, wurde in jener Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit auf Strom- und Spannungswandler verzichtet. Diese Vereinfachung wird in Abbildung 3.34a korrigiert, wo nun alle relevanten Betriebsmittel vollständig abgebildet sind. Zudem wurden in dieser Darstellung die Bezeichnungen der einzelnen Elemente ergänzt. Abbildung 3.34b zeigt die identische Topologie in einer realitätsnäheren Darstellung, die die Analyse erleichtern soll. Zur visuellen Unterscheidung der Sammelschienen wurde SS1 grün, SS2 gelb markiert. Jene Betriebsmittel, die direkt mit der betreffenden Sammelschiene verbunden sind, sind entsprechend eingefärbt.

Analyseprozess je Element

Für jedes aufgelistete Element wird untersucht, welcher Abzweig bei einem Fehlerereignis unmittelbar betroffen ist. Der betroffene Abzweig wird in der Spalte „Def. nach F.“ (Versorgungsdefizit nach Fehler) der Tabelle eingetragen. Ist kein Abzweig betroffen, bleibt das Feld leer. In einem weiteren Schritt wird geprüft, ob durch eine Korrekturschaltung die Versorgung des betroffenen Abzweigs wiederhergestellt werden kann. Falls dies möglich ist, bleibt die Spalte „Def. nach Korr.“ (Versorgungsdefizit nach Korrektur) leer. Andernfalls wird der betroffene Abzweig auch in dieser Spalte vermerkt.

Beispiele

- Für die ersten acht Netzelemente gilt: Bei einem Fehler öffnet der jeweils zugehörige Leistungsschalter (LS11 oder LS21) und isoliert den Fehler. Da der betroffene Bereich über den verbleibenden Leitungsabschnitt sowie den geschlossenen Querkuppler weiterhin versorgt wird, entsteht keine Versorgungsunterbrechung für die Kunden.
- Tritt ein Fehler an TR11-SS1 auf, lösen LS11, LS-A1-1 und QLS aus. Der an Abzweig A1 angeschlossene Kunde ist zunächst nicht versorgt. Eine Korrekturschaltung – durch Öffnen von TR-A1-SS1, Schließen von TR-A1-SS2 und anschließendem Schließen von LS-A1-1 und QLS – stellt die Versorgung über SS2 wieder her.
- Im Fall eines Fehlers an TR11-SS2 wird angenommen, dass die an Abzweig A1 und Abzweig A2 angeschlossenen Kunden initial betroffen sind, da der Fehler sowohl in Richtung SS1, oder aber in Richtung SS2 liegen kann. Infolgedessen lösen LS11, LS21, LS-A1-1 und LS-A2-1 aus. Durch eine Korrekturschaltung (Öffnen von TR11-SS1, SS-Wechsel des Abzweigs A2 von SS2 auf SS1 (Öffnen von TR-A2-SS2 sowie Schließen von TR-A2-SS1), Öffnen von TR21-SS2, Schließen von TR21-SS1, Öffnen von QTR1 und QTR2 sowie Schließen der Leistungsschalter LS-A1-1, LS-A2-1 und LS21) kann jedoch die Versorgung beider Kunden wiederhergestellt werden.

- Bei einem Fehler an TR-A1-SS1 öffnen LS11, LS-A1-1 und QLS. Der Kunde K1 ist nicht versorgt, und eine Korrekturschaltung ist in diesem Fall nicht möglich – ebenso wenig wie bei allen weiter in richtig Kunde liegenden Komponenten des Abzweigs, weil dieser nicht redundant aufgebaut ist.

Anschließend erfolgt die quantitative Bewertung: Die Spalten H (Ausfallhäufigkeit) und NV (Nichtverfügbarkeit) werden jeweils für die beiden Zeiträume „Nach Ausf., vor Korr.“ (Nach Ausfall, vor Korrektur) sowie „Nach Korr.“ (Nach Korrektur) befüllt.

Da die Topologie zwei Abzweige (A1 und A2) umfasst, ist grundsätzlich eine getrennte Zuverlässigkeitsbetrachtung der Abzweige erforderlich. In Tabelle 3.30 wurden allerdings aus Platzgründen die Zahlenwerte für H und NV lediglich für den Abzweig A1 eingetragen. Aufgrund der nahezu symmetrischen Struktur der Schaltanlage – mit Ausnahme der Positionierung der Wandler im Querzweig – ergibt sich für A1 eine leicht schlechtere Zuverlässigkeitskenngröße. So führen Fehler in den Elementen QStrW oder QSpW durch die Lage des Leistungsschalters zu Unterbrechungen auf der mit SS1 verbundenen Seite, also bei Abzweig A1. Da dieser Unterschied jedoch marginal ist, werden beim Beispiel der eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene ausschließlich die Werte von Abzweig A1 betrachtet, da er die konservativeren (schlechteren) Werte aufweist. Auch bei den übrigen Topologien werden durchgehend die jeweils ungünstigeren Werte angegeben – unabhängig davon, ob sie von Abzweig A1 oder A2 stammen.

Methodik zur Berechnung von H und NV für den Abzweig A1

Die Spalten H und NV werden nach folgendem Schema befüllt:

- Steht der Abzweig A1 in der Spalte „Def. nach F.“, so wird die Ausfallhäufigkeit des zugehörigen Elements gemäß Tabelle 3.29 in die Spalte H unter „Nach Ausf., vor Korr.“ eingetragen.
- Die Nichtverfügbarkeit wird anschließend mit folgender Beziehung berechnet:

$$NV = H \cdot (\text{Dauer der Ausfallsituation}) \quad (3.112)$$

Für den Zeitraum „Nach Ausf., vor Korr.“ wird eine Ausfalldauer von 0,25 h angenommen. Diese Zeit berücksichtigt notwendige Schalthandlungen, wie das Öffnen oder Schließen von Trennern – diese Zeitspanne wird selbst dann veranschlagt, wenn keine Korrekturschaltung möglich ist und das fehlerbehaftete Element repariert oder ausgetauscht werden muss.

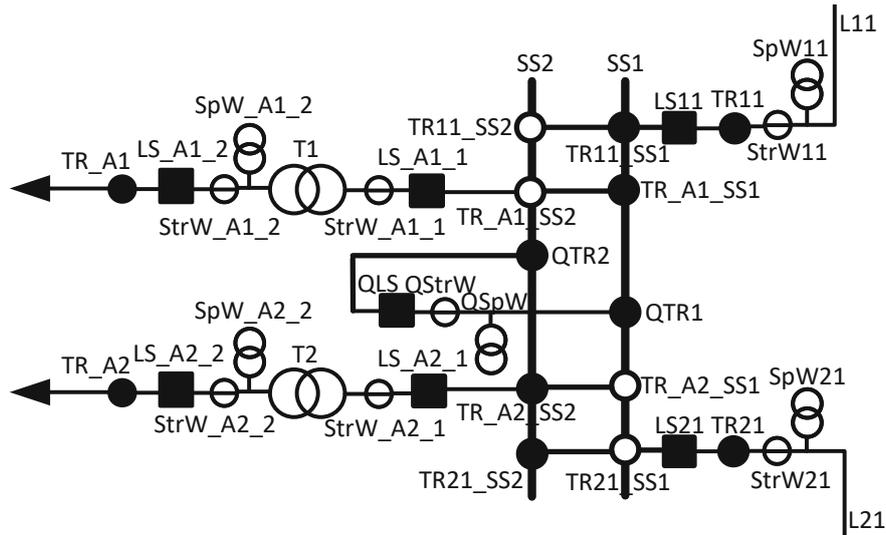
- Steht der Abzweig A1 in der Spalte „Def. nach Korr.“, so wird die Ausfallhäufigkeit erneut in die Spalte H unter „Nach Korr.“ eingetragen. Die entsprechende Ausfalldauer wird der Tabelle 3.29 entnommen, um NV gemäß Gleichung 3.112 zu berechnen.

Die Werte der Spalte „Gesamt“ ergeben sich durch:

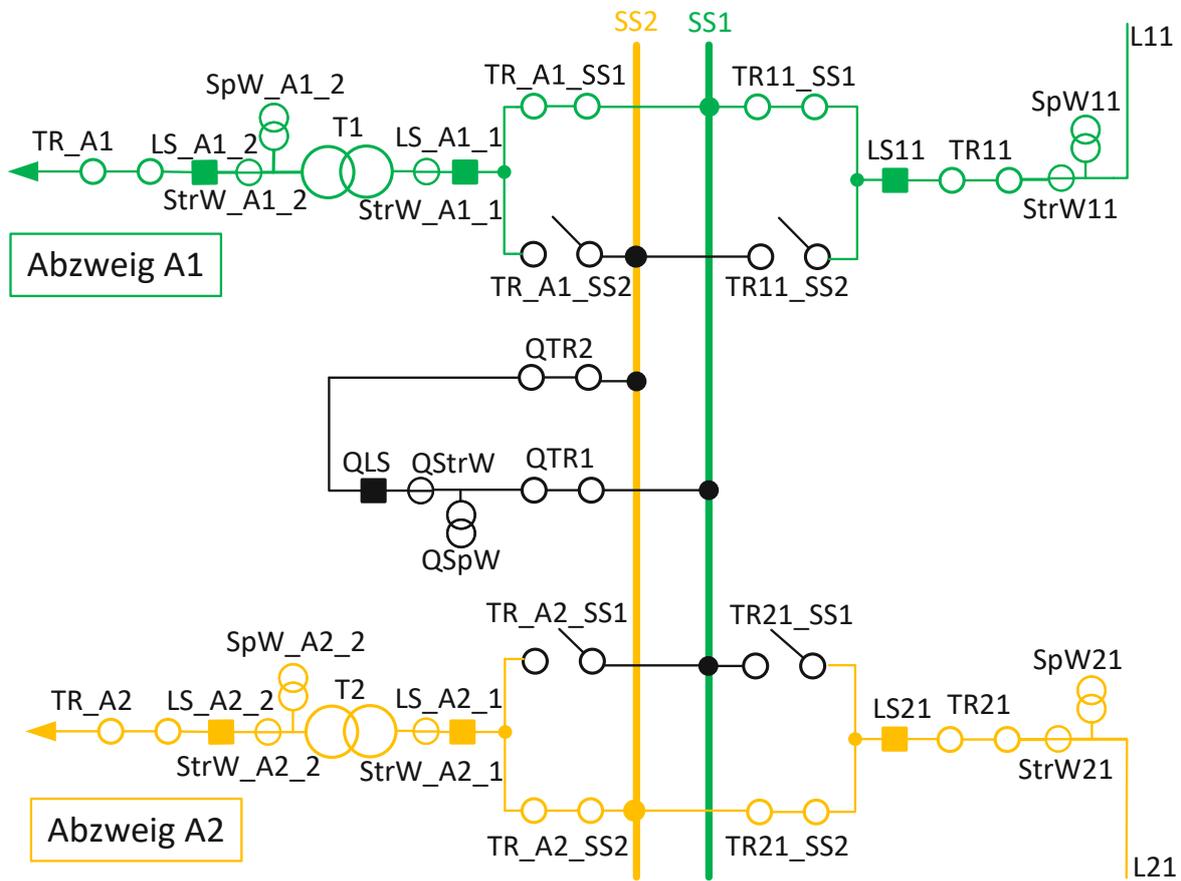
- Summation der beiden NV -Werte aus den Gruppen „Nach Ausfall, vor Korrektur“ und „Nach Korrektur“.

3. Ergebnisse und Diskussion

- Die Ausfallhäufigkeit H wird für jede betroffene Komponente nur einmal berücksichtigt – unabhängig davon, ob eine Korrekturschaltung möglich ist oder nicht.
- Abschließend werden alle H - und NV -Werte der Spalte „Gesamt“ aufsummiert. Das Resultat ist die gesamte Ausfallhäufigkeit sowie die jährliche Nichtverfügbarkeit des betrachteten Abzweigs (A1).



(a) vereinfachte Darstellung



(b) realitätsgetreue Darstellung

Abbildung 3.34.: 2-fach-Sammelschiene Einfacheinschleifung

3. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3.30.: (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse: 2-fach-Sammelschiene. Ausfallhäufigkeit H und Nichtverlässlichkeit NV

Ausgef. Element	Typ	Def. nach F.	Def. nach Korr.	Nach Ausf., vor Korr.		Nach Korr.		Gesamt	
				H in 1/a	NV in h/1	H in 1/a	NV in h/1	H in 1/a	NV in h/1
LTG11	LTG			0	0	0	0	0	0
LTG21	LTG			0	0	0	0	0	0
SpW11	W			0	0	0	0	0	0
StrW11	W			0	0	0	0	0	0
SpW21	W			0	0	0	0	0	0
StrW21	W			0	0	0	0	0	0
TR11	TR			0	0	0	0	0	0
TR21	TR			0	0	0	0	0	0
TR11-SS1	TR	A1		0,042	0,0105	0	0	0,042	0,0105
TR11-SS2	TR	A1,A2		0,042	0,0105	0	0	0,042	0,0105
TR21-SS1	TR	A1,A2		0,042	0,0105	0	0	0,042	0,0105
TR21-SS2	TR	A2		0	0	0	0	0	0
TR-A1-SS1	TR	A1	A1	0,042	0,0105	0,042	2,52	0,042	2,5305
TR-A1-SS2	TR	A1,A2	A1	0,042	0,0105	0,042	2,52	0,042	2,5305
TR-A2-SS1	TR	A1,A2	A2	0,042	0,0105	0	0	0,042	0,0105
TR-A2-SS2	TR	A2	A2	0	0	0	0	0	0
TR-A1	TR	A1	A1	0,042	0,0105	0,042	2,52	0,042	2,5305
TR-A2	TR	A2	A2	0	0	0	0	0	y80
QTR1	TR	A1		0,042	0,0105	0	0	0,042	0,0105
QTR2	TR	A2		0	0	0	0	0	0
QSpW	W	A1		0,001389	0,000347	0	0	0,001389	0,000347
QStrW	W	A1		0,001389	0,000347	0	0	0,001389	0,000347
LS11	LS	A1		0,0113	0,002825	0	0	0,0113	0,002825
LS21	LS	A2		0	0	0	0	0	0
QLS	LS	A1,A2		0,0113	0,002825	0	0	0,0113	0,002825
LS-A1-1	LS	A1	A1	0,0113	0,002825	0,0113	1,0283	0,0113	1,031125
LS-A2-1	LS	A2	A2	0	0	0	0	0	0
LS-A1-2	LS	A1	A1	0,0113	0,002825	0,0113	1,0283	0,0113	1,031125
LS-A2-2	LS	A2	A2	0	0	0	0	0	0
StrW-A1-1	W	A1	A1	0,001389	0,000347	0,001389	0,064102	0,001389	0,06445
SpW-A1-2	W	A1	A1	0,001389	0,000347	0,001389	0,064102	0,001389	0,06445
StrW-A1-2	W	A1	A1	0,001389	0,000347	0,001389	0,064102	0,001389	0,06445
StrW-A2-1	W	A2	A2	0	0	0	0	0	0
SpW-A2-2	W	A2	A2	0	0	0	0	0	0
StrW-A2-2	W	A2	A2	0	0	0	0	0	0
T1	T	A1	A1	0,007521	0,00188	0,007521	0,210588	0,007521	0,212468
T2	T	A2	A2	0	0	0	0	0	0
SS1	SS	A1		0,000148	0,000037	0	0	0,000148	0,000037
SS2	SS	A2		0	0	0	0	0	0
Gesamt								0,395814	10,118449

Für den Abzweig A1 ergibt sich schließlich:

Ausfallhäufigkeit: 0,396 Ausfälle/a
Nichtverfügbarkeit: 10,118 h/a nicht versorgt

Die beschriebene Vorgehensweise wird auf all jene zu Beginn von Kapitel 3.4 aufgelisteten Topologien angewandt. Die Endergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst, aufsteigend nach NV geordnet.

Tabelle 3.31.: Vergleich der Zuverlässigkeitskennwerte verschiedener Topologien

Topologie	H /(Ausfälle/a)	NV /(h/a)
2-fach-SS einfach	0,396	10,118
2-fach-SS voll	0,533	10,153
Doppelstich	0,502	10,209
1 1/2-LS einfach	0,215	11,501
1 1/2-LS voll	0,215	11,501
Ring-SS	0,215	11,512
H3-Schaltung	0,226	12,596
H5-Schaltung	0,226	12,596
3-fach-SS einfach	0,648	12,701
3-fach-SS voll	0,827	12,746
Stich	0,460	34,879

Analyse und Interpretation der Zuverlässigkeitskennwerte

- 2-fach-Sammelschiene und 3-fach-Sammelschiene: Die einfach eingeschleiften Varianten weisen jeweils bessere (d.h. niedrigere) Zuverlässigkeitskennwerte auf als die entsprechende voll eingeschleifte Ausführung. Dies lässt sich damit erklären, dass in der voll eingeschleifte Konfiguration zusätzliche Betriebsmittel integriert sind, deren potenzielle Ausfälle die Fehleranfälligkeit der Topologie erhöhen und die Ausfallhäufigkeit H entsprechend steigern. Die zusätzlichen Leitungsstromkreise bieten in dieser Hinsicht keinen Vorteil, da bereits mit zwei Leitungsstromkreisen ein einzelner Ausfall nicht zu einer längerfristigen Versorgungsunterbrechung führt. Der Unterschied in der Nichtverfügbarkeit NV bleibt deshalb gering, da jene Ausfälle, die nicht durch eine Korrekturschaltung behoben werden können, bei beiden Varianten identisch sind.
- Des Weiteren zeigt sich, dass die 2-fach-Sammelschiene insgesamt bessere Kennwerte liefert als die 3-fach-Sammelschiene. Auch hier ist die höhere Anzahl an Netzelementen bei der 3-fach-Variante ursächlich für die gestiegenen Werte von Ausfallhäufigkeit (H) und Nichtverfügbarkeit (NV). Insbesondere die Sammelschiene-Trenner, von denen die 3-fach-Sammelschiene pro Abzweig einen mehr hat, fließen

3. Ergebnisse und Diskussion

bei der Ausfallhäufigkeit negativ ein. Die zusätzliche, dritte Sammelschiene bietet dahingehend keinen Vorteil, da bereits bei lediglich zwei Sammelschienen der Fehler in einer Sammelschiene durch eine Korrekturschaltung (Sammelschienen-Wechsel auf die andere Sammelschiene) behoben werden kann und nicht zum längerfristigen Ausfall der Versorgung führt.

- $1\frac{1}{2}$ -Leistungsschalter: Es zeigen sich keine Unterschiede in den Zuverlässigkeitskennwerten zwischen der einfach und der voll eingeschleiften Variante. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die bei der Volleinschleifung zusätzlich integrierten Leitungsstromkreise an einem dritten, separat betriebenen Zweig angeschlossen sind. Fehler in diesem dritten Zweig wirken sich somit nicht auf die Versorgung der Kunden aus, die über den ersten oder zweiten Zweig angebunden sind.
- Ring-Sammelschiene: Die Ring-Topologie weist denselben Wert für die Ausfallhäufigkeit H wie die $1\frac{1}{2}$ -Topologie auf, jedoch eine geringfügig höhere Nichtverfügbarkeit.
- H-Schaltung: Im Vergleich zur voll eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene zeigt die H-Schaltung ein niedrigeres H , was auf die geringe Anzahl an Netzelementen zurückzuführen ist, deren Ausfall ein initiales Versorgungsdefizit bewirkt. Gleichzeitig ist jedoch die NV höher als bei der einfach eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene. Dies resultiert aus dem Umstand, dass Fehler in QTR1 und QTR2 nicht durch eine Korrekturschaltung kompensiert werden können. Die Ausfallhäufigkeit und Nichtverfügbarkeit von H3- und H5-Schaltung sind, wie bereits in Abschnitt 1.1.1 angesprochen, identisch.
- Doppelstich: Der Doppelstich zeigt vergleichbare Werte für H und NV wie die voll eingeschleifte 2-fach-Sammelschiene, jedoch deutlich bessere (niedrigere) Kennwerte als die 3-fach-Sammelschiene. Dies erklärt sich aus der geringeren Anzahl an Netzelementen, die potenziell ausfallen können. Im Fehlerfall eines Leitungsabschnitts ist zunächst jener Abzweig betroffen, der direkt mit der fehlerbehafteten Leitung verbunden ist. Bei der Analyse wird angenommen, dass jedoch eine Korrekturschaltung (Schließen der Trenner im Querzweig) möglich ist und die Versorgung wiederherstellen kann.⁴ Da die lange Ausfalldauer der Leitung (80h) durch die erfolgreiche Korrekturmaßnahme nicht zum Tragen kommt, wird der NV -Wert dadurch nicht negativ beeinflusst.
- Stich: Im Gegensatz dazu steht die einfache Stichverbindung. Hier kann bei einem Leitungsausfall keine Korrekturschaltung durchgeführt werden, weshalb die gesamte Ausfalldauer der Leitung in die Nichtverfügbarkeit eingeht – was den deutlich höheren NV -Wert erklärt.

⁴Ob ein Zuschalten auf die verbleibende Leitung im konkreten Fall zulässig ist, lässt sich jedoch nicht pauschal beurteilen und muss im Einzelfall geprüft werden.

Mängel in der Berechnungslogik und deren Folgen für die Zuverlässigkeitskennwerte

Die in dieser Arbeit angewandte Berechnungslogik basiert stets auf der Annahme eines Worst Case-Fehlers. Dabei wird unterstellt, dass ein Fehler so auftritt, dass der Schutz auslöst und die zugehörigen Leistungsschalter den betroffenen Abschnitt abschalten. Bei einem Trenner entspräche dies beispielsweise einem elektrischen Versagen. Laut [16] machen derartige Fehler jedoch nur etwa 2,5 % aller Trenner-Fehler aus. Weitaus häufiger – mit einer Häufigkeit von rund 70 % – treten bei Trennern Antriebsfehler auf. Hierbei ist zwischen Störungen beim Öffnen und beim Schließen zu unterscheiden:

- Kann ein nicht-aktiver Trenner nicht schließen und bleibt vollständig geöffnet (Isolationsabstand gegeben), sind im Fehlerfall alle anderen Abzweige unbeeinträchtigt. Der betroffene Abzweig könnte in manchen Fällen sogar über einen anderen, funktionierenden Trenner weiterhin versorgt werden – beides Abweichungen von meiner Annahme.
- Fällt der Antrieb eines aktiven Trenners aus und dieser kann nicht öffnen (bleibt geschlossen), ist ebenfalls denkbar, dass der betroffene Abzweig weiterhin versorgt wird – ebenfalls eine Abweichung von meiner Annahme.

Da bei 3-fach-Sammelschienen-Topologien pro Abzweig drei Trenner und bei 2-fach-Sammelschienen-Topologien nur zwei Trenner vorhanden sind, fallen die summierten Ausfallhäufigkeiten – und damit auch die Abweichungen zur Realität – bei der 3-fach-Sammelschiene entsprechend höher aus. Dieser Effekt kann dazu führen, dass die Reihung der Topologien zugunsten einer vermeintlich zuverlässigeren 2-fach-Sammelschienen-Anlage ausfällt. Die Aussage, eine 2-fach-Sammelschienen-Anlage sei grundsätzlich zuverlässiger als eine 3-fach-Sammelschienen-Anlage, ist daher ausschließlich im Kontext der hier angewandten Berechnungslogik zu interpretieren.

Zusammenfassend:

- Die Berechnungslogik unterstellt stets einen Worst-Case-Fehler, der bei Trennern nur in etwa 2,5 % der Fälle auftritt und daher nicht repräsentativ ist.
- Generell wird nicht zwischen den unterschiedlichen Fehlerarten unterschieden, die zur Nichtverfügbarkeit der einzelnen Betriebsmittel führen, obwohl eine solche Differenzierung bei einer derart komplexen Fragestellung erforderlich wäre.
- Die Ergebnisse sind daher ungeeignet, um belastbare Aussagen darüber zu treffen, welche Topologie in der Praxis die höchste Zuverlässigkeit aufweist.

Bewertung aus Anwendersicht

Welche Kennzahl – H oder NV – als kritischer zu bewerten ist, hängt vom Anwendungsfall und den Anforderungen des jeweiligen Netzanschlusskunden ab. Für bestimmte Verbraucher kann eine höhere Anzahl kurzzeitiger Unterbrechungen (hohes H , niedriges

3. Ergebnisse und Diskussion

NV) problematischer sein als eine einzelne, lang andauernde Unterbrechung (niedriges H , hohes NV), z.B. bei empfindlicher Produktionstechnik oder zeitkritischen Prozessen.

Gesamttrend

Tendenziell zeigt sich, dass mit zunehmender Anzahl verbauter Netzelemente die Zuverlässigkeitskennwerte (H und NV) steigen, was zunächst nicht intuitiv erscheint. Intuitiv würde man erwarten, dass größere, komplexere und flexiblere Topologien eine höhere Ausfallsicherheit bieten. Allerdings erhöht sich mit wachsender Systemkomplexität auch die Anzahl der Komponenten, die potenziell ausfallen können – wodurch die Gesamtzuverlässigkeit negativ beeinflusst wird.

Betrachtung auf Kunden- anstatt auf Abzweigebene

Wie bereits im Abschnitt „Vorausgehende Überlegungen“ dargelegt, wurde in dieser Arbeit bewusst entschieden, die Zuverlässigkeitskennwerte pro Abzweig und nicht pro Kunde zu ermitteln. Doch welche Auswirkungen hätte eine alternative Betrachtungsweise auf Kundenebene?

Würden die Zuverlässigkeitskenngrößen auf Kunden- statt auf Abzweigebene berechnet, ergäben sich folgende Konsequenzen:

- Die resultierenden Kennwerte wären deutlich geringer – bei einigen Topologien sogar null. Diese Topologien wären dann auf Kundenebene bezüglich dem Ausfall aller Elemente $(n-1)$ -sicher. Dies betrifft unter anderem die $1^{1/2}$ -Leitungsschalter-Topologie (sowohl in einfach als auch in voll eingeschleifter Ausführung), die Ringsammelschiene sowie die Doppelsammelschiene.
- Der Unterschied zwischen der Abzweig- und der Kundenbetrachtung ist nicht für alle Topologien gleich ausgeprägt. Bei der $1^{1/2}$ -Leistungsschalter-Topologie und der Ringsammelschiene etwa liegen sowohl H als auch NV auf Kundenebene bei null. Die in Tabelle 3.31 dargestellte Reihung der Topologien anhand der Nichtverfügbarkeit NV würde sich demnach verschieben – die Bewertung der Topologien fiel also unterschiedlich aus.

Dieser Aspekt darf keinesfalls unbeachtet bleiben. Für eine aussagekräftige und praxisrelevante Zuverlässigkeitsanalyse ist es entscheidend, die genaue Anzahl der einem Kunden zugeordneten Abzweige zu kennen. Nur auf dieser Grundlage lassen sich verlässliche und vergleichbare Kenngrößen auf Kundenebene ermitteln.

$(n-1)$ -Kriterium auf Kundenebene

Soll das $(n-1)$ -Kriterium auf Kundenebene analysiert werden, so sind in den Spalten „Def. nach F.“ und „Def. nach Korr.“ ausschließlich jene Einträge zu betrachten, die sowohl den Abzweig A1 als auch den Abzweig A2 beinhalten. Denn nur diese führen zu einer Versorgungsunterbrechung des Kunden – die Schaltanlage ist in diesen Fällen

hinsichtlich der betroffenen Elemente nicht $(n-1)$ -sicher.

Häufig wird verkürzt gesagt, die einfach eingeschleifte 2-fach-Sammelschiene sei „ $(n-1)$ -sicher, aber nicht betrieblich $(n-1)$ -sicher“. Diese Aussage ist jedoch ungenau. Korrekt ist: Die Topologie ist zwar $(n-1)$ -sicher bezüglich des Ausfalls einer Leitung oder einer Sammelschiene, jedoch nicht hinsichtlich des Ausfalls aller Netzelemente, die die Versorgung eines Kunden beeinflussen können.

Wie aus Tabelle 3.30 hervorgeht, führen Fehler in den Elementen TR11-SS2, TR21-SS1, TR-A1-SS2, TR-A2-SS1 sowie im QLS jeweils zu einer kurzfristigen Unterbrechung der Versorgung. Diese Unterbrechung kann jedoch durch eine Korrekturschaltung behoben werden.

Folgende Topologien sind auf Kundenebene vollständig $(n-1)$ -sicher :

- 1 1/2-Leistungsschalter (sowohl einfach als auch voll eingeschleift),
- Ringsammelschiene,
- Doppelstich.

Die H-Schaltung enthält lediglich ein Element, das eine vollständige $(n-1)$ -Sicherheit verhindert: den Leistungsschalter im Querzweig. Die 2-fach-Sammelschiene ist bezüglich ausgewählter leitungs- und abzweigseitiger Sammelschienentrenner (vier in der einfach eingeschleiften Variante, sechs in der voll eingeschleiften Variante) und des Leistungsschalters in der Querkupplung nicht vollständig $(n-1)$ -sicher. Auch die 3-fach-Sammelschiene ist nicht vollständig $(n-1)$ -sicher, da dieselben Trenner wie bei der 2-fach-Sammelschiene das $(n-1)$ -Kriterium nicht erfüllen, ergänzt um zwei weitere Trenner in der Querkupplung.

Ein Ausfall dieser genannten Elemente führt in allen Fällen zu einer kurzzeitigen Unterbrechung beider Abzweige. Durch eine Korrekturschaltung kann jedoch zumindest ein Abzweig zeitnah wieder versorgt werden.

Der Stich stellt einen Sonderfall dar: Diese Topologie ist in keiner Hinsicht $(n-1)$ -sicher, da bereits der Ausfall eines beliebigen Netzelements zu einer vollständigen Versorgungsunterbrechung führt.

3.4.2. Notwendigkeit einer betrieblichen $(n-1)$ -Analyse

Mängel der $(n-1)$ -Zuverlässigkeitsanalyse

Die zuvor vorgestellte Analyse betrachtet nur $(n-1)$ -Fehler, das stellt aber nur einen Teil des Gesamtbildes dar.

Erst eine betriebliche $(n-1)$ -Analyse könnte den möglichen Vorteil von größeren, flexibleren Topologien gegenüber kleineren Topologien mit wenigen Elementen aufzeigen. Für eine betriebliche $(n-1)$ -Analyse wäre folgende Vorgehensweise erforderlich:⁵

Beispiel: einfach eingeschleifte 2-fach-Sammelschiene (mit 39 Netzelementen):

⁵Dies gilt aber nur unter der Voraussetzung, dass die Fehlerereignisse unabhängig voneinander sind.

3. Ergebnisse und Diskussion

betriebliche (n-1)-Ausfallhäufigkeit =

$$\begin{aligned} & \text{Fehlerwahrscheinlichkeit des Elements 1} \\ & \quad * (\text{Ausfallhäufigkeit des Kunden bei Fehler an Element 1}) \\ + & \text{ Fehlerwahrscheinlichkeit des Elements 2} \\ & \quad * (\text{Ausfallhäufigkeit des Kunden bei Fehler an Element 2}) \\ & \quad \vdots \\ + & \text{ Fehlerwahrscheinlichkeit des Elements 39} \\ & \quad * (\text{Ausfallhäufigkeit des Kunden bei Fehler an Element 39}) \\ + & \text{ Wahrscheinlichkeit, dass initial kein Element einen Fehler hat} \\ & \quad * ((n-1)\text{-Ausfallhäufigkeit des Kunden}) \end{aligned}$$

Die Fehlerwahrscheinlichkeit eines Netzelements beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass jenes Element innerhalb eines Jahres von einem Fehler betroffen ist und berechnet sich als:

$$\text{Fehlerwahrscheinlichkeit} = \frac{H \cdot \text{Ausfalldauer}}{8760 \text{ h/a}}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass initial kein Element einen Fehler aufweist, ergibt sich als Gegenwahrscheinlichkeit:

$$1 - \left(\begin{aligned} & \text{Fehlerwahrscheinlichkeit des Elements 1} \\ & + \text{ Fehlerwahrscheinlichkeit des Elements 2} \\ & \quad \vdots \\ & + \text{ Fehlerwahrscheinlichkeit des Elements 39} \end{aligned} \right)$$

Die (n-1)-Ausfallhäufigkeit des Kunden ergibt sich aus jener Analyse, die in Kapitel 3.4.1 exemplarisch für die einfach eingeschleifte 2-fach-Sammelschiene durchgeführt wurde.

Diese Vorgehensweise führt somit zu $39 + 1$ separaten Zuverlässigkeitsanalysen, wobei die jeweiligen Endergebnisse mit der Fehlerwahrscheinlichkeit des entsprechenden Elements (bzw. der Gegenwahrscheinlichkeit im letzten Fall) multipliziert werden. Abschließend werden die einzelnen Ergebnisse aufaddiert. Was im Beispiel für die einfach eingeschleifte 2-fach-Sammelschiene gezeigt ist, ist für jede zu untersuchende Topologie durchzuführen.

Diese Vorgehensweise würde eine aussagekräftige Bewertung der betrieblichen Zuverlässigkeit liefern.

Die Durchführung einer solchen Analyse ist mit der in dieser Arbeit verwendeten Excel-basierten Methodik in vertretbarem zeitlichen Rahmen jedoch nicht realisierbar. Erforderlich wäre eine weiterführende, computergestützte Auswertungsmethode. Da deren Implementierung und Anwendung den Umfang dieser Masterarbeit übersteigen würde, wurde auf eine weitergehende Behandlung verzichtet.

Betriebliche (n-1)-Sicherheit auf Kundenebene

Die betriebliche (n-1)-Sicherheit beschreibt den Fall, dass ein Kunde auch bei geplanten Abschaltungen oder Wartungsarbeiten weiterhin (n-1)-sicher versorgt wird. Da eine vollständige betriebliche (n-1)-Analyse den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird im Folgenden ein konkreter Teilaspekt untersucht: Es wird geprüft, ob ein Kunde – unter der Annahme, dass er über die beiden in den Abbildungen dargestellten Abzweige versorgt wird – im Fall eines Ausfalls eines Leitungsstromkreises oder einer Sammelschiene noch als betrieblich (n-1)-sicher gilt.

Wie bereits im Abschnitt „(n-1)-Kriterium auf Kundenebene“ beschrieben, sind ausschließlich die 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie, die Ringsammelschiene sowie die Doppelsammelschiene vollständig (n-1)-sicher – also gegenüber dem Ausfall aller relevanten Netzelemente. Wird zusätzlich angenommen, dass sich ein Leitungsstromkreis oder eine Sammelschiene bereits in Wartung befindet, bleibt von diesen Varianten nur noch die voll eingeschleifte 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie vollständig (n-1)-sicher.

Wird hingegen lediglich der Ausfall desjenigen Elementtyps betrachtet, das sich gerade in Wartung befindet, ergibt sich die in Tabelle 3.32 dargestellte Bewertung.

Die Anbindung per Stich erfüllt bereits das (n-1)-Kriterium nicht, wie bereits zu Beginn von Kapitel 3.2, insbesondere Tabelle 3.11, herausgearbeitet wurde. Deshalb ist offensichtlich, dass die betriebliche (n-1)-Sicherheit, die das weitaus strengere Kriterium darstellt, auch nicht erfüllt ist.

Ausfall eines Leitungsstromkreises

Doppelstich und Einfacheinschleifung sind nicht betrieblich (n-1)-sicher bezüglich dem Ausfall eines Leitungsabschnittes. Dies gilt unabhängig von der eingesetzten Schaltanlagentechnologie – einschließlich H-Schaltung, 2-fach-Sammelschiene und 3-fach-Sammelschiene, Ring-Sammelschiene oder 1 1/2-Leistungsschalter.

Im Gegensatz dazu ermöglicht die Volleinschleifung einen betrieblich (n-1)-sicheren Zustand im Falle eines Leitungsstromkreisausfalls.

3. Ergebnisse und Diskussion

Ausfall einer Sammelschiene

Bezogen auf den Ausfall von Sammelschienen zeigt sich, dass sowohl die 2-fach-Sammelschiene als auch die Ring-Sammelschiene betrieblich nicht (n-1)-sicher sind. Eine 3-fach-Sammelschiene sowie eine 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie hingegen erfüllen die Anforderungen an die betriebliche (n-1)-Sicherheit auch im Falle eines Sammelschienenausfalls.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass von den untersuchten Varianten ausschließlich die Volleinschleifung mit 3-fach-Sammelschiene sowie die voll eingeschleifte 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie eine betriebliche (n-1)-Sicherheit gewährleisten.

Tabelle 3.32.: Betriebliche (n-1)-Sicherheit bei Ausfall von Leitungen oder Sammelschienen

Anbindung → Schaltanlagen-Topologie	Leitungs- ausfall	SS- Ausfall
Stich	✗	–
Doppelstich	✗	–
Einfacheinschleifung → H-Schaltung, 2-fach-SS, Ring-SS	✗	✗
Einfacheinschleifung → 3-fach-SS, 1 1/2-LS	✗	✓
Volleinschleifung → 2-fach-SS	✓	✗
Volleinschleifung → 3-fach-SS, 1 1/2-LS	✓	✓

3.5. Anzahl der Assets

In Tabelle 3.33 sind die einzelnen Netzelemente sowie die Anzahl der benötigten Schaltfelder für jede betrachtete Schaltanlagentopologie aufgeführt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Komplexität der Topologie – insbesondere durch zusätzliche Sammelschienen und Leistungsstromkreise – auch die Anzahl der eingesetzten Betriebsmittel deutlich ansteigt. Die höchste Gesamtelementanzahl ergibt sich bei der voll eingeschleiften 3-fach-Sammelschiene und der voll eingeschleiften 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie mit jeweils 69 bzw. 71 Elementen. Im Gegensatz dazu weisen einfache Varianten wie der Stich oder Doppelstich nur 10 bzw. 22 Elemente auf.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Anzahl der benötigten Schaltfelder (SF): Während klassische Sammelschienen-Topologien – insbesondere die 2-fach- und 3-fach-SS – eine eindeutige und standardisierte Definition von Schaltfeldern ermöglichen, ist dies bei anderen Topologieformen nur eingeschränkt möglich. In der Tabelle sind daher ausschließlich für diese Varianten konkrete SF-Werte angegeben. Bei Topologien wie der Ring-Sammelschiene, dem Doppelstich oder dem Stich wurde bewusst auf die Angabe von Schaltfeldern verzichtet, da deren Aufbau keiner klassischen Schaltfeldstruktur folgt. Auch bei der 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie ist die angegebene SF-Anzahl nur eingeschränkt interpretierbar. Aufgrund der spezifischen Anordnung – bei der sich zwei Abzweige jeweils drei Leistungsschalter teilen – lässt sich kein klar abgegrenztes Schaltfeld pro Abzweig definieren, wie es bei konventionellen Sammelschienenanlagen üblich ist.

	LTG	W	LS	TR	T	SS	Σ	SF
H3-Schaltung	2	11	5	8	2	0	30	
H5-Schaltung	2	11	7	8	2	0	30	
2-fach-SS einfach.	2	12	7	14	2	2	39	6
2-fach-SS voll.	4	16	9	20	2	2	53	8
3-fach-SS einfach.	2	14	8	24	2	3	53	8
3-fach-SS voll.	4	18	10	32	2	3	69	10
1 1/2-LS einfach.	2	18	8	18	2	2	50	(6)
1 1/2-LS voll.	4	26	11	26	2	2	71	(9)
Ring-SS	2	14	6	14	2	1	42	
Doppelstich	2	8	4	6	2	0	22	
Stich	1	4	2	2	1	0	10	

Tabelle 3.33.: Anzahl der Netzelemente und Anzahl der Schaltfelder pro Topologie

4. Synthese der Ergebnisse

4.1. Transportkapazität

4.1.1. (n-0)-Fall

Die Leitungsauslastung im (n-0)-Fall ist für die Auslegung nicht unmittelbar relevant, liefert jedoch wertvolle Hinweise zur Lastflussaufteilung. Sie stellt somit eine geeignete Ausgangsbasis für weiterführende Überlegungen dar. Zudem treten im Netz idealerweise (und überwiegend) (n-0)-Zustände auf, deren Einfluss auf Aspekte wie Geräusentwicklung, elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Alterungsprozesse ebenfalls von Relevanz ist.

Anmerkung: Die Stichtabbindungsänge wurde in sämtlichen Betrachtungen vernachlässigt. In Bezug auf die Leitungsauslastung beziehungsweise Transportkapazität gilt daher: Volleinschleifung $\hat{=}$ Doppeltstich, Einfacheinschleifung $\hat{=}$ Stich.

Die wesentlichen Erkenntnisse ergeben sich aus Abbildung 3.8. Dort wird deutlich, dass die Auslastung der nicht eingeschleiften Leitung L_2 bei der Einfacheinschleifung exakt zwischen den Auslastungen von L_{11} und L_{21} zu liegen kommt. Noch viel relevanter: Bei der Einfacheinschleifung ist ein Leitungsabschnitt stets stärker, ein anderer hingegen schwächer ausgelastet als die jeweils korrespondierenden Abschnitte bei der Volleinschleifung. Das führt dazu, dass bei der Einfacheinschleifung ein Abschnitt früher seine Auslastungsgrenze erreicht, wodurch die übertragbare Leistung begrenzt wird.

Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die maximale Übertragungskapazität ist bei der Volleinschleifung für alle untersuchten Last- und Erzeugungssituationen P_S größer als bei der Einfacheinschleifung.
- Mit zunehmendem P_S verstärkt sich der Vorteil der Volleinschleifung. Bei $P_S = 0$ sind Volleinschleifung und Einfacheinschleifung bezüglich Übertragungskapazität gleichwertig (Abweichung: 0%).
- Der Vermaschungsgrad hat einen positiven Einfluss auf $P_{B,max}$. Sowohl bei der Voll- als auch bei der Einfacheinschleifung führt ein höherer Vermaschungsgrad zu höherer Übertragungskapazität. Dieser Effekt äußert sich gleichermaßen bei Volleinschleifung und Einfacheinschleifung, wodurch die Abweichung zwischen beiden Varianten nahezu konstant bleibt (vgl. Gleichung 3.65).

4.1.2. (n-1)-Fall

Die maximale Übertragungskapazität im (n-0)-Fall ist nicht ausschlaggebend, da die Auslegung durch den ungünstigsten (n-1)-Fall bestimmt wird. Um eine Überlastung im Fehlerfall – also beim Ausfall eines Betriebsmittels – zu vermeiden, darf auch im regulären Betrieb nur so viel Wirkleistung übertragen werden, wie es der kritischste (n-1)-Fall zulässt.

Aus den Untersuchungen im Kapitel „(n-1)-Fall: Auslastung der Leitungsstromkreise“ ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Jede Anbindung zwischen zwei Netzknoten führt zu einer erhöhten Auslastung einzelner Leitungsabschnitte und beeinflusst die Transportkapazität folglich negativ (vgl. Abbildung 3.19 und Abbildung 3.21). Rein in Hinblick auf die Transportkapazität wäre ein direkter Anschluss von Lasten oder Erzeugern an bestehende Netzknoten ideal. In der Praxis gibt es jedoch technische, wirtschaftliche oder geografische Gründe, die für eine Anbindung zwischen zwei Netzknoten sprechen.

Ist man bereit, den Kompromiss aus geminderter Transportkapazität einzugehen und Last oder Erzeugung außerhalb von einem großen Netzknoten anzubinden, stellt sich die Frage, welche Option hierfür am besten geeignet ist.

Für die Bewertung dieser Fragestellung ist stets der kritischste (n-1)-Fehlerfall zu betrachten. Entscheidend ist jener Leitungsabschnitt, der beim kritischsten Ausfall als erstes seine Auslastungsgrenze erreicht. Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die maximale Übertragungskapazität ist bei der Einfacheinschleifung im untersuchten Last- und Erzeugungsbereich ($-1200 \text{ MW} \leq P_S \leq 1200 \text{ MW}$) und für Vermaschungsgrade zwischen 55 % und 80 % größer als bei der Volleinschleifung:

$$P_{B,\max,n-1,\text{Ein.}} > P_{B,\max,n-1,\text{Voll.}}$$

Der Grund liegt in der höheren Impedanz der Übertragungsstrecke bei der Einfacheinschleifung: $Z_{11} + Z_{21}$ bei Ausfall von Z_2 im Vergleich zu $Z_{11} || Z_{12} + Z_{21}$ bei Ausfall von L_{22} . Dies führt dazu, dass ein größerer Anteil des Lastflusses über das vermaschte Netz geleitet wird, wodurch die untersuchten Leitungsabschnitte geringer belastet sind.

- Der Vorteil¹ der Einfacheinschleifung ist besonders bei kleineren Leistungen P_S ausgeprägt. Ab einer gewissen Leistung (Umkehrpunkt: $P_{S,\text{Umkehr,theor.}} = \pm S_r = \pm 2632,7 \text{ MW}$; $P_{S,\text{Umkehr,real}} \approx \pm 2540 \text{ MW}$) kehrt sich der Effekt um: Für noch größere P_S bietet die Volleinschleifung die höhere Übertragungskapazität. Bei längerer Strecke zwischen **A** und **B** verschiebt sich der Umkehrpunkt auf niedrigere Leistungen, da der Blindleistungsbedarf der Leitungen stärker ins Gewicht fällt.

¹Vorteil: Differenz aus den maximalen Übertragungskapazitäten von Voll- und Einfacheinschleifung, bezogen auf die maximale Übertragungskapazität der Volleinschleifung, siehe Gleichung 3.65

Je näher man sich diesem Punkt nähert, desto geringer wird der Vorteil der Einfacheinschleifung.

- Mit steigendem Vermaschungsgrad V nimmt die maximale Übertragungskapazität $P_{B,\max,n-1}$ bei konstantem P_S zu. Der Grund dafür ist, dass der Lastfluss bei höheren Vermaschungsgraden stärker aufs vermaschte Netz ausweicht. Dieser Effekt ist bei der Einfacheinschleifung aufgrund der höheren Impedanz der Übertragungstrecke ausgeprägter als bei der Volleinschleifung. Betrachtet man nur den Wirkleistungsfluss, ergibt sich ein Schwellenwert bei $V > 50\%$ zugunsten der Einfacheinschleifung. Wird der Blindleistungsfluss mitberücksichtigt, verschiebt sich dieser Schwellenwert auf ca. $V > 55\%$. Ein nennenswerter Vorteil zeigt sich ab $V \geq 60\%$, wie in Tabelle 3.23 und Tabelle 3.25 ersichtlich ist (Abweichung: 1,5% bis 7,1%). In sehr stark vermaschten Gebieten ($V = 80\%$) liegt der Vorteil zwischen 11,5% und 21,3%.
- Zur konkreten Positionierung der Anbindung: Ist die Richtung der Last- und Erzeugungsflüsse (P_B , P_S) nicht bekannt, ist eine mittige Anbindung sinnvoll. Falls die Richtung bekannt ist und die örtlichen Gegebenheiten es zulassen, sollte die optimale Position für eine bekannte Vermaschung V , P_S und P_B mit einer Netzrechnungssoftware ermittelt werden. Wie stark sich die Positionierung auswirkt, zeigen die Ergebnisse in Abbildung 3.26 und Abbildung 3.27. Bei Verschiebung in die entgegengesetzte Richtung ist zu erwarten, dass der Vorteil zunimmt.

4.2. Kurzschluss

4.2.1. Kurzschluss innerhalb der angebundenen Schaltanlage

Es wurden zwei Szenarien hinsichtlich der Leitungslängen zwischen den Netzknoten **A** und **B** betrachtet: 100 km und 5 km.

Für beide Szenarien gilt: Ein Kurzschluss innerhalb der Schaltanlage erzeugt einen konstanten Strombeitrag $I''_{k,S}$, unabhängig vom Vermaschungsgrad, der Position der Schaltanlage und der Anbindungsart. Bei mittiger Positionierung ist der gesamte Kurzschlussstrom ebenfalls vom Vermaschungsgrad unabhängig. Letzteres ist jedoch eine Folge der Vereinfachungen im Untersuchungsmodell und lässt sich nicht direkt auf reale Situationen übertragen.

Distanz A ↔ B = 100 km

Vergleicht man die Anbindungsarten bei mittiger Position, zeigt sich bei der Einfacheinschleifung ein deutlich niedrigerer Kurzschlussstrom als bei der Volleinschleifung ($\Delta I''_k = 11,6 \text{ kA}$). Ursache ist die höhere Impedanz zwischen Fehlerstelle und speisenden Netzknoten, was zu geringeren Beiträgen von **A** und **B** führt. Verschiebt sich die Schaltanlage in Richtung **B**, gleichen sich die Beiträge beider Varianten zunehmend an, bis sie am Netzknoten **B** ident sind.

Bei mittiger Positionierung ist der Kurzschlussstrom vom Vermaschungsgrad unabhängig. Mit zunehmender Verschiebung der Schaltanlage in Richtung **B** wird jedoch der

4. Synthese der Ergebnisse

Einfluss des Vermaschungsgrads deutlich: Die Beiträge der Netzknoten $I''_{k,A}$ und $I''_{k,B}$ nehmen mit steigendem Vermaschungsgrad V zu. Beispielsweise ergibt sich bei 100 km ein Unterschied von 6,89 kA zwischen dem Kurzschlussstrom des höchsten (80 %) und des niedrigsten (55 %) Vermaschungsgrades.

Distanz A ↔ B = 5 km

Aufgrund der geringen Leitungslängen zwischen der Fehlerstelle und den Netzknoten, welche auf den Kurzschluss speisen, steigen die Kurzschlussströme deutlich an. Der Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung fällt bei mittiger Positionierung mit 2,54 kA vergleichsweise sehr gering aus.

Der Einfluss des Vermaschungsgrades ist in diesem Fall vernachlässigbar, da der direkte Pfad zur Fehlerstelle eine deutlich geringere Impedanz aufweist als der alternative Pfad über das vermaschte Netz. Daher fallen alle Kennlinien – unabhängig vom Vermaschungsgrad – jeweils zu einer gemeinsamen Kurve zusammen.

4.2.2. Kurzschluss im Netzknoten B

In diesem Szenario ereignet sich der Kurzschluss direkt im Netzknoten **B** (bei 100 km Abstand zwischen **A** und **B**). Der Beitrag der Schaltanlage $I''_{k,S}$ fällt im Vergleich zu den dominierenden Strömen aus **B** (konstant) und **A** (stark abhängig vom Vermaschungsgrad) sehr gering aus. Entsprechend hat die Anbindungsart der Schaltanlage (Voll- oder Einfacheinschleifung) hier keinen nennenswerten Einfluss auf den resultierenden Kurzschlussstrom.

Allerdings wirkt sich die Position der Anbindung von Erzeugung oder Last sehr wohl auf den Kurzschlussstrom im Netzknoten **B** aus. Erfolgt der Anschluss – wie in der Praxis üblich – direkt im Netzknoten **B**, so fällt der dortige Kurzschlussstrom je nach Vermaschungsgrad um etwa 2–3 kA höher aus als bei einer Anbindung in der Leitung zwischen **A** und **B**.

4.2.3. Bewertung der Kurzschlussberechnung nach Norm

Zur Überprüfung der normbasierten Kurzschlussberechnung wurde ergänzend eine Berechnung nach der vollständigen Methode durchgeführt, die den tatsächlichen Lastfluss berücksichtigt. Die Analyse zeigt, dass das qualitative Verhalten – insbesondere der Unterschied zwischen Voll- und Einfacheinschleifung sowie die Abhängigkeit vom Vermaschungsgrad – durch beide Methoden übereinstimmend beschrieben wird.

Quantitativ liefert die Normberechnung durchwegs höhere Kurzschlussströme und erfüllt damit das Ziel, bei der Auslegung der Betriebsmittel auf der sicheren Seite zu sein. Die Abweichung bleibt dabei moderat: maximal 5 kA bei mittiger Positionierung, bis zu 8 kA bei Annäherung an den Netzknoten **B**.

Auch wenn diese Überschätzung im Einzelfall zu einer scheinbaren Überschreitung des Schaltvermögens führen kann, ist diese Problematik nicht Teil dieser Arbeit. Für die hier durchgeführte Untersuchung gilt: Die Normberechnung stellt eine konservative und doch hinreichend genaue Methode dar, die das Verhalten der unterschiedlichen Anbindungsvarianten zuverlässig erfasst.

4.3. Zuverlässigkeitsanalyse

In diesem Kapitel wurden verschiedene Schaltanlagentopologien im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit bewertet und mithilfe einer (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse die Kenngrößen Ausfallhäufigkeit H und Nichtverfügbarkeit NV berechnet. Im Mittelpunkt standen dabei sowohl die rein rechnerische (n-1)-Zuverlässigkeit je Abzweig als auch qualitative Aussagen zur betrieblichen (n-1)-Sicherheit auf Kundenebene.

Die Ergebnisse zeigen, dass die ermittelten Zuverlässigkeitskennwerte maßgeblich durch die Anzahl und Art der eingesetzten Netzelemente bestimmt werden. Komplexere Topologien mit mehr Komponenten zeigen bei der (n-1)-Analyse tendenziell höhere Ausfallhäufigkeiten und Nichtverfügbarkeiten, obwohl sie als sicherer gelten. Insbesondere bei der Unterscheidung zwischen einfach und voll eingeschleiften Varianten sowie 2-fach- und 3-fach-Sammelschiene wird deutlich, dass zusätzliche Leitungsstromkreise oder Sammelschienen nicht zwangsläufig einen Zuverlässigkeitsgewinn darstellen, sondern durch die erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit einzelner Komponenten sogar gegenläufige Effekte verursachen können.

Diese Aussagen sind jedoch nur im Zusammenhang mit der gewählten Berechnungslogik gültig. Die in dieser Arbeit angewandte Berechnungslogik basiert stets auf der Annahme eines Worst Case-Fehlers. Dabei wird unterstellt, dass ein Fehler so auftritt, dass der Schutz auslöst und die zugehörigen Leistungsschalter den betroffenen Abschnitt abschalten. Bei einem Trenner entspräche dies beispielsweise einem elektrischen Versagen. Laut [16] machen derartige Fehler jedoch nur etwa 2,5 % aller Trenner-Fehler aus.

Da bei 3-fach-Sammelschienen-Topologien pro Abzweig drei Trenner und bei 2-fach-Sammelschienen-Topologien nur zwei Trenner vorhanden sind, fallen die summierten Ausfallhäufigkeiten – und damit auch die Abweichungen zur Realität – bei der 3-fach-Sammelschiene entsprechend höher aus. Dieser Effekt kann dazu führen, dass die Reihung der Topologien zugunsten einer vermeintlich zuverlässigeren 2-fach-Sammelschienen-Anlage ausfällt. Die Aussage, eine einfachere Topologie mit wenigen Elementen sei grundsätzlich zuverlässiger als eine große Topologie mit vielen Elementen, ist daher ausschließlich im Kontext der hier angewandten Berechnungslogik zu interpretieren.

Die Analysen basieren auf einer Betrachtung einzelner Abzweige, und nicht etwa einzelner Kunden. Dieser Ansatz erlaubt eine flexible Übertragung auf reale Anwendungen, solange die Zuordnung von Abzweigen zu Kunden sowie die konkrete Auslegung (z.B. Transformatoranzahl und -größe) bekannt sind.

Allerdings führt dieser Ansatz zu höheren (schlechteren) Zuverlässigkeitskennwerten. Werden die Kennwerte für einzelne Kunden berechnet, so verbessern sich insbesondere bei redundanten Topologien die Resultate deutlich – mit potenziellen Verschiebungen in der Reihung der Topologien.

Limitationen:

- Die Analyse beschränkt sich auf einfache (n-1)-Fehlerfälle. Eine betriebliche (n-1)-Analyse, die geplante Wartungszustände oder bereits eingetretene Fehler berücksichtigt, wurde nicht durchgeführt.
- Abhängigkeiten zwischen Fehlern, z.B. Folgefehler, sind nicht modelliert.

4. Synthese der Ergebnisse

- Die angenommenen Ausfalldauern entsprechen nicht immer der aktuellen Realität.
- Es wird nicht zwischen den unterschiedlichen Fehlerarten unterschieden, die zur Nichtverfügbarkeit der einzelnen Betriebsmittel führen. Eine solche Differenzierung wäre bei einer derart komplexen Fragestellung allerdings erforderlich.

4.3.1. Wichtige Erkenntnisse

- Die Aussage, eine einfachere Topologie mit wenigen Elementen sei grundsätzlich zuverlässiger als eine komplexere Topologie mit vielen Elementen, ist ausschließlich im Kontext der hier angewandten Berechnungslogik zu interpretieren.
- Für eine realitätsnahe Bewertung der Zuverlässigkeit muss zwischen der Betrachtung auf Abzweig- und Kundenebene unterschieden werden. Erst dann lassen sich die tatsächlichen Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit richtig einordnen.
- Die alleinige Betrachtung von $(n-1)$ -Fehlern greift zu kurz. Durch eine betriebliche Analyse ließe sich das tatsächliche Ausfallrisiko deutlich besser einschätzen, aber erst eine $(n-x)$ -Analyse würde die Zuverlässigkeit der Topologie in vollem Umfang erfassen.
- Aufgrund der erheblichen Limitationen eignen sich die Ergebnisse nicht, um verlässliche Aussagen darüber zu treffen, welche Topologie in der Praxis die höchste Zuverlässigkeit bietet.

5. Schlussfolgerung

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, inwieweit eine konzeptionelle und bauliche Trennung groß dimensionierter Schaltanlagen in Netzknotenanlagen – primär für den Transport elektrischer Energie – und Versorgungs-/Kundenanlagen – ausschließlich für die Einbindung von Transformatoren von Verteilnetzbetreibern und Kunden – technisch und betrieblich sinnvoll umsetzbar ist. Die angewandte Methodik basiert auf einem bewusst vereinfachten, konzeptionellen Netzmodell in PowerFactory, das es ermöglichte, die Auswirkungen unterschiedlicher Einbindungsarten isoliert und ohne externe Störeinflüsse zu analysieren. Durch die Variation des Vermaschungsgrades sowie der angeschlossenen Leistungen konnte ein breites Spektrum möglicher Netzsituationen abgebildet werden. Die Ergebnisse sind somit nicht auf ein bestimmtes Netzgebiet beschränkt. Eine wesentliche Einschränkung dieser Modellierung ist jedoch, dass Engpässe im vermaschten Netz nicht erfasst werden, wodurch mögliche Überlastungen im vermaschten Gebiet unberücksichtigt bleiben.

Aus der Auswertung der Ergebnisse lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

- Jede Einbindung zwischen zwei Netzknoten erhöht die Auslastung einzelner Leitungsabschnitte und wirkt sich negativ auf die Transportkapazität aus. Rein in Hinblick auf die Transportkapazität wäre ein direkter Anschluss von Lasten oder Erzeugern an bestehende Netzknoten ideal.
- Unter den untersuchten Anbindungen außerhalb von bestehenden Netzknoten bietet die Einfacheinschleifung in einem breiten Last- und Erzeugungsbereich sowie bei mittleren bis hohen Vermaschungsgraden eine höhere Transportkapazität als die Volleinschleifung. Der Vorteil nimmt mit steigendem Vermaschungsgrad zu und kann in sehr stark vermaschten Netzen bis zu 21% betragen.
- Ab einer bestimmten Einspeise- bzw. Lastleistung ($P_{S,Umkehr} \approx \pm 2540$ MW) kehrt sich der Vorteil um, sodass die Volleinschleifung in Hinblick auf Übertragungskapazität überlegen ist.
- Hinsichtlich des Kurzschlussniveaus zeigt sich bei einem Kurzschluss in der Schaltanlage, dass der resultierende Kurzschlussstrom bei der Einfacheinschleifung in mittlerer Position mit 11,6 kA deutlich geringer ist als bei der Volleinschleifung. Wird die Schaltanlage in Richtung **B** verlagert, gleichen sich die Beiträge beider Varianten zunehmend an, bis sie am Netzknoten **B** identisch sind. Je kürzer die Distanz zwischen den Netzknoten, desto geringer ist der Einfluss der Netzeinbindungsart auf den resultierenden Kurzschlussstrom in der Schaltanlage.
- Bei einem Kurzschluss direkt im Netzknoten **B** fällt der Beitrag der Schaltanlage im Vergleich zu den dominierenden Strömen aus **B** und **A** sehr gering aus. Die

5. Schlussfolgerung

Anbindungsart der Schaltanlage (Voll- oder Einfacheinschleifung) hat in diesem Fall keinen nennenswerten Einfluss auf den resultierenden Kurzschlussstrom.

Allerdings beeinflusst die Position der Anbindung von Erzeugung oder Last den Kurzschlussstrom im Netzknoten **B** merklich: Erfolgt der Anschluss – wie in der Praxis üblich – direkt im Netzknoten **B**, liegt der dortige Kurzschlussstrom je nach Vermaschungsgrad um etwa 2–3 kA höher als bei einer Anbindung in der Leitung zwischen **A** und **B**.

- Die (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse zeigt, dass komplexere Topologien mit mehr Betriebsmitteln nicht zwangsläufig eine höhere Versorgungssicherheit bieten, da zusätzliche Komponenten auch mehr potenzielle Fehlerquellen bedeuten. Diese Aussage ist jedoch ausschließlich im Kontext der hier angewandten Berechnungslogik zu interpretieren.
- Aufgrund der erheblichen Limitationen eignen sich die Ergebnisse nicht, um verlässliche Aussagen darüber zu treffen, welche Topologie in der Praxis die höchste Zuverlässigkeit bietet.

Die Beschränkung auf (n-1)-Fehlerfälle bildet die tatsächliche Betriebsituation jedoch nur unzureichend ab. Zukünftige Analysen sollten zumindest betriebliche (n-1)-Fehlerfälle einbeziehen und darüber hinaus zwischen Betrachtungen auf Abzweig- und Kundenebene unterscheiden, um die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit realitätsnäher zu bewerten. Darüber hinaus wurden zwar vier verschiedene Werte der angebundenen Last/Erzeugung sowie eine große Bandbreite an Transportflüssen simuliert, jedoch erfolgte keine Bewertung, wie häufig die jeweiligen Netznutzungsszenarien in der Realität tatsächlich auftreten. Eine solche Analyse wäre erforderlich, um die Relevanz der einzelnen Fälle einzuordnen und die Topologiewahl gezielter zu begründen.

Ein weiterer wichtiger Untersuchungsaspekt ist die Variante mit zwei einfach eingeschliffenen Kundenanlagen, jeweils eine pro parallel verlaufendem Stromkreis. Erste Überlegungen deuten darauf hin, dass hierbei – abhängig von den Planungszielen – die doppelte Leistung P_S bei gleicher Transportkapazität oder die gleiche Leistung P_S bei höherer Transportkapazität angeschlossen werden kann. Zudem verspricht dieses Konzept ein niedrigeres Kurzschlussniveau im Vergleich zur direkten Anbindung im Netzknoten **B**.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Schaltanlagen-Topologien für Volleinschleifung	19
1.2. Schaltanlagen-Topologien für Einfacheinschleifung	21
2.1. Untersuchungsumgebung in PowerFactory	26
2.2. Vermaschungsgrad	28
2.3. Basisszenario: Konventionelle Anbindung von Erzeugern und/ oder Lasten in einem Netzknoten	31
2.4. Anbindung von Erzeugern und/oder Lasten zwischen A und B	32
3.1. Ersatzschaltung für den infinitesimal langen Abschnitt einer verlustbehafteten Doppelleitung [13]	39
3.2. Ersatzschaltbild von Volleinschleifung und Doppelstich im (n-0)-Fall bei Vernachlässigung von C' und G'	41
3.3. Funktion $f(x) = k(x - c)$ mit beispielhaften Werten $k = 2$ und $c = 1$	46
3.4. Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation (—) und analytischer Berechnung (\cdots)	49
3.5. Ersatzschaltbild von Einfacheinschleifung und Stich im (n-0)-Fall bei Vernachlässigung von C' und G'	51
3.6. Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation (---) und analytische Berechnung (\cdots)	54
3.7. Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation (---) und analytische Berechnung (\cdots)	56
3.8. Simulierte Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: Voll- und Einfacheinschleifung	62
3.9. Simulierte Auslastung der Leitungsabschnitte bei $V = 66,7\%$: Voll- und Einfacheinschleifung sowie konventionelle/direkte Anbindung in B	63
3.10. Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung – Voll- und Einfacheinschleifung	64
3.11. Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung – Voll- und Einfacheinschleifung sowie konventionelle Anbindung	65
3.12. Volleinschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz A \Leftrightarrow B = 100 km	68
3.13. Einfacheinschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz A \Leftrightarrow B = 100 km	70
3.14. Volleinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_{12} sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$	83
3.15. Volleinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_{12} sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$	85
3.16. Einfacheinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_2 sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$	89

3.17. Einfacheinschleifung: Auslastungen von L_{11} und L_{21} beim Ausfall von L_2 sowie im (n-0)-Fall für $V = 66,7\%$	93
3.18. (n-1)-Worst-Case: Voll- und Einfacheinschleifung im direkten Vergleich, $V = 66,7\%$	97
3.19. (n-1)-Worst-Case: Voll- und Einfacheinschleifung sowie Anbindung der Last/Erzeugung in B im direkten Vergleich, $V = 66,7\%$	98
3.20. (n-1)-Worst-Case: Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung: Voll- und Einfacheinschleifung	100
3.21. (n-1)-Worst-Case: Auswirkung der Vermaschung auf die Leitungsauslastung: Voll- und Einfacheinschleifung sowie direkte Anbindung in B	101
3.22. (n-1)-Worst-Case bei $V = 66,7\%$: PowerFactory-Simulation und analytische Berechnung im Vergleich	103
3.23. (n-1)-Worst-Case, Volleinschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz $\mathbf{A} \Leftrightarrow \mathbf{B} = 100$ km	105
3.24. (n-1)-Worst-Case, Einfacheinschleifung: Überlagerung der Lastflüsse. Parameter β und σ entsprechend $L_{PL} = 100$ km bei Distanz $\mathbf{A} \Leftrightarrow \mathbf{B} = 100$ km	107
3.25. Bestimmung von $P_{S,Umkehr,real}$: bei ≈ -2540 MW	113
3.26. Veränderung der Übertragungskapazität $P_{B,max}$ bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung eines Netzknotens; $V = 66,7\%$	120
3.27. Veränderung der Übertragungskapazität $P_{B,max}$ für unterschiedliche Vermaschungsgrade	122
3.28. Veränderung des Kurzschlussstroms $I''_k = I''_{k,A} + I''_{k,B} + I''_{k,S}$ an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung B	130
3.29. Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussstroms $I''_k = I''_{k,A} + I''_{k,B} + I''_{k,S}$ an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung B	132
3.30. Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussstroms I''_k an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung B	134
3.31. Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussstroms I''_k an der Fehlerstelle bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung B	136
3.32. Vergleich zwischen Voll- und Einfacheinschleifung: Veränderung des Kurzschlussbeitrags $I''_{k,S}$ bei Verschiebung der Schaltanlage ausgehend von der Mittelposition in Richtung B	137
3.33. Kurzschlussstrom I''_k an der Fehlerstelle: Vergleich zwischen der Berechnung nach „Norm IEC 60909“ und der Berechnung nach der „vollständigen Methode“	140
3.34. 2-fach-Sammelschiene Einfacheinschleifung	147
A.1. H3-Schaltung	189
A.2. H5-Schaltung	189
A.3. 2-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift	190
A.4. Doppelstich	190

A.5. Stich	190
A.6. 1 ^{1/2} -Leistungsschalter-Topologie voll eingeschleift	191
A.7. Ringsammelschiene	192
A.8. 2-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift	193
A.9. 2-fach-Sammelschiene voll eingeschleift	194
A.10.3-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift	195
A.11.3-fach-Sammelschiene voll eingeschleift	196
A.12.3-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift: Begründung der schlechteren Zuverlässigkeitskennwerte gegenüber der 2-fach-Sammelschiene	197

Tabellenverzeichnis

1.1.	Ergebnisse der Beurteilung von Schaltanlagen-Topologien laut [7]	11
2.1.	Leistungsparameter der Freileitungen	25
2.2.	Zusammenhang zwischen Vermaschungsgrad und Vermaschung	28
2.3.	Zuordnung zwischen Vermaschungsgrad und Länge der Parallel-Leitung für Abbildung 2.2	29
2.4.	Zusammenhang zwischen Vermaschung und Anzahl der Zweige sowie die aus dem Vermaschungsgrad umgerechnete Länge der Parallel-Leitung	29
2.5.	P_{B+} im (n-0)-Fall für verschiedene Vermaschungsgrade	33
2.6.	Last- und Erzeugungsszenarien der ins Netz zu integrierenden Einheiten	34
2.7.	Voll eingeschleifte Schaltanlagen im TenneT Netz und Summe der Kurzschluss-Beiträge ihrer vier Leitungsstromkreise	36
3.1.	Abweichung der simulierten von der analytisch berechneten Leistungsauslastung für $P_S = -1200$ MW und $P_B = -8000$ MW sowie Unterschied der Abweichungen zwischen Voll- und Einfacheinschleifung	53
3.2.	Parameter σ und β bei verschiedenen Vermaschungsgraden V im (n-0)-Fall	57
3.3.	Parameter σ für unterschiedliche Leitungsabschnitte im n-0 Fall	58
3.4.	Auslastung der Leitungsabschnitte bei verschiedenen Kombinationen von P_B und P_S	60
3.5.	Veränderung der Auslastung bei Verschiebung der Schaltanlage S	66
3.6.	Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} bei $P_{B,max,Voll.} = -5800$ MW, $P_{B,max,Ein.} = -5060$ MW, $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$	73
3.7.	Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-0)-Fall laut analytischer Berechnung	74
3.8.	Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-0)-Fall laut Simulation	75
3.9.	Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-0)-Fall laut analytischer Berechnung	76
3.10.	Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-0)-Fall laut Simulation	77
3.11.	Auswirkungen von (n-1)-Leistungsfehlern auf Versorgung und Übertragungskapazität	79
3.12.	Äquivalente (n-1)-Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise hinsichtlich der resultierenden Leistungsauslastung	80
3.13.	Bei Lastflussrichtung laut <u>Kästchen</u> : ungünstigster Ausfall ist L_{21}	82
3.14.	Bei Lastflussrichtung laut <u>Kästchen</u> : ungünstigster Ausfall ist L_{22}	85
3.15.	(n-1)-Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise	86

3.16. Äquivalente (n-1)-Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise hinsichtlich der resultierenden Leitungsauslastung	90
3.17. (n-1)-Fehler- und Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise	91
3.18. (n-1)-Fehler- und Ausfallszenarien der Leitungsstromkreise	92
3.19. Parameter σ und β bei verschiedenen Vermaschungsgraden V im (n-1)-Fall	94
3.20. Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} bei $P_B = -5000$ MW, $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$	102
3.21. Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} bei $P_{B,max,Voll.} = -2900$ MW, $P_{B,max,Ein.} = -3150$ MW, $P_S = -1200$ MW und $V = 66,7\%$	110
3.22. Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-1)-Fall laut händischer Berechnung	114
3.23. Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B > 0$ im (n-1)-Fall laut Simulation	115
3.24. Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-1)-Fall laut händischer Berechnung	116
3.25. Übertragungskapazität $P_{B,max}$ /MW für $P_B < 0$ im (n-1)-Fall laut Simulation	117
3.26. R^2 -Werte der linearen Regression sowie der polynomialen Regression . .	119
3.27. Differenz zwischen berechnetem und simuliertem Vorteil der Einfacheinschleifung gegenüber der Volleinschleifung betreffend der maximalen Übertragungskapazität für $P_B > 0$ im kritischsten (n-1)-Fall	124
3.28. Simulierte P - und Q -Werte am Anfang (A) und Ende (E) der Leitungsabschnitte L_{11} und L_{21} für $P_S = -1200$ MW bzw. $P_S = -400$ MW und $V = 66,7\%$ für den kritischsten (n-1)-Leitungsausfall	125
3.29. Ausfallhäufigkeit und Ausfalldauer verschiedener Netzelemente	142
3.30. (n-1)-Zuverlässigkeitsanalyse: 2-fach-Sammelschiene. Ausfallhäufigkeit H und Nichtverlässlichkeit NV	148
3.31. Vergleich der Zuverlässigkeitskennwerte verschiedener Topologien	149
3.32. Betriebliche (n-1)-Sicherheit bei Ausfall von Leitungen oder Sammelschienen	156
3.33. Anzahl der Netzelemente und Anzahl der Schaltfelder pro Topologie . .	157
A.1. Zuverlässigkeitsanalyse der H3-Schaltung	178
A.2. Zuverlässigkeitsanalyse der H5-Schaltung	179
A.3. Zuverlässigkeitsanalyse der einfach eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene	180
A.4. Zuverlässigkeitsanalyse der voll eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene . .	181
A.5. Zuverlässigkeitsanalyse der einfach eingeschleiften 3-fach-Sammelschiene	182
A.6. Zuverlässigkeitsanalyse der voll eingeschleiften 3-fach-Sammelschiene . .	183
A.7. Zuverlässigkeitsanalyse der einfach eingeschleiften $1\frac{1}{2}$ -Leistungsschalter Topologie	184
A.8. Zuverlässigkeitsanalyse der voll eingeschleiften $1\frac{1}{2}$ -Leistungsschalter Topologie	185
A.9. Zuverlässigkeitsanalyse der Ringsammelschiene	186
A.10. Zuverlässigkeitsanalyse des Doppelstichs	187

A.11.Zuverlässigkeitsanalyse des Stichs 188

Literaturverzeichnis

- [1] F. W. Davenport, E. M. Magidson und Y. A. Yakub, “Substations Bus-Switching Arrangements: Their Essential Requirements and Reliability”, in *CIGRE Session*, Paper ELT_010_1, CIGRE Study Committee 23 (Substations), 1969.
- [2] R. J. Cakebread, K. Reichert und H.-G. Schütte, “Substation Design Criteria for Simple, Reliable and Safe Service”, in *CIGRE Session*, Paper presented in the name of Study Committee No. 23 (Substations), CIGRE Study Committee 23 (Substations), 1974.
- [3] R. J. Cakebread, K. Reichert und H. G. Schütte, “Reliability in the Design of EHV Substations: Availability as a Function of Component Failure Rate, Repair and Maintenance Times”, in *CIGRE Session*, Paper presented to SC 23 and published at the request of Chairman F. T. W. Davenport, CIGRE Study Committee 23 (Substations), 1979.
- [4] “General Guidelines for the Design of Outdoor A. C. Substations (2nd version)”, CIGRE, Technical Brochure (Ref. 161), 2000, Working Group 23.03, Study Committee B3.
- [5] “General Guidelines for the Design of Outdoor A. C. Substations”, CIGRE, Technical Brochure (Ref. 069), 1992, Working Group 23.04, Study Committee B3.
- [6] *IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations*, New York, NY, USA, 2008. DOI: 10.1109/IEEESTD.2008.4655775.
- [7] Joint Working Group B3/C1/C2.14, “Circuit Configuration Optimization”, CIGRE, Paris, France, Technical Brochure CIGRE Brochure No. 585, 2014, Joint Working Group B3/C1/C2.14.
- [8] T. Krieg und J. Finn, Hrsg., *Substations, CIGRE Green Books*. Cham, Switzerland: Springer, 2021, CIGRE Study Committee B3; Power Network Consulting Pty Ltd, Adelaide, Australia; CIGRE UK, Newcastle upon Tyne, UK.
- [9] K. Schäfer, *Netzberechnung: Verfahren zur Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, ISBN: 9783658267339. Adresse: <https://books.google.de/books?id=gC3KDwAAQBAJ>.
- [10] *ÖVE EN 60909-0:2017 – Kurzschlussströme in Drehstromsystemen – Teil 0: Berechnungen von Kurzschlussströmen (IEC 60909-0:2016)*, German, Norm, ÖVE/ÖNORM EN 60909-0:2017-02, Österreichischer Verband für Elektrotechnik (ÖVE), 2017.
- [11] DIgSILENT GmbH, *PowerFactory 2024 Benutzerhandbuch*, Online-Edition, Version 2024, r12089, DIgSILENT GmbH, Heinrich-Hertz-Straße 9, 72810 Gomariningen, Deutschland, Aug. 2024. Adresse: <https://www.digsilent.de>.

- [12] G. Balzer, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen*. Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg, 2020, FG Elektrische Energieversorgung, TU Darmstadt, ISBN: 978-3-658-28330-8. DOI: 10.1007/978-3-658-28331-5. Adresse: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28331-5>.
- [13] A. Prechtel, “Vorlesung über Elektrodynamik”.
- [14] CIGRE Working Group A3.06, “Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 1 – Summary and General Matters”, CIGRE, Technical Report, Okt. 2012.
- [15] CIGRE Working Group A3.06, “Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 2 – Reliability of High Voltage SF₆ Circuit Breakers”, CIGRE, Technical Report, Okt. 2012.
- [16] CIGRE Working Group A3.06, “Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 3 – Disconnectors and Earthing Switches”, CIGRE, Technical Report, Okt. 2012.
- [17] CIGRE Working Group A3.06, “Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 4 – Instrument Transformers”, CIGRE, Technical Report, Okt. 2012.
- [18] CIGRE Working Group A2.37, “Transformer Reliability Survey”, CIGRE, Technical Report, Dez. 2015.
- [19] “High Voltage Equipment Reliability Data”, Energiforsk AB, Techn. Ber. RAPPORT 2023-974, Dez. 2023. Adresse: <https://www.energiforsk.se>.

A. Anhang 1

A.1. Zuverlässigkeitsanalyse: Excel-Auswertung

Tabelle A.1.: Zuverlässigkeitsanalyse der H3-Schaltung

Ausgef.	Typ	Def. nach	Def. nach	Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung		Nach Korrekturschaltung		Gesamt		
				H [1/a]	NV [h/a]	H [1/a]	NV [h/a]	H [1/a]	NV [h/a]	
Elem.	Fehler	Korr.	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2
LTG11	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0
LTG21	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0
SpW11	W		0	0	0	0	0	0	0	0
StrW11	W		0	0	0	0	0	0	0	0
SpW21	W		0	0	0	0	0	0	0	0
StrW21	W		0	0	0	0	0	0	0	0
LS11	LS	V1	0,0113	0	0	0	0	0	0,0113	0
LS21	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0,0113	0,002825
TR11	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0,0113
TR21	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0113
TR_A1_1	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0,0105
TR_A2_1	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105
TR_A1_2	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0,0105
TR_A2_2	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105
QTR1	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0,0105
QTR2	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105
QLS	LS	V1,V2	0,0113	0,0113	0	0,002825	0	0,002825	0,0113	0,0113
QStrW	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0,00034725
LS_A1_2	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0,002825
LS_A2_2	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825
StrW_A1_1	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0,00034725
SpW_A1_2	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0,00034725
StrW_A1_2	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0,00034725
StrW_A2_1	W	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725
SpW_A2_2	W	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725
StrW_A2_2	W	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725
T1	T	V1	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,007521	0,00188025
T2	T	V2	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,00188025
Gesamt			0,214977	0,213588	11,5649393	11,56459205	0,214977	0,213588	11,5649393	11,56459205

Tabelle A.2.: Zuverlässigkeitsanalyse der H5-Schaltung

Ausgef.	Elem.	Typ	Def. nach Fehler	Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung				Nach Korrekturschaltung				Gesamt						
				H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]			
	LTG1	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	LTG2	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	SpW1	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	StrW1	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	SpW2	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	StrW2	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	LS1	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0	0	0	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	
	LS2	LS	V2	0,042	0,0113	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	
	TR1	TR	V1	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	
	TR2	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	
	TR_A1_1	TR	V1	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	
	TR_A2_1	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	
	TR_A1_2	TR	V1	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	
	TR_A2_2	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	
	QTR1	TR	V1	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	0,042	0	
	QTR2	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	
	QLS	LS	V1,V2	0,0113	0,0113	0,002825	0,002825	0	0	0	0	0	0	0,0113	0,0113	0,002825	0	
	QStrW	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	
	LS_A1_1	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	1,0283	0	0,0113	0	1,031125	0	
	LS_A2_1	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	1,0283	0	0,0113	0	1,031125	
	LS_A1_2	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	1,0283	0	0,0113	0	1,031125	0	
	LS_A2_2	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	1,0283	0	0,0113	0	1,031125	
	StrW_A1_1	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0	
	StrW_A1_2	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0	
	StrW_A1_2	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0	
	StrW_A2_1	W	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	
	StrW_A2_2	W	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	
	StrW_A2_2	W	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	
	T1	T	V1	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,007521	0	0,210588	0	0,007521	0	0,21246825	0	
	T2	T	V2	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,007521	0	0,210588	0	0,007521	0	0,21246825	
			Gesamt															
				0,226277	0,224888	0,226277	0,224888	0,226277	0,224888	0,226277	0,224888	0,226277	0,224888	0,226277	0,224888	0,226277	0,224888	12,59571705

Tabelle A.3.: Zuverlässigkeitsanalyse der einfach eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene

Ausgef.	Typ	Def. nach	Def. nach	Nach Anfall, vor Korrekturschaltung				Nach Korrekturschaltung				Gesamt					
				H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]		
LTCG1	LTCG	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LTCG21	LTCG	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW11	W	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW21	W	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
StrW21	W	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11	TR	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21	TR	V1	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_Ss1	TR	V1,V2	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	
TR11_Ss2	TR	V1,V2	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	
TR21_Ss1	TR	V1,V2	V2	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	
TR21_Ss2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
TR_A1_Ss1	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
TR_A1_Ss2	TR	V1,V2	V1	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,042	0,042	0	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	
TR_A2_Ss1	TR	V1,V2	V2	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,042	0,042	0	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	
TR_A2_Ss2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
TR_A1	TR	V1	V1	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
TR_A2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
QTR1	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
QTR2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	
QSpW	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	
QStW	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	
LS11	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	
LS21	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0,002825	
QLS	LS	V1,V2	V1	0,0113	0,0113	0,002825	0,002825	0,0113	0,0113	0	0	0,0113	0,0113	0,002825	0,002825	0	
LS_A1_1	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	
LS_A2_1	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0,002825	
LS_A1_2	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	
LS_A2_2	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0,002825	
StrW_A1_1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	
StrW_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	
StrW_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	
StrW_A2_1	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,0644496	0	
StrW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,0644496	0	
StrW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,0644496	0	
T1	T	V1	V1	0,007521	0	0	0,00188025	0	0,007521	0	0	0,210588	0	0,007521	0	0,21246825	
T2	T	V2	V2	0	0,007521	0	0,00188025	0	0	0,007521	0	0	0,210588	0	0,21246825	0	
Ss1	SS	V1	V1	0,000148	0	0	0,000037	0	0,000148	0	0	0,000148	0	0,000148	0	0,000037	
Ss2	SS	V2	V2	0	0,000148	0	0,000037	0	0	0,000148	0	0	0,000148	0	0,000037	0	
Gesamt				0,395814	0,393036	10,11844855	10,11775405	0,395814	0,393036	10,11844855	10,11775405	0,395814	0,393036	10,11844855	10,11775405	0,395814	0,393036

Tabelle A.4.: Zuverlässigkeitsanalyse der voll eingeschleiften 2-fach-Sammelschiene

Ausgef. Elem.	Typ	Def. nach Fehler	Def. nach Korrr.	Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung				Nach Korrekturschaltung				Gesamt					
				H [l/a]		NV [h/a]		H [l/a]		NV [h/a]		H [l/a]		NV [h/a]			
				V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2		
LTG11	LTG			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LTG12	LTG			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LTG21	LTG			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
LTG22	LTG			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW11	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW11	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW21	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW21	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW12	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW12	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW22	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SpW22	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
StrW22	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
StrW22	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR11	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR11	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR21	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR21	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR22	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR22	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
TR11_SS1	TR	V1		0,042	0	0,0105	0	0	0	0	0	0,042	0	0,0105	0		
TR11_SS2	TR	V1,V2		0,042	0,042	0,0105	0,0105	0	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105		
TR12_SS1	TR	V1,V2		0,042	0,042	0,0105	0,0105	0	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105		
TR12_SS2	TR	V2		0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0,0105		
TR21_SS1	TR	V1,V2		0,042	0,042	0,0105	0,0105	0	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105		
TR21_SS2	TR	V2		0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0,0105		
TR22_SS1	TR	V1		0,042	0	0,0105	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0		
TR22_SS2	TR	V1,V2		0,042	0,042	0,0105	0,0105	0	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105		
TR_A1_SS1	TR	V1	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0		
TR_A1_SS2	TR	V1,V2	V1	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,042	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105		
TR_A2_SS1	TR	V1,V2	V2	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0	0,042	0,042	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105		
TR_A2_SS2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0,0105		
TR_A1	TR	V1	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0		
TR_A2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0,0105		
QTR1	TR	V1		0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0		
QTR2	TR	V2		0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0,042	0	0,0105	0	0,0105	0,0105		
QSpW	W	V1		0,001389	0	0,00034725	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725	0		
QStrW	W	V1		0,001389	0	0,00034725	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725	0		
LS11	LS	V1		0,0113	0	0,002825	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825	0		
LS21	LS	V2		0	0,0113	0	0,002825	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825		
LS12	LS	V2		0	0,0113	0	0,002825	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825		
LS22	LS	V1		0,0113	0	0,002825	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825	0		
LS11	LS	V1,V2	V1	0,0113	0,0113	0,002825	0,002825	0	0	0,0113	0,0113	0,002825	0,002825	0,002825	0,002825		
LS_A1_1	LS	V1	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825	0		
LS_A2_1	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825		
LS_A1_2	LS	V1	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825	0		
LS_A2_2	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,0113	0	0,002825	0	0,002825		
StrW_A1_1	W	V1	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725	0		
StrW_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725	0		
StrW_A1_1	W	V1	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725	0		
StrW_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725	0		
StrW_A2_1	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725		
StrW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725		
SpW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725		
StrW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,00034725		
T1	T	V1	V1	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,00188025	0		
T2	T	V2	V2	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,00188025		
SS1	SS	V1	V1	0,000148	0	0,000037	0	0,000148	0	0,000148	0	0,000037	0	0,000037	0		
SS2	SS	V2	V2	0	0,000148	0	0,000037	0	0,000148	0	0,000148	0	0,000037	0	0,000037		
Gesamt				0,533114				0,530336				10,15277355				10,15207905	

Tabelle A.5.: Zuverlässigkeitsanalyse der einfach eingeschleiften 3-fach-Sammelschiene

Ausgef.	Typ	Def nach	Def nach	Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung				Nach Korrekturschaltung				Gesamt						
				H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]			
LTG1	LTG	LTG	LTG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LTG2	LTG	LTG	LTG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SPW11	W	W	W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SPW21	W	W	W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SPW21	W	W	W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SPW21	W	W	W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11	TR	TR	TR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21	TR	TR	TR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_S81	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR11_S82	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR11_S83	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR21_S81	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR21_S82	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR21_S83	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
TR_A1_S81	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR_A1_S82	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR_A1_S83	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR_A2_S81	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR_A2_S82	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
TR_A2_S83	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
TR_A1	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
TR_A2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
QTR1_S82_1	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
QTR1_S83	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
QTR1_S81	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
QTR1_S82_2	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
QTR2_S82_1	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
QTR2_S83	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
QTR2_S81	TR	V1,V2	V1,V2	0,042	0	0	0,0105	0	0	0	0	0,042	0	0	0,0105	0	0	
QTR2_S82_2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	0,042	0	0,0105	0	0	
QSPW1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0	0	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	
QSPW1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0	0	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	
QSPW2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	
QSPW2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	
LS11	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0	0	0,0113	0	0	0,002825	0	0	
LS21	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0	
QLS1	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0	0	0,0113	0	0	0,002825	0	0	
QLS2	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0	
LS_A1_1	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0,0113	0	0	0,0113	0	0	0,002825	0	0	
LS_A2_1	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0	
LS_A1_2	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0	
LS_A2_2	LS	V2	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0,0113	0	0,002825	0	0	
SPW_A1_1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	
SPW_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	
SPW_A2_1	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	
SPW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	
SPW_A2_2	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	0	
T1	T	V1	V1	0,007521	0	0	0,00188025	0	0,007521	0	0	0,007521	0	0	0,00188025	0	0	
T2	T	V2	V2	0	0,007521	0	0,00188025	0	0	0,007521	0	0	0	0,007521	0	0,00188025	0	0
SS1	SS	V1	V1	0,000148	0	0	0,000037	0	0	0	0	0,000148	0	0	0,000037	0	0	
SS2	SS	V1	V1	0,000148	0	0	0,000037	0	0	0	0	0,000148	0	0	0,000037	0	0	
SS3	SS	V2	V2	0	0,000148	0	0,000037	0	0	0	0	0	0,000148	0	0,000037	0	0	
Gesamt				0,563814	0,647814	12,68044855	12,70144855	0,563814	0,647814	12,68044855	12,70144855	0,563814	0,647814	12,68044855	12,70144855	0,563814	0,647814	12,68044855

Tabelle A.7.: Zuverlässigkeitsanalyse der einfach eingeschleiften 1 1/2-Leistungsschalter Topologie

Ausgef. Elem.	Typ	Def nach	Def nach Fehler Korrekt.	Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung				Nach Korrekturschaltung				Gesamt					
				H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]		
LTCG1	LTCG			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LTCG2	LTCG			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW11	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW21	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_S21	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_S22	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_S21	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_S22	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR_A1_1	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0	0	
TR_A2_1	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0	0	
TR_A1_2	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0	0	
TR_A2_2	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0	0	
SpW_A1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,001389	0	0	0	0	
SpW_A2	W	V2	V2	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,001389	0	0	0	0	
SpW_A1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,001389	0	0	0	0	
SpW_A2	W	V2	V2	0,001389	0	0	0,00034725	0	0,001389	0	0	0,001389	0	0	0	0	
LS1_S21	LS	V2	V2	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0	
LS1_S22	LS	V2	V2	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0	0	0,0113	0	0	
LS2_S21	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0	0,0113	0	0	0	0,002825	0	
LS2_S22	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0	0,0113	0	0	0	0,002825	0	
TR11_a	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_b	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_c	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0	
TR11_d	TR	V2	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	0	0,042	0	0	
SpW11_a	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW11_b	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW11_c	W	V2	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,001389	0	0,00034725	
SpW11_d	W	V2	V2	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,00034725	0	0,00034725	
TR21_a	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0	0	
TR21_b	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0,042	0	0	0,042	0	0	0	0	
TR21_c	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_d	TR			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW21_a	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW21_b	W			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW21_c	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,00034725	0	0	
SpW21_d	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0	0,00034725	0	0	
LS_A1	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0	0,002825	0	0	
LS_A2	LS	V2	V2	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	0	0,002825	0	0	
TR1	T	V1	V1	0,007521	0	0	0,00188025	0	0,007521	0	0	0,007521	0	0	0	0	
TR2	T	V2	V2	0,007521	0	0	0,00188025	0	0,007521	0	0	0,007521	0	0	0	0	
SS1	SS			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SS2	SS			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gesamt				0,214977	0,214977	0,214977	11,50083695	11,50083695	0,214977	0,214977	0,214977	11,50083695	11,50083695	0,214977	0,214977	0,214977	11,50083695

Tabelle A.8.: Zuverlässigkeitsanalyse der voll eingeschleiften 1 1/2-Leistungsschalter Topologie

Ausgef. Elem.	Typ	Def. nach Fehler Korr.	Nach Ausfall, vor Korrekturschaltung			Nach Korrekturschaltung			Gesamt					
			H [1/a]	NV [h/a]	H [1/a]	NV [h/a]	H [1/a]	NV [h/a]	H [1/a]	NV [h/a]				
LTG11	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LTG12	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LTG21	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LTG22	LTG		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR22	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW11	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW21	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW12	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SpW22	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_SS1	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_SS2	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_SS1	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_SS2	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12_SS1	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12_SS2	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR_A1_1	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305	
TR_A2_1	TR	V2	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305	
TR_A1_2	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305	
TR_A2_2	TR	V2	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305	
SpW_A1	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,0644496	
SpW_A2	W	V2	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,0644496	
LS11_SS1	LS	V2	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,0644496
LS11_SS1_SS2	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825
LS11_SS2	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825
LS21_SS1	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	
LS21_SS1_SS2	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	
LS21_SS2	LS	V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_b	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR11_c	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305
TR11_d	TR	V2	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305
St+W11_SS1	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W11_a	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W11_b	W	V2	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	
St+W11_c	W	V2	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	
St+W11_d	W	V2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W11_SS2	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_a	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305	
TR21_b	TR	V1	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	0,0105	0	0,042	0	2,5305	
TR21_c	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR21_d	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W21_SS1	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W21_a	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W21_b	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	
St+W21_c	W	V1	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	0	0,001389	0	0,00034725	
St+W21_SS2	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12_a	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12_b	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12_c	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TR12_d	TR		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W12_SS1	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W12_a	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W12_b	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W12_c	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W12_d	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
St+W12_SS2	W		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
LS_A1	LS	V1	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	1,031125	
LS_A2	LS	V2	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	0,002825	0	0,0113	0	1,031125
T1	T	V1	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,21246825	
T2	T	V2	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,00188025	0	0,007521	0	0,21246825	
SS1	SS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SS2	SS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gesamt						0,214977			0,214977			11,50083695		

Tabelle A.11.: Zuverlässigkeitsanalyse des Stichs

Ausgef.	Typ	Def. nach Fehler	Def. nach Korr.	Nach Anfall, vor Korrekturschaltung				Nach Korrekturschaltung				Gesamt								
				H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]	H [1/a]	V1	V2	NV [h/a]					
LTG1	LTG	V1	V1	0,34	0	0	0,085	0	0	0,34	0	0	27,2	0	0,34	0	27,285	0		
TR1	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	0		
TR_A1	TR	V1	V1	0,042	0	0	0,0105	0	0	0,042	0	0	2,52	0	0,042	0	2,5305	0		
LS_A1_1	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	1,0283	0	0,0113	0	1,031125	0		
LS_A1_2	LS	V1	V1	0,0113	0	0	0,002825	0	0	0,0113	0	0	1,0283	0	0,0113	0	1,031125	0		
StrW_A1_1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0		
Spw_A1_1	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0		
Spw_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0		
StrW_A1_2	W	V1	V1	0,001389	0	0	0,00034725	0	0	0,001389	0	0	0,06410235	0	0,001389	0	0,0644496	0		
T1	T	V1	V1	0,007521	0	0	0,00188025	0	0	0,007521	0	0	0,210588	0	0,007521	0	0,21246825	0		
Gesamt																	0,459677	0	34,87851665	0

A.2. Zuverlässigkeitsanalyse: Topologien inklusive Wandler-Positionen und Beschriftungen

Die unten dargestellten Topologien entsprechen Abbildung 1.1 und Abbildung 1.2, ergänzt um die Positionen der Strom- und Spannungswandler sowie um eine Beschriftung, die jener in den Tabellen A.1 bis A.11 entspricht. Die Topologien 2-fach-Sammelschiene voll eingeschleift, 3-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift und 3-fach-Sammelschiene voll eingeschleift sind hier nicht gesondert dargestellt, da ihre Wandlerpositionen und Beschriftungen – abgesehen von geringfügigen Unterschieden – mit jenen der 2-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift (Abbildung A.3) übereinstimmen. Entsprechendes gilt für die 1^{1/2}-Leistungsschalter-Topologie einfach eingeschleift, die – mit Ausnahme der beiden fehlenden Leitungsstromkreise – der 1^{1/2}-Leistungsschalter-Topologie voll eingeschleift (Abbildung A.6) entspricht.

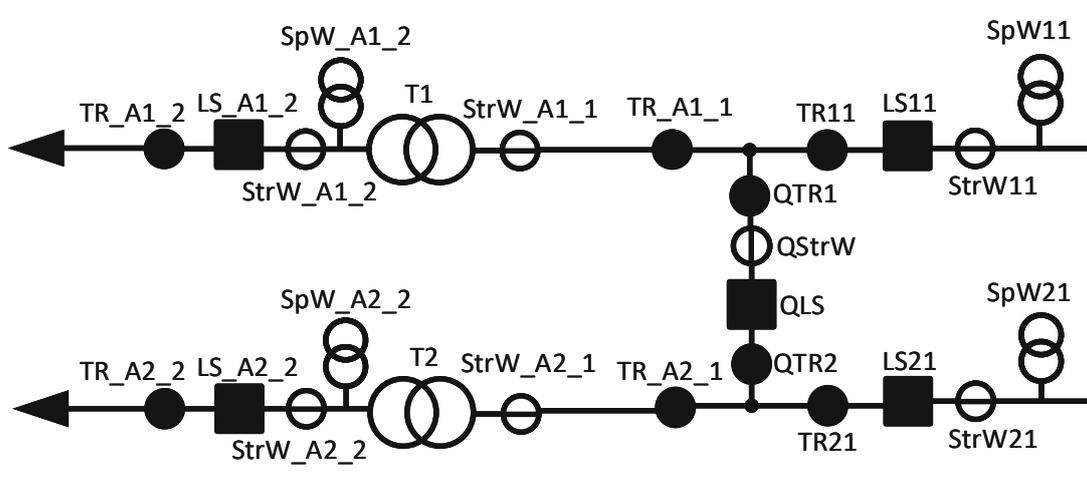


Abbildung A.1.: H3-Schaltung

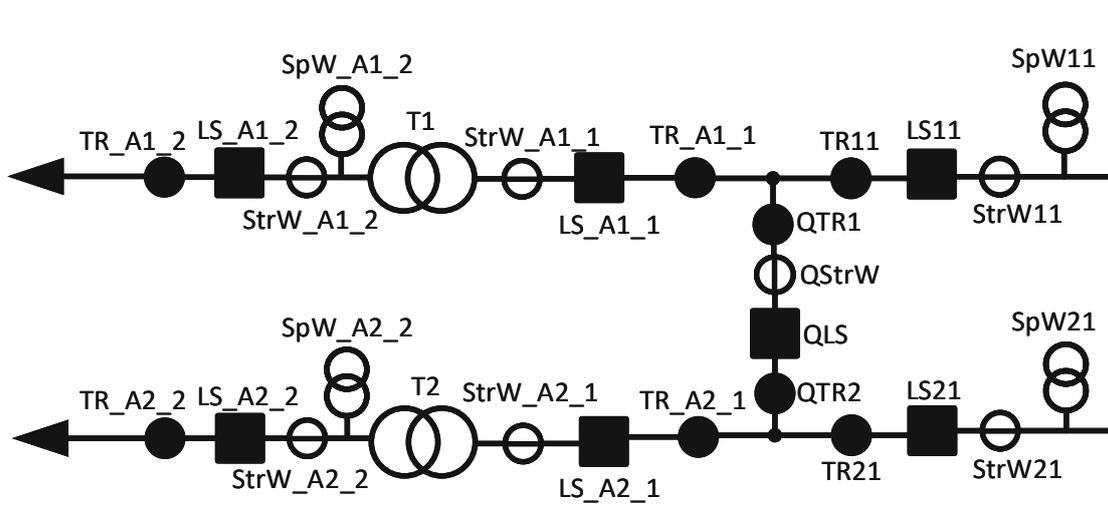


Abbildung A.2.: H5-Schaltung

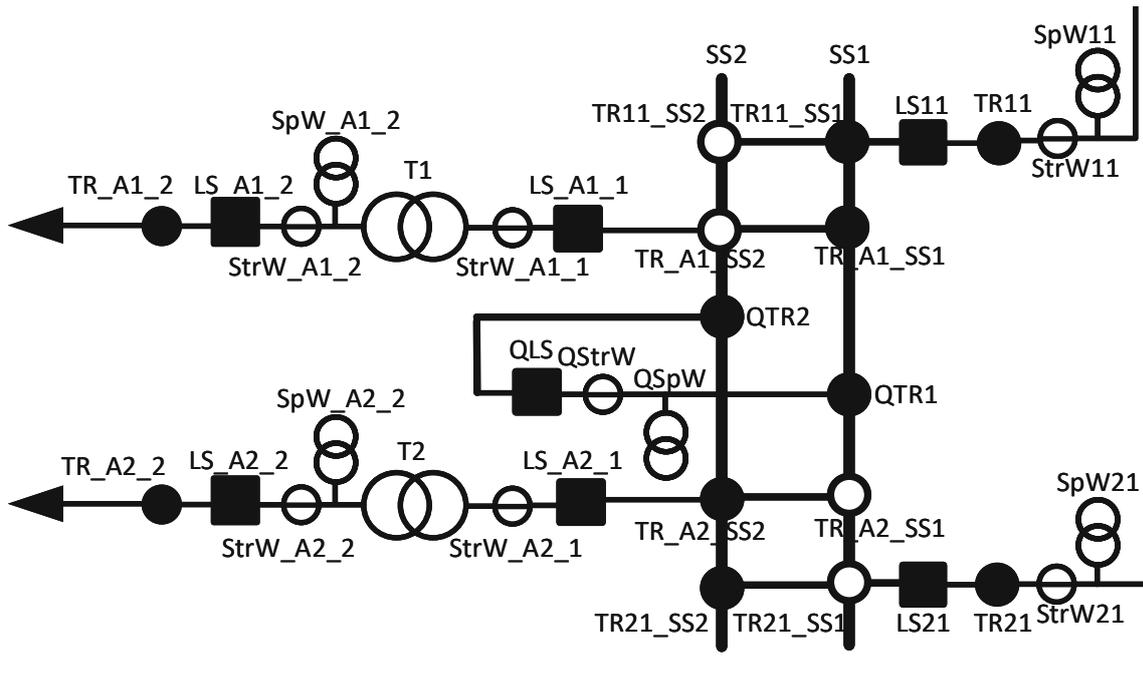


Abbildung A.3.: 2-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift

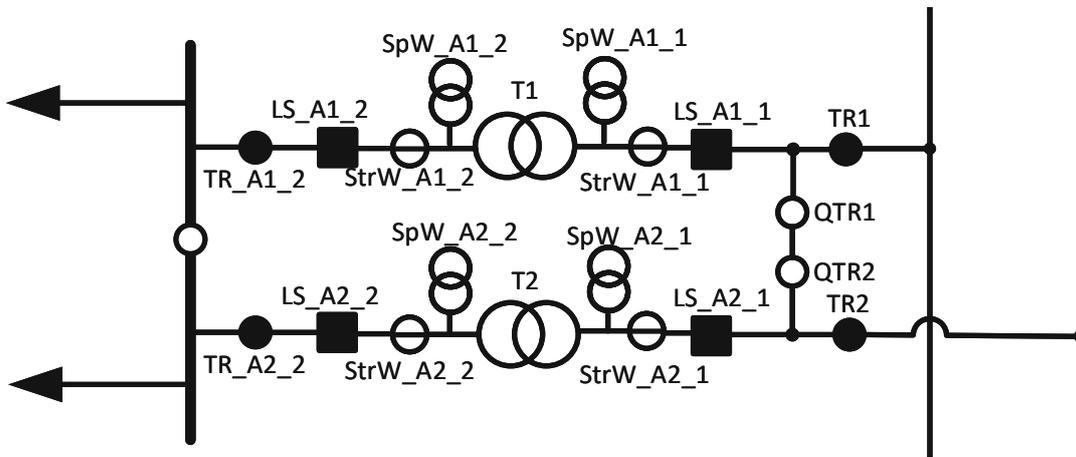


Abbildung A.4.: Doppelstich

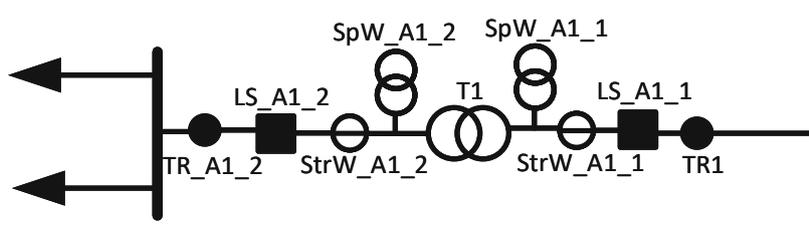


Abbildung A.5.: Stich

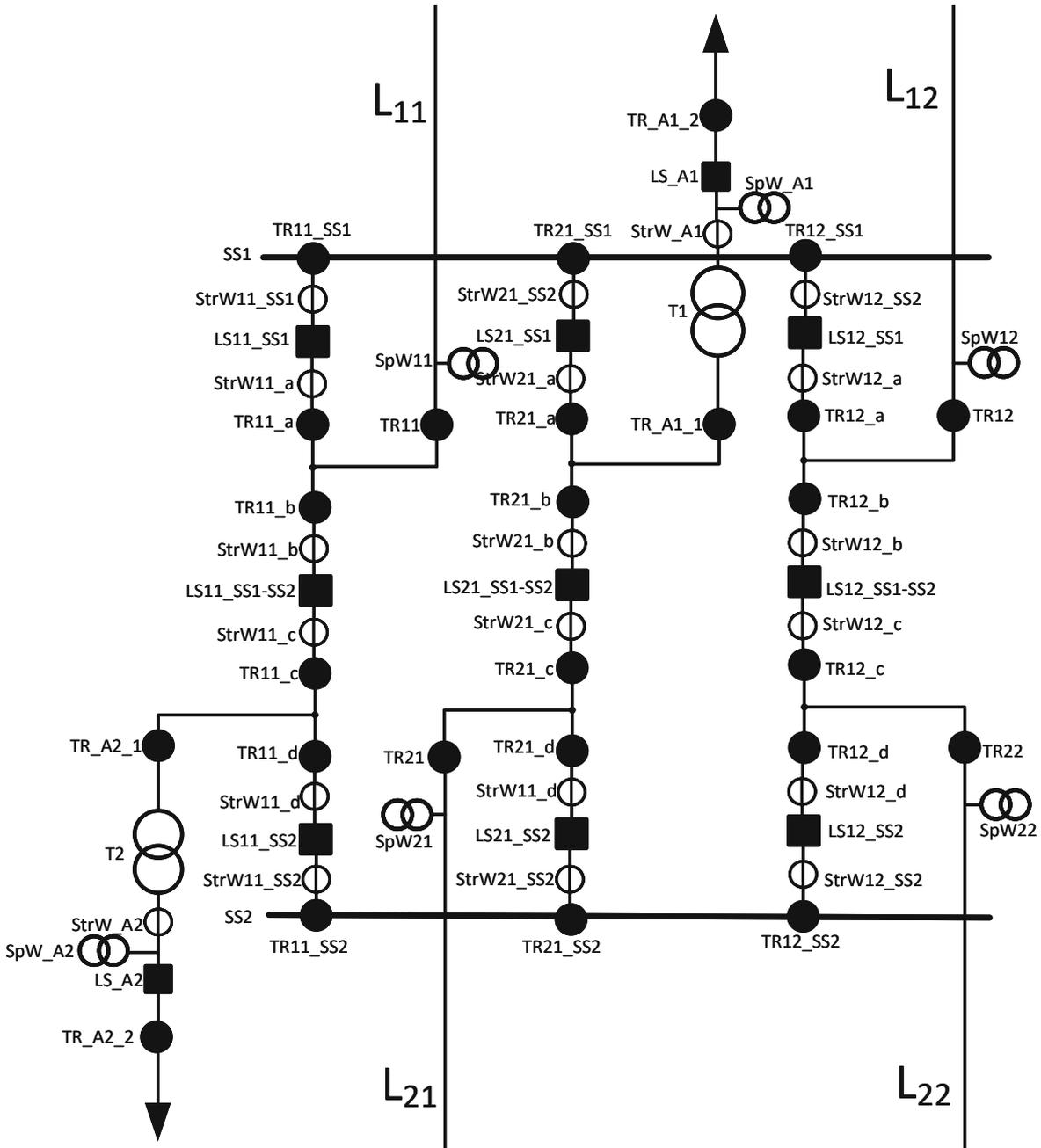


Abbildung A.6.: 1 1/2-Leistungsschalter-Topologie voll eingeschleift

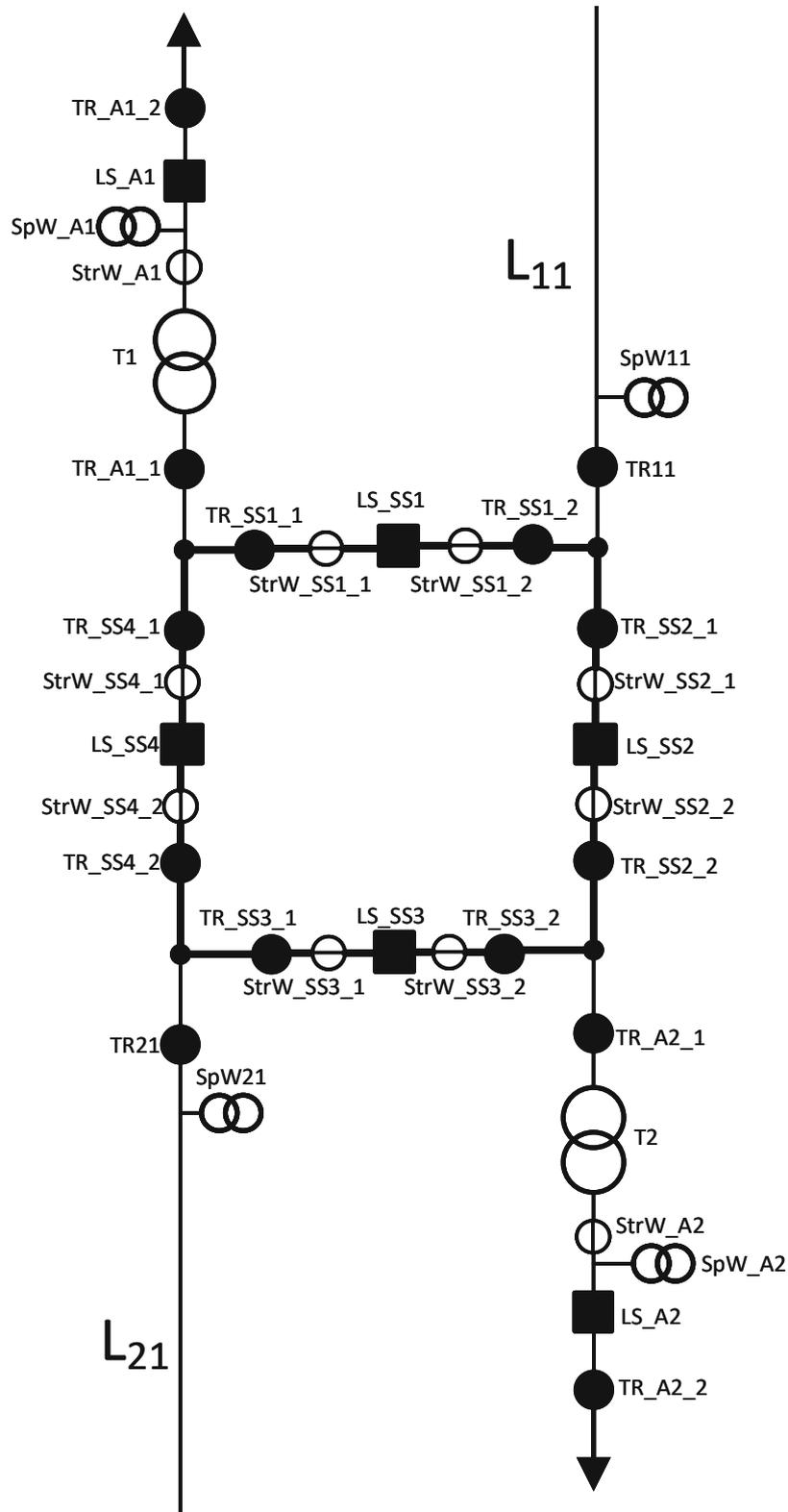


Abbildung A.7.: Ringsammelschiene

A.3. Zuverlässigkeitsanalyse: realitätsgetreue Darstellungen

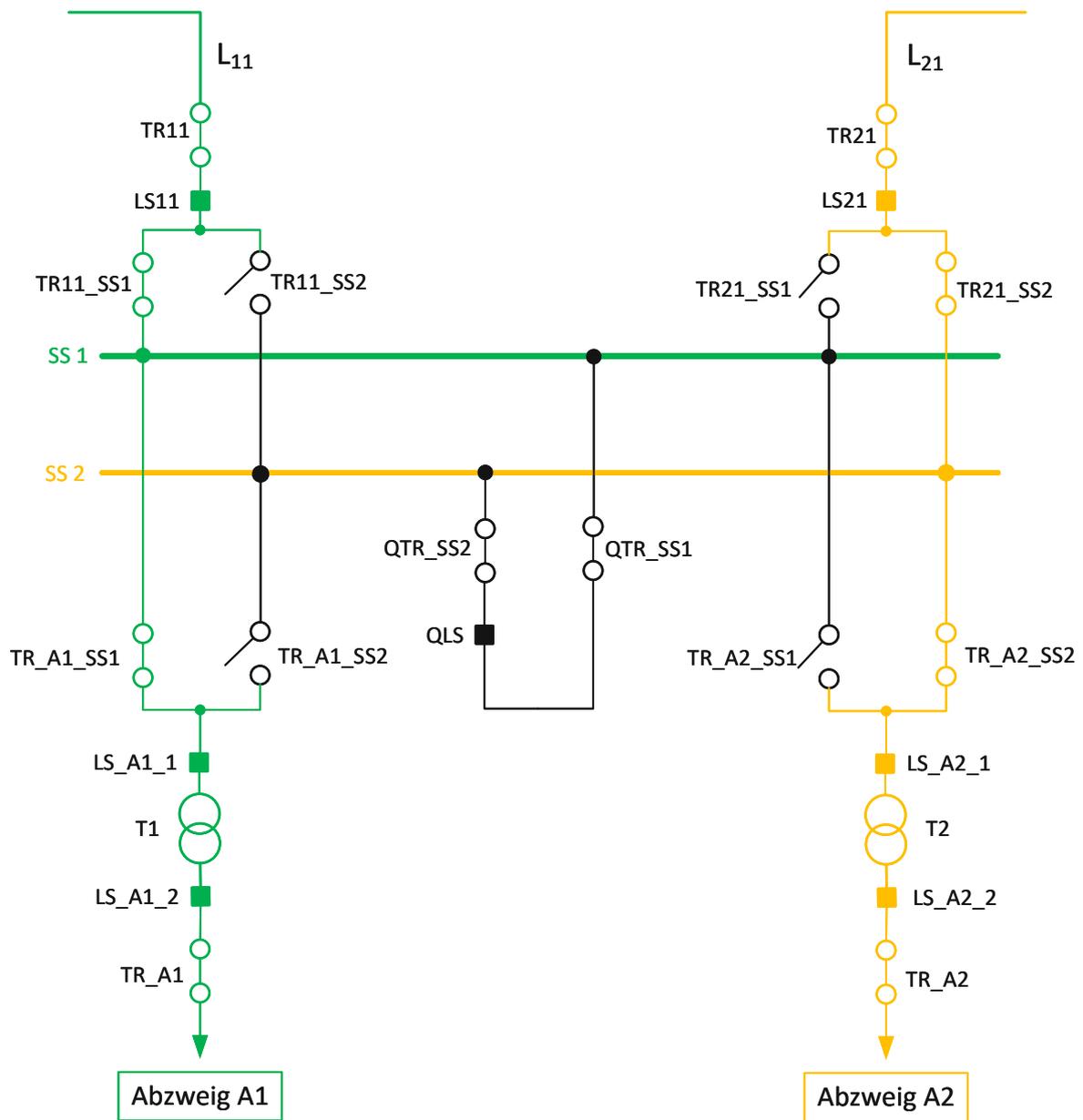


Abbildung A.8.: 2-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift

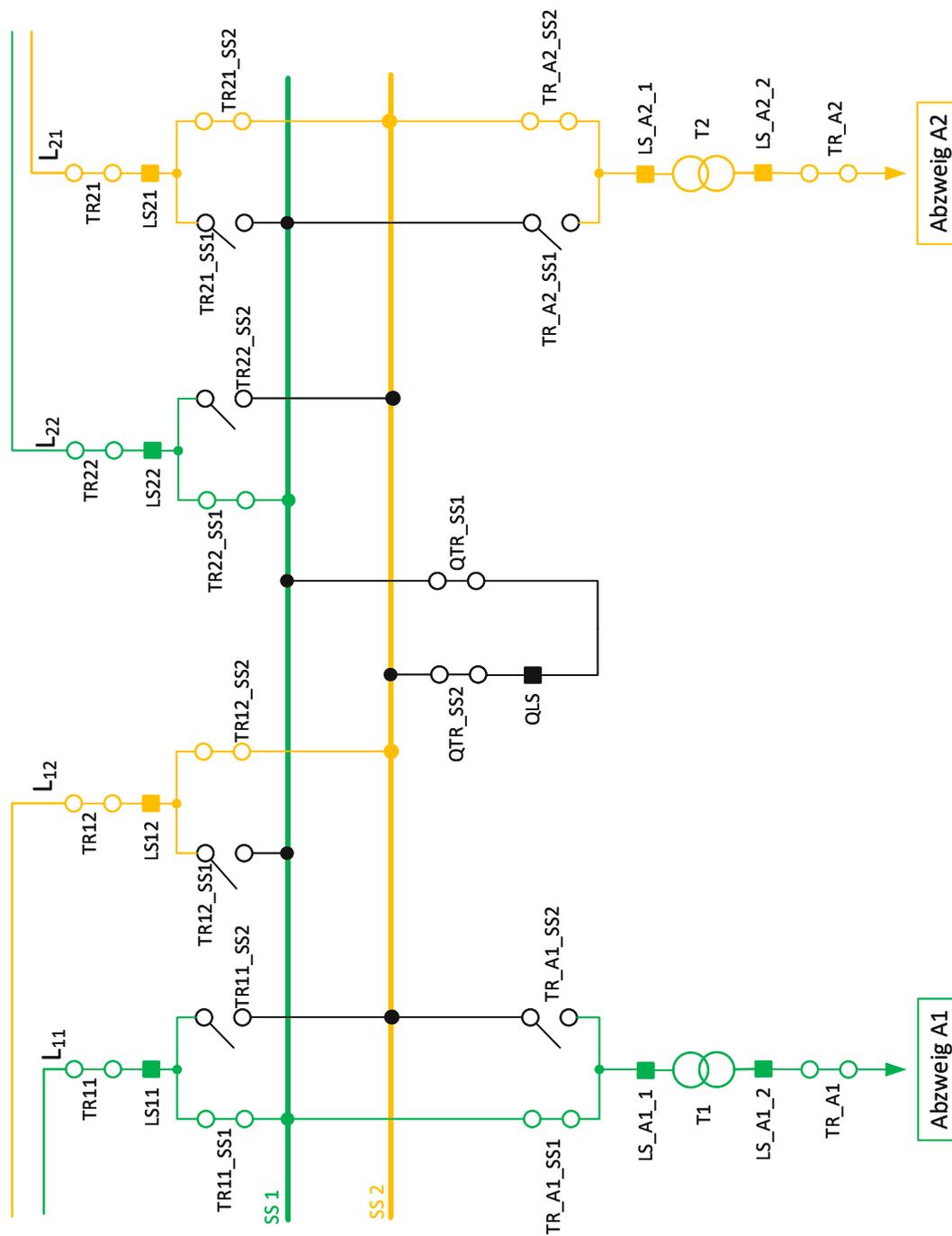


Abbildung A.9.: 2-fach-Sammelschiene voll eingeschleift

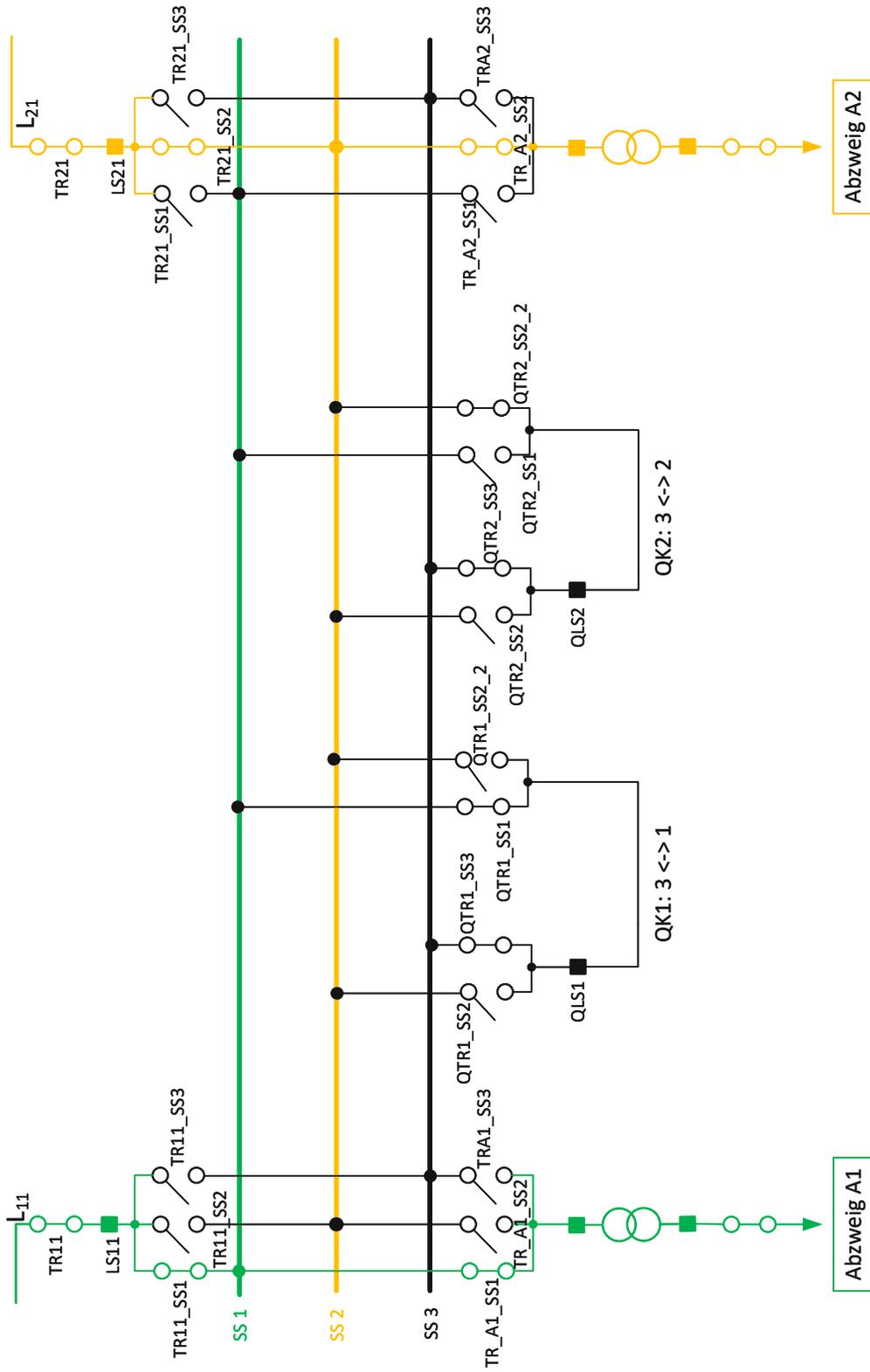


Abbildung A.10.: 3-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift

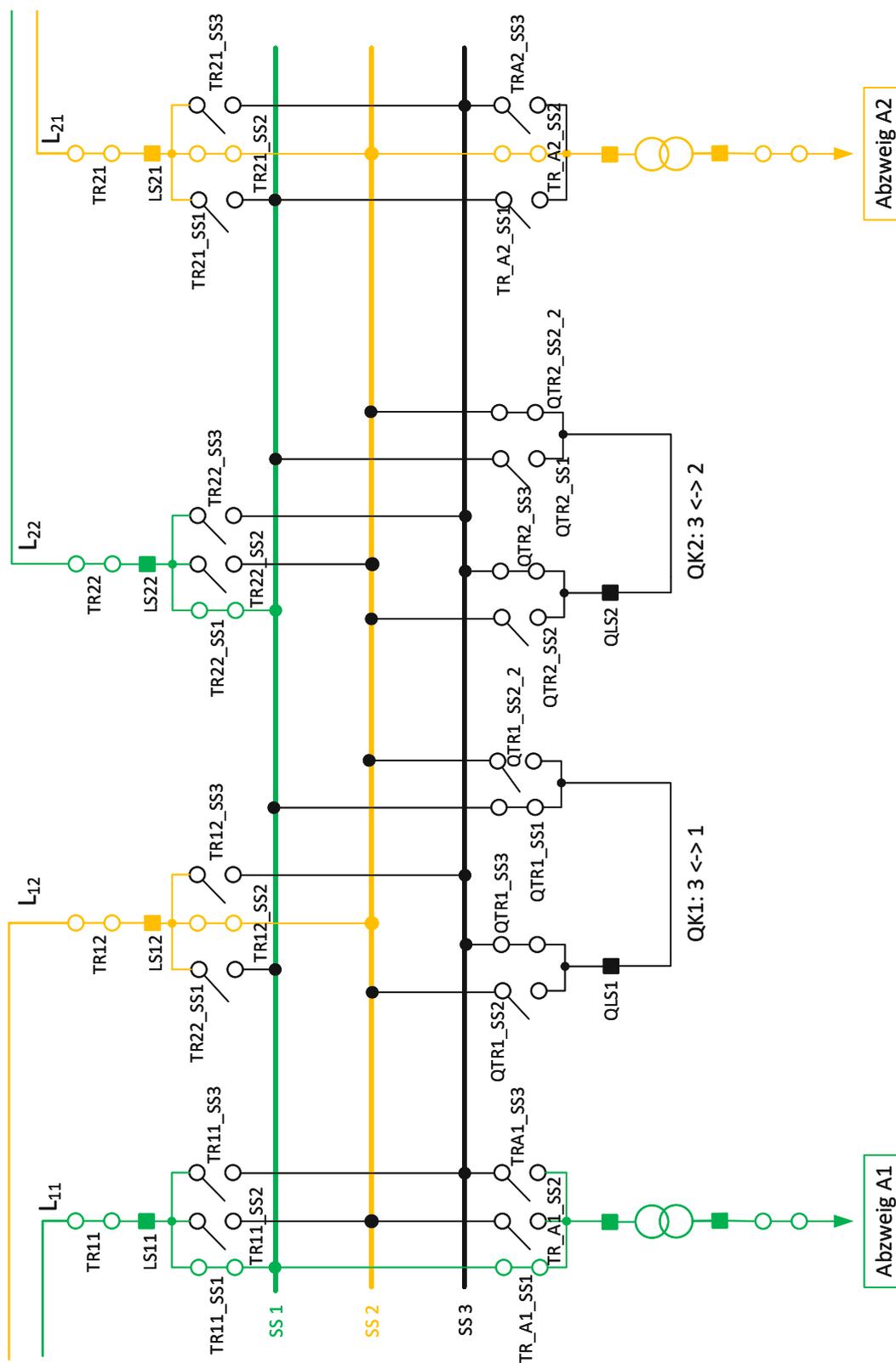


Abbildung A.11.: 3-fach-Sammelschiene voll eingeschleift

Fehlerfälle, die sich bei der 3-fach SS im Vergleich zur 2-fach SS negativ auf die Zuverlässigkeit der Anlage auswirken:

- Fehler TR11_SS3 => Ausfall Abzweig 1
 - Fehler TR21_SS3 => Ausfall Abzweig 2
 - Fehler TRA1_SS3 => Ausfall Abzweig 1 + keine Korrekturschaltung möglich!
 - Fehler TRA2_SS3 => Ausfall Abzweig 2 + keine Korrekturschaltung möglich!
-
- Fehler QTR1_SS2 => Ausfall Abzweig 2
 - Fehler QTR1_SS3 => kein Ausfall
 - (Fehler QTR1_SS1 => Ausfall Abzweig 1) → diesen Fehler wäre auch bei 2-fach SS
 - Fehler QTR1_SS2_2 => Ausfall Abzweig 1+2
-
- (Fehler QTR2_SS2 => Ausfall Abzweig 2) → diesen Fehler wäre auch bei 2-fach SS
 - Fehler QTR2_SS3 => kein Ausfall
 - Fehler QTR2_SS1 => Ausfall Abzweig 1+2
 - Fehler QTR2_SS2_2 => Ausfall Abzweig 2

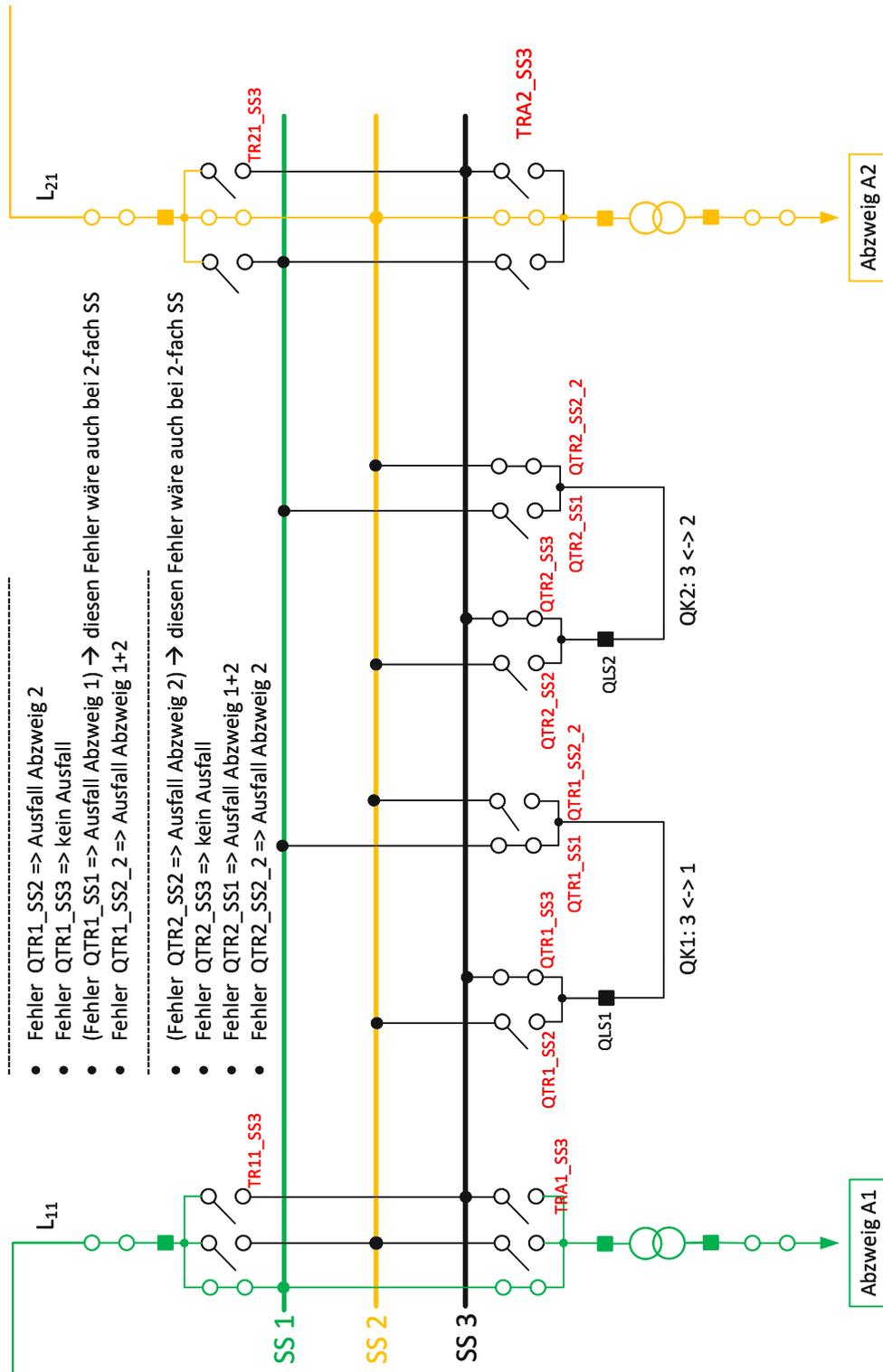


Abbildung A.12.: 3-fach-Sammelschiene einfach eingeschleift: Begründung der schlechteren Zuverlässigkeitskennwerte gegenüber der 2-fach-Sammelschiene