

**Einsatz eines  
Niederspannungslängsreglers zur  
Behebung von Spannungsunsymmetrien  
hervorgerufen durch Elektromobilität  
und dezentrale Energieerzeugung**

Robert Jahn

Masterarbeit  
Juni 2020



Masterarbeit für Herrn Robert Jahn

Datum: 18.12.2019

## **Einsatz eines Niederspannungslängsreglers zur Behebung von Spannungs- unsymmetrien hervorgerufen durch Elektromobilität und dezentrale Energieerzeugung**

Durch die zunehmende Einspeisung dezentraler Energieerzeuger sowie die vermehrte Anbindung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge ergeben sich für das Verteilnetz neue Herausforderungen. Aufgrund des hohen Energiebedarf der Elektrofahrzeuge auf der einen Seite und der Rückspeisung durch regenerative Erzeugungsanlagen auf der anderen Seite, ergibt sich ein nie dagewesenes Delta zwischen minimalem und maximalem Leistungsbezug. Da ein signifikanter Anteil an Ladestationen und dezentralen Energieerzeuger einphasig im Niederspannungsnetz angeschlossen ist, tritt dieses Leistungsdelta nicht nur im Zeitverlauf auf, sondern auch zwischen den drei Phasen, wodurch Spannungsunsymmetrien bewirkt werden.

Ein Spannungslängsregler ist ein Bauteil zur Verbesserung der statischen Spannungshaltung. Dabei wird mithilfe eines Längstransformators eine in- oder gegenphasige Zusatzspannung zur Netzspannung hinzugefügt. Dies führt entweder zur Senkung oder zum Anstieg der Spannung am Ausgang des Längsreglers. Das Bauteil ermöglicht eine symmetrische Regelung der drei Phasen, kann aber auch phasenunabhängig regeln und so Spannungsunsymmetrien ausgleichen.

Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung des Einsatzes eines Spannungslängsreglers zur Behebung von Spannungsunsymmetrien im Niederspannungsnetz. Dazu soll zunächst eine Literaturrecherche hinsichtlich Spannungsunsymmetrien vorgenommen werden. Im nächsten Schritt ist ein Netzmodell zu entwickeln, mit dem Spannungsunsymmetrien im Niederspannungsnetz simuliert werden können. Anhand des Netzmodells sollen die Auswirkungen von dezentralen Energieerzeugern und Elektrofahrzeugen auf die Spannungssymmetrien betrachtet werden. Aufbauend auf diesen Betrachtungen soll ein Niederspannungslängsregler in eine geeignete Stelle im Netzmodell implementiert werden und dessen Einsatz hinsichtlich der Behebung von Spannungsunsymmetrien untersucht und bewertet werden. Dabei soll betrachtet werden, inwieweit ein Spannungslängsregler die Spannungssymmetrie verbessern kann und dadurch eine Steigerung des Integrationspotentials von dezentralen Energieerzeugern und Elektrofahrzeugen ermöglicht. Das zu diesem Zweck bereitgestellte Längsreglermodell ist in der Lage die Phasenspannungen einzeln zu regeln. Abschließend soll eine Validierung des Längsreglereinsatzes zur Behebung von Spannungsunsymmetrien mit einem realen Längsregler im Labor erfolgen.

Zur Strukturierung der Arbeit werden folgende Schritte vorgeschlagen:

- Recherche zur Spannungsunsymmetrien im Netz
- Entwicklung eines Netzmodells zur Analyse von Spannungsunsymmetrien
- Untersuchung der Auswirkung von dezentralen Energieerzeugern und Elektrofahrzeugen auf die Spannungssymmetrien im Netzmodell
- Untersuchung und Bewertung des Einsatzes eines Spannungslängsreglers zur Behebung von Spannungsunsymmetrien im Netzmodell
- Validierung der Untersuchungen mit einem realen Längsregler im Labor

Im Anschluss an diese Arbeit ist in einem Vortrag über die Ergebnisse zu berichten.

Tag der Ausgabe: 18.12.2019

Tag der Abgabe: 03.06.2020

Zuständig: Mara Holt



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während des Ausbruchs der SARS-CoV-2-Pandemie. In dieser Zeit waren aufgrund eines Betretungsverbots an der TU Dortmund keine Messungen im Labor möglich. Aus diesem Grund ist die Bearbeitung des letzten Aufgabenteils dieser Masterarbeit: "Validierung der Untersuchungen mit einem realen Längsregler im Labor" nicht möglich gewesen. Dieser Aufgabenteil ist daher mit einer dynamischen, simulationstechnischen Untersuchung und Bewertung des Einsatzes eines Spannungslängsreglers zur Behebung von Spannungsunsymmetrien im Netzmodell ersetzt worden. Für die entstandenen Umstände ist die Abgabefrist automatisch um 2 Wochen verlängert worden, womit der Tag der Abgabe auf den 17.06.2020 fällt.



# Kurzfassung

Mit dem steigenden Anteil einphasiger dezentraler Energieerzeuger (Photovoltaiksysteme) und moderner einphasiger Lasten (Elektrofahrzeuge) wächst die Herausforderung für den Netzbetrieb im Niederspannungsnetz. Dabei ist die Spannungsqualität von ländlichen Regionen mit langen Leitungen besonders gefährdet. Spannungsregler wie regelbare Ortsnetztransformatoren oder Spannungslängsregler bieten hier eine praktische Alternative zum Netzausbau.

Im Fokus dieser Arbeit stehen die durch einphasige Photovoltaiksysteme und einphasige Elektrofahrzeuge entstehenden Spannungsunsymmetrien im Niederspannungsnetz. Dafür wird zunächst ein realitätsnahes Niederspannungsmodell erstellt, welches die Analyse von Spannungsunsymmetrien ermöglicht. Zudem werden ein regelbarer Ortsnetztransformator, die Ansteuerungslogik eines Spannungslängsreglers und ein Zick-Zack Lastregler modelliert. Anschließend werden mit statischen und dynamischen Worst Case Szenarien die Regler mit geeigneten Kriterien hinsichtlich ihres Regelverhaltens untersucht. Abschließend wird ermittelt, inwiefern die Regler das Integrationspotential weiterer unsymmetrischer Leistungen steigern können.

# Abstract

With an increasing percentage of single-phase distributed energy resources (photovoltaic systems) and modern single-phase loads (electric vehicles) in the low voltage network, challenges are rising for voltage grid operations. Especially the voltage quality in rural areas with long power cables is at risk. Voltage regulators like on-load tap changers or line-voltage regulators provide a feasible alternative to grid expansions.

The focus of this thesis is on voltage unbalances created by single-phase photovoltaic systems and single-phase electric vehicles within the low voltage grid. At first, a realistic low voltage simulation model is created in order to analyze voltage unbalances. In addition to that an on-load tap changer, the control logic of a line-voltage regulator and a zig-zag load-balancer are modeled. Subsequently these regulators are tested with static and dynamic worst-case scenarios and evaluated with appropriate criteria regarding their controller behavior. Finally, it will be determined to what extent these regulators are able to increase the integration potential of further unsymmetrical Power.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Niederspannungsverteilstetze . . . . .	5
2.1.1 Arten und Formen von Niederspannungsnetzen . . . . .	5
2.1.2 Betriebsmittel in der Niederspannungsebene . . . . .	8
2.2 Spannungsunsymmetrien . . . . .	15
2.2.1 Symmetrische Komponenten . . . . .	16
2.2.2 Unsymmetrische Lasten in der Niederspannungsebene . . . . .	19
2.2.3 Unsymmetrische Energieerzeuger im Niederspannungsnetz . . . . .	20
2.3 Regelung von Unsymmetrien . . . . .	22
2.3.1 Zick-Zack Transformator als Lastregler . . . . .	22
2.3.2 Regelbarer Ortsnetztransformator . . . . .	23
2.3.3 Spannungslängsregler mit regelbarer Induktivität . . . . .	24
2.4 Begrenzungskriterien für das Integrationspotential von Unsymmetrien . . . . .	26
<b>3 Modellierung des Netzmodells</b>	<b>29</b>
3.1 Aufbau und Parametrierung des Netzmodells . . . . .	29
3.1.1 Betriebsmittel des NS-Verteilnetzes . . . . .	29
3.1.2 Unsymmetrische Einspeiser und Lasten . . . . .	32
3.1.3 Reglerarten . . . . .	35
3.2 Gesamtmodell . . . . .	39
<b>4 Simulationstechnische Untersuchung der Unsymmetrien</b>	<b>41</b>
4.1 Simulationsdurchführung . . . . .	41
4.1.1 Simulationsumgebung . . . . .	41
4.1.2 Simulationsszenarien . . . . .	42
4.1.3 Auswertungsverfahren . . . . .	43
4.2 Simulationsergebnisse . . . . .	48
4.2.1 Szenario 1 - unsymmetrische Einspeisung . . . . .	48

---

4.2.2	Szenario 2 - unsymmetrische Belastung . . . . .	51
4.2.3	Szenario 3 - unsymmetrische Einspeisung und Belastung . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Simulationstechnische Untersuchung der Reglerdynamik</b>	<b>59</b>
5.1	Simulationdurchführung . . . . .	59
5.1.1	Simulationsumgebung . . . . .	59
5.1.2	Simulationsszenarien . . . . .	59
5.2	Simulationsergebnisse . . . . .	60
5.2.1	Szenario 1 - Dynamischer Einspeisungssprung . . . . .	61
5.2.2	Szenario 2 - Dynamischer Lastsprung . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Gegenüberstellung der Reglervarianten</b>	<b>71</b>
6.1	Rahmenbedingung . . . . .	71
6.2	Vergleich des gesteigerten Integrationspotentials im Kontext der Begrenzungskriterien . . . . .	72
6.2.1	Szenario 1 - unsymmetrische Einspeisung . . . . .	72
6.2.2	Szenario 2 - unsymmetrische Belastung . . . . .	73
6.2.3	Szenario 3 - unsymmetrische Einspeisung und Belastung . . . . .	74
6.2.4	Gesamtergebnis des Integrationspotentials . . . . .	75
6.3	Dynamisches Verhalten der Reglerarten . . . . .	76
6.3.1	Szenario 1 - Dynamischer Einspeisesprung . . . . .	77
6.3.2	Szenario 2 - Dynamischer Lastsprung . . . . .	77
6.4	Gesamtevaluierung der Reglerarten . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>81</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>83</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Literatur</b>	<b>87</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen

<i>ESB</i>	Ersatzschaltbild
<i>HS</i>	Hochspannung
<i>IT</i>	Netzform mit isoliertem Sternpunkt und separat geerdeten Verbrauchern
<i>MS</i>	Mittelspannung
<i>NS</i>	Niederspannung
<i>rONT</i>	regelbarer Ortsnetztransformator
<i>SLR</i>	Spannungslängsregler
<i>STATCOM</i>	statischer Kompensator
<i>TN – C</i>	Netzform mit geerdetem Sternpunkt und verbundenen Neutral- und Schutzleiter-Erdung von Verbrauchern
<i>TN – C – S</i>	Kombination aus TN-C und TN-S Netzformen
<i>TN – S</i>	Netzform mit geerdetem Sternpunkt und getrennter Neutral- und Schutzleiter-Erdung von Verbrauchern
<i>TT</i>	Netzform mit geerdetem Sternpunkt und separat geerdeten Verbrauchern
PD	Phasendetektor
PLL	Phasenregelschleife (engl.:phase locked loop)
SF	Schleifenfilter
VCO	spannungsgesteuerten Oszillator (engl.:Voltage controlled oscillator)

## Formel- und Schaltzeichen

$\kappa$	spezifischer Leitwert
$\omega$	Kreisfrequenz
$\Phi_{\phi 1}$	Streufeld der Primärseite
$\Phi_{\phi 2}$	Streufeld der Sekundärseite
$\phi_{h1}$	magnetischer Hauptfluss der Primärseite

---

$\phi_{h2}$	magnetischer Hauptfluss der Sekundärseite
$A$	Querschnitt
$a$	Operator für die Phasendrehung
$B'_L$	Suzeptanzbelag
$C'$	Kapazitätsbelag
$C_L$	Leitungskapazität
$E_1$	Selbstinduktionsspannung
$E_w$	Windungsspannung
$f_N$	Netzfrequenz
$f_{OUT}$	Ausgangssignal
$G_L$	Leitungsleitwert
$I_0$	Leerlaufstrom
$I_1$	Primärstrom
$I_2$	Sekundärstrom
$I_{NO}$	Nullsystem-Strom
$I_n$	Nennstrom
$I_{PV}$	Stromkonstante-PV
$I_p$	Stromkonstante
$I_S$	Strom-Steuersignal
$k_{us}$	Symmetriefaktor
$L'$	Induktivitätsbelag
$L_1$	Außenleiter 1
$L_2$	Außenleiter 2
$L_3$	Außenleiter 3
$L_{\phi 1}$	Streuinduktivität der Primärseite
$L_{\phi 2}$	Streuinduktivität der Sekundärseite
$L_B$	Bezugsinduktivität
$L_{h0}$	Hauptimpedanz des Nullsystems
$L_h$	Hauptinduktivität
$L_L$	Leitungsinduktivität
$l_L$	Leitungslänge
$L_p$	Primärinduktivität des SLR
$L_r$	Regelbare Induktivität des SLR
$L_s$	Sekundärinduktivität des SLR
$N$	Neutralleiter
$N_{OS}$	Primärwicklung
$N_{taps}$	Anzahl der rONT Anzapfungen

---

$N_{US}$	Sekundärwicklung
$P_0$	Leerlaufverlustleistung
$P_{cu}$	Kupferverluste
$P_{EV}$	EV-Wirkleistung
$P_{PV}$	PV-Wirkleistung
$Q_{LEV}$	EV-induktive Blindleistung
$R'$	Widerstandsbelag
$R_B$	Bezugswiderstand
$R_{cu1}$	Kupferwiderstand der Primärspule
$R_{cu2}$	Kupferwiderstand der Sekundärspule
$R_{fe}$	Eisenwiderstand
$R_L$	Leitungswiderstand
$S_E$	Steuersignal
$T$	Entsymmetrierungsmatrix
$T^{-1}$	inverse Entsymmetrierungsmatrix
$TAP_{NR}$	Anzapfungsnummer
$U_{(0)}$	Spannung des Nullsystems
$U_{(1)}$	Spannung des Mitsystems
$U_{(2)}$	Spannung des Gegensystems
$U_1$	Primärspannung
$U_2$	Sekundärspannung
$U_{Boost}$	Aufwärtsmodus-Spannung SLR
$U_{Buck}$	Abwärtsmodus-Spannung SLR
$U_B$	Strangspannung B
$U_{diff}$	Spannungsdifferenz
$U_{EIN}$	Eingangsspannung
$U_{EIN}$	Sollspannung
$U_{IN}$	Eingangssignal
$U_{ist}$	Spannungswert
$U_k$	Kurzschlussspannung
$U_N$	Nennspannung
$U_{PEN}$	Nullspannung
$U_{reg1}$	Reglerwicklung der Primärseite
$U_{reg2}$	Reglerwicklung der Sekundärseite
$U_{soll}$	Spannungswert
$U_{stamm1}$	Stammwicklung der Primärseite
$U_{stamm2}$	Stammwicklung der Sekundärseite

$X'_L$	Reaktanzbelag
$X_h$	Hauptreaktanz
$X_{\text{sym}}$	Symmetrischer Nullpunkt
$X_{\text{unsym}}$	Unsymmetrischer Sternpunkt
$Z$	Verbraucherimpedanz
$Z_B$	Bezugsimpedanz
$Z_h$	Hauptimpedanz
$Z_L$	Längsimpedanz
$E$	Fehlersignal
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis eines Transformators

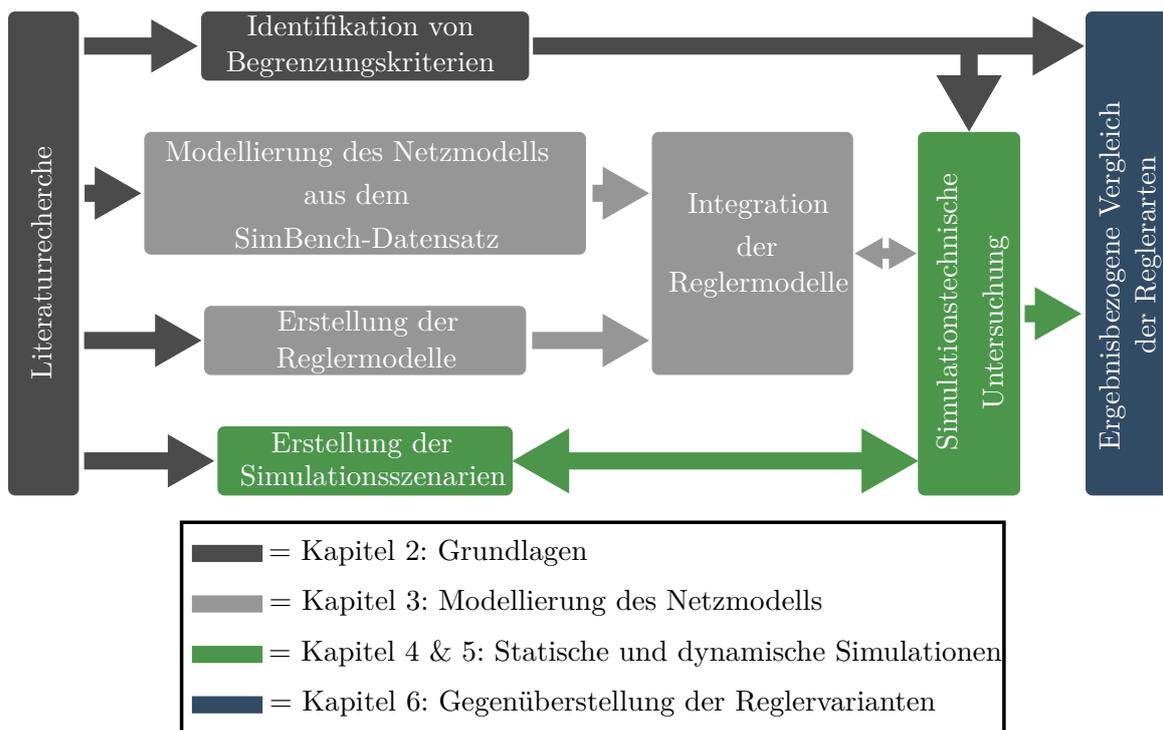
# 1 Einleitung

Mit dem Wandel der Energieerzeugung durch konventionelle Kraftwerke hin zu den dezentralen regenerativen Anlagen verschiebt sich ein Teil der Erzeugung in die Niederspannungsebene (NS-Ebene). Da Windkraftanlagen hauptsächlich in der Mittelspannungsebene angebunden sind, fällt der Großteil der Erzeugung im NS-Netz auf Photovoltaik-Systeme (PV-Systeme) zurück [1]. Dabei speisen über 98 % der Solarstromanlagen in Deutschland direkt in das NS-Netz ein, was einer installierten Anlagenleistung von 23 GW entspricht [2], [3]. Darüber hinaus hat die nach Leistungsklassen gestaffelte Einspeisungsvergütung zu einem Zubau von vorwiegend Kleinanlagen geführt, welche hauptsächlich über den Hausanschluss einphasig in das NS-Netz einspeisen [4]. Die Energieerzeugung dieser hohen PV-Anlagendichte kann an besonders sonnigen Tagen den Stromverbrauch lokal überschreiten und neben der Rückspeisung in das Mittelspannungsnetz zusätzlich Unsymmetrien erzeugen. Verstärkt werden die Unsymmetrien im NS-Netz durch eine Vielzahl einphasiger Verbraucher. Hier stehen insbesondere einphasige Elektrofahrzeuge im Fokus, weil diese sich durch ihre lange Ladezeit und hoher Gleichzeitigkeit von anderen einphasigen Lasten abheben [5]. Eine Studie zeigte, dass 72,5 % der Elektrofahrzeuge zu Hause in der Nacht geladen werden [6]. Mit einer steigenden Zulassungszahl von 43,9 % bei den Neuzulassungen im Jahr 2018 [7] und einem bisherigen Marktanteil von 1 % führt dies in Zukunft zu einer stetig wachsenden Herausforderung für die Spannungsqualität bezüglich der Einhaltung des Spannungsbandes und der Unsymmetrien. Für die Einhaltung der Betriebsgrenzen von Spannungsband und Spannungsunsymmetrie nach DIN EN 50160 gibt es eine Vielzahl an möglichen Reglerkonzepten, die dieses ohne Ausbau des NS-Netzes ermöglichen. In dieser Arbeit stehen dabei ein regelbarer Ortsnetztransformator (rONT), ein Zick-Zack Lastregler (ZZ-Lastregler) und ein Spannungslängsregler mit regelbarer Induktivität (SLR) im Fokus.

Das Ziel dieser Arbeit ist, Spannungsunsymmetrien hervorgerufen durch einphasige PV-Systeme und einphasige Elektrofahrzeuge, im NS-Netz zu untersuchen und deren Behebbarkeit mittels rONT, ZZ-Lastregler oder SLR zu prüfen. Dabei steht die Steigerung des Integrationspotentials von weiteren unsymmetrischen Leistungen im Fokus. Hierfür wird zunächst ein passendes NS-Modell anhand der Daten aus dem SimBench Projekt erstellt. Darüber hinaus werden die drei Regler simulationstechnisch modelliert und in Worst Case Szenarien sowohl statisch als auch dynamisch erprobt und mittels geeigneter Begrenzungskriterien verglichen.

## Struktur der Arbeit

Der strukturelle Ablauf dieser Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die thematische Zuordnung für die jeweiligen Kapitel erfolgt dabei farblich. Kapitel zwei ist das Grundlagenkapitel, welches sich mit Spannungsunsymmetrien in Niederspannungsnetzen (NS-Netzen) befasst. Dafür werden zunächst die gängigen Arten und Formen von NS-Netzen vorgestellt und die für diese Arbeit wichtigen Betriebsmittel in Form des Verteilnetztransformators und der Leitungen erörtert. Anschließend folgen die symmetrischen Komponenten als mathematische Grundlage für die Betrachtung von Unsymmetrien. Des Weiteren werden die Verursacher von Unsymmetrien im Netz identifiziert und in Einspeiser und Lasten aufgeteilt. Anschließend folgt die Vorstellung von Gegenmaßnahmen bezüglich der Unsymmetrien durch diverse Reglerkonzepte. Dabei steht der Zick-Zack Transformator, der regelbare Ortsnetztransformator und insbesondere der Spannungslängsregler mit regelbarer Induktivität im Fokus. Abschließend werden Begrenzungskriterien vorgestellt, anhand derer das Integrationspotential für weitere unsymmetrische Lasten und Einspeiser mittels der Regler geprüft werden kann.



**Abbildung 1.1:** Struktureller Ablauf dieser Arbeit

Kapitel drei befasst sich mit der Modellierung des Netzmodells und den darin enthaltenen Betriebsmitteln sowie der Modellierung der Reglerarten. Die Literaturrecherche liefert hier Informationen zu den Anforderungen eines NS-Netzmodells, welches für die Untersuchung von Unsymmetrien mit den drei Reglerarten genutzt wird. Anhand dieser Informationen wird ein

---

geeigneter Benchmarkdatensatz aus dem SimBench-Projekt [1] ausgewählt und in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink modelliert und parametrisiert. Bei den Reglervarianten wird ein bereits verfügbares einphasiges SLR-Modell aus [8] zu einem dreiphasigen Regler aufgebaut und mit einer Regelungslogik versehen. Die Simulationsmodelle des Zick-Zack Lastreglers und des rONTs werden aus den Erkenntnissen der Literaturrecherche erstellt. Bei der Integration des Zick-Zack Lastregler- und des rONT-Modells, werden die aus der Literatur hervorgehenden Platzierungsorte verwendet. Für die geeignete Platzierung des SLR im NS-Netz werden die Ergebnisse der simulationstechnischen Untersuchungen der Simulationsszenarien ohne Regler ausgewertet und durch die Erstellung von Grenzkurven ermittelt.

In Kapitel vier und fünf werden die Regler sowohl statisch als auch dynamisch simulationstechnisch untersucht. Für die statische Untersuchung kommen drei Worst-Case Betrachtungen zum Einsatz. Dabei wird die einphasige Belastung durch PV-Systeme und Elektrofahrzeuge bei 100 % Einspeisung und 0 % Last für Szenario 1 sowie umgekehrt mit 0 % Einspeisung und 100 % Last für Szenario 2 angenommen. Ein drittes Szenario befasst sich mit der unsymmetrischen Einspeisung auf einer Phase und der gleichzeitigen unsymmetrischen Last auf einer der anderen beiden Phasen. Die Leistungen werden sowohl punktuell am Ende der Leitungen als auch homogen verteilt angenommen und soweit erhöht bis die Grenzen der Begrenzungskriterien überschritten werden. Für die dynamische Untersuchung werden die Szenarien 1 und 2 der statischen Untersuchung mit Einbezug der gesammelten Erkenntnisse modifiziert. Es werden ein unsymmetrischer Lastsprung bzw. eine sprunghafte unsymmetrische Einspeisung simuliert. Die Höhe der Leistung wird dabei von den ermittelten thermischen Grenzleistungen aus der statischen Untersuchung abgeleitet.

In Kapitel sechs geht es um den ergebnisbezogenen Vergleich der Reglervarianten. Hier werden sowohl die statischen als auch dynamischen Simulationsergebnisse der Reglerarten bezüglich der Begrenzungskriterien aus dem Grundlagenkapitel und ihres dynamischen Verhaltens miteinander verglichen. Hierauf folgt eine allgemeine Bewertung der Reglervarianten bezüglich deren Fähigkeit, die Integrationsfähigkeit unsymmetrischer Leistungen zu erhöhen. Im siebten Kapitel werden die in dieser Arbeit gesammelten Erkenntnisse zusammengefasst und hinsichtlich weiterer Forschungsfragen eingeordnet.



## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Niederspannungsverteilsnetzen bereitgestellt. Dazu sind die unterschiedlichen Arten und Formen der Netze und die darin enthaltenen Betriebsmittel aufgeführt. Darauf folgt die Vorstellung von Spannungsunsymmetrien. Zunächst wird der theoretische Hintergrund mit den symmetrischen Komponenten betrachtet. Im Anschluss dazu werden unsymmetrien-erzeugende Lasten und unsymmetrische Energieerzeuger in der Niederspannungsebene vorgestellt. Es werden Regelungskonzepte und ihre Betriebsmittel beschrieben, mittels deren Hilfe sich Unsymmetrien im Niederspannungsnetz ausregeln lassen. Abschließend sind allgemeine Bewertungskriterien anhand der Norm EN 50160 und der VDE-AR 4105 aufgestellt, mit welchen die Funktionalität des Längsreglers bei der Ausregelung von Unsymmetrien gewertet werden soll.

### 2.1 Niederspannungsverteilsnetze

Das deutsche Niederspannungsverteilsnetz (NS-Netz) besteht aus drei Außenleitern  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  und einem Neutralleiter  $N$  [9]. Die genormte Nennspannung  $U_N$  beträgt 230 V zwischen Außenleiter und Neutralleiter und 400 V zwischen den Außenleitern, bei einer Netzfrequenz  $f_N$  von 50 Hz [10]. Gespeist wird das NS-Netz von der Mittelspannungsebene (MS-Ebene) über die Ortsnetzstation. Dort werden die 10 kV, 20 kV oder 30 kV der Mittelspannung in die 400 V der Niederspannung heruntertransformiert [11]. Mit den Ortsnetzstationen sind die Haushalte und die darin enthaltenen, meist einphasigen, Verbraucher direkt über Erdkabel oder Dachständerfreileitungen verbunden [11][12]. Die Arten und Formen dieser NS-Netze sind durch viele Faktoren beeinflusst, auf welche im Folgenden eingegangen wird.

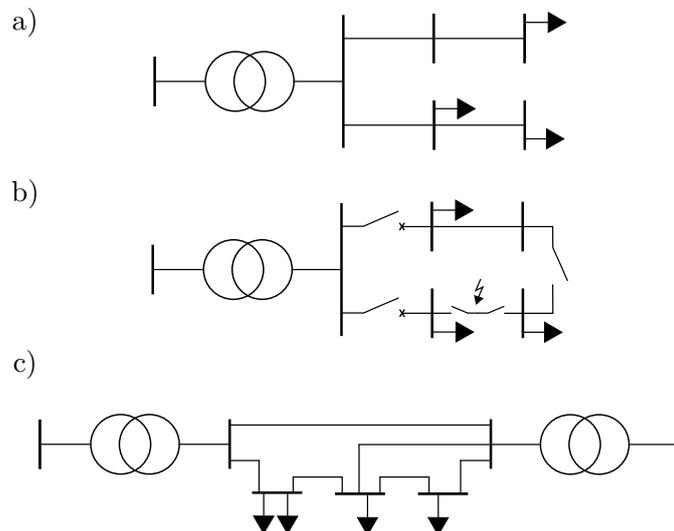
#### 2.1.1 Arten und Formen von Niederspannungsnetzen

Bei der Beschreibung von NS-Netzen wird zunächst zwischen typischen Arten differenziert, die sich je nach Versorgungsaufgabe, landschaftlicher Gegebenheit und Versorgungssicherheit

im Aussehen unterscheiden [11]. Darüber hinaus hat jedes NS-Netz noch spezifische Netzformen, welche auch als Netzsysteme in der DIN VDE 0100 bezeichnet werden und die Art der Erdverbindung beschreiben [13].

## Netzarten

Die wichtigsten Netzarten sind das Radial- oder auch Strahlennetz, das Ringnetz und das Maschennetz, welche in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt werden [9][14]. Dabei sind sie bezüglich der Anwendung entsprechend der zunehmenden Lastdichte geordnet, da Strahlennetze bei geringer Lastdichte und Maschennetze bei hoher Lastdichte zum Einsatz kommen [11]. Darüber hinaus sind die typischen Netzarten auf jeder Spannungsebene möglich und werden anwendungsbezogen verwendet.



**Abbildung 2.1:** Typische Netzarten a) Strahlennetz b) Ringnetz c) Maschennetz

Das Strahlennetz bildet die einfachste Netzart und ist beispielhaft in Abbildung 2.1 a) dargestellt [14]. Vom Verteilungstransformator einer Ortsnetzstation verlaufen die Versorgungsleitungen strahlenförmig zu den Verbrauchern. Dabei können über eine Sammelschiene ein oder mehrere Abgänge versorgt werden [11]. Das Strahlennetz ist die am häufigsten vorkommende Netzart in den europäischen NS-Netzen und insbesondere in ländlichen Gebieten aufgrund der geringen Lastdichte üblich [14][15]. Darüber hinaus tendieren die Netzbetreiber immer häufiger zur Entmaschung der Verteilnetze, was auf den Kostendruck durch die Marktliberalisierung zurück zu führen ist [11]. Die Vorteile des Strahlennetzes liegen in der Einfachheit. So ist neben dem geringen Leitungsaufwand und die damit verbundene einfache Überwachung auch die effiziente Fehlererkennung zu nennen [16]. Des Weiteren ist der Planungsaufwand und die Anforderung an den Netzschutz geringer. Dem gegenüber steht ein mit der Leitungslänge

steigender Spannungsabfall durch Verbraucher und Leitungsimpedanzen oder Spannungsanstieg durch dezentrale Energieerzeuger. Darüber hinaus fallen sämtliche Verbraucher oder auch dezentrale Erzeuger eines Strahles im Fehlerfall aus [9][11].

Das Ringnetz besteht prinzipiell aus mindestens zwei zusammengeschlossenen Strahlen, wird jedoch meist offen betrieben. Im Fehlerfall können, wie in Abbildung 2.1 b), die fehlerhaften Netzsegmente mit Leistungsschaltern abgeschaltet werden, ohne dass die restlichen Verbraucher vom Netz gehen. Diese einfachste Form der Vermaschung erhöht die Betriebssicherheit für Verbraucher, da sie von zwei Seiten gespeist werden [14]. Eingesetzt werden sie unter anderem in NS-Netzen mit hoher Lastdichte, wobei das Haupteinsatzgebiet die MS-Ebene ist [9]. Der Hauptvorteil gegenüber dem Strahlennetz ist die Weiterversorgung der Verbraucher im Fehlerfall. Darüber hinaus ist die Spannungshaltung auf Grund kürzerer Leitungen und mehrseitiger Versorgung einfacher [11]. Allerdings steigt der Schutz- und Planaufwand.

Das Maschennetz ist ein stark- bis vollvermaschtes Netz, das hauptsächlich in der Hochspannungsebene (HS-Ebene) Anwendung findet. Die zweiseitige Versorgung aus dem Ringnetz wird hier noch um weitere Versorgungszweige ergänzt, was in Abbildung 2.1 c) verdeutlicht ist. So sind die einzelnen Zweige des Netzes mehrfach versorgt, was zu einer Steigerung der Versorgungssicherheit führt. Der dadurch steigende Schutzaufwand ist jedoch erst ab der HS-Ebene wirtschaftlich gerechtfertigt, wodurch diese Netzart selten auf MS- und NS-Ebenen zu finden ist [14][16].

## Netzformen

Die fünf wesentlichen in der DIN VDE 0100 aufgeführten Netzformen sind das TN-C, das TN-S, das TN-C-S, das TT- und das IT-Netz. Diese werden in Anlehnung an [13] vorgestellt. Die Bedeutung der Buchstaben ist der Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Das TN-Netz ist die am häufigsten vorkommende Netzform in Europa [15]. Hier ist der Sternpunkt der speisenden Quelle direkt geerdet. Die Verbraucher sind entweder direkt über einen Neutralleiter oder einem PEN-Leiter mit diesem Sternpunkt verbunden. Abhängig von der Anordnung des Neutral- und Schutzleiters gibt es drei Modifizierungen. Das TN-S-Netz hat einen getrennten Neutralleiter N und Schutzleiter PE, was in Abbildung 2.2 a) im grünen Bereich charakteristisch dargestellt wird. Diese Modifikation ist hauptsächlich innerhalb von Gebäuden zu finden, da ein großes Fünfleiter-System aufwändiger ist [16]. Bei der Trennung von Neutral- und Schutzleiter liegen sämtliche metallische Gehäuse von Verbrauchern auf einem Potential und sind mit der Erde verbunden. Im fehlerfreien Betrieb ist somit nur der Neutralleiter und nicht der Schutzleiter stromführend. Das TN-C-Netz ist ein Vierleiter-System mit einem kombinierten Schutz- und Neutralleiter, was im blauen Bereich der Abbildung 2.2 a) dargestellt ist. Dies ist die häufigste Form der Versorgungsleitungen in NS-Netzen. Bei einer Unterbrechung des PEN-Leiters ist der Spannungsabfall einer Verbraucher-Erd-Spannung an

**Tabelle 2.1:** Bedeutung der Abkürzungen aus der DIN-VDE-0100

<b>Erster Buchstabe:</b> Erdungsbedingung der Speisenden Quelle	
<b>T</b>	Direkte Erdung des Sternpunktes
<b>I</b>	Aktive Trennung von der Erde oder der Verbindung des Sternpunktes mit der Erde über eine Impedanz
<b>Zweiter Buchstabe:</b> Erdungsbedingung des Verbrauchers	
<b>T</b>	Direkte Erdung des Verbrauchers unabhängig von der Betriebserde
<b>N</b>	Direkte Erdung mit der Betriebserde über einen Neutralleiter
<b>Weiterer Buchstabe:</b> Anordnung des Neutral- und Schutzleiters	
<b>S</b>	Neutral- und Schutzleiter sind getrennt
<b>C</b>	Neutral- und Schutzleiter sind zusammen geführt

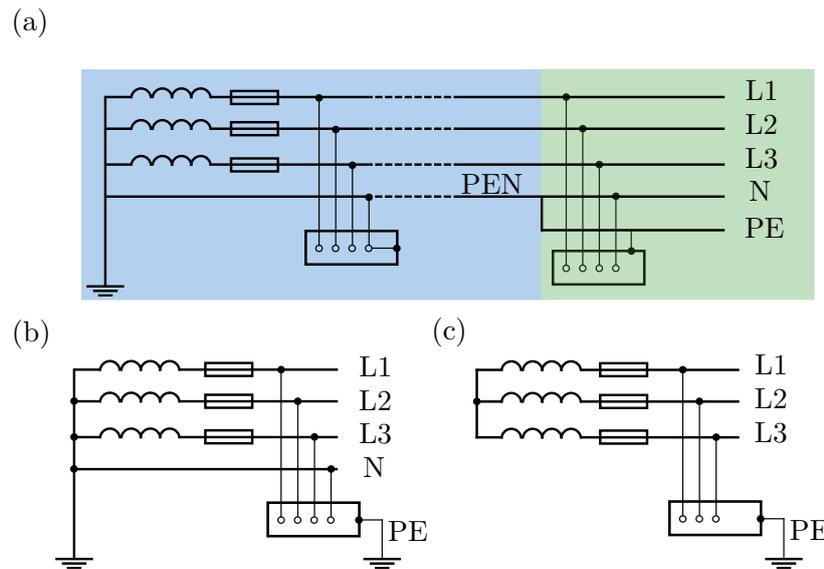
allen Verbrauchern möglich, was bei einem TN-S System ausgeschlossen ist. Falls an einem Strang sowohl das TN-C als auch das TN-S vorkommen, wird von einem TN-C-S-Netz gesprochen, was in Abbildung 2.2 a) gezeigt wird [16]. Als Beispiel dafür ist eine Versorgungsleitung in TN-C Form und ein Haushalt mit TN-S Form, nach dem Hausanschlusskasten, denkbar. In TN-Netzen können Unsymmetrien die Spannung des PEN-Leiters anheben und zu erhöhten PEN-Strömen führen.

Bei dem TT-Netz ist, wie im TN-Netz, die speisende Quelle im Sternpunkt geerdet. Zusätzlich sind die Gehäuse der Verbraucher geerdet, welche nicht direkt mit der Betriebserdung am Sternpunkt verbunden ist. Dies ist in Abbildung 2.2 b) dargestellt. Ein Neutralleiter am Sternpunkt der speisenden Quelle setzt die Verbraucher auf das gleiche Nullpotential. Hier können Spannungsunsymmetrien den PE des jeweiligen Verbrauchers nicht gefährden, jedoch auf dem Neutralleiter N zu erhöhten Betriebsströmen führen. Genutzt wird diese Netzform hauptsächlich bei Baustellen oder im Viehbetrieb [16].

Der Sternpunkt der speisenden Quelle eines IT-Netzes hat keine direkte Erdung. Lediglich die Gehäuse der Verbraucher sind mit einem PE-Leiter verbunden und separat geerdet. Dies ist in Abbildung 2.2 c) skizziert. Die DIN VDE 0100 lässt jedoch eine direkte Erdung mit hoher Impedanz zu. Genutzt wird das IT-Netz in Industriebetrieben, da im einpoligen Erdfehlerfall hohe Kurzschlussströme verhindert werden [16].

### 2.1.2 Betriebsmittel in der Niederspannungsebene

Im Rahmen der Netzmodellierung sind in dieser Arbeit besonders die Verteilungstransformatoren in den Ortsnetzstationen und die Freileitungen bzw. Kabel von Interesse. Für die

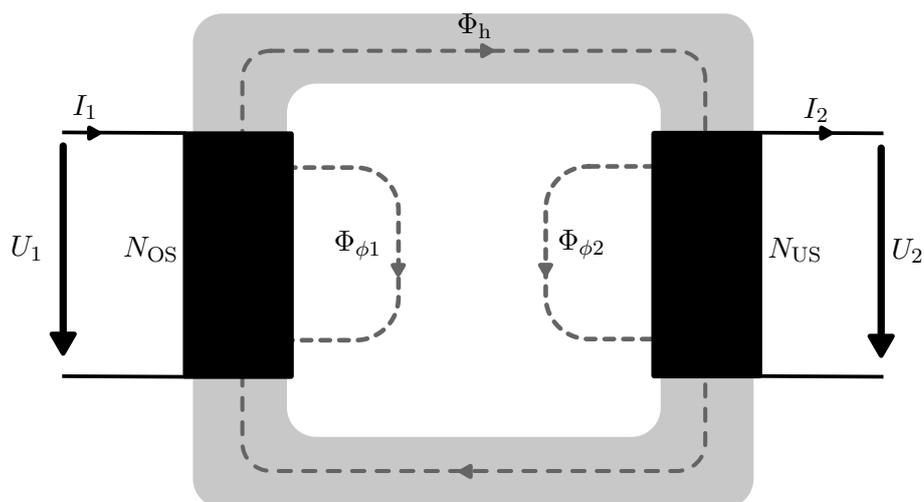


**Abbildung 2.2:** Die wesentlichen Netzformen a) TN-C-S-Netz b) TT-Netz c) IT-Netz

Betrachtung der Auswirkungen von Spannungsunsymmetrien sind Schutzeinrichtungen wie Schmelzsicherung oder Leistungsschalter im Simulationsmodell nicht relevant und werden daher in diesem Kapitel vernachlässigt.

### Verteilungstransformator

Zunächst wird die allgemeine Wirkweise eines Transformators in Anlehnung an [11] vorgestellt. Dazu ist ein einphasiger Transformator in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung eines zweischenkligen Transformators

Dieser besteht aus einem zweiseitigen Eisenkern und zwei galvanisch voneinander getrennten Wicklungen, welche sich in der Anzahl an Windungen unterscheiden. Die Primärwicklung  $N_{OS}$  hat eine höhere Windungszahl als die Sekundärwicklung  $N_{US}$ . Das Verhältnis der beiden Windungszahlen stellt die Übersetzung  $\ddot{u}$  des Transformators dar, mit der die Primärspannung  $U_1$  auf die Sekundärspannung  $U_2$  transformiert wird. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 2.1 dargestellt.

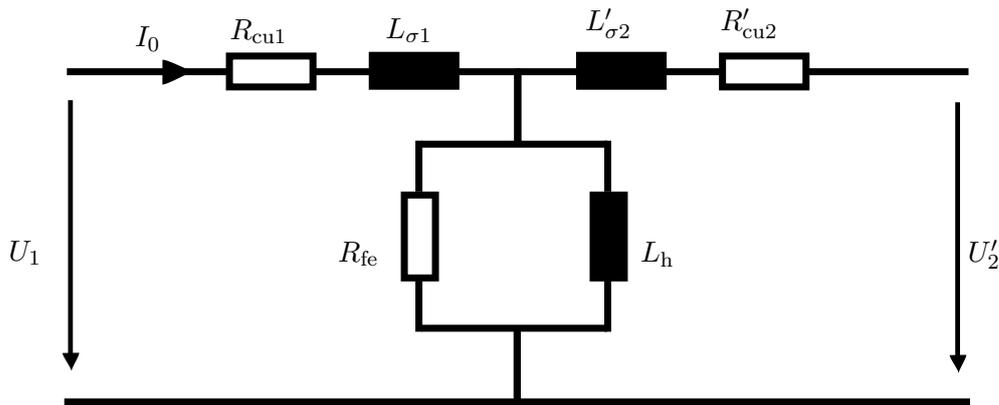
$$\ddot{u} = \frac{N_{OS}}{N_{US}} = \frac{U_1}{U_2} \quad (2.1)$$

Durch das Anlegen der Primärspannung  $U_1$  wird  $N_{OS}$  mit einem Strom Primärstrom  $I_1$  durchflossen. Der mit dem Primärstrom zusammenhängende magnetische Hauptfluss  $\phi_{h1}$  wird durch den Eisenkern geführt und koppelt die Primärwicklung  $N_{OS}$  mit der Sekundärwicklung  $N_{US}$ . Dieser magnetische Fluss induziert eine Windungsspannung  $E_w = -j\omega\Phi$  in jede Windung der Primärwicklung und der Sekundärwicklung. Daraus resultiert für die Primärwicklung eine Selbstinduktionsspannung  $E_1 = -j\omega\Phi N_{OS}$  welche nach der Lenz'schen Regel der angelegten Klemmspannung  $U_1$  entgegen wirkt und mit ihr immer ein Gleichgewicht bildet. An der Sekundärwicklung entsteht die Sekundärspannung  $U_2 = E_w N_{US}$ . Ist an der Unterseite ein Verbraucher mit der Impedanz  $Z$  angeschlossen, fließt ein Strom  $I_2$ , der wiederum einen magnetischen Fluss  $\phi_{h2}$  erzeugt. Dieser wirkt ebenfalls nach der Lenz'schen Regel dem Hauptfluss  $\phi_{h1}$  entgegen. Der Verlust des Gleichgewichts von der Selbstinduktionsspannung  $E_1$  und der Primärspannung  $U_1$  wird durch die erhöhte Stromaufnahme der Primärspule verhindert. Dieser Vorgang wird als Aufrechterhaltung des magnetischen Gleichgewichts bezeichnet. Die beiden magnetischen Flüsse  $\Phi_{\phi_1}$  und  $\Phi_{\phi_2}$  verlaufen außerhalb des Kerns und tragen nicht zum Hauptfluss bei. Sie werden als Streuflüsse bezeichnet und stellen Verluste dar.

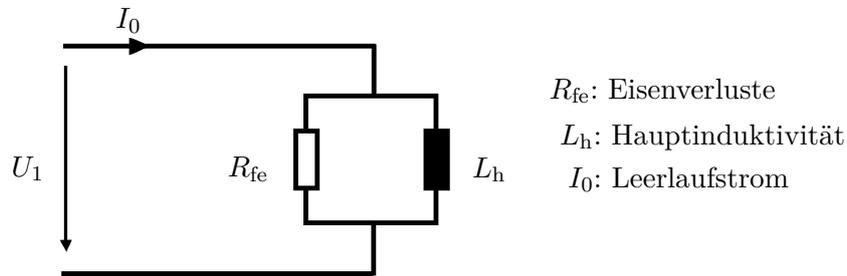
Vereinfacht lässt sich der reale Transformator mit dem T-ESB in Abbildung 2.4 darstellen. Die darin enthaltenen Elemente lassen sich mit dem Kurzschluss- und Leerlaufversuch ermitteln.

Bei dem Leerlaufversuch wird die Oberseite des Transformators mit der Nennspannung gespeist, wobei kein Verbraucher an der Unterspannungsseite angeschlossen ist. Es tritt kein Stromfluss  $I_2$  auf, wodurch die Streuinduktivität  $L_{\phi_2}$  und der Kupferwiderstand der zweiten Wicklung  $R_{cu2}$  entfallen. Darüber hinaus können die Streuinduktivität  $L_{\phi_1}$  und der Kupferwiderstand der Primärspule  $R_{cu1}$  vernachlässigt werden, da diese deutlich kleiner sind als die Hauptinduktivität  $L_h$  und der Eisenwiderstand  $R_{fe}$ . So vereinfacht sich das T-ESB aus Abbildung 2.4 zu dem Leerlauf-ESB in Abbildung 2.5. Gemessen werden der Leerlaufstrom  $I_0$ , auch als Magnetisierungsstrom bezeichnet, und die Leerlaufverlustleistung  $P_0$ .

Der Eisenwiderstand  $R_{fe}$  berücksichtigt die durch den magnetischen Fluss erzeugten Wirbelstromverluste und die bei der Ummagnetisierung entstehenden Eisenkernverluste. Durch die



**Abbildung 2.4:** T-ESB des Transformators mit auf die Oberspannungsseite bezogenen Größen



**Abbildung 2.5:** Vereinfachtes ESB des Transformators im Leerlaufversuch

vernachlässigbaren Kupferverluste im Leerlauf lässt sich  $R_{fe}$  mit der Gleichung 2.2 aus den gemessenen Leerlaufverlusten  $P_0$  und der Primärspannung  $U_1$  ermitteln.

$$R_{fe} = \frac{U_1^2}{P_0} \quad (2.2)$$

Die Hauptimpedanz  $Z_h$  lässt sich über den gemessenen Leerlaufstrom  $I_0$  und der Primärspannung  $U_1$  mit dem Zusammenhang in Gleichung 2.3 ermitteln.

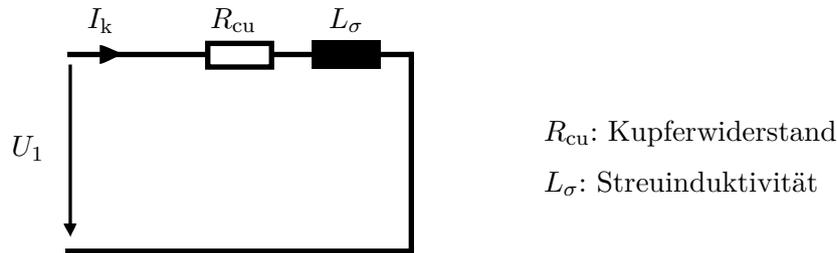
$$Z_h = \frac{U_1}{I_0} \quad (2.3)$$

Aus  $Z_h$  (vgl. Gleichung 2.3) und dem zuvor ermittelten Eisenwiderstand  $R_{fe}$  kann die Hauptreaktanz (vgl. Gleichung 2.4)  $X_h$  berechnet werden. Aus dieser geht die Hauptinduktivität  $L_h$  mit der Kreisfrequenz  $\omega$  bzw. der Netzfrequenz  $f_N$  aus der Gleichung 2.5 hervor.

$$X_h = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_h^2} - \frac{1}{R_{fe}^2}}} \quad (2.4)$$

$$L_h = \frac{X_h}{\omega} = \frac{X_h}{2\pi f_n} \quad (2.5)$$

Bei dem Kurzschlussversuch wird die Unterspannungsseite kurzgeschlossen. Dabei wird die speisende Spannung erhöht, bis der Nennstrom  $I_n$  fließt. Auf Grund der hohen Hauptimpedanz  $X_h$  fließt kein nennenswerter Strom über die Querelemente des T-ESB. Daher sind  $R_{fe}$  und  $L_h$  im Kurzschluss-ESB in der Abbildung 2.6 vernachlässigt. Gemessen werden die Kurzschlussspannung  $U_k$  und die Kupferverluste  $P_{cu}$ , welche durch die realen Widerstände der beiden Wicklungen entstehen.



**Abbildung 2.6:** Vereinfachtes ESB des Transformators im Kurzschlussversuch

Die Kurzschlussimpedanz des Transformators  $Z_k$  wird über die gemessene Kurzschlussspannung  $U_k$  und den Nennstrom  $I_n$  mit der Gleichung 2.6 bestimmt, welche für die Ermittlung der Streuinduktivität  $L_\phi$  benötigt wird.

$$Z_k = \frac{U_k}{I_N} \quad (2.6)$$

Die Kupferwiderstände  $R_{cu}$  lassen sich über die Kupferverluste  $P_{cu}$  und den Nennstrom  $I_n$  mit der Gleichung 2.7 bestimmen.

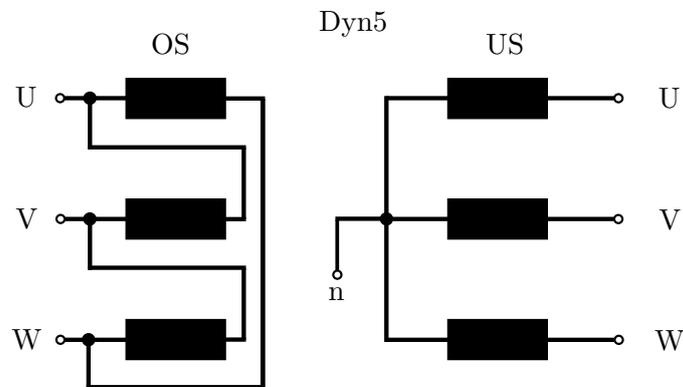
$$R_{cu} = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_N^2} \quad (2.7)$$

Analog zu der Bestimmung der Hauptinduktivität  $L_h$  werden die Streuinduktivitäten  $L_\phi$  mit den Formel 2.4 und Formel 2.5 bestimmt. Hierbei sind die Eisenwiderstände  $R_{fe}$  mit dem zusammengefassten Kupferwiderstand  $R_{cu}$  und die Hauptimpedanz  $Z_h$  mit der Kurzschlussimpedanz  $Z_k$  zu tauschen. Damit  $R_{cu}$  und  $L_\phi$ , wie im T-ESB der Abbildung 2.4 den jeweiligen Wicklungen zugeordnet werden können, müssen diese mit dem Übersetzungsfaktor aus Gleichung 2.1 umgerechnet werden [14]. Die Gleichung 2.8 und Gleichung 2.9 bestimmen aus dem Gesamtkupferwiderstand  $R_{cu}$  und der Gesamtstreuinduktivität  $L_\phi$  die jeweiligen Wicklungswiderstände und Streuinduktivitäten.

$$R_{\text{cu}1} = R'_{\text{cu}2} = \frac{R_{\text{cu}}}{2} \quad (2.8)$$

$$L_{\sigma 1} = L'_{\sigma 2} = \frac{L_{\sigma}}{2} \quad (2.9)$$

Transformatoren kommen in NS-Netzen in Form von Verteilungstransformatoren in den Ortsnetzstationen zum Einsatz. Dort transformieren sie die 10 kV bis 30 kV auf die in NS-Netzen üblichen 0,4 kV runter. In der Literatur wird der gängige Leistungsbereich von Verteilungstransformatoren zwischen 100 kVA und 2 MVA angegeben [14]. Die am häufigsten vorkommende Verschaltungsart ist Dyn5 und in Abbildung 2.7 dargestellt [14]. Hier ist die Oberseite



**Abbildung 2.7:** ESB des Transformators für die Verschaltungsart Dyn5

im Dreieck (1. Buchstabe D) verschaltet, was einen kleineren Drahtquerschnitt bei großen Leiterströmen ermöglicht und die Nullsysteme zweier Netze entkoppelt. Die Sternschaltung (2. Buchstabe y) auf der Unterseite ermöglicht den Anschluss des Schutzleiters (3. Buchstabe n) an den Sternpunkt des Transformators. Auf Grund der niedrigeren Strangspannung besteht darüber hinaus ein geringerer Isolationsaufwand der Wicklungen. Die Zahl fünf beschreibt den Vorfaktor der Phasenverschiebung von der Oberspannungsseite zur Unterspannungsseite um  $30^\circ$ . Bei der Dyn5-Verschaltung eilt die Unterspannungsseite der Oberspannungsseite um  $150^\circ$  nach.

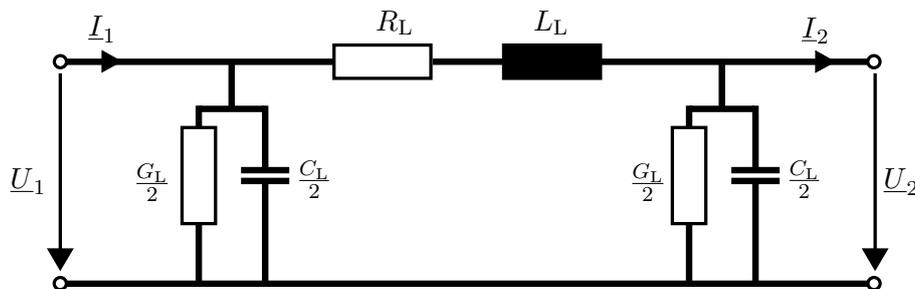
## Leitungen

Für die Energieübertragung im NS-Netz werden hauptsächlich Kabelleitungen verwendet [14]. Die am häufigsten vorkommende Bauart ist das PVC-isolierte, vieradrige Kabel NAYY [17]. In der DIN VDE 0293-308 ist die Bedeutung der Kurzzeichen von Leitungen festgelegt und für diesen Fall in Tabelle 2.2 beispielhaft aufgeführt.

**Tabelle 2.2:** Bedeutung der Kurzzeichen des NAYY Kabeltyps nach DIN VDE 0293-308

Kurzzeichen-Erläuterung	
	<b>N</b> Normtyp
Ader	<b>A</b> Aluminiumleiter (Kupferleiter wird nicht gesondert erwähnt)
	<b>Y</b> Kabelisolierung aus thermoplastischen Polyvinylchlorid (PVC)
Mantel	<b>Y</b> Mantelisolierung aus thermoplastischen Polyvinylchlorid (PVC)

Eine vereinfachte Darstellung von Leitungen ist mit dem  $\pi$ -Ersatzschaltbild ( $\pi$ -ESB) für kurze Leitungen bis 100 km gültig. Da NS-Netze deutlich kürzere Kabelstrecken als 100 km aufweisen, ist die Darstellungsform in Abbildung 2.8 zulässig [16]. Für die Modellierung von Kabelsegmenten wird neben der Leitungslänge  $l_L$ , der -widerstand  $R_L$ , die -induktivität  $L_L$ , die -kapazität  $C_L$  und der -leitwert  $G_L$  benötigt. Der Leitungsleitwert  $G_L$  bezieht die Di-

**Abbildung 2.8:**  $\pi$ -ESB einer kurzen Leitung

elektrikumsverluste, welche durch fehlerhafte Isolation zwischen Leitern oder Leiter und Erde hervorgerufen werden. Bei normalen Betriebsverhältnissen ist dieser Wert mit wenigen  $\frac{\mu\text{S}}{\text{km}}$  sehr klein und ist daher vernachlässigbar [14].

Der Wirkwiderstand  $R_L$  einer Leitung wird mit Hilfe des Widerstandsbelags  $R' \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right]$  bestimmt. Dieser lässt sich mit der Formel 2.10 bestimmen und ist abhängig von dem material-spezifischen Leitwert  $\kappa$ .

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad (2.10)$$

Die Phasen des NAYY Kabels bestehen, wie zuvor beschrieben, aus Aluminium und haben einen spezifischen Leitwert von  $\kappa = 35 \Omega^{-1} \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}$ . Mit dem gängigen Querschnitt  $A = 120 \text{ mm}^2$  in NS-Netzen resultiert damit der Wirkwiderstand der Leitung auf ca.  $0,19 \frac{\Omega}{\text{km}}$  [16]. Bei Kabeln in Drehstromsystemen treten zusätzlich der Skin- und der Proximity Effekt auf. Beim Skin-Effekt entsteht eine querschnittsabhängige Widerstandserhöhung durch die Stromverdrängung an hin zur Außenseite des Leiters. Das gleiche gilt auch für den Proximity-Effekt, bei dem

der Hin- und Rückleiter die Ströme auf die einander zugewandte Seite verlagert. Eine merkliche Widerstandserhöhung ist jedoch erst bei Leitern ab einem Querschnitt  $A = 300 \text{ mm}^2$  zu erwarten [16]. Da NS-Netze einen maximalen Querschnitt  $A = 240 \text{ mm}^2$  aufweisen, sind diese beiden Effekte bei der Modellierung von NS-Kabeln vernachlässigbar [1].

Für die Längsimpedanz  $Z_L$  eines Kabels ist die Leitungsinduktivität  $L_L$  elementar. Diese kann mit Hilfe des Induktivitätsbelages  $L' \left[ \frac{\text{mH}}{\text{km}} \right]$  bestimmt werden, welcher das von dem Strom induzierte magnetische Feld beschreibt. Eine exakte Bestimmung von  $L'$  ist bei Vierleiterkabeln schwierig, weshalb für eine genaue Netzmodellierung die Datenblätter der Hersteller immer zu bevorzugen sind [16][14]. In der Literatur wird für den Induktivitätsbelag ein Wertebereich von  $0,25 - 0,5 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$  angegeben [14][17]. Damit ist dieser um das 2 bis 3 fache kleiner als bei Freileitungen, was auf die Abstände zwischen den Leitern zurückzuführen ist [14][16].

Durch die Vernachlässigung des Leitungsleitwertes  $G_L$  bleibt für die Queradmittanz des Kabels die Leiterkapazität  $C_L$  übrig. Diese lässt sich mit dem Kapazitätsbelag  $C' \left[ \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \right]$  bestimmen, welcher das elektrische Feld zwischen den Leitern und Leiter-Erde berücksichtigt. Auch hier ist eine exakte Berechnung von  $C'$  für Vierleiter-Kabel schwierig und führt zu ungenauen Ergebnissen [14]. Somit wird auch hier für eine präzise Modellierung die Nutzung von Herstellerdatenblättern empfohlen. Die Kapazität von Kabeln ist deutlich höher als bei Freileitungen und wird in der Literatur auf 20- bis 50-mal so groß beziffert. Dies ist auf die kleinen Abstände der Leitungen zueinander, zu der Erde und der größeren Dielektrizitätskonstante zurückzuführen [18]. Aufgrund der geringen Spannungen im NS-Netz hat die Leitungskapazität in NS-Netzen einen geringen Einfluss auf das Betriebsverhalten und wird in der Literatur oftmals vernachlässigt [14].

## 2.2 Spannungsunsymmetrien

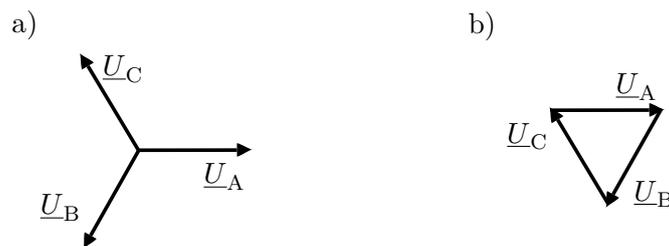
Spannungsunsymmetrien sind neben Spannungseinbrüchen, Überspannungen, Oberschwingungen und Flickern Störfaktoren in Drehstromsystemen, welche die Qualität der Versorgungsspannung beeinträchtigen [9]. In [10] werden Unsymmetrien mit der Abweichung des Effektivwertes der Spannung zwischen den Leitern oder einer Abweichung der Phasenwinkel-differenz von üblichen  $120^\circ$  zwischen den Leiter-Erdspannungen definiert. Unsymmetrien entstehen, sobald die Impedanz einer einzelnen Phase ungleich mit den Impedanzen der anderen ist. Dieser Zustand wird durch einphasige Verbraucher, einphasige Erzeuger, ein unsymmetrischer Netzaufbau oder unsymmetrische Fehler hervorgerufen [12][19][14]. Unsymmetrische Fehler sind dabei Phasenunterbrechungen, zweiphasige Kurzschlüsse oder Erdberührungen [18]. Gerade Niederspannungsnetze sind aufgrund der Vierleitersysteme anfällig für Unsymmetrien, da der Neutraleiter den Anschluss von einphasigen Verbrauchern und Einspeisern ermöglicht.

Bei Unsymmetrien wird zusätzlich zwischen langfristigen und kurzfristigen Zuständen unterschieden. Dabei werden kurzfristige Ereignisse von Fehlern im Netz verursacht, wohingegen langfristige Unsymmetriezustände von unsymmetrischen Lasten oder Erzeugern stammen [19]. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur langfristige Unsymmetriezustände betrachtet und Fehler damit ausgeklammert.

Die Auswirkungen von Unsymmetrien in der Versorgungsspannung sind zusätzliche Verluste durch Ströme im Neutralleiter [20]. Darüber hinaus beeinflussen die höheren oder niedrigeren Leiter-Erd-Spannungen besonders sensible Lasten, wie Asynchron- und Synchronmaschinen und verringern bei langfristigen Unsymmetrien die Lebenszeit der Maschinen [19]. Außerdem können einzelne Phasen Spannungsband-Verletzungen aufweisen, ein Spannungsabfall bei überlasteten Phasen oder Überspannung bei Phasen mit erhöhter Einspeisung [21]. Zudem kommt es zum Abschalten ganzer Stränge, wenn der maximal zulässige Strom über den Neutralleiter überschritten wird.

### 2.2.1 Symmetrische Komponenten

Für die Berechnung von stationären unsymmetrischen Zuständen kommen in der Literatur die symmetrischen Komponenten zum Einsatz, welche in Anlehnung an [9] vorgestellt werden. In einem symmetrisch betriebenen Drehstromsystem sind die Beträge der einzelnen Phasenspannungen und -ströme gleich und um je  $120^\circ$  phasenverschoben. In Abbildung 2.9 ist das Zeigerdiagramm der komplexen Phasenspannungen mit dem zugehörigen Spannungsdreieck gegeben. Mit ihnen werden die Nullbedingungen aus der Formel 2.11 und Formel 2.12 ersichtlich, welche für Ströme und Spannungen gleichermaßen gelten [14].

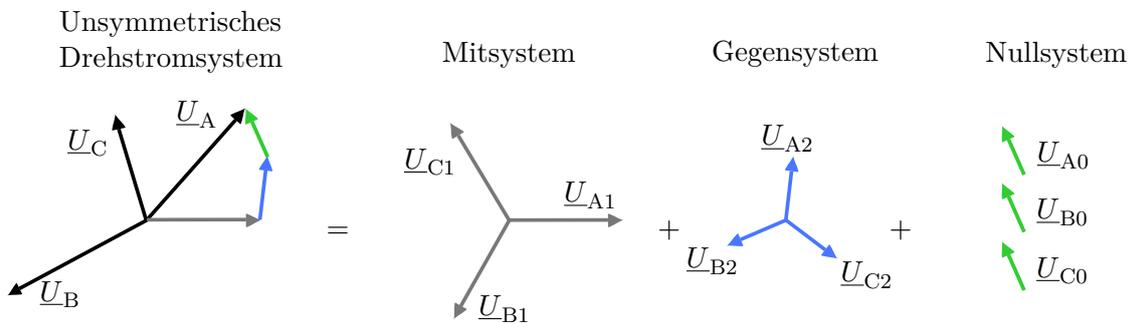


**Abbildung 2.9:** Symmetrische Spannung im a) Zeigerdiagramm b) Spannungsdreieck

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0 \quad (2.11)$$

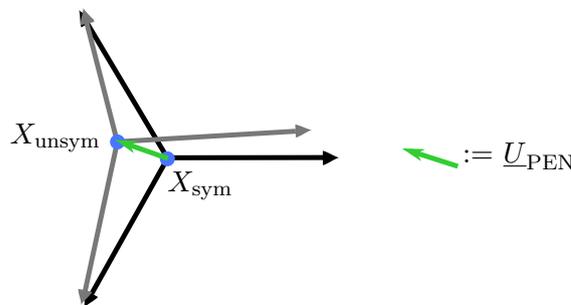
$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \quad (2.12)$$

Bei Symmetrie ist es möglich, das dreiphasige ESB zu einem einphasigen ESB zu vereinfachen. Diese Vereinfachung ist bei Spannungsunsymmetrien nicht mehr direkt möglich, da die Nullbedingungen aus Formel 2.11 und Formel 2.12 nicht länger erfüllt ist. Mit den symmetrischen Komponenten kann jedes Drehstromsystem durch die Überlagerung von zwei Drehstrom- und einem Wechselstromsystem dargestellt werden. Das erste Drehstromsystem ist das Mitsystem  $\underline{U}_{(1)}$  mit positiver Phasenfolge. Das zweite Drehstromsystem ist das Gegensystem  $\underline{U}_{(2)}$  mit negativer Phasenfolge. Das Wechselstromsystem wird als Nullsystem  $\underline{U}_{(0)}$  bezeichnet und weist keine Phasenfolge auf. In Abbildung 2.10 ist ein unsymmetrisches Drehstromsystem mit dem Mit-, Gegen- und Nullsystem dargestellt. Es wird ersichtlich, dass mit den drei eben genannten symmetrischen Systemen ein beliebig unsymmetrisches System nachgebildet werden kann.



**Abbildung 2.10:** Zerlegung eines unsymmetrischen Drehstromsystems in das Mit-, Gegen- und Nullsystem

Wird ein symmetrisches Drehstromsystem mit den symmetrischen Komponenten betrachtet, existieren nur Größen, welche im Mitsystem ungleich null sind [14]. Erst im unsymmetrischen Fall existieren auch Gegen- und Nullgrößen. Physikalisch betrachtet führt das Nullsystem die Größen, welche über einen vorhandenen Neutralleiter abfallen. So steht die Nullspannung  $\underline{U}_{PEN}$  für die Potentialdifferenz zwischen dem symmetrischen Nullpunkt  $X_{sym}$  und dem unsymmetrischen Sternpunkt  $X_{unsym}$  des Drehstromsystems, welches in Abbildung 2.11 veranschaulicht ist.



**Abbildung 2.11:** Potentialdifferenz  $\underline{U}_{PEN}$  des Symmetrischen Nullpunktes  $X_{sym}$  und des unsymmetrischen Sternpunktes  $X_{unsym}$

Der Nullstrom fließt über einen von den anderen Phasen unabhängigen Leitern. Dies kann entweder der Neutralleiter oder die Erde sein. Die Höhe des Stroms wird mit der Formel 2.13 angegeben.

$$\frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = \underline{I}_0 \quad (2.13)$$

Für die mathematische Transformation eines Drehstromsystems in die symmetrischen Komponenten wird die inverse Entsymmetrierungsmatrix  $T^{-1}$  genutzt. Die Transformationsgleichung ist mit der Formel 2.14 gegeben

$$\begin{pmatrix} \underline{W}_{1A} \\ \underline{W}_{2A} \\ \underline{W}_{0A} \end{pmatrix} = T^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \underline{W}_A \\ \underline{W}_B \\ \underline{W}_C \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Da die Transformation von Spannung und Strom analog ist, steht das  $W$  in der Gleichung für Wechselgröße. Die Indizes 1, 2, 0 stehen für das Mit-, Gegen- und Nullsystem und A, B und C für die jeweilige Phase. Der Operator  $\underline{a}$  bewirkt eine Phasendrehung um  $120^\circ$  und  $\underline{a}^2$  eine Phasendrehung von  $240^\circ$ , was in Formel 2.15 ersichtlich wird [18].

$$\underline{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \underline{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.15)$$

Analog wird die Rücktransformation der symmetrischen Komponenten mit der Entsymmetrierungsmatrix  $T$  in Formel 2.16 durchgeführt.

$$\begin{pmatrix} \underline{W}_A \\ \underline{W}_B \\ \underline{W}_C \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} \underline{W}_{1A} \\ \underline{W}_{2A} \\ \underline{W}_{0A} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Für die Berechnung der dreiphasigen Scheinleistung wird zunächst der Zusammenhang von der Spannung  $U$  und dem Strom  $I$  in Komponentenschreibweise mit der diagonalen Impedanzmatrix  $Z$  in Formel 2.17 hergestellt. Auch hier ist zu beachten, dass bei der Berechnung in Komponentenschreibweise nur die Phase A betrachtet wird. Die Phasen B und C sind vom Betrag identisch mit der Phase A, jedoch um  $120^\circ$  beziehungsweise  $240^\circ$  phasenverschoben.

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{1A} \\ \underline{U}_{2A} \\ \underline{U}_{0A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{1A} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{2A} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{0A} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_{1A} \\ \underline{I}_{2A} \\ \underline{I}_{0A} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

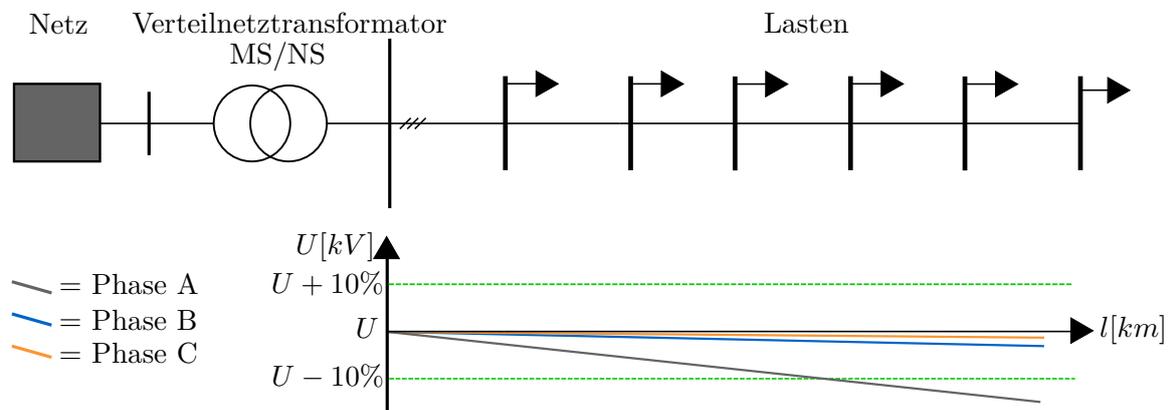
So ist bei der Berechnung der dreiphasigen Leistung mit der Formel 2.18 der Faktor 3 notwendig. Ohne diesen Vorfaktor wird nur die einphasige Scheinleistung betrachtet.

$$\underline{S}_{ABC} = \begin{pmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix}^* = 3 \cdot \underline{S}_{120} \quad (2.18)$$

### 2.2.2 Unsymmetrische Lasten in der Niederspannungsebene

Bei unsymmetrischen Lasten handelt es sich um Verbraucher, welche ein- oder zweiphasig an das Netz angeschlossen sind und dadurch das Drehstromsystem ungleichmäßig belasten. Durch den Vierleiteraufbau von NS-Netzes und der damit zur Verfügung gestellten Leiter-Erd-Spannung von 230 V, wird der Anschluss dieser ein- oder zweiphasigen Lasten ermöglicht [9]. Aus diesem Grund ist ein symmetrischer Netzbetrieb der Niederspannungsebene in der Realität ausgeschlossen. Haushalte stellen dabei einen der Verursacher von Unsymmetrien im NS-Netz dar. Die einzelnen Verbraucher, welche über den gesamten Haushalt verteilt sind, wirken zusammengefasst als eine unsymmetrische Last. Dabei trägt die Küche, mit den größten Lasten des Haushaltes an einer Phase, am stärksten zu dem Ungleichgewicht bei. Sofern nicht alle Küchen in einem NS-Netz auf einer Phase liegen, reduzieren sich die Unsymmetrien durch die Haushaltslasten bei zunehmender Anzahl [16]. Eine weitere große unsymmetrische Last im NS-Netz sind Straßenbahnen, welche zweiphasig zwischen zwei Außenleitern angeschlossen sind. Da die Streckenabschnitte von Bahnnetzen durch mehrere NS-Netze verlaufen und somit nur kurzzeitig auftreten, werden diese Lasten im Verlauf dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Unsymmetrien können auch durch den ungleichen Aufbau von Leitungen, insbesondere bei Freileitungen, verursacht werden. Dabei unterscheiden sich die Längen der einzelnen Leiter oder deren Anordnung zueinander. Daraus resultieren unterschiedliche Leitungsbeläge der einzelnen Phasen, was wiederum Unsymmetrien hervorruft [19]. Als moderne unsymmetrische Last stellt das ein- oder zweiphasig ladende Elektrofahrzeug eine neue Herausforderung an das NS-Netz dar. Mit einer gesteigerten Zuwachsrate von 43,9 % bei den Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen im Jahr 2018 und einem bisherigen geringen Marktanteil von 1% besteht ein hohes Potential bei der Elektrifizierung der Verkehrsflotte [7]. Aus diesem Grund liegt in dieser Arbeit der Fokus bei unsymmetrischen Lasten auf einphasig ladenden elektrischen Fahrzeugen, um die Auswirkungen der Integrationen vieler Elektrofahrzeuge in das NS-Netz zu prüfen. Für die Betrachtung von durch E-Fahrzeug hervorgerufene Unsymmetrien kommen erst Fahrzeuge mit Ladeströmen von über 10 A in Frage. Kleine Abnehmer wie E-Bikes oder E-Motorräder haben durch kleine Ladeströme von unter 2 A und die daraus resultierende niedrige Ladeleistung einen eher geringen Einfluss auf das Netz [22][5]. Die in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeuge werden mit einer einphasigen Leistung von 3,7 kW

(16 A) angesetzt. Was die elektrischen Fahrzeuge von anderen unsymmetrischen Lasten, wie beispielsweise Mikrowellen, unterscheidet ist die Ladedauer bei konstant hoher Leistung [23]. Dies steigert die Gefahr von Gleichzeitigkeiten, da die meisten Elektrofahrzeuge über Nacht an der Hausstation laden und dadurch ein Risiko für schwache Netzste, insbesondere im ländlichen Bereich, darstellen [23][6]. Das Laden von E-Fahrzeugen im Haushalt und die ungleichmäßige Verteilung im NS-Verteilnetz erzeugt Unsymmetrien, die die Unsymmetriegrenze von 2% nach DIN 50160 übersteigen. Auch die gleichmäßige Verteilung der E-Fahrzeuge ist keine Garantie für Symmetrie im Netz. Zum einen bestehen auch ohne E-Fahrzeuge durch andere Lasten Unsymmetrien im NS-Verteilnetz. Zum anderen führt individuelles Nutzerverhalten auch zu individuellem Ladeverhalten [24]. Neben den Unsymmetrien ist auch die Verletzung der negativen Spannungshubgrenze nach DIN 50160 bei Belastung einer Phase eine Gefahr. Die Abbildung 2.12 zeigt einen beispielhaften Fall einer langen Leitung, bei dem viele Fahrzeuge unsymmetrisch an der Phase A einphasig angeschlossen sind.



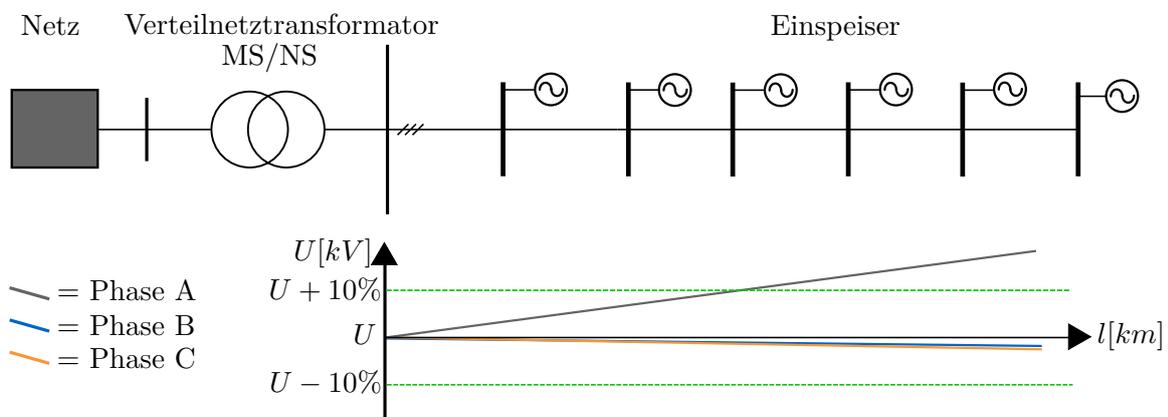
**Abbildung 2.12:** Spannungsabsenkung durch viele einphasige Elektrofahrzeuge auf einer einzelnen langen Phase

Die Phasen B und C sind unbelastet und bleiben im Grenzbereich, wohingegen die Phase A mit steigender Leitungslänge den Grenzbereich verlässt. Somit steigen durch die zunehmende Netzintegration von Elektrofahrzeugen, insbesondere bei unkoordiniertem Laden, die Gefahren für die Spannungsqualität. Durch die noch fehlende Infrastruktur für die Kommunikation der einzelnen Elektrofahrzeuge, werden die Probleme bei der Spannungsqualität bestehen bleiben. Aus diesem Grund steht das Elektrofahrzeug bei der Betrachtung der Integration von unsymmetrischen Lasten mit Hilfe eines Spannungslängsreglers im Fokus dieser Arbeit.

### 2.2.3 Unsymmetrische Energieerzeuger im Niederspannungsnetz

Unsymmetrien erzeugende Einspeiser sind einphasig an das NS-Netz angeschlossen und in der Regel Photovoltaik Systeme (PV-Systeme) [1]. Aus diesem Grund wird der Fokus dieser Arbeit

bei den dezentralen Erzeugern im NS-Netz auf die PV-Systeme gelegt. PV-Systeme wandeln mit Solarzellen die Sonneneinstrahlung direkt in elektrische Energie um. Dabei agiert die Solarzelle als Halbleiter-Flächendiode, welche einen Gleichstrom erzeugt. Dieser wird dann entsprechend des Netzanschlusses durch einen Wechselrichter in eine ein- oder dreiphasige Wechselspannung umgewandelt und mit der Frequenz des Netzes synchronisiert [11]. Nach den Richtlinien der VDE AR-N 4105 ist bei einphasigen Systemen eine maximale Erzeugungsleistung von 4,7 kW an einem Netzanschlusspunkt je Außenleiter zulässig, damit starke Unsymmetrien vermieden werden [25]. Besonders ländliche Regionen mit einer geringen Verbraucherdichte können jedoch durch die Summe mehrerer unsymmetrischer Netzanschlusspunkte gefährdet sein [20]. Hinzu kommt die lokal konzentrierte Leistungserzeugung von PV-Systemen. Durch die geringe Ausdehnung der NS-Netze sind eine nahezu identische Solarstrahlung und weitere Einflussfaktoren, wie die Umgebungstemperatur, gegeben [26]. Auch bei gleichmäßiger Verteilung der PV-Systeme kann es aufgrund unterschiedlicher Ausrichtungen und Neigungswinkeln der einzelnen Systeme zu unsymmetrischer Leistungserzeugung kommen [27]. Eine hohe unsymmetrische Einspeisung gefährdet unter anderem das Spannungshubkriterium nach den Richtlinien der VDE AR-N 4105. Dieser Fall ist in Abbildung 2.13 schematisch für eine lange Leitung dargestellt.



**Abbildung 2.13:** Spannungserhöhung durch viele einphasige PV-Systeme auf einer einzelnen langen Phase

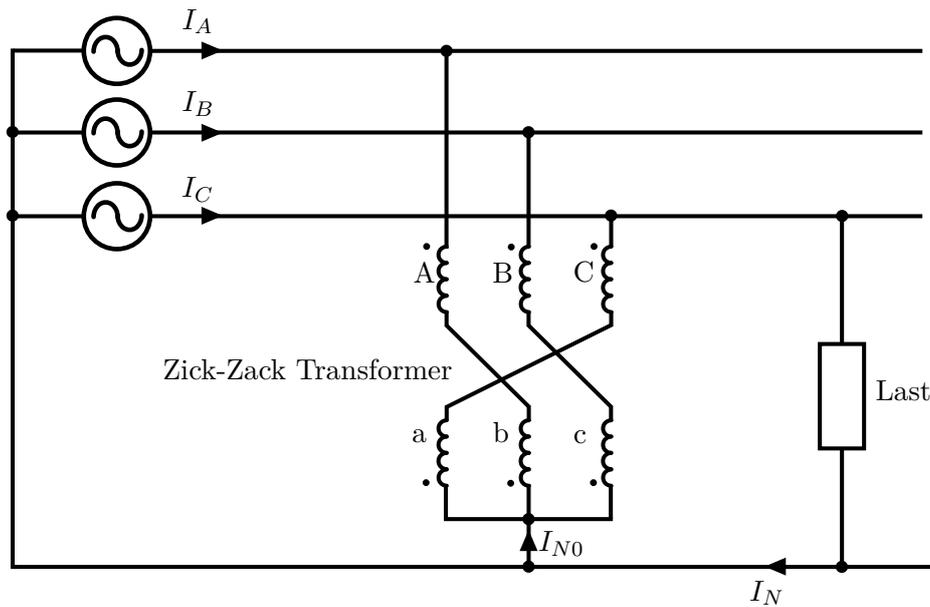
Wird eine Leistung unsymmetrisch auf einer Phase erzeugt, ist diese um das Dreifache höher als bei der symmetrischen Aufteilung auf alle drei Phasen [28]. Dies führt zu einem deutlich höheren Spannungshub auf der belasteten Phase und einem Strom im Neutralleiter. Daher wird die Integration weiterer PV-Systeme durch starke Unsymmetrien im Netz limitiert.

## 2.3 Regelung von Unsymmetrien

Mit innovativen Betriebsmitteln kann die Betriebsgrenze, insbesondere die Spannungsgrenzen der dreiphasigen Knotenspannungen, welche in der DIN EN 50160 definiert sind, ohne den Ausbau der Netze gehalten werden [29]. Dazu sind die Spannungsregelungen in zwei Kategorien unterteilbar, welche durch ihre phasenunabhängige Regelung auch Unsymmetrien ausgleichen können. Die erste Kategorie bezieht sich auf die indirekte Spannungsregelung über die Bereitstellung von Blindleistung oder die Entlastung des Neutalleiters. Dazu kommen unter anderem Zick-Zack Transformatoren als Lastregler oder statische Kompensatoren (STATCOM) zum Einsatz [29][30]. Der Zick-Zack Lastregler wird für die Reduktion von Neutraleiterströmen genutzt, welche durch Spannungsunsymmetrien hervorgerufen werden. Statische Kompensatoren wie der STATCOM stellen für jede Phase stetig Blindleistung bereit. Dazu erzeugt er ein dreiphasiges Spannungssystem mit variabler, phasenunabhängiger Spannungsamplitude, welche um  $90^\circ$  phasenverschoben in das Netz eingespeist wird. Dadurch entsteht eine reine Blindleistungseinspeisung, welche durch die variable Spannungsamplitude auch Unsymmetrien im Netz ausgleichen kann [11]. Die zweite Kategorie ist die direkte Spannungsregelung bei der die Betriebsmittel einen unmittelbaren Einfluss auf die Amplitude der Knotenspannung haben. Dafür werden ein regelbarer Ortsnetztransformator (rONT) oder ein Spannungslängsregler (SLR) genutzt. Der rONT wird in der Ortsnetzstation aufgestellt und regelt damit die dreiphasige Knotenspannung am Anfang einer Leitung, indem er mehrstufig das Übersetzungsverhältnis variiert. In dieser Arbeit steht ein SLR mit regelbarer Induktivität im Fokus, welcher für die Ausregelung von Unsymmetrien bei der simulationstechnischen Untersuchung verwendet wird. Darüber hinaus wird der SLR mit einem Zick-Zack Transformator und einem rONT verglichen. Mit diesem Hintergrund werden im Folgenden die drei Reglerarten vorgestellt.

### 2.3.1 Zick-Zack Transformator als Lastregler

Zick-Zack-Transformatoren bestehen aus drei einphasigen Transformatoren mit Zick-Zack-Schaltung, welche in Abbildung 2.14 zu sehen ist. Die Primärseiten sind mit Großbuchstaben A,B,C beschriftet und sind galvanisch mit den entsprechenden Sekundärspulen a,b,c gekoppelt. So bilden sich die Paare Aa, Bb und Cc. Dabei ist das Übersetzungsverhältnis der einzelnen Transformatoren mit 1:1 festgelegt [30]. Aus der Abbildung 2.14 wird ersichtlich, dass der Zick-Zack-Transformator parallel an das Netz angekoppelt ist und damit eine direkte Verbindung mit den Neutraleiter ermöglicht. Die Zick-Zack-Verschaltung und die gegensätzliche Polarität der oberen und unteren Wicklungen haben eine niedrige Nullsystem-Impedanz und eine hohe Mitsystem-Impedanz zur Folge [30][31].



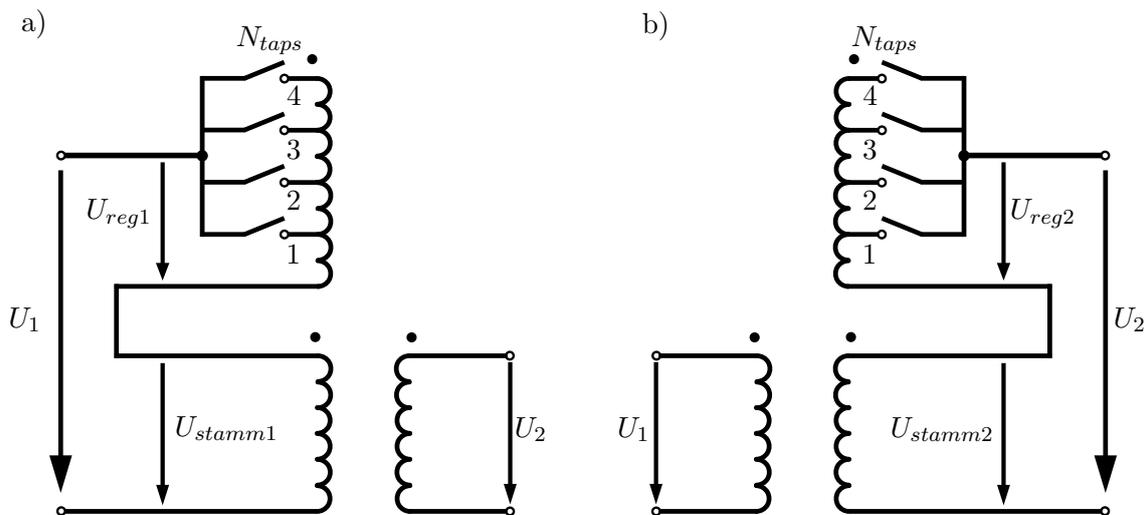
**Abbildung 2.14:** Schematische Abbildung des Zick-Zack Lastreglers in einem Vierleiternetz

Es kann somit nur ein Nullsystem-Strom durch die Wicklungen fließen, welcher lediglich im unsymmetrischen Betriebsfall auftritt [32]. Wird nun eine einphasige Last, wie in Abbildung 2.14 dargestellt, an das Netz angeschlossen, fließt ein durch die Unsymmetrie hervorgerufener Strom  $I_N$  durch den Neutralleiter. Der Anteil des Nullsystem-Stroms  $I_{N0}$  fließt durch den Zick-Zack-Transformator und teilt sich gleichmäßig auf die drei Wicklungsstränge auf, was eine Reduktion des Neutralleiterstroms zur Folge hat. Dies wiederum vermindert die Verschiebung des Sternpunktes des Drehstromsystems und reduziert die Schwankung des Spannungsbetrages der einzelnen Phasen [31]. Da der Neutralleiterstrom erst ab dem Zick-Zack-Transformator reduziert wird, ist dieser so nah wie möglich an die Stelle mit den größten Unsymmetrien zu platzieren, was in der Regel am Ende der Leitungen gegeben ist [30][32].

### 2.3.2 Regelbarer Ortsnetztransformator

Im Folgenden wird der regelbare Ortsnetztransformator vorgestellt. Der rONT ist ein direkter Spannungsregler, welcher in der Ortsnetzstation die Amplitude der Primär- oder Sekundärspannung  $U_1$  und  $U_2$  mehrstufig verändern kann. Dazu ist die Primär- oder Sekundärwicklung in eine Stammwicklung  $U_{stamm1}$  oder  $U_{stamm2}$  und einer zusätzlichen Reglerwicklung  $U_{reg1}$  oder  $U_{reg2}$  aufgeteilt [11]. In Abbildung 2.15 sind dazu die primärseitigen und sekundärseitigen Anordnungen der Wicklungen in a) und b) dargestellt. Mit den Reglerwicklungen werden die Windungszahlen und damit einhergehend das Übersetzungsverhältnis verändert. Dies wird über die Anzapfungen (engl. Taps) gesteuert, welche in einer festen Anzahl  $N_{taps}$  vorhanden sind. Das Umschalten zwischen den einzelnen Anzapfungen geschieht dynamisch

und unterbrechungsfrei unter Last mit Hilfe eines Lastschalters. Die Unterbrechungsfreiheit wird erreicht, indem beim Umschaltvorgang von der einen auf die andere Anzapfung ein Windungsschluss stattfindet [11]. Dieser Kurzschluss wird durch ohmsche Widerstände begrenzt, welche Bestandteil der Leistungsschalter-Bauart sind. Ein Umschaltvorgang dauert dabei zwischen 40 ms bis 60 ms und liegt zwischen 0,8 % und 2 % der Nennspannung [33]. Das Hystereseverhalten des rONTs verhindert darüber hinaus das dauerhafte Schalten bei bleibenden Abweichungen [34]. Für den Vergleich des Sollwertes und des Istwertes kommen zwei Messansätze zum Einsatz. Im einfachen Fall wird die Knotenspannung unmittelbar am rONT gemessen und hinsichtlich des Sollwertes ausgeregelt. Dies hat den Vorteil, dass keine Kommunikationsinfrastruktur notwendig ist. Die aufwendige Variante nutzt die Schlechtpunkt-messung am Ende der Leitung [34]. Hierfür ist eine Kommunikationsinfrastruktur zwingend erforderlich, welche jedoch auch extreme Spannungsschwankungen am Ende des Netzes berücksichtigen kann. Der Vorteil des rONTs ist der einfache Aufbau und die seit über 90 Jahren angewandte Technologie in der Praxis [33]. Dem gegenüber steht die unflexible Platzierung am Anfang des Verteilnetzes. Treten starke Spannungshübe oder -absenkungen am Ende der Leitungen auf, limitieren nahe Leitungsabschnitte oder unbetroffene Leitungen im Netz die Anpassungsfähigkeit der Spannungsamplitude.

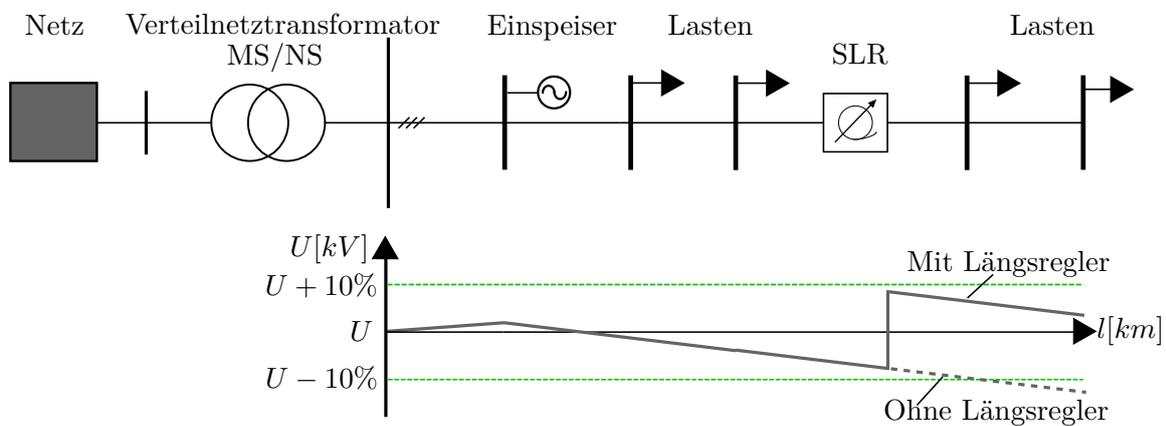


**Abbildung 2.15:** Anordnung der Stamm- und Reglerwicklungen des rONTs a) Primärseitige Regelung b) Sekundärseitige Regelung

### 2.3.3 Spannungslängsregler mit regelbarer Induktivität

Der Spannungslängsregler wird im Folgenden in Anlehnung an [35] vorgestellt. Im Allgemeinen besteht ein SLR aus einem Längstransformator, dessen Sekundärseite in Reihe mit der

zu regelnden Phase geschaltet ist. Geregelt wird das Übersetzungsverhältnis des Längstransformator, indem die Spannung der Primärseite nach unterschiedlichen Ansätzen variiert wird. So gibt es Spannungslängsregler mit Transformator-kaskaden, Stelltransformatoren, Wandlerbasierte Längsregler und Längsregler mit regelbarer Induktivität [34]. Sie alle ermöglichen das Einprägen einer in Phase oder um  $180^\circ$  phasenverschobenen Spannung in das Drehstromnetz. Dadurch wird eine Anhebung oder Senkung der Phasenspannung erzielt, was in Abbildung 2.16 schematisch für den Rückspeisefall bei einer langen Leitung dargestellt ist. Mit dem Hinzufügen einer gegenphasigen Spannung wird die Spannungserhöhung durch die dezentralen Einspeiser gemindert und in der nach DIN EN 50160 vorgesehenen Grenze gehalten. Des Weiteren lassen sich Längsregler unmittelbar an kritischen Stellen im Netz einbauen, was sie zum Beispiel vom rONT unterscheidet, welcher nur am Anfang einer Leitung regeln kann. In dieser Arbeit geht es um einen Längsregler mit regelbarer Induktivität, welcher in



**Abbildung 2.16:** Schematische Abbildung des Einsatzes eines SLRs bei Überlast im Netz auf einer langen Leitung

vereinfachter Variante schematisch mit dem einphasigen ESB in Abbildung 2.17 dargestellt ist. Die Sekundärinduktivität  $L_s$  ist in Reihe mit der zu regelnden Phase geschaltet. Die Primärinduktivität  $L_p$  ist Teil eines induktiven Spannungsteilers mit der regelbaren Induktivität  $L_r$ . Die Induktivität  $L_r$  ist ein Ringkerntransformator mit einer zusätzlichen Steuerwicklung. Die Steuerwicklung wird von einem Gleichstrom durchflossen, welcher einen gleichbleibenden magnetischen Fluss in den Eisenkern des Ringkerntransformators erzeugt. Diese Magnetisierung erhöht den magnetischen Widerstand des Eisenkerns, was letztendlich die Induktivität  $L_r$  verringert. Dadurch verändert sich auch das Spannungsteiler-Verhältnis von  $L_r$  und  $L_p$ , welches sich wiederum auf das Übersetzungsverhältnis des Längstransformators auswirkt. Der Längsregler ermöglicht die phasenunabhängige Regelung, indem der Aufbau aus Abbildung 2.17 in jede Phase implementiert, individuell angesteuert und die Strangspannung  $U_B$  angehoben oder gesenkt wird. So lassen sich Unsymmetrien im Netz mit der Einprägung einer entsprechend ausgerichteten Spannung ausregeln.

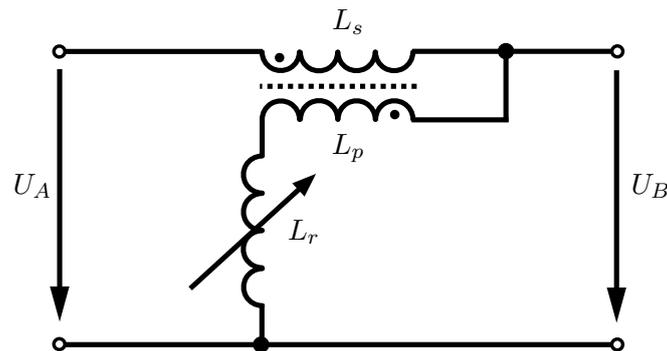
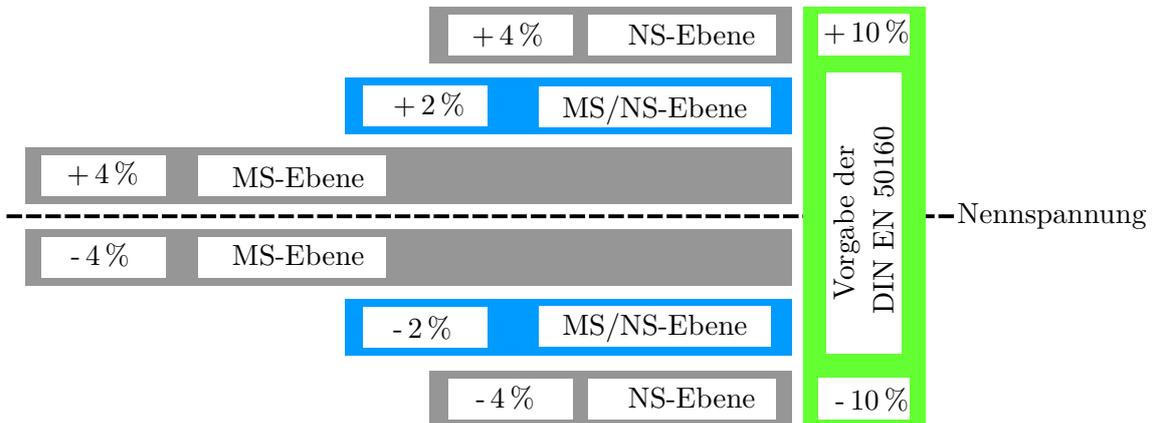


Abbildung 2.17: Vereinfachtes ESB des SLR

## 2.4 Begrenzungskriterien für das Integrationspotential von Unsymmetrien

Bei der Untersuchung des Integrationspotentials von unsymmetrischen Lasten und Erzeugern in NS-Netzen sind bestimmte physikalische Grenzen und weitere Anforderungen einzuhalten. Die physikalischen Grenzen sind durch die eingesetzten Betriebsmittel vorgegeben. Weitere Anforderungen gehen aus Normen, wie beispielsweise der DIN EN 50160, bezüglich der Mindestanforderungen an die Spannungsqualität für den Endverbraucher im NS-Netz, hervor. Die erste Begrenzung der integrierbaren unsymmetrischen Leistungserzeugung oder -entnahme geht von dem Verteilungstransformator in der Ortsnetzstation aus. Aus dem vorgegebenen Spannungsniveau des NS-Netzes und der Nennleistung des Verteilungstransformators resultiert ein maximaler Nennstrom. Dieser darf auf Grund von thermischen Belastungsgrenzen der Wicklungen nicht überschritten werden, da ansonsten eine schnelle Alterung der Isolierungen eine verkürzte Lebensdauer zur Folge hat [36]. Jedoch ist eine dauerhafte Überlastung von 20% in der Literatur als zulässig angegeben [20]. Eine weitere Begrenzung des Integrationspotentials von unsymmetrischen Lasten und Erzeugern geht von der Strombelastbarkeit der verlegten Leitungen aus. Auch hier hat eine Überlastung die thermische Alterung der Isolierungen und eine damit verbundene verkürzte Lebensdauer zur Folge. Bei langen Leitungen, welche insbesondere im ländlichen Raum genutzt werden, ist vor allem der vordere Teil der Stränge gefährdet, da dort der Betriebsstrom am höchsten ist. Wie zuvor erwähnt, erzeugen unsymmetrische Belastungen Ströme im Neutralleiter, wodurch alle vier Leiter eines TN-C NS-Netzes potentiell gefährdet sind. Durch die DIN VDE 0100-520 sind bei Neuanlagen keine kleineren Querschnitte des Neutralleiters zulässig, sofern Unsymmetrien im Netz vorkommen können [13]. Daher wird bei weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit von Kabeln mit identischem Querschnitt je Phase ausgegangen. Die Mindestanforderungen an die Spannungsqualität durch die DIN EN 50160 ist ein weiterer limitierender Faktor für die Integration von unsymmetrischen Lasten und Erzeugern. So ist die maximale Abweichung von der

Nennspannung je Phase beim NS-Kunden auf  $\pm 10\%$  festgelegt. Darüber hinaus sind diese 10 % aus Netzplanungssicht auf mehrere Spannungsebenen aufzuteilen, wodurch die mögliche Spannungserhöhung oder -senkung im NS-Netz verringert wird. Eine mögliche Aufteilung des Spannungsbandes, über die Netzebenen hinweg, ist in Abbildung 2.18 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2.18:** Mögliche Aufteilung des Spannungsbandes im ungestörten Betrieb

Nach Abbildung 2.18 werden für die Spannungsänderung in NS-Netzen  $\pm 4\%$  reserviert, wobei die restlichen Prozente auf das MS-Netz und den Verteilnetztransformer aufgeteilt sind. Bezüglich des Rückspeisefalls gibt jedoch die Richtlinie der VDE AR-N 4105 bei der Netzplanung eine maximale Spannungserhöhung von 3 % je Netzanschlusspunkt vor, welche nur überschritten werden darf, sofern Regeleinheiten wie z.B. ein RONT im Netz verbaut sind [25]. Bei einem regelbaren Transformator stehen dann wieder die vollen  $\pm 10\%$  des Spannungsbandes im NS-Netz zur Verfügung. Im Verlauf dieser Arbeit wird im Rückspeisefall mit einer maximalen Spannungserhöhung von 3 % und einer maximalen Spannungssenkung von 4 % im Starklastfall gearbeitet.

Neben dem Spannungshub wird in der DIN EN 50160 auch die maximal vertretbare Unsymmetrie im NS-Netz festgelegt. Diese wird mit einem maximalen Unsymmetriefaktor  $k_{\text{us}}$  von 2 % angegeben. Der Unsymmetriefaktor  $k_{\text{us}}$  aus Gleichung 2.19 setzt sich aus dem Verhältnis des Effektivwerts der Gegensystemkomponente  $\underline{U}_{(2)}$  und des Effektivwerts der Mitsystemkomponenten  $\underline{U}_{(1)}$  zusammen.

$$k_{\text{us}} = \frac{\underline{U}_{(2)}}{\underline{U}_{(1)}} \leq 2\% \quad (2.19)$$

So lassen sich abschließend aus der Literaturrecherche vier Begrenzungskriterien herausarbeiten, die im Rahmen dieser Arbeit für die Untersuchung des Integrationspotenzials von

unsymmetrischen Erzeugern und Lasten genutzt wird. Für die bessere Übersicht sind diese noch einmal in der Tabelle 2.3 aufgeführt.

**Tabelle 2.3:** Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer unsymmetrischer Leistungen

<b>Kriterium</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
<b>1</b>	Leistungsbegrenzung des Transformators	netzabhängig	kW
<b>2</b>	Stromtragfähigkeit der Leitungen	netzabhängig	A
<b>3</b>	Spannungshub Kriterium nach DIN 50160	+ 3, - 4	%
<b>4</b>	Unsymmetriefaktor nach DIN 50160	- 2	%

## 3 Modellierung des Netzmodells

Für die Erforschung des Einsatzes eines Spannungslängsreglers zur Behebung von Spannungsunsymmetrien sind im Kapitel 2 Begrenzungskriterien aufgestellt worden. Mit ihnen soll in dieser Arbeit überprüft werden, inwieweit ein Spannungslängsregler das Integrationspotential unsymmetrischer Lasten und Einspeiser erhöhen kann. Dafür wird zunächst eine Simulationsumgebung in Form eines NS-Strahls benötigt, um die Auswirkungen von dezentralen Energieerzeugern und Elektrofahrzeugen auf die Spannungssymmetrien zu untersuchen. Mit Hilfe dieser Umgebung wird dann der Einsatz des SLR, eines rONTs und zusätzlich eines Zick-Zack Lastreglers mit verschiedenen Worst-Case Szenarien im weiteren Verlauf dieser Arbeit erprobt.

### 3.1 Aufbau und Parametrierung des Netzmodells

Die Modellierung aller eingesetzten Betriebsmittel und die Simulationen der Worst-Case Szenarien werden in der Simulink/MATLAB Umgebung mit Hilfe der Software Simscape Power Systems durchgeführt. Mit Simscape Power Systems können elektrische Stromkomponenten ein- und dreiphasig modelliert und zu flexiblen Wechselstromsystemen verknüpft werden, was umfangreiche Untersuchungsmöglichkeiten mit sich bringt [37]. Zunächst wird die Modellierung der relevanten NS-Netz Betriebsmittel in Form der Leitungen und des Verteilnetztransformators erörtert. Notwendige Daten für die Ermittlung der Parameter werden aus dem SimBench-Datensatz [1] entnommen. Darauf folgt die Modellierung der einphasigen Photovoltaik-Systeme und Elektrofahrzeuge. Eine anschließende Modellierung der Reglervarianten vervollständigt die notwendigen Komponenten. Zusammengefügt ergeben die modellierten Betriebsmittel das Gesamtmodell, welches im späteren Verlauf mit den Worst-Case Szenarien simulationstechnisch untersucht wird.

#### 3.1.1 Betriebsmittel des NS-Verteilnetzes

Wie zuvor beschrieben, werden für die Modellierung der relevanten Betriebsmittel die, für die Parametrierung notwendigen Daten aus dem SimBench Datensatz entnommen. Dabei

sind in dieser Arbeit besonders die ländlichen NS-Netze von Interesse. Im SimBench Datensatz sind dazu drei ländliche Benchmark Datensätze hinterlegt. Aus ihnen wird der längste NS-Strahl herausgesucht, da hier die Risiken der Spannungsbandverletzung und die Verletzung des symmetrischen Kriteriums am höchsten sind. Relevante Informationen sind dabei sämtliche Leitungsparameter, Angaben zu dem Verteilungstransformator und die Anzahl der vorhandenen Busse auf der Leitung. Parameter für Sicherungen oder Schalter sind für die Untersuchung von Unsymmetrien nicht relevant und werden daher nicht betrachtet.

## Leitungen

Ein Leitungsabschnitt wird mit einem  $\pi$ -ESB modelliert. Die notwendigen Parameter sind die Netzfrequenz  $f_N$  [Hz], die 50 Hz beträgt, der Widerstandsbelag  $R'$  [ $\Omega$ /km], die Leitungsinduktivität  $L_L$  [H/km] und die Leitungskapazität  $C_L$  [F/km]. Darüber hinaus wird noch die Länge des zu modellierenden Leitungsabschnitts  $l_L$  in Meter benötigt. Die elektrischen Parameter des verwendeten Leitungstyps aus dem SimBench Datensatz sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

**Tabelle 3.1:** Elektrische Parameter des Leitungstypen aus dem SimBench Datensatz

Parameter	$R'$ ( $\Omega$ /km)	$X'_L$ ( $\Omega$ /km)	$B'_L$ ( $\Omega$ /km)	$i_{max}$ (A)
NAYY 4x150SE 0,6/1kV	0,2067	0,08042	260,752	270

Der Parameter  $X'_L$  beschreibt den Reaktanzbelag und  $B'_L$  den Suzeptanzbelag. Für die Modellierung als  $\pi$ -ESB sind diese beiden Werte für die Leitungsinduktivität  $l_L$  und der Leitungskapazität  $C_L$  umzurechnen. Sie werden über die Nennfrequenz mit den Formeln 3.1 für  $L_L$  und Formel 3.2  $C_L$  ermittelt.

$$X'_L = \omega L' \Rightarrow L' = \frac{X'_L}{\omega} = \frac{X'_L}{2\pi f_n} \quad (3.1)$$

$$B'_L = \omega C' \Rightarrow C' = \frac{B'_L}{\omega} = \frac{B'_L}{2\pi f_n} \quad (3.2)$$

Die für das  $\pi$ -ESB resultierenden Parameter sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Die Leitungslängen variierenden für jeden Leitungsabschnitte und können dem Datensatz "1 – LV – rural2 – –0 – no\_sw" des SimBench Projekts entnommen werden [1]. Darüber hinaus ist zu beachten, dass ein  $\pi$ -ESB für jede Phase einzeln modelliert wird und somit für jeden Leitungsabschnitt des vieradrigen NAYY Kabels vier äquivalente Blöcke notwendig sind.

**Tabelle 3.2:** Elektrische Parameter für die Modellierung in MATLAB

Parameter	$R'$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L'_L$ (mH/km)	$C'_L$ ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )	$f_n$ (Hz)
NAYY 4x150SE 0,6/1kV	0,2067	0,259	0,83	50

### Verteilungstransformatoren

Der dreiphasige Verteilungstransformator mit einem T-ESB modelliert. Für die Parametrierung wird die Nennleistung  $P_N$  und Netzfrequenz  $f_N$ , welche hier stets 50 Hz beträgt, benötigt. Das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  wird über die Leiter-Leiter Spannungen an der Primär- und Sekundärwicklung gebildet. Darüber hinaus sind die Wicklungen über den jeweiligen Kupferwiderstand  $R_{\text{cu}}$  und deren Streuinduktivitäten  $L_{\phi 1}$  und  $L_{\phi 2}$  modelliert. Für die Parametrierung des Kerns wird der Eisenwiderstand  $R_{\text{fe}}$  und die Hauptinduktivität  $L_h$  genutzt. Bei Unsymmetrien im Netz verändern sich die drei magnetischen Hauptflüsse des dreiphasigen Transformators [14]. Es tritt ein Nullsystem auf, welches ebenfalls die Form eines T-ESB hat. Hier ist vor allem die Hauptinduktivität  $L_{h0}$  für die Modellierung relevant.

Wie bei den Leitungen stammen die für die Parametrierung notwendigen Information aus dem SimBench Datensatz. Diese sind in der folgenden Tabelle 3.3 aufgeführt.

**Tabelle 3.3:** Elektrische Parameter des Verteilungstransformators aus dem SimBench Datensatz

Beschreibung	Wert	Einheit
Typ	20/0,4	kV
Schaltgruppe	Dyn5	/
Nennleistung ( $P_n$ )	0,25	MVA
Primärspannung ( $U_1$ )	20	kv
Sekundärspannung ( $U_2$ )	0,4	kv
Kurzschlussspannung ( $u_k$ )	6	%
Leerlaufstrom ( $I_0$ )	0,352	%
Eisenverluste ( $P_{fe}$ )	0,88	kW
Kupferverluste ( $P_{cu}$ )	3,3	kW
Relativer Kupferwiderstand ( $u_{kr}$ )	1,32	%

Mit Hilfe der Leerlauf- und Kurzschlussrechnung, welche in Kapitel 2 vorgestellt worden sind, können aus den obigen Angaben die Parameter für das T-ESB ermittelt werden. Aus der Kurzschlussrechnung gehen der Kupferwiderstand  $R_{\text{cu}}$  der beiden Wicklungen und deren Streuinduktivitäten  $L_{\phi 1}$  und  $L_{\phi 2}$  hervor. Die Leerlaufrechnung liefert den Eisenwiderstand  $R_{\text{fe}}$

und die Hauptinduktivität  $L_h$ . Die Hauptinduktivität des Nullsystems  $L_{ho}$  spielt besonders bei Unsymmetrien eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Denn in diesem Fall sind die drei magnetischen Hauptflüsse nicht mehr um  $120^\circ$  phasenversätzt, wodurch sie sich nicht mehr gegenseitig aufheben. Durch das Vorhandensein eines Nullstroms, sind die drei magnetischen Hauptflüsse gleichphasig und benötigen einen Weg für den Rückfluss. Bei getrennten Kernen oder Fünfschenkelkerntransformatoren ist ein Rückweg für den Nullstrom über den Eisenkern vorhanden, wodurch  $L_{ho}$  die gleiche Größenordnung besitzt wie  $L_h$  des Mitsystems [14]. Im Fall dieser Arbeit handelt es sich jedoch um einen Dreischenkeltransformator. Bei diesem existiert kein Rückweg über den Eisenkern für den magnetischen Fluss  $L_{ho}$ . Dieser fließt daher außerhalb des Eisenkerns zurück, was eine Verringerung von  $L_{ho} = 0,1 \times L_h$  mit sich bringt [14]. Die notwendigen Parameter des T-ESB werden in Bezugsgrößen (p.u.) angegeben. Dafür ist die Umrechnung der ermittelten Größen bezogen auf die zugehörige Basisgröße notwendig. Zunächst werden mit der Gleichung 3.3 und der Gleichung 3.4 die Bezugsimpedanz  $Z_B$  bzw. Bezugswiderstand  $R_B$  und Bezugsinduktivität  $L_B$  berechnet.

$$Z_B = R_B = X_B = \frac{(U_n)^2}{N_n} \quad , \text{ mit } U_n = U_1 \quad (3.3)$$

$$L_B = \frac{X_B}{2\pi f_n} \quad (3.4)$$

Aus Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6 folgen dann der Widerstand und die Induktivität in Bezugsgröße (pu).

$$R(pu) = \frac{R(\Omega)}{R_B} \quad (3.5)$$

$$L(pu) = \frac{L(H)}{L_B} \quad (3.6)$$

In der folgenden Tabelle 3.4 sind die ermittelten Parameter des Verteilungstransformators für den Simulink-Block aufgelistet.

### 3.1.2 Unsymmetrische Einspeiser und Lasten

Wie in den Grundlagen bereits erwähnt wurde, gibt es eine Vielzahl an Unsymmetrien erzeugende Einspeiser und Verbraucher im NS-Netz. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einphasigen

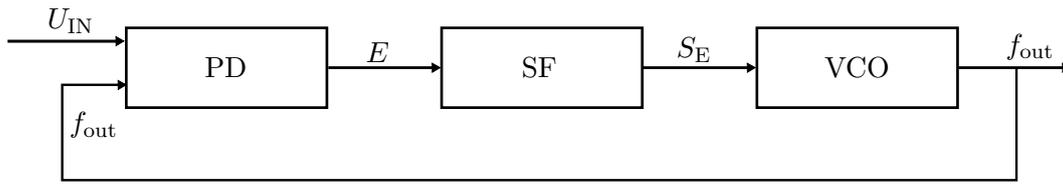
**Tabelle 3.4:** Elektrische Parameter des Verteilungstransformators für die Parametrierung des MATLAB-Bausteins

Beschreibung	Wert	Einheit	Wert in p.u. Größe
Kupferwiderstand Wicklung 1 & 2 ( $R_{cu1,2}$ )	10,56	$\Omega$	$6,6 \times 10^{-3}$
Streuinduktivität Wicklung 1 & 2 ( $L_{\phi 1,2}$ )	0,149	H	0,02925
Eisenwiderstand ( $R_{fe}$ )	454,55	k $\Omega$	284,09
Hauptinduktivität ( $L_h$ )	382,93	H	75,19
Hauptinduktivität des Nullsystems ( $L_{ho}$ )	38,293	H	7,519

Elektrofahrzeugen bei dem unsymmetrischen Verbraucher und auf einphasigen Photovoltaik-Systemen bei den unsymmetrischen Einspeisern. Für die Betrachtung der Worst-Case Szenarien wird eine statische und vereinfachte dynamische Modellierung der Lasten und Einspeiser genutzt. Bei der vereinfachten dynamischen Modellierung wird ein einfacher Lastsprung nachgebildet. Eine detailliertere Modellierung mit Zeitreihen ist in diesem Fall nicht notwendig, da lediglich Last- und Einspeisespitzen von Interessen sind. Sowohl die einphasigen Elektrofahrzeuge als auch die PV-Systeme sind an den im Netz vorhandenen Bussen für die Hausanschlüsse installiert.

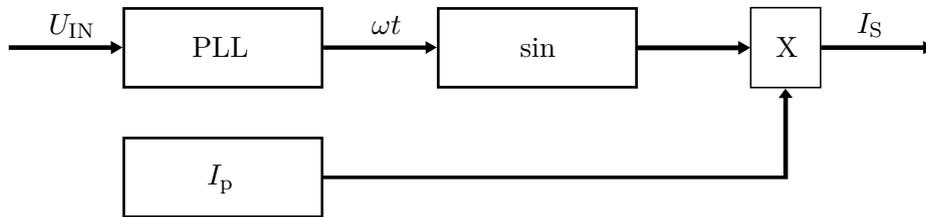
### Einphasiges PV-System

Die einphasig angeschlossenen PV-Systeme werden als steuerbare Stromquellen modelliert. PV-Module erzeugen in der Realität einen Gleichstrom, der für die Einspeisung in das NS-Netz mit einem Wechselrichter umgewandelt werden muss. Dabei wird sichergestellt, dass die Leistung synchron mit der Netzfrequenz eingespeist wird. In diesem Modell wird der Wechselrichter nicht modelliert, da lediglich die Leistungseinspeisung von Interesse ist. Die steuerbare Stromquelle erzeugt somit direkt ein Wechselstromsignal. Durch das Entfallen des Wechselrichters ist es notwendig, dass das treibende Steuersignal der Stromquelle die Informationen der Phasenlage enthält. Mit der Messung der dreiphasigen komplexen Strangspannung am Anschlusspunkt des PV-Systems lassen sich die einzelnen Phasenlagen und Frequenzen mit Hilfe einer Phasenregelschleife (PLL) ermitteln. In Abbildung 3.1 ist dazu das fundamentale Strukturdiagramm der Phasenregelschleife dargestellt. Der Phasendetektor (PD) vergleicht am Eingang das zu messende Signal  $U_{IN}$  mit dem Ausgangssignal  $f_{OUT}$  den spannungsgesteuerten Oszillator (VCO). Die Ausgabe des PD Blocks ist ein Fehlersignal E, welches sich proportional zur Abweichung der Phasenlage verhält. Das Fehlersignal E durchläuft einen Schleifenfilter (SF), welcher dieses in ein Steuersignal  $S_E$  für den VCO umwandelt. Der VCO agiert bezüglich der Phasenabweichung wie ein Integrierer, der die Phasendifferenz auf Null regelt und somit die Synchronisation der Phasenlage erreicht [38]. In Abbildung 3.2



**Abbildung 3.1:** Strukturdiagramm der fundamentalen Blöcke einer Phasenregelschleife

ist das gesamte Strukturdiagramm des einphasigen PV-Systems schematisch dargestellt. Die ermittelte Phasenlage  $\omega t$  wird nun als Argument einer Sinusfunktion für das synchronisierte Wechselstromsignal genutzt. Mit der Multiplikation einer Konstante  $I_p$  wird ein vollständiges Strom-Steuerungssignal  $I_S$  für die Stromquelle erzeugt.



**Abbildung 3.2:** Strukturdiagramm des einphasigen PV-Systems

Die Konstante  $I_{PV}$  ist dabei der Scheitelwert, welcher für die Einspeisung der geforderten effektiven PV-Leistung  $P_{PV}$  notwendig ist und welcher mit der Gleichung 3.7 berechnet wird.

$$I_{PV} = \frac{P_{PV}}{U_n} \cdot \sqrt{2} \quad (3.7)$$

### Einphasiges Elektrofahrzeug

Das statische einphasige Model des Elektrofahrzeuges wird über einen Widerstand und einer Induktivität modelliert welche parallel zueinander geschaltet sind. Dies ermöglicht die Simulation einer konstanten Last, indem die Wirkleistung und die induktive Blindleistung über die Elemente vorgegeben werden kann. Im SimBench Projekt sind bei den Benchmark-Datensätzen ebenfalls Profile für Elektrofahrzeuge enthalten. Dabei wird in ihnen ein Leistungsfaktor von  $\cos(\varphi) = 0,93$  (induktiv) angenommen, welcher im Rahmen dieser Arbeit übernommen wird. Damit bei einer Wirkleistungserhöhung dieser Leistungsfaktor eingehalten wird, werden die Parameter für die Wirkleistung  $P_{EV}$  und der induktiven Blindleistung  $Q_{LEV}$  mit der Gleichung 3.8 sowie der Gleichung 3.9 angepasst.

$$S_{EV} = \frac{P_{EV}}{\cos(\varphi)} = \frac{P_{PV}}{0,93} \quad (3.8)$$

$$Q_{\text{LEV}} = S_{\text{EV}} \cdot \sin(\varphi) \quad , \text{ mit } \varphi = \arccos(0,93) \quad (3.9)$$

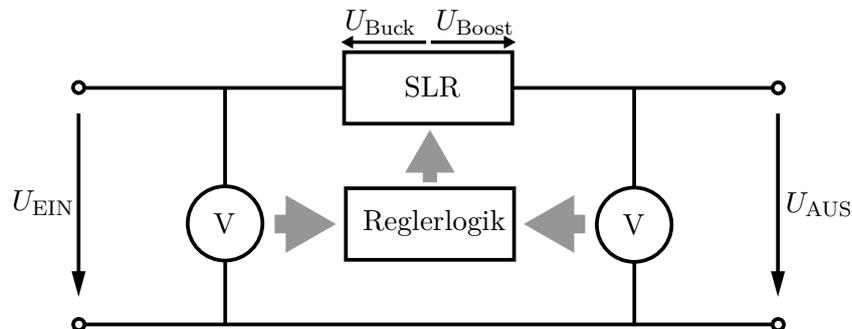
Für den Leistungsbezug ist eine Synchronisation mit dem Netz wie bei den PV-Systemen nicht notwendig.

### 3.1.3 Reglerarten

Die drei in dieser Arbeit betrachteten Reglervarianten SLR, rONT und Zick-Zack Lastregler werden ebenfalls in der Simulink/MATLAB Umgebung erstellt. Bei den SLR wird ein zur Verfügung gestelltes einphasiges Reglermodell ohne Ansteuerlogik in ein dreiphasiges Modell mit Ansteuerlogik umgewandelt. Die anderen beiden Modelle werden mit den Kenntnissen aus der Literaturrecherche erstellt und parametrieren. Im Folgenden werden alle drei Modelle vorgestellt.

#### Spannungslängsregler

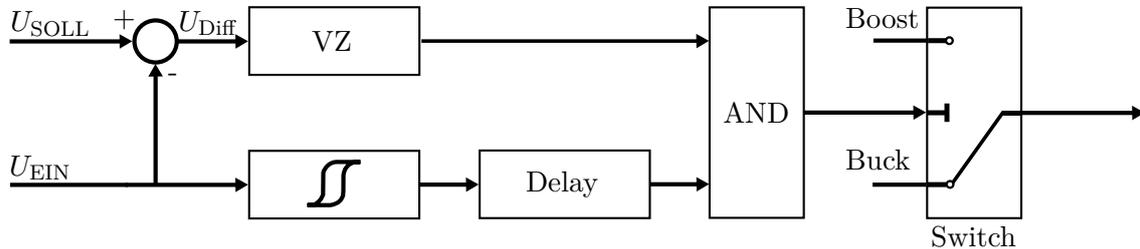
Das vereinfachte Funktionsprinzip des SLR ist bereits in der Abbildung 2.17 in Kapitel 2 vorgestellt worden. Die Abbildung 3.3 befindet sich schematisch eine Modellebene darüber. Hier wird lediglich die spannungshebende oder -senkende Fähigkeit des SLR einphasig betrachtet.



**Abbildung 3.3:** Darstellung der Vereinfachten Reglerlogik des SLR

Der Fokus liegt auf der implementierten Ansteuerlogik in Abbildung 3.4, welche den SLR auf Spannungshebung  $U_{\text{Boost}}$  oder -senkung  $U_{\text{Buck}}$  stellt. Dafür wird die Eingangsspannung  $U_{\text{EIN}}$  des SLRs gemessen und diese dann innerhalb der Ansteuerlogik mit dem Sollwert  $U_{\text{SOLL}}$  verglichen. Die daraus resultierende Differenz  $U_{\text{Diff}}$  wird für den Umschaltvorgang zwischen dem Boostmodus (dt.: Aufwärtsmodus) und Buckmodus (dt.: Abwärtsmodus) benötigt. Bei einer beispielsweise positiven Differenz ist die Spannung  $U_{\text{EIN}}$  kleiner als  $U_{\text{SOLL}}$ , was das Absacken der Spannung entlang der Leitung bedeutet und den Boost-Modus erfordert. Der VZ-Block

prüft darüber hinaus, ob ein Vorzeichenwechsel stattgefunden hat. Diese Information wird für das Umschalten ebenfalls benötigt.



**Abbildung 3.4:** Vereinfachte Darstellung der Ansteuerungslogik des SLRs

In Abbildung 3.4 ist zusätzlich eine Hysterese dargestellt, die den Regler bei schwankenden Werten um den Sollwert stabilisiert. In dieser Arbeit ist die Hysterese mit  $+1,5\%$  und  $-2\%$  des Sollwertes festgelegt. Der Delay Block sorgt mit einer Verzögerung von 5 Sekunden dafür, dass Spannungstransienten keine Schaltvorgänge auslösen können, was ebenfalls für die Stabilisierung des Reglers implementiert worden ist. Ein AND Block sorgt für das Einhalten der zwei Sollzustände des VZ-Blocks und der Hysterese, welche für das Umschalten notwendig ist. Erst wenn die VZ-Bedingung und die Hysteresebedingung erfüllt sind, wird über den Switch zwischen Buck und Boost umgeschaltet. Solange wird der Modus beibehalten, welcher gerade ausgewählt ist. Bleibt der Spannungswert  $U_{\text{EIN}}$  für fünf Sekunden innerhalb der Hysterese, wird der SLR ausgeschaltet. Dieser wird erst wieder eingeschaltet, sobald die Hysterese für fünf Sekunden verlassen worden ist. Der Sollwert ist hier der Effektivwert der Leiter-Erd Spannung und beträgt 230 V. Bei besonders langen Leitungen kann dieser Sollwert allerdings variieren. Um starke Spannungsschwankungen am Ende langer Leitungen auszuregulieren sind unter Berücksichtigung des Spannungsbandes nach VDE AR N 4105 Werte von 230 V  $+3\%$  und  $-4\%$  möglich. Sofern der Umfang einer starken dauerhaften Abweichung nicht hinreichend bekannt ist, benötigt eine Regelung abseits des Sollwertes von 230 V jedoch eine zusätzliche Spannungsmessung am Ende der Leitungen. Dazu kommt eine aufwendigere Ansteuerlogik welche die Leitungslänge und die Phasenspannung am Leitungsende berücksichtigt. In der Realität sind dafür Smart Meter und eine Kommunikationsinfrastruktur notwendig. Bei gewöhnlichen Leitungslängen von 200 m - 600 m aus dem SimBench Datensatz für NS-Netze ist die Mittelpunktregelung mit einem Sollwert von 230 V für in dieser Arbeit betrachteten Szenarien geeignet [1]. Denn in den Simulationen werden sowohl der überhöhte Einspeisefall als auch der überhöhte Verbrauchsfall betrachtet. Neben der Spannungsmessung ist mit dem SLR eine Leitungskompensation auch über die Messung des Phasenstroms möglich. Fließt ein großer Einspeisestrom kann der Sollwert verringert werden und umgekehrt bei einem großen Verbraucherstrom kann der Sollwert vergrößert werden. Diese Variante wird in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet. Bekommt der Regler nun das Schaltsignal der Ansteuerlogik, schaltet dieser zwischen dem sogenannten Buck Modus bei Überspannung oder Boost Modus bei

Unterspannung um. So wird eine positiv gerichtete Spannung  $U_{\text{Boost}}$  oder negativ gerichtete Spannung  $U_{\text{Buck}}$  längs in das Netz eingepreßt. Bei dem dreiphasigen SLR Modell wird dies für jede Phase eigenständig durchgeführt, was die Ausregelung von Unsymmetrien zwischen den Phasen ermöglicht. Der dreiphasige SLR besteht aus drei einphasigen in Abbildung 2.17 dargestellten SLRs. Verbunden werden diese über einen gemeinsamen Neutralleiter. Das Modell in der Simulink/MATLAB Umgebung wird als steuerbare Spannungsquelle realisiert.

### Zick-Zack Lastregler

Für die Modellierung des Zick-Zack Lastregler werden drei T-ESBs genutzt. Aus dem Kapitel 2 kann entnommen werden, dass der Zick-Zack Lastregler mit drei einphasigen Transformatoren mit zwei Wicklungen erstellt wird. Verschaltet werden diese untereinander nach dem Zick-Zack Schema aus Abbildung 2.14. Die zu parametrierenden Elemente des Modells gleichen dem des Verteilnetztransformators und sind in der Abbildung 2.4 des T-ESBs eines allgemeinen Transformators dargestellt. Für eine festgelegte Nennleistung von 0,15 MVA werden die bezogenen p.u. Werte des Transformatormodells aus der Matlab-Bibliothek für einen Beispieltransformator übernommen[37]. Dies ist für die Betrachtung der allgemeinen Funktionsweise ausreichend, insofern keine Optimierungsvariante des Zick-Zack Lastreglers gesucht wird. Lediglich der Standardwert des Spulenwiderstandes wird in dieser Ausführung halbiert, da in der Literatur Kupferlegierungen mit besonders geringen Verlusten eingesetzt werden. Dies vermeidet Energieverluste und ermöglicht eine geringe Nullimpedanz [30]. Das notwendige Übersetzungsverhältnis von 1:1 wird über eine identische Primär- und Sekundärspannung von 230 V erreicht. In Tabelle 3.5 sind Parameter mit Bezug auf die Abbildung 2.4 aufgelistet. Durch seinen einfachen Aufbau ist keine separate Regelungs- oder Steuereinheit notwendig, wodurch auch Messeinheiten entfallen. Des Weiteren stellt er für das symmetrische System keine Belastung dar, da aufgrund der hohen Mitimpedanz des Lastreglers keine nennenswerten Ströme über die Transformatoren fließen können [30]. So kann dieses einfache Modell direkt parallel zum Netz geschaltet werden, welches nur dann aktiv wird, sobald Unsymmetrien auf den Phasen entstehen. In der Simulink/MATLAB Umgebung wird aus simulationstechnischen Gründen ein Transformatormodell mit Sättigungsverhalten verwendet. Die Erstellung des ZZ-Lastreglers ist allgemein aber auch mit drei linearen T-ESBs möglich.

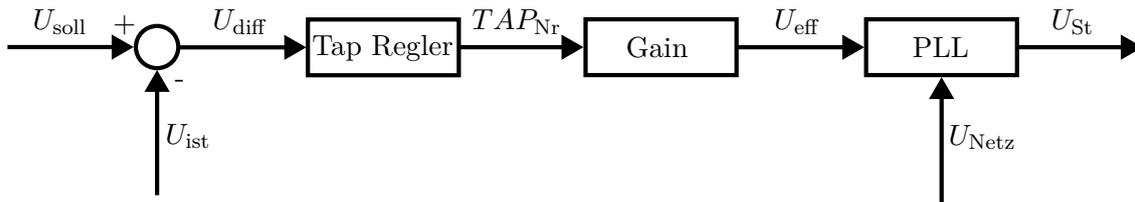
### Regelbarer Ortsnetztransformator

Bei der Modellierung des rONTs wird das zuvor beschriebene Verteilnetztransformator-Modell genutzt und für die Spannungsregelung um ein separates Reglermodul ergänzt. Dieses regelt die Sekundärspannung  $U_2$  mit steuerbaren Spannungsquellen individuell für jede Phase. Die

**Tabelle 3.5:** Elektrische Parameter des Zick-Zack Lastreglers für die Parametrierung des MATLAB-Bausteins

Beschreibung	Wert	Einheit	Wert in p.u. Größe
Kupferwiderstand Wicklung 1 & 2 ( $R_{cu1,2}$ )	0,35	m $\Omega$	0,001
Streuinduktivität Wicklung 1 & 2 ( $L_{\phi1,2}$ )	84,2	$\mu$ H	0,075
Magnetischer Widerstand ( $R_m$ )	176,33	$\Omega$	500

steuerbaren Spannungsquellen simulieren damit das Umschalten von Anzapfungen der Reglerwicklung, wie sie in Abbildung 2.15 für die sekundärseitige Regelung dargestellt sind. Dabei ist der Ausgangspunkt der Reglerwicklung mit einer Anzahl von  $n$  Anzapfung bei  $n/2$  festgesetzt. Dies ermöglicht die Vereinfachung des Modells, insofern der sich verändernde Kupferwiderstand durch die variierende Anzapfungsanzahl zum positiven und negativen Maximum der Anzapfungen mittelt. Des Weiteren haben die geringen Widerstandsänderungen keinen signifikanten Einfluss auf die Funktionsbetrachtung des rONTs. In Abbildung 3.5 ist die Struktur der Reglermoduls abgebildet, welches das Steuersignal für die Spannungsquellen erzeugt.

**Abbildung 3.5:** Strukturdiagramm der fundamentalen Blöcke des rONT-Reglermoduls

Für die Regelung benötigt das Modul einen Spannungssollwert  $U_{soll}$  und -istwert  $U_{ist}$ . Dabei wird der Spannungswert am Leitungsende gemessen, was einer Schlechtwertregelung entspricht. Die Differenz  $U_{diff}$  der beiden Spannungswerte wird dann dem Tap-Regler-Baustein zugeführt. Dieser prüft zunächst, ob die Abweichung positiv oder negativ ist. Eine positive Abweichung bedeutet, dass  $U_{ist}$  zu gering ausfällt und damit der rONT eine Anzapfung hochschalten muss. Analog gilt dies auch für eine negative Abweichung, bei der dann eine Anzapfung runter geschaltet wird. Innerhalb des Tap-Regler Bausteins ist auch eine "Memory" Schleife enthalten, die sich merkt, welche Anzapfung gerade geschaltet ist und hält diese auch bei ausgeregelter Abweichung fest. Die Ausgabe des Tap-Regler-Bausteins ist die Anzapfungsnummer  $TAP_{NR}$ , welche dem Gain-Block zugeführt wird. Dort wird die  $TAP_{NR}$  mit dem Effektivwert für eine Anzapfung multipliziert und anschließend mit einem PLL-Block mit dem Netz synchronisiert, so dass mit dem fertigen Steuersignal eine direkte Spannungseinspeisung ermöglicht wird. Die Parameter des rONTs Reglermoduls sind der Tabelle 3.6 zu entnehmen.

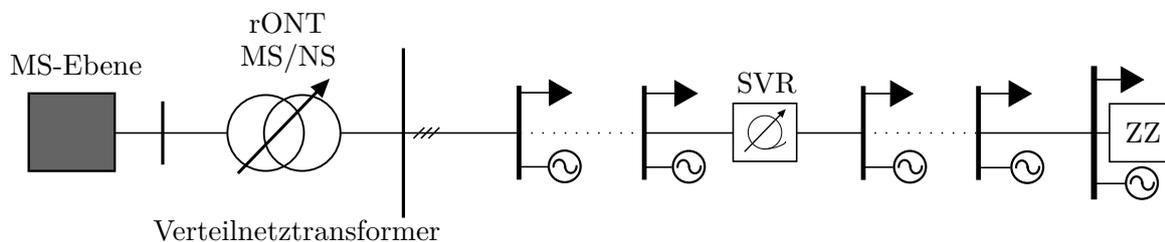
**Tabelle 3.6:** Parameter des rONT Reglermoduls für das Simulink/MATLAB Modell

Beschreibung	Wert	Einheit
Nennspannung	0,4	kV
Anzapfungen	$\pm 5$	St.
Max. Spannungsänderung	$\pm 10$	%
Effektive Spannungsänderung pro Anzapfungen	4,6	V
Zeit pro Anzapfungsänderung	3	s

Da das rONT Modell den Verteilnetztransformator für dessen simulationstechnische Untersuchung ersetzen wird, sind sämtliche Parameter aus Tabelle 3.4 für den Transformator übernommen worden. So bleibt die Vergleichbarkeit bestehen, insofern sich die grundlegenden Netzbetriebsmittel während der simulationstechnischen Untersuchung nicht verändern.

## 3.2 Gesamtmodell

Für die Untersuchung der Reglerarten im unsymmetrischen Last- oder Einspeisefall werden die zuvor erstellten Modelle zu einem Gesamtmodell zusammengeführt, welches in Abbildung 3.6 dargestellt wird.

**Abbildung 3.6:** Gesamtmodell des NS-Strahl mit Platzierungsorte der Reglerarten

Da in dieser Arbeit der Fokus auf der Funktionsweise und dem allgemeinen Verhalten der Regler bei Unsymmetrien liegt, wird die Mittelspannungsebene vereinfacht durch eine dreiphasige Spannungsquelle dargestellt. Die Spannung der MS-Ebene beträgt in diesem Modell 20 kV. Bei simulationstechnischen Untersuchungen des rONTs wird der Verteilnetztransformator durch den rONT ersetzt. In den anderen Untersuchungsfällen ist der rONT nicht im Netz implementiert. Die Platzierung der SVR ist entlang der Leitung und wird im späteren Verlauf dieser Arbeit genauer beschrieben. Der Zick-Zack Lastregler ist wie abgebildet am Ende der Leitung platziert. Wie abgebildet besteht an jedem Bus die Möglichkeit, ein PV-System und ein Elektrofahrzeug zuzuschalten. Da in dieser Arbeit lediglich der Fokus auf unsymmetrischen Lasten und Einspeiser liegt, sind dreiphasige Häuserlasten nicht modelliert.

Dies würde die Ergebnisse zugunsten der PV-Systeme durch die Zusatzbelastung des Netzes verzerren und keinen Mehrwert bezüglich der Unsymmetrien bringen. Die Rahmendaten für die Anzahl der Busse und einzelnen Leitungslängen und weitere netzbeschreibende Parameter werden aus dem SimBench Datensatz entnommen und sind gebündelt in der Tabelle 3.7 zusammengefasst.

**Tabelle 3.7:** Netzbeschreibende Parameter für das Gesamtmodell

<b>Beschreibung</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Netzart	Strahlnetz	/
Netzform	TN-C	/
Nennspannung	0,4	kV
MS/NS-Transformatornennleistung	250	MVA
Leitungstyp	0,4	/
Leitungslänge	584,4	m
Bus-Anzahl	43	St.

## 4 Simulationstechnische Untersuchung der Unsymmetrien

Für die statische Untersuchung der Reglerarten im unsymmetrischen Einspeise- und Lastfall wird das Gesamtmodell aus dem vorherigen Kapitel genutzt. Dazu werden die Regler einzeln in das NS-Modell integriert und in drei Worst Case Szenarien erprobt. Im weiteren Verlauf werden diese Ergebnisse dazu genutzt, die Reglerarten miteinander bezüglich der Begrenzungskriterien aus Kapitel 2 und ihrer Fähigkeit unsymmetrischer Leistung in das NS-Netz zu integrieren und zu vergleichen.

### 4.1 Simulationsdurchführung

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen der Simulationsdurchführung erörtert. Dies beinhaltet die genutzten Solver und weitere Spezifikationen der Simulationsparameter. Des weiteren werden die betrachteten Worst Case Szenarien vorgestellt. Daran anknüpfend wird ein Auswertungsverfahren für die Simulationsergebnisse präsentiert.

#### 4.1.1 Simulationsumgebung

Die Simulation der Reglerarten im NS-Modell wird in der Simulink/MATLAB Umgebung durchgeführt. Dabei löst die Software Anfangswertprobleme gewöhnlicher Differentialgleichungen, welche von dem Grundmodell erzeugt werden. Für das Lösen dieser Differentialgleichungen stehen in MATLAB mehrere Solver zur Verfügung. In dieser Arbeit wird der Solver „ode23tb(stiff/TR-BDF2)“ aufgrund seiner schnellen und robusten Eigenschaften gewählt. Dabei löst dieser die Differentialgleichungen mit der Trapezregel und der „backward differentiation“ Formel. Darüber hinaus wird eine Fehlertoleranz von  $1 \cdot 10^{-4}$  zugelassen. Für die Simulation von Modellen, welche mit Simscape Power Systems in Simulink erzeugt werden, ist der sogenannte „Power Gui“ Baustein zwingend notwendig. Dieser erzeugt die notwendige mathematische Umgebung, um die Ergebnisse der Simulation zu analysieren. Dabei gibt er für jede Simulation die Wahl von drei Simulationstypen „continuous“, „discrete“ und „phasor“,

welche sich im Rechenaufwand und somit auch im Detailgrad unterscheiden. Mit dem Simulationstyp „continuous“ ist eine variable Schrittweite möglich, welcher bei schnellen Ereignissen die Schrittweite für eine genau Analyse verkleinert. Die Geschwindigkeit wird dadurch deutlich verringert, was zusätzlich den Speicherbedarf der Simulationsdaten erhöht. Mit dem Simulationstyp „discrete“ sind die Schrittweiten der Simulation auf einen fixen Wert festgelegt. Das verringert die aufgenommenen Daten und beschleunigt die Simulation, was besonders bei größeren Modellen mit vielen Abhängigkeiten von Vorteil ist. Dieser Simulationstyp wird in dieser Arbeit mit einer Schrittweite von  $0,75 \cdot 10^{-4}$  für die Untersuchung des Zick-Zack Lastregler genutzt, da dieser aufgrund seines Sättigungsverhaltens nur für die discrete Simulation verwendbar ist. Der letzte Simulationstyp ist der „phasor“. Er bedient sich vereinfachter Formeln und ermittelt nur die Spitzenwerte der Wechselströme und -spannungen einer festgelegten Frequenz, welche in dieser Arbeit immer 50 Hz beträgt. Dies ermöglicht sehr schnelle Simulationen mit geringem Speicherbedarf. Da in dieser Arbeit keine harmonischen Schwingungen betrachtet werden, ist der „phasor“ Simulationstyp als Standard festgesetzt. Vor dem Start der Simulation werden die Lasten und Erzeuger des Netzes definiert. Dabei wird zum einen die Höhe der unsymmetrischen Leistung festgelegt, zum anderen aber auch deren Verteilung. Zur Auswahl steht die homogene Verteilung und die Platzierung der unsymmetrischen Leistung am Leitungsende. Die homogene Verteilung bezieht sich dabei nicht auf die Leitungslänge, also die Verteilung in gleichmäßigen Abschnitten, sondern auf die Anzahl der vorhandenen Busse. Anhand der gemessenen Phasenspannungen und Ströme wird im Anschluss die Leistung der einzelnen Regler bewertet.

#### 4.1.2 Simulationsszenarien

Bei der simulationstechnischen Untersuchung der Reglerarten werden drei Worst Case Szenarien betrachtet. Diese haben gegenüber aufwändiger Zeitreihenbetrachtung den Vorteil, dass sie auf der Basis weniger Informationen aussagekräftige Ergebnisse erzielen. Sämtliche Szenarien haben darüber hinaus zwei Varianten, um die Leistungen entlang einer Phase zu verteilen. Bei Variante 1 wird mit einer homogenen Leistungsverteilung entlang der Phase simuliert. Mit der 2. Variante wird jedes Szenario mit einer punktuellen Last am Leitungsende simuliert, welche der Leistung des homogenen Falles entspricht und damit eine noch höhere Belastung für das Netz darstellt. Bevor die Reglerarten einzeln erprobt werden, durchläuft das Netzmodell die Szenarien 1 bis 3 bei homogener und punktueller Leistungsverteilung ohne jegliche Eingriffe. Dies dient als Vergleichspunkt für die Performance der Reglerarten und wird darüber hinaus für die optimale Platzierung des SLR genutzt.

### **Szenario 1**

Das Szenario 1 betrachtet die unsymmetrische einphasige Einspeisung von PV-Systemen ohne zusätzliche Belastung von anderen Verbrauchern. Dieser Extremfall entspricht einer Leistungsverteilung von 100 % Einspeisung und 0 % Last. Dabei werden sämtliche PV-Systeme an die Phase A des Gesamtmodells angeschlossen. Es wird eine Simulationsreihe mit 15 Simulationen durchgeführt, bei der mit jedem neuen Durchlauf die Leistung pro Einspeiser um 250 W erhöht wird. Gemessen werden die komplexen Spannungen der Phasen sowie deren Ströme, einschließlich des Neutralleiterstroms an jedem Bus des Gesamtmodells. Dies ermöglicht die abschnittsscharfe Analyse der Begrenzungskriterien aus Kapitel 2.

### **Szenario 2**

Das Szenario 2 betrachtet die unsymmetrische einphasige Belastung durch Elektrofahrzeuge ohne eine weitere Einspeisung. Dies entspricht einer Leistungsverteilung von 0 % Einspeisung und 100 % Last, welche einheitlich an die Phase A des NS-Netzes angeschlossen ist. Wie in Szenario 1 wird auch hier eine Simulationsreihe mit 15 Simulationen durchgeführt, bei der die Leistung jedes einzelnen angeschlossenen Elektrofahrzeugs um 250 W erhöht wird. Die Messdaten werden analog zu Szenario 1 aufgenommen.

### **Szenario 3**

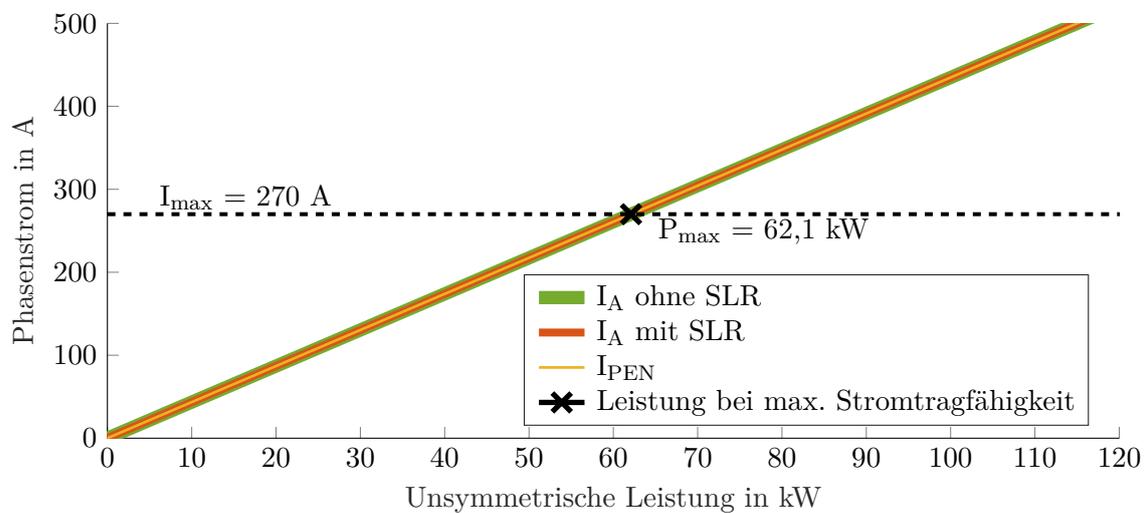
Das Szenario 3 ist eine Kombination der ersten beiden Szenarien. Hier werden die Lasten in Form von Elektrofahrzeugen an die Phase A angeschlossen und die PV-Systeme an die Phase C. Dieser Extremfall entspricht einer Leistungsverteilung von 100 % Einspeisung und 100 % Last auf zwei unterschiedliche Phasen. Auch hier werden die Messdaten analog zu Szenario 1 und 2 ermittelt.

#### **4.1.3 Auswertungsverfahren**

Für die Untersuchung der Reglerarten hinsichtlich ihrer Fähigkeit das Integrationspotential unsymmetrischer Leistungen im Netz zu erhöhen, ist ein vierstufiges Auswertungsverfahren entwickelt worden. Dieses beinhaltet alle vier Begrenzungskriterien aus dem Tabelle 2.3 und wird im Folgenden an dem Beispiel des SLRs (Szenario 1) hergeleitet. Dabei liegt die Leistungsverteilung punktuell am Ende.

### Schritt 1

Der erste Schritt des Auswertungsverfahrens untersucht die maximal übertragbare einphasige Leistung des Gesamtmodells, welche für jedes einzelne Szenarien mit jeder Reglerart individuell ermittelt wird. Als begrenzende Kriterien kommen Kriterium 1 und 2 aus der Tabelle 2.3 in Frage. Hierbei handelt es sich bei Kriterium 1 um die Leistungsbegrenzung des Verteilnetztransformators, welche bei einer 20 % zulässigen Dauerüberlastung 100 kW beträgt. Das zweite Kriterium ist die maximale Stromtragfähigkeit des verlegten NAYY 4x150 mm Kabels, welche 270 A beträgt. In Abbildung 4.1 wird die Ermittlung der maximalen einphasigen Leistung des Gesamtmodells dargestellt. Auf der Y-Achse ist der gemessene effektive Phasenstrom



**Abbildung 4.1:** Ermittlung der maximal übertragbaren, unsymmetrischen Leistung

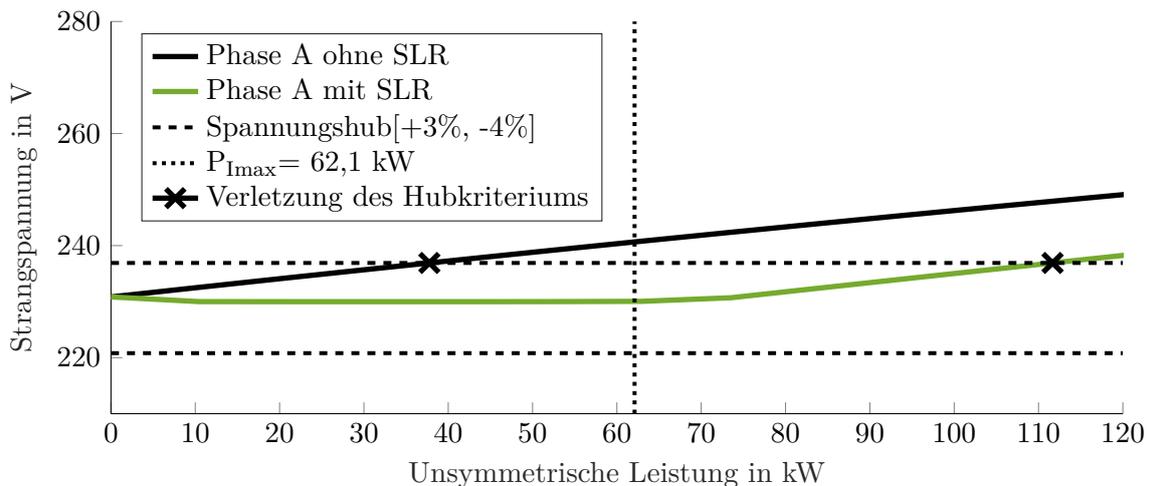
in A über der unsymmetrischen einphasigen Leistung in kW auf der X-Achse am Leitungsende aufgetragen. Abgebildet sind hier drei Ströme, die am Leitungsanfang aufgenommen worden sind, da hier der höchste Strom auftritt. Die grüne Linie entspricht dem gemessenen Phasenstrom der Phase A ohne SLR, die orangene Linie dem Phasenstrom der Phase A mit SLR und die gelbe Linie stellt den Phasenstrom des Neutralleiters dar.

Aus der Abbildung 4.1 wird ersichtlich, dass diese drei Ströme erwartungsgemäß identisch ausfallen und daher genau übereinander liegen. Die gestrichelte schwarze Gerade stellt die maximale Stromtragfähigkeit des NAYY Kabels mit 270 A dar. Der Schnittpunkt dieser Gerade mit den Stromverläufen der Phasen, ermöglicht die Ermittlung der maximalen einphasigen Leistung, welcher in diesem Szenario 62,1 kW entspricht. Die Leistungsgrenze des Transformators mit 100 kW wird damit nicht erreicht, weshalb diese Begrenzungslinie nicht in der Abbildung 4.1 enthalten ist und auch im weiteren Verlauf nicht eingezeichnet wird. Jedoch ist hier zu beachten, dass im Gesamtmodell nur ein einzelner langer Strahl eines typischen NS-Netzes betrachtet wird. In der Realität besteht ein NS-Netz aus mehreren Strahlen, bei

denen dann die maximale Leistung des Verteilnetztransformers betrachtet werden muss. Die nun ermittelte maximale Leistung dient als Benchmark für die weiteren Schritte des Auswertungsverfahrens.

## Schritt 2

Im zweiten Schritt wird das 3. Kriterium aus Tabelle 2.3 betrachtet, welches für den maximalen Spannungshub bzw. die maximale Spannungsabsenkung nach DIN 50160 steht. Dazu sind in Abbildung 4.2 die Ergebnisse dargestellt. Auf der Y-Achse ist die Strangspannung der belasteten Phase A in V aufgetragen. Diese wird am Leitungsende gemessen, da dort die Spannung für Abweichungen am anfälligsten ist. Die X-Achse steht für die unsymmetrische einphasige Leistung in kW. Mit der schwarzen durchgezogenen Gerade wird die Strangspannung der Phase A ohne SLR und mit der grünen Gerade die Strangspannung der Phase A mit SLR dargestellt. Die zwei schwarzen gestrichelten, horizontalen Linien zeigen den Spannungshub, welcher als 3. Begrenzungskriterium in Tabelle 2.3 mit +3% und -4% nach der VDE AR-N 4105 festgelegt worden ist.



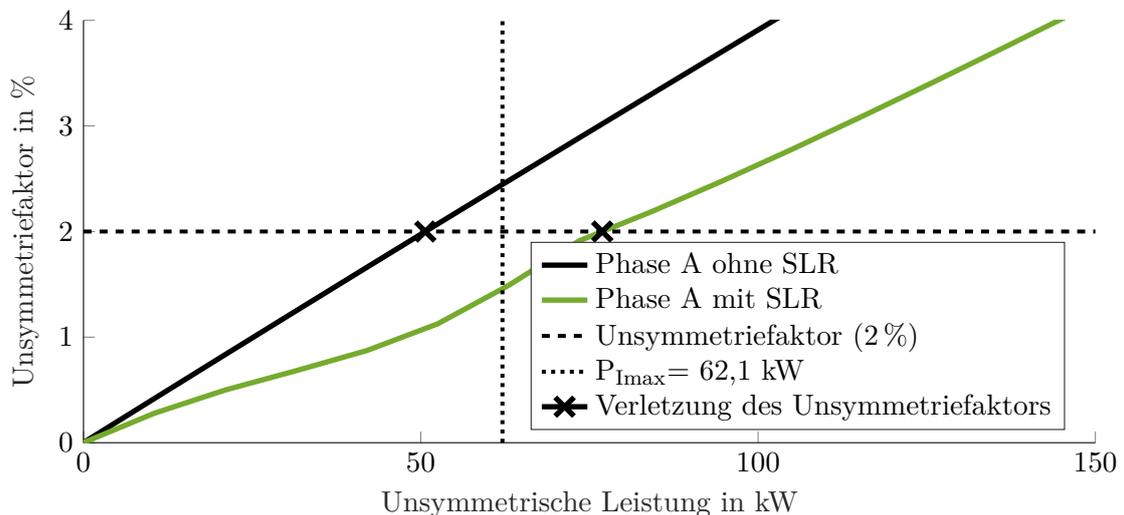
**Abbildung 4.2:** Betrachtung der Strangspannung am Leitungsende bei steigender unsymmetrischer Leistung auf Phase A mit und ohne SLR

Diese Grenze limitiert die unsymmetrische Leistung im NS-Netz. Auf der X-Achse ist mit der gestrichelten, vertikalen schwarzen Linie die in Schritt 1 ermittelte Leistungsgrenze eingezeichnet. Sobald die Strangspannung vor dieser vertikalen Grenzlinie das Spannungshubkriterium verletzt, wird übertragbares Leistungspotential nicht genutzt. Dieser Fall ist beim Verlauf der Strangspannung ohne SLR erkennbar. Hier wird das Hubkriterium bei einer Leistung von 37,77 kW verletzt, was einem ungenutzten Potential von 24,33 kW (39,2%) entspricht. Mit der grünen Gerade wird deutlich, dass der SLR eine unsymmetrische Leistung hinter

der Grenzlinie ermöglicht und damit das volle Netzpotential in Bezug auf das Hubkriterium ausschöpft.

### Schritt 3

Im dritten Schritt wird das 4. Begrenzungskriterium aus Tabelle 2.3 betrachtet, welches für den Unsymmetriefaktor aus der DIN 50160 steht. Dieses ermittelt sich aus der Gleichung 2.19 und wird auf maximal 2 % festgelegt. Die Abbildung 4.3 ähnelt dem Aufbau der Abbildung 4.2. Hier ist auf die X-Achse ebenfalls die unsymmetrische Leistung in kW aufgetragen. Die Y-Achse entspricht hier dem symmetrischen Kriterium in %, welches anhand der Spannungsmessungen am Ende der Leitung gebildet wird.

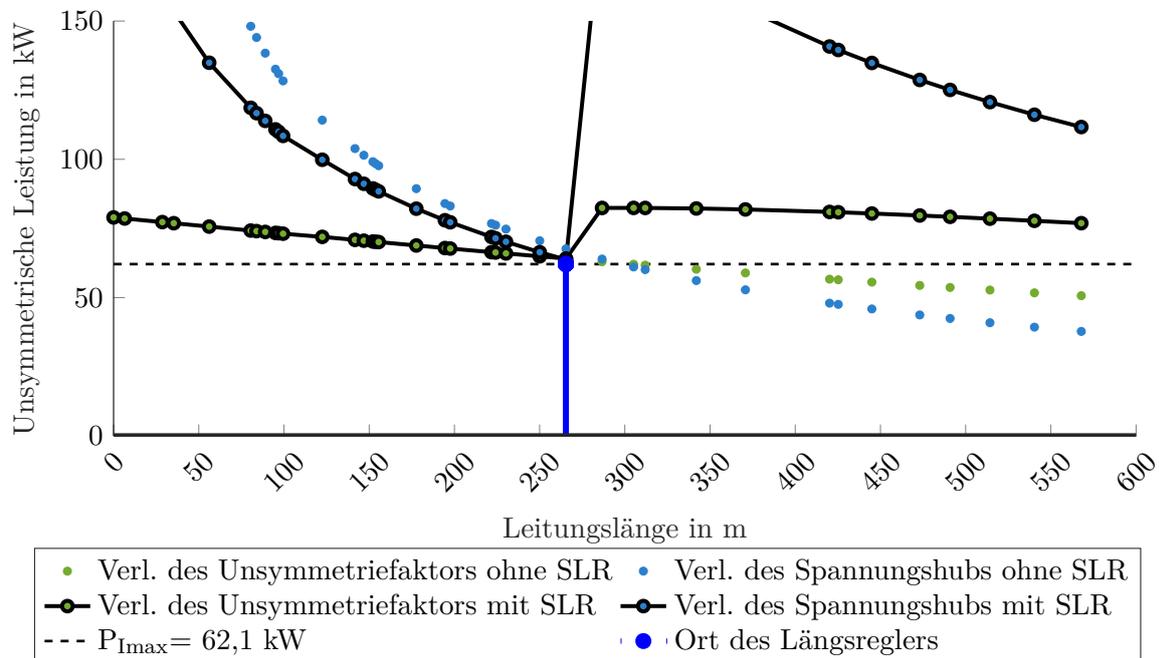


**Abbildung 4.3:** Betrachtung des symmetrischen Kriteriums am Leitungsende bei steigender unsymmetrischer Leistung auf Phase A mit und ohne SLR

Die schwarze durchgezogene Gerade steht für den Unsymmetriefaktor am Leitungsende ohne SLR, wohingegen die grüne Gerade den Unsymmetriefaktor mit SLR darstellt. Wie in Abbildung 4.2 ist die gestrichelte, vertikale Linie die maximal übertragbare Leistung aus Schritt 1. Die horizontale, gestrichelte schwarze Linie markiert die 2% Grenze des symmetrischen Kriteriums nach DIN 50160. Schneidet sich diese 2% Grenze mit einer der beiden durchgezogenen Geraden bevor die maximal übertragbare Leistung erreicht worden ist, bleibt in Bezug auf den Unsymmetriefaktor Leistungspotenzial ungenutzt. In diesem Fall geht aus der Abbildung 4.2 hervor, dass ohne einen SLR Leistungspotenzial in Höhe von 11,4 kW (18,41 %) nicht genutzt wird. Wie der Schnittpunkt mit der 2% Grenze bei 76,9 kW zeigt, kann der SLR dieses Leistungspotenzial voll ausschöpfen.

### Schritt 4

Der vierte und letzte Schritt kombiniert die zuvor gesammelten Erkenntnisse in einer Abbildung zu einer Grenzkurve, die abhängig von der Leitungslänge ist. Für jeden Bus im Gesamtmodell werden Schritt 2 und 3 mit der maximalen Leistung aus Schritt 1 durchgeführt und entsprechend der Entfernung zum Verteilnetztransformator aufgetragen. In Abbildung 4.4 ist das Resultat des Analyseverfahrens für die Betrachtung des SLR zu sehen. Auf der Y-Achse ist die unsymmetrische Leistung aufgetragen, bei der entweder das Spannungshubkriterium (hellblaue Punkte) oder der Unsymmetriefaktor (grüne Punkte) verletzt werden. Dabei sind die schwarz umrandeten Punkte für die Reglerarten, in diesem Fall der SLR, vorgesehen und die ohne Umrandung für das Netzverhalten ohne die Verwendung von Reglern. Die horizontale



**Abbildung 4.4:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 1 mit SLR

gestrichelte schwarze Linie bildet die maximal übertragbare Leistung aus Schritt 1 ab. Sofern einer der blauen oder grünen Punkte unterhalb dieser Linie liegt besteht Potential mittels einer Reglerart unsymmetrische Leistung im Netz zu integrieren. Der dunkelblaue Punkt markiert dabei die Platzierung des SLR, welcher mit der Grenzkurve ohne Reglereinsatz bestimmt wird. Hierfür wird der Schnittpunkt der Grenzkurve mit der schwarzen Grenzlinie ermittelt. Dies markiert den Punkt, ab dem Leistungs-Integrationspotential vorhanden ist. So wird der SLR genau einen Bus vor diesem Schnittpunkt platziert, um das volle Leistungspotential zu nutzen. In diesem Fall liegt dieser Ort bei 265,4 m hinter dem Verteilnetztransformator. In der Abbildung 4.4 wird deutlich, dass ab diesen Punkt die Leistung, bei welcher das Hubkriterium

oder der Unsymmetriefaktor verletzt wird, mittels des SLRs deutlich über die Grenzlinie gehoben wird. Somit sichert der SLR im Worst Case Einspeisefall bei punktueller Einspeisung am Leitungsende die vollständige Ausnutzung der möglichen maximalen unsymmetrischen Einspeiseleistung. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass der SLR erst hinter seinem Einsatzort effektiv ist. Das sieht man deutlich daran, dass der Unsymmetriefaktor mit und ohne SLR vor dessen Platzierung identisch ist. Lediglich der Spannungshub wird mit SLR früher verletzt, weil dieser bei umgekehrten Lastfluss eine Spannungserhöhung auch vor seinem Einsatzort erzeugt. Hier stellt er eine zusätzliche Belastung für das Netz dar. Da diese Verletzungen jedoch oberhalb der maximal möglichen Leistung sind, kann dieses Verhalten vernachlässigt werden. Bei der Untersuchung der homogenen Einspeiseverteilung für das Worst Case Szenario konnte kein Potential festgestellt werden, da für die betrachtete Leitungslänge sowohl der Unsymmetriefaktor als auch das Hubkriterium erst oberhalb der Grenzlinie verletzt worden sind. Die weiteren Betrachtungen der Reglerarten für das Szenario 1 fokussieren sich daher auf den Worst Case Fall mit punktueller Einspeisung am Leitungsende.

## 4.2 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der statischen Simulation aller drei Worst Case Szenarien präsentiert und ausgewertet. Für die Analyse der Phasenspannungen und Ströme werden die aufgestellten Begrenzungskriterien aus Kapitel 2 genutzt. Darüber hinaus wird ein dafür entwickeltes Auswertungsschema an einem Beispiel vorgestellt und für sämtliche Worst Case Szenarien angewandt. Alle Ergebnisse der Reglerarten werden einzeln mit den Simulationsergebnissen des Gesamtmodelles ohne Maßnahmen verglichen, um deren Potential sauber voneinander abzugrenzen.

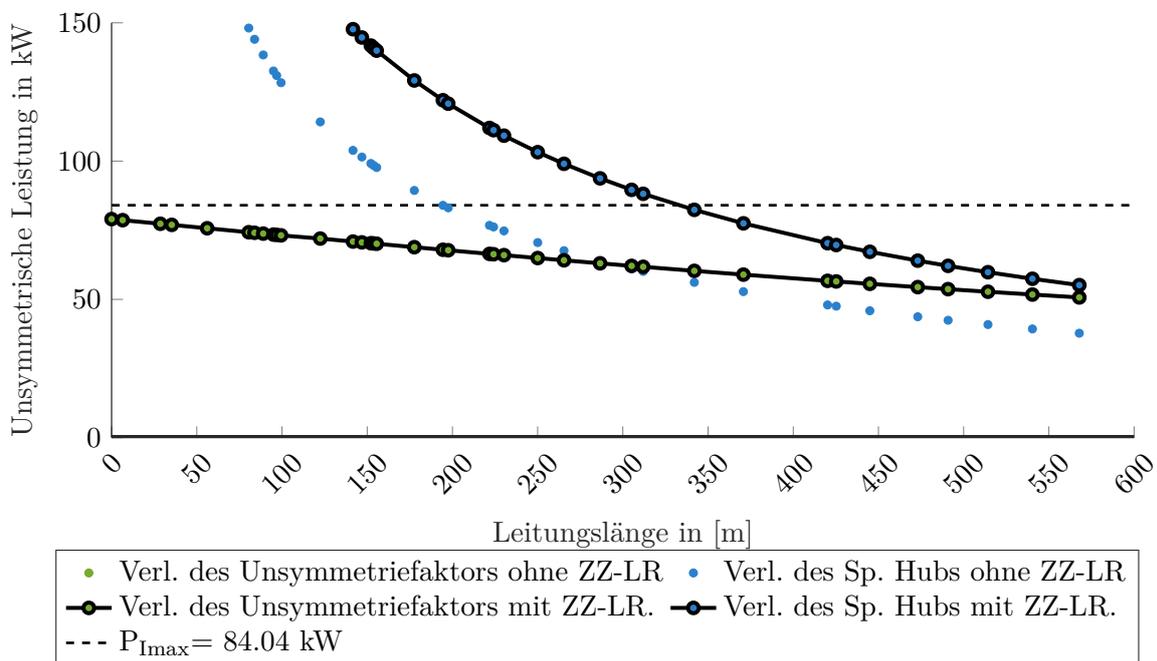
### 4.2.1 Szenario 1 - unsymmetrische Einspeisung

Das erste Worst Case Szenario befasst sich mit der unsymmetrischen Einspeisung von PV-System ohne weitere Abnehmer im NS-Netz. Zuvor ist das Auswertungsverfahren mittels der Ergebnisse des SLRs hergelitten worden, weshalb diese hier nicht wiederholt werden.

#### **ZZ-Lastregler**

In Abbildung 4.5 ist das Resultat des Analyseverfahrens mit dem ZZ-Lastregler zu sehen. Der Aufbau der Abbildung entspricht dabei dem zuvor betrachteten Fall mit SLR. Hier liegt der Unterschied jedoch bei der Platzierung des Reglers, da der ZZ-Lastregler am Leitungsende zu finden ist. Aus diesem Grund gibt es keine zusätzliche Markierung für den Ort des Reglers

innerhalb der Abbildung. Die Grenzlinie der maximalen Leistungsübertragung liegt mit dem ZZ-Lastregler mit 84,04 kW insgesamt 21,94 kW höher als ohne ZZ-Lastregler. Dieser Effekt lässt sich auf die strombalancierende Eigenschaft des ZZ-Lastreglers zurückführen, welcher den unsymmetrischen Phasenstrom auf die übrigen Phasen verteilt und dadurch ebenfalls den Neutralleiter entlastet. Obwohl der Regler keine direkte Spannungsregelung durchführen kann, wird das Spannungshubkriterium durch die Entlastung des Neutralleiters und der Verteilung der Ströme deutlich später verletzt als bei der Betrachtung ohne Regler. Jedoch verdeutlichen die blauen Punkte mit schwarzer Umrandung, dass weiterhin Potential im Netz existiert, da diese trotz ZZ-Lastregler unterhalb der Grenzlinie liegen. Bezogen auf den Spannungshub er-

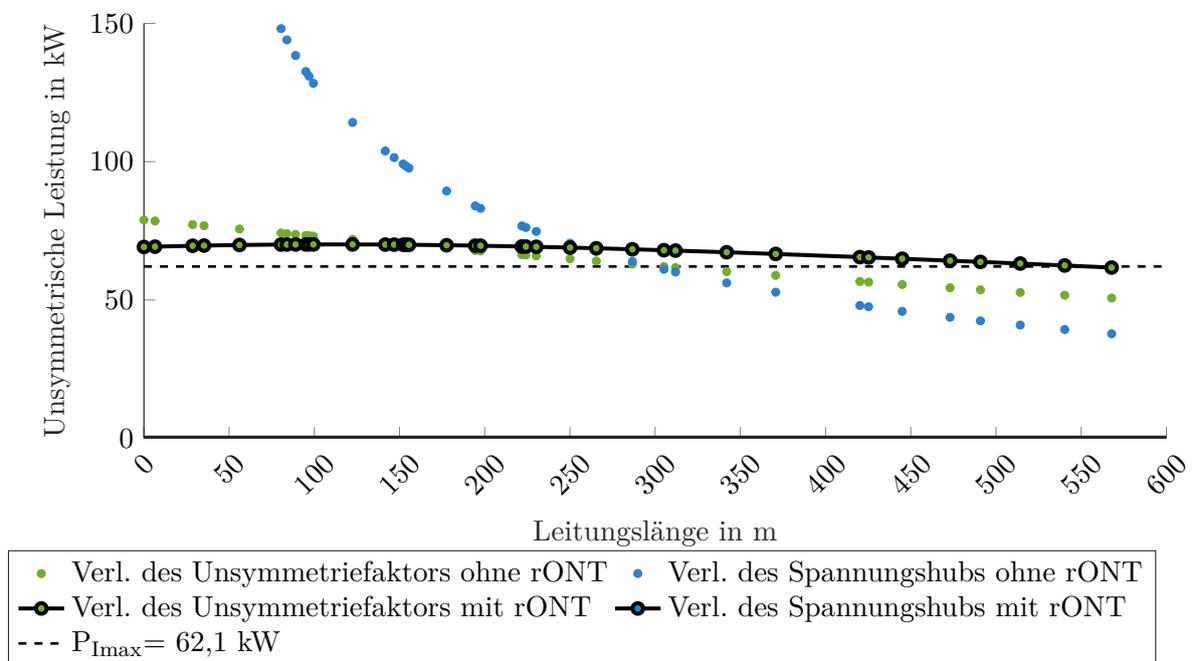


**Abbildung 4.5:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 1 mit ZZ-Lastregler

möglicht der Regler jedoch eine zusätzliche Leistungsintegration von 17,39 kW (46,05 %). Bei der Betrachtung des symmetrischen Kriteriums ist keine Verbesserung zu erkennen. Beide Geraden liegen direkt übereinander. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Unsymmetriefaktor auf die Phasenspannung ausgerichtet ist. Der ZZ-Lastregler balanciert jedoch nicht die Spannungen, sondern die Ströme, sodass der Spannungshub der belasteten Phasen auf die anderen Phasen aufgeteilt wird und somit der Unsymmetriefaktor nicht verbessert werden kann. Bei der Steigerung des Integrationspotentials limitiert das schwächste Kriterium das gesamte Integrationspotential, was in diesem Fall der Unsymmetriefaktor mit 50,7 kW ist. Da bei der Betrachtung ohne Regler die maximale unsymmetrische Leistungsintegration bei 37,75 kW liegt, ist das dennoch eine Steigerung von 12,94 kW (34,26 %).

## rONT

In Abbildung 4.6 wird das Ergebnis des Analyseverfahrens mit dem rONT dargestellt. Hier ist der Regler direkt am Anfang der Leitung platziert, weshalb auch hier auf eine Markierung innerhalb der Abbildung verzichtet wird. Da der rONT ebenfalls eine direkte Spannungsregelung wie der SLR betreibt, liegt auch in diesem Fall die maximal zulässige Leistungsübertragung bei 62,1 kW bei einphasiger unsymmetrischer Einspeisung am Leitungsende. Die Abwesenheit der blauen Punkte mit schwarzer Umrandung bedeutet, dass zu keinem Zeitpunkt der Spannungshub mit dem rONT verletzt wird. Damit ist er in der Lage, das volle Leistungspotential auszunutzen und das Integrationspotential um 24,34 kW (64,45 %) bezüglich des Spannungshubs zu steigern. Bei dem symmetrischen Kriterium ist ebenfalls eine Verbesserung durch den rONT erkennbar. Am Anfang der Leitung wird der Unsymmetriefaktor jedoch verschlechtert. Dies liegt an der Schlechtpunktregelung des rONTs, welche sich auf das Leitungsende fokussiert. So wird die Spannung auf der belasteten Phase deutlich gesenkt, was am Anfang der Leitung zu einer Verschlechterung führt. Jedoch dreht sich dieses Verhalten nach ca. 1/3 der Leitungslänge. Trotz der Regelung ist der rONT nicht in der Lage, das Potential bezüglich des symmetrischen Kriteriums voll auszuschöpfen. Hier liegt die übertragbare unsymmetrische Leistung bei 61,7 kW und lässt damit ein Leistungspotential von 0,4 kW ungenutzt. Damit ist bei der Betrachtung des rONTs der Unsymmetriefaktor das schwächste Kriterium. Es wird insgesamt eine Leistungssteigerung von 23,94 kW (63,28 %) erreicht.



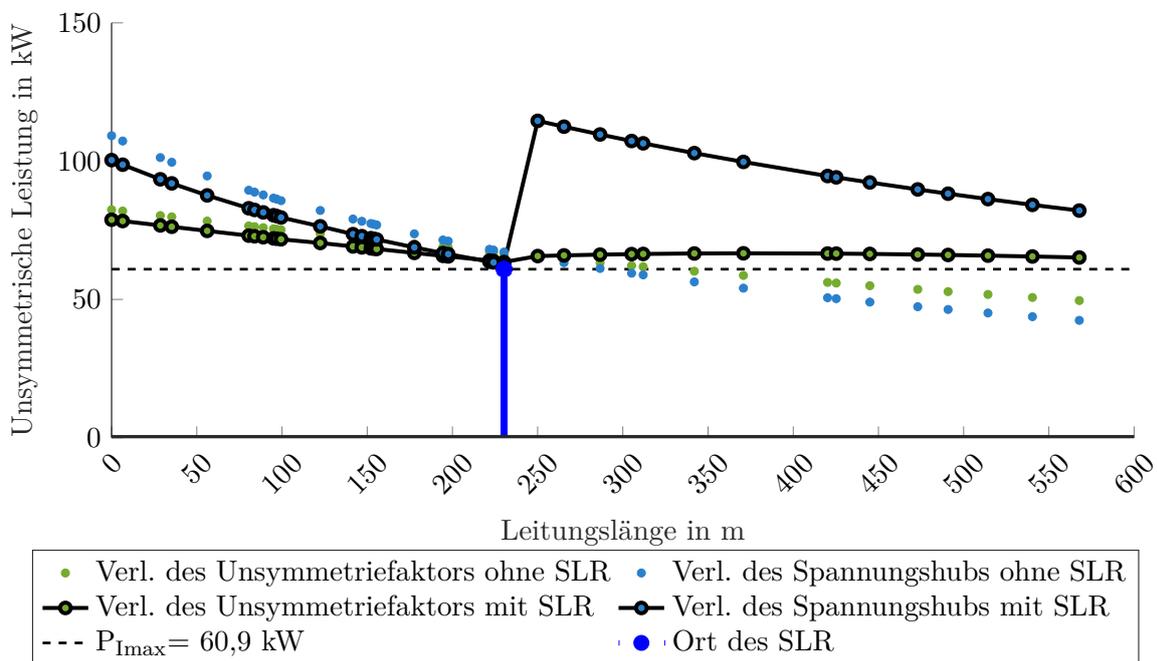
**Abbildung 4.6:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 1 mit rONT

### 4.2.2 Szenario 2 - unsymmetrische Belastung

Das zweite Szenario befasst sich mit der unsymmetrischen einphasigen Last durch Elektrofahrzeug ohne jegliche Einspeiser im NS-Netz. Dafür wird auch hier das zuvor vorgestellte vierstufige Auswertungsverfahren angewandt. Bei den im Folgenden vorgestellten Abbildungen handelt es sich um die punktuelle Lastverteilung am Leistungsende. Auch hier konnte bei der homogenen Lastverteilung entlang der Leitung kein Potential für die betrachtete Leitungslänge festgestellt werden, da weder der Unsymmetriefaktor noch das Spannungshubkriterium unterhalb der Leistungsgrenze gefallen ist.

#### SLR

In Abbildung 4.7 wird das Grundmodell mit SLR zusammen mit den Ergebnissen des Gesamtmodells ohne Reglereingriff betrachtet. Dabei liegt die maximale Leistungsbegrenzung bei 60,9 kW, welches durch die schwarze gestrichelte Linie veranschaulicht ist. Mit Blick auf das Szenario 1 sind das 1,2 kW weniger. Das liegt daran, dass die Leitungen als Last dem Spannungshub in Szenario 1 entgegengewirkten. In Szenario 2 ist dies allerdings eine zusätzliche Last, die das Netz vorermüdet und damit eine geringe Leistung ermöglicht.



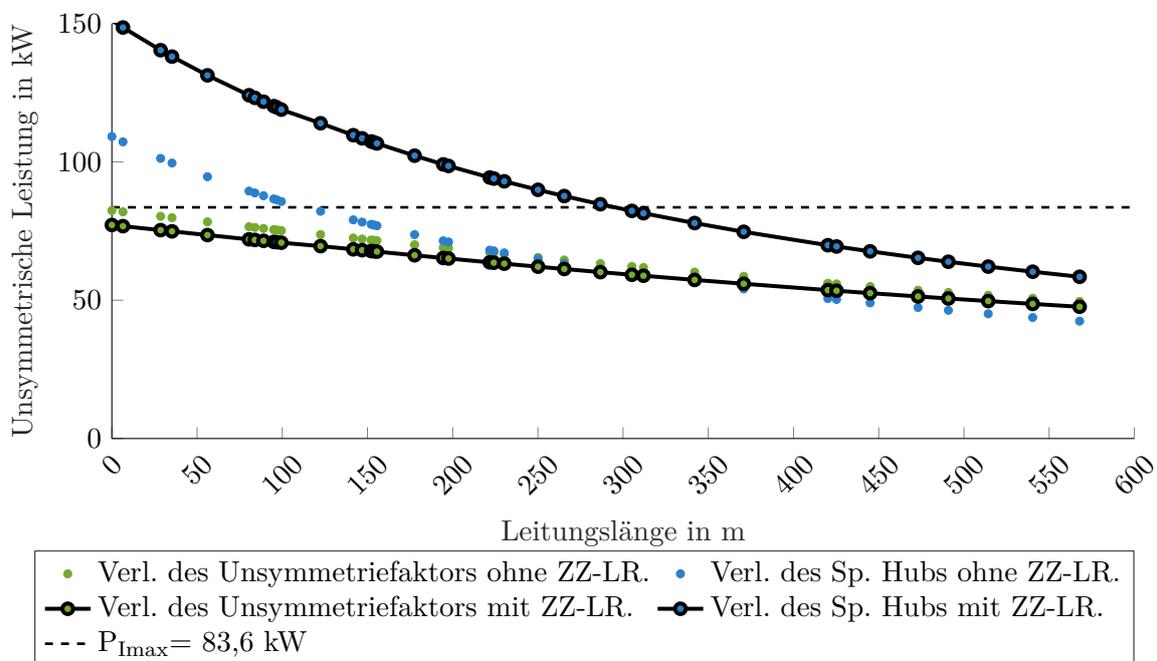
**Abbildung 4.7:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 2 mit SLR

Die dunkelblaue Markierung steht auch in diesem Fall für den Ort des SLR, welcher durch die Ergebnisse des reglerlosen Gesamtmodells ermittelt wird und bei 230,3 m nach dem Vertei-

lungstransformator liegt. Es ist erkennbar, dass der SLR ab seinem Einsatzort eine deutliche Wirkung auf das Netz hat. Die Abweichungen des Spannungshubes und des symmetrischen Kriteriums vor dem SLR, welche durch die grünen und blauen schwarz umrandeten Markierungen gekennzeichnet sind, lassen sich auf die Grundlast des SLR zurückführen. Diese entstehen durch die Spule, welche längs der Leitung eingesetzt ist und dadurch das Netz zusätzlich belasten. Dies sorgt jedoch nicht dafür, dass das Spannungshubkriterium oder der Unsymmetriefaktor gefährdet werden. Durch den SLR wird das Spannungshubkriterium am anfälligsten Punkt, das Leitungsende, erst hinter der maximal möglichen Übertragungsleistung verletzt. Dies bedeutet eine Steigerung von 18,5 kW (43,6 %) in Bezug auf das Ergebnis des Spannungshubes mit dem Grundmodell ohne Reglereingriff. Bei dem symmetrischen Kriterium wird eine Steigerung von 15,57 kW (31,4 %) in Bezug auf das Grundmodell ohne Reglereingriff erzielt. Somit ermöglicht der SLR auch im 2. Szenario die Ausnutzung des vollen Leistungspotentials.

### ZZ-Lastregler

Die Abbildung 4.8 ist das Ergebnis des Auswertungsverfahrens des ZZ-Lastreglers und des Grundmodells ohne Regelung. Auch im 2. Szenario ermöglicht der Regler eine hohe potenzielle maximale Leistungsübertragung von 83,6 kW, indem er den unsymmetrischen Laststrom auf die übrigen Phasen aufteilt.

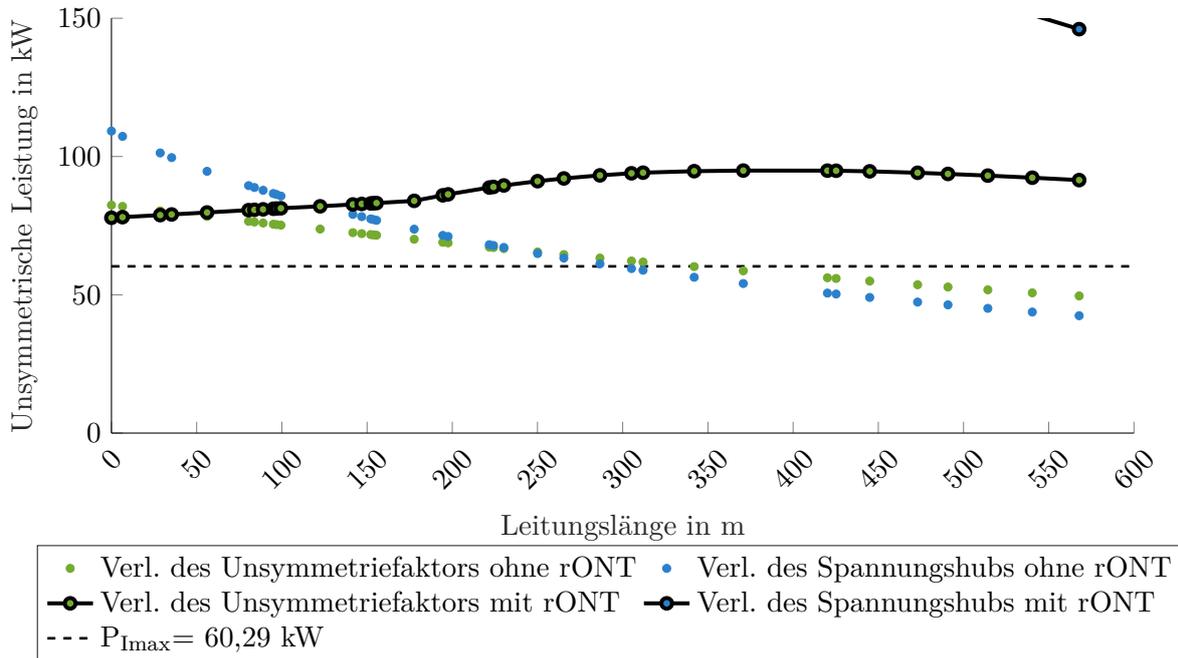


**Abbildung 4.8:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 2 mit ZZ-Lastregler

Damit erhöht er die Grenzlinie in Bezug auf die Ergebnisse des Grundmodells ohne Regler um 19,63 kW (30,7 %), welche nun potenziell erreichbar sind. Der Spannungshub wird durch den Einsatz des ZZ-Lastreglers an jeder Stelle des Netzes deutlich später verletzt, sodass am Leitungsende eine unsymmetrische Leistungssteigerung von 16,04 kW (37,8 %) ermöglicht wird. Wie in Szenario 1 hat auch hier der ZZ-Lastregler keinen positiven Einfluss auf den Unsymmetriefaktor. Die Verteilung des Laststromes auf die anderen Phasen bewirkt auch die Verteilung der Unsymmetrien auf die anderen Phasen, wodurch das unsymmetrische Verhalten unverändert bleibt. Somit bildet der Unsymmetriefaktor auch hier den limitierenden Faktor, was dennoch eine Leistungssteigerung von 5,2 kW (12,25 %) bedeutet.

### rONT

Die Abbildung 4.9 betrachtet die Ergebnisse des rONTs im Vergleich zum Grundmodell ohne Regler. Die maximal übertragbare unsymmetrische Leistung beträgt hier 60,29 kW. Das Spannungshubkriterium wird hier durch den rONT deutlich erhöht, sodass im betrachteten Leistungsbereich nur eine Verletzung am Leitungsende beobachtet werden kann. Damit wird das gesamte vorhandene Potential des Netzes genutzt.



**Abbildung 4.9:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 2 mit rONT

Im Vergleich zu der Spannungshubverletzung des Grundmodells ohne Regler ist dies eine Steigerung von 17,85 kW (42,1 %). Auch der Unsymmetriefaktor wird deutlich verbessert.

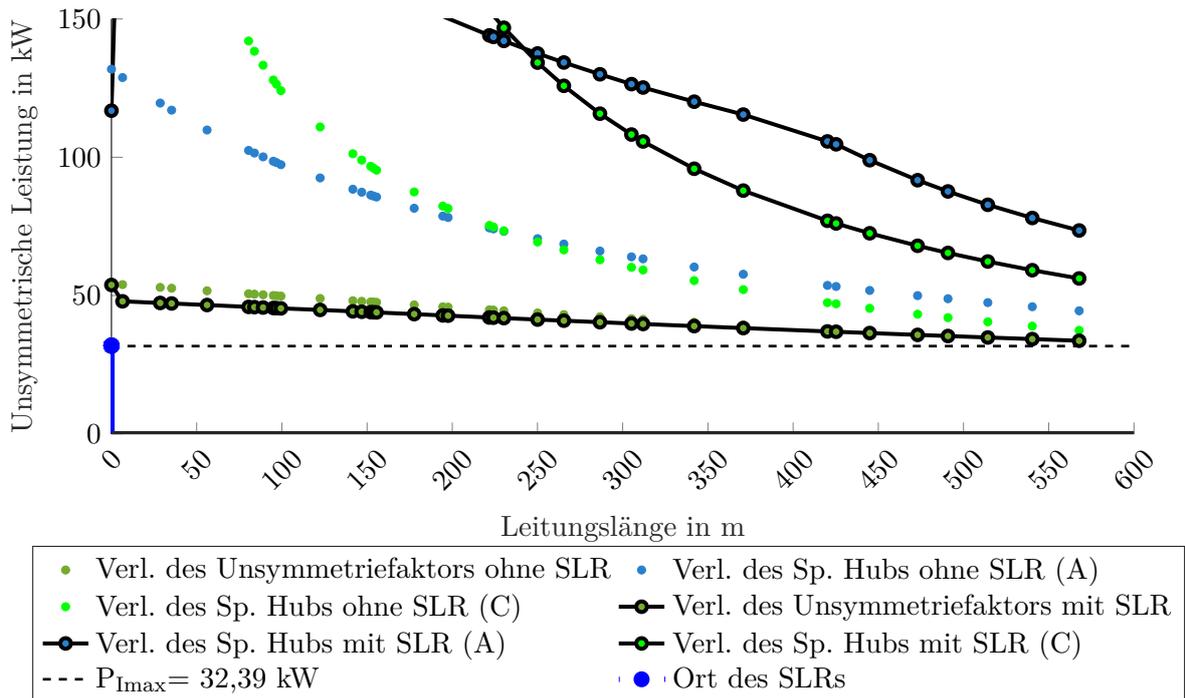
Wie in Szenario 1 wird dieses zunächst am Leitungsanfang verschlechtert, was erneut auf die Schlechtpunktregelung am Leitungsende zurückzuführen ist, denn der rONT erhöht die Phasenspannung direkt am Leitungsanfang, um den Sollwert am Leitungsende einzuhalten. So ist im Verlauf der Leitungslänge eine stetige Verbesserung des symmetrischen Kriteriums erkennbar, welche schlussendlich mit weiter zunehmender Leitungslänge leicht beginnt abzufallen. Dieser Prozess ist jedoch entlang der Leitung stets oberhalb der maximalen Leistungsgrenzen. Damit wird auch bei dem symmetrischen Kriterium das Leistungspotential des NS-Netzes voll ausgeschöpft. Im Vergleich zu der Verletzungsleistung des symmetrischen Kriteriums im Grundmodell ohne Regler ist das eine Steigerung von 11,34 kW (22,88 %) hin zur maximalen Leistungsgrenze. Das zuvor limitierende Kriterium des Grundmodells ist mit 42,44 kW das Spannungshubkriterium. Durch den rONT ist in allen Fällen das volle Leistungspotential von 60,29 kW nutzbar, was eine Steigerung von 17,85 kW (42,1 %) bedeutet.

### 4.2.3 Szenario 3 - unsymmetrische Einspeisung und Belastung

Im dritten und letzten Szenario der statischen Untersuchungen aller Reglerarten werden die beiden vorherigen Szenarien miteinander kombiniert. So wird auf Phase A die identische Leistung aus Szenario 2 in Form der Elektrofahrzeuge gesetzt. Analog dazu wird die Einspeisung der PV-Systeme aus Szenario 1 auf die Phase C gelegt. Dabei wird die Einspeise- und Lastleistung simultan und in gleichem Umfang erhöht. Auch hier kommt das bekannte vierstufige Auswertungsverfahren zum Einsatz.

#### SLR - punktuelle Leistungsverteilung

In Abbildung 4.10 wird der LR mit dem Grundmodell ohne Regler bei punktuelle Leistungsverteilung am Leitungsende betrachtet. Die Y-Achse betrachtet auch hier die einphasige unsymmetrische Leistung in [kW]. Die maximal übertragbare Leistung liegt in diesem Fall bei 32,39 kW, was deutlich geringer ist als in den zwei vorherigen Szenarien. Das liegt daran, dass nun zwei Phasen unsymmetrisch belastet werden und damit der Neutralleiter doppelt beansprucht wird. In diesem Extremfall ist daher der Neutralleiter das schwächste Glied im Netz. Der SLR ist hier direkt am Leitungsanfang platziert, um durch eine ganzheitliche Regelung den Strom auf dem Neutralleiter zu reduzieren. Der Abbildung ist entnehmbar, dass mit einer direkten Spannungsregelung in diesem Extramfall keine Leistungssteigerung möglich ist. Zwar wird auch hier der Spannungshub sowohl auf Phase A als auch auf Phase C erhöht, eine Erhöhung der maximal zulässigen Leistung kann hier dennoch nicht bewirkt werden. Womit in diesem Fall der SLR wirkungslos in Bezug auf die Erhöhung des Integrationspotentials von unsymmetrischen Leistungen ist. Indem dieser eine zusätzliche Last darstellt, können sogar 0,19 kW (0,57 %) weniger übertragen werden. Ein identisches Resultat kann auch bei der

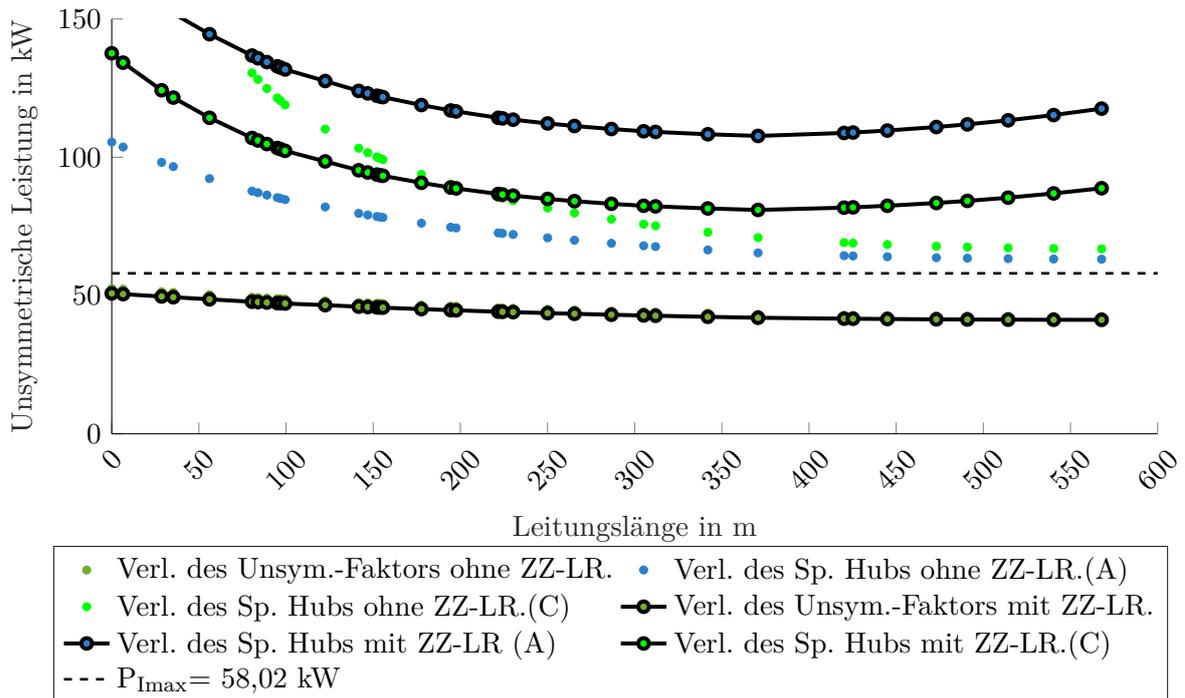


**Abbildung 4.10:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit SLR bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende

homogenen Lastverteilung beobachtet werden, weshalb diese Abbildung nicht noch einmal dargestellt wird. Hier beziffert sich der Leistungsverlust durch die zusätzliche Last des SLR auf 0,77 kW (2,4%). Dieser fällt deutlicher aus als bei der punktuellen Leistungsverteilung, da hier die Leitung bei der Einspeisung nicht mehr in ganzer Länge als Last für die gesamte Einspeiseleistung entgegenwirkt, sondern nur partiell.

### ZZ-Lastregler - homogene Leistungsverteilung

In Abbildung 4.11 wird der ZZ-Lastregler mit dem Grundmodell ohne Regler bei homogener Leistungsverteilung der beiden belasteten Phasen A und C verglichen. Hier liegt die maximale übertragbare Leistung bei 58,02 kW, welche durch den Einsatz des ZZ-Lastreglers ermöglicht wird. Im Vergleich zum Grundmodell ohne Regler ist das eine Steigerung von 26,89 kW (81,94%). Diese Steigerung ist in diesem Maß möglich, da der ZZ-Lastregler den Strom balanciert und somit der Neutralleiter entlastet wird. Die Verletzung des Spannungshubes wird für beide Phasen angehoben. Jedoch ist auf der Phase C bei der Einspeisung zu erkennen, dass bei der homogenen Verteilung das Leistungsniveau der Verletzung am Leitungsanfang sinkt. Hier ist der ZZ-Lastregler zu weit von der Ursache der Unsymmetrien entfernt, um einen positiven Effekt auf die Spannung zu haben. Diese Beobachtung ist bei der Last auf Phase A nicht zu



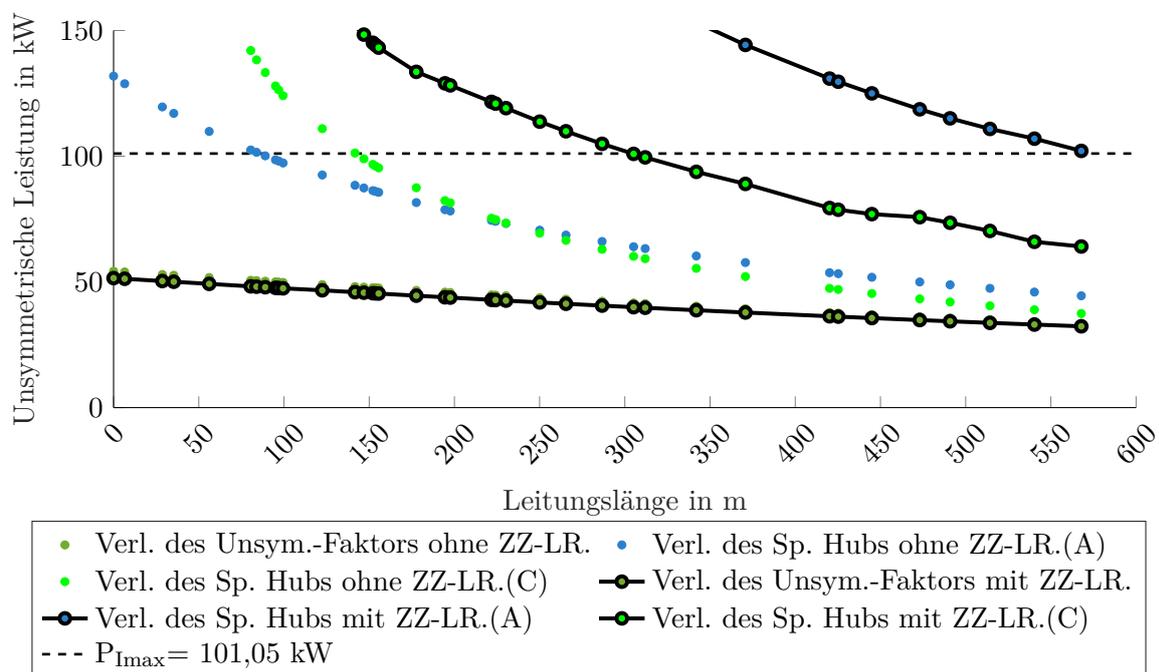
**Abbildung 4.11:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit ZZ-Lastregler bei homogener Leistungsverteilung

beobachten, wofür die Festlegung des maximalen Spannungsbandes verantwortlich ist. Dieser Vorrang befindet sich weit oberhalb der maximal möglichen Leistung und beeinträchtigt daher nicht das Endresultat. Da zuvor auch der Spannungshub des Grundmodells oberhalb der nun möglichen Leistungsübertragung liegt, kann keine weitere Leistungsintegration mit dem ZZ-Lastregler ermöglicht werden. In dieser Abbildung begrenzt der Unsymmetriefaktor, welcher in dieser Abbildung auf einem unveränderten Niveau bleibt, da auch hier die beiden Geraden übereinander liegen. Dass der ZZ-Lastregler keinen nennenswerten Effekt auf den Unsymmetriefaktor hat, ist auch aus den anderen beiden Szenarien entnehmbar und wird auch in diesem Fall bestätigt. Die resultierende Leistungssteigerung durch den ZZ-Lastregler wird durch seine Eigenschaft, den Neutralleiterstrom zu reduzieren, erzielt und schlussendlich durch den Unsymmetriefaktor begrenzt. Diese Leistungssteigerung beträgt hier insgesamt 9,32 kW (29,21 %).

### ZZ-Lastregler - punktuelle Leistungsverteilung

Die Abbildung 4.12 zeigt den Vergleich des ZZ-Lastreglers mit dem Grundmodell ohne Regler bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende. Die ermittelte Leistungsgrenze mit ZZ-Lastregler liegt hier bei 101,05 kW und ist damit um 68,48 kW (210,2 %) höher als beim

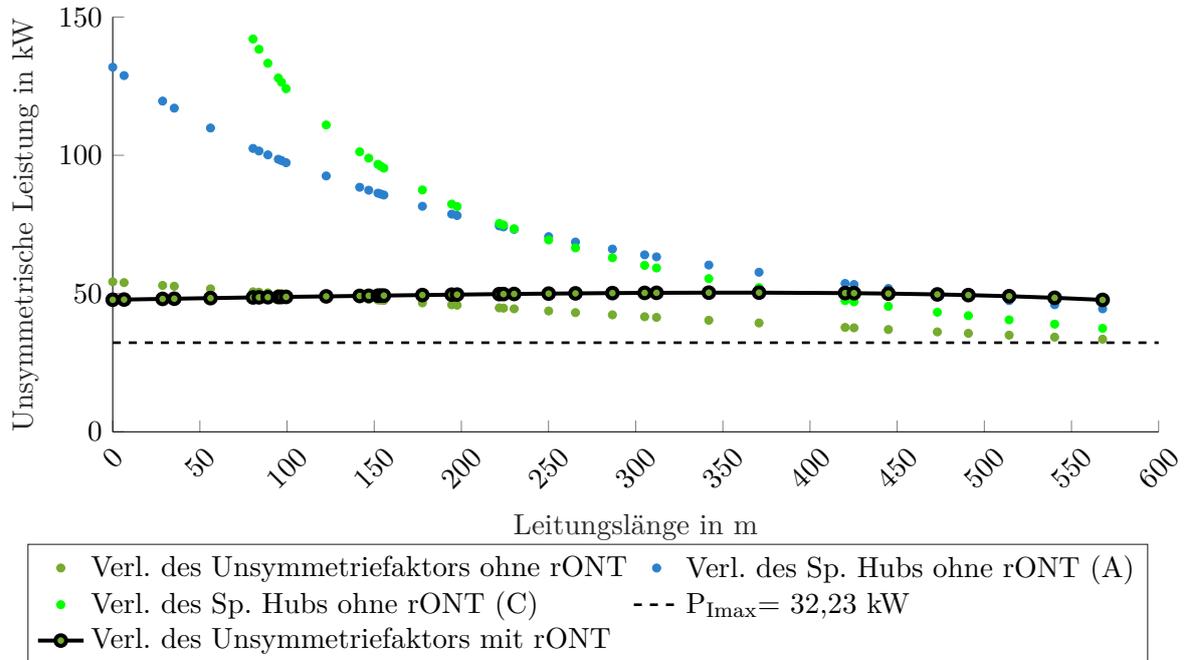
Grundmodell ohne Regler. Hier zeigt der ZZ-Lastregler, dass er gerade dann effektiv die Ströme balanciert, wenn er direkt an der Quelle der Unsymmetrien angeschlossen ist. Auch in diesem Fall erhöht der ZZ-Lastregler die Verletzungsleistung des Spannungshubes sowohl für die Einspeisung als auch für die Last. Dabei ist die Phase C mit der Einspeisung schneller verletzt als die der Last. Das liegt vor allem an dem engeren Spannungsband für Spannungserhöhungen, aber auch an der Balancierung des Stromes. Für die Entlastung des Neutralleiters wird der Neutralleiterstrom auf den drei Phasen gedrittelt über den ZZ-Lastregler zurückgeführt. Dies passiert bei jeder unsymmetrischen Stromkomponente, in diesem Fall für die Lasten auf Phase A und die Einspeisung auf Phase C. Da die Phase C die gleiche Stromrichtung durch die Stromeinspeisung der PV-System hat, wirkt dies als zusätzliche Belastung für die Phase, welche auch die Spannung erhöht. Dieser Effekt tritt bei der entgegen gerichteten Stromrichtung der Phase A nicht auf. Dennoch wird eine höhere Leistungsintegration von 26,66 kW (71,13 %) für die schwächere Phase C in Bezug auf den Spannungshub ermöglicht. Auch in diesem Szenario bildet der Unsymmetriefaktor das schwächste Glied beim Einsatz des ZZ-Lastreglers. Hier wird durch dessen Einsatz keine Verbesserung erzeugt, womit die übertragbare unsymmetrische einphasige Leistung bei 32,34 kW (-0,72 %) kaum verändert bleibt.



**Abbildung 4.12:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit ZZ-Lastregler bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende

### rONT - punktuelle Leistungsverteilung

In Abbildung 4.13 wird der rONT mit dem Grundmodell ohne Regler bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende betrachtet. Hier liegt die ermittelte Leistungsgrenze bei 32,23 kW mit rONT, was ein Rückgang von 0,34 kW (-1,04 %) darstellt. Wie beim SLR hat



**Abbildung 4.13:** Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit rONT bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende

die direkte Spannungsregelung des rONTs keinen Einfluss auf die Entlastung des Neutralleiters in diesem Extremszenario. Bei dem Spannungshub kann durch den rONT zu jedem Zeitpunkt eine Verletzung verhindert werden, weshalb die Geraden außerhalb der Abbildung liegen. Die Schlechtpunktregelung des rONTs hat daher eine theoretische unsymmetrische Leistung von >150 kW, was in Bezug auf das Spannungshubkriterium eine Steigerung von >300 % ist. Den Unsymmetriefaktor kann der rONT um 14 kW (41,8 %) verbessern. Somit bietet die Leistungsgrenze aufgrund des überlasteten Neutralleiters kein weiteres Integrationspotential für unsymmetrische Leistung bei diesem Extremfall. Bei der homogenen Leistungsverteilung ist das Ergebnis mit einer maximalen Übertragungsleistung von 32,25 kW identisch, weshalb auf diese Abbildung keine neuen Erkenntnisse liefert und somit nicht vorgestellt wird.

## 5 Simulationstechnische Untersuchung der Reglerdynamik

Für die Untersuchung der Reglerdynamik werden wie bei der statischen Untersuchung das Grundmodell aus Kapitel 3 und die dazugehörigen Reglermodelle übernommen. Es kommen zwei dynamische Szenarien zum Einsatz bei denen sowohl die Begrenzungskriterien aus Kapitel 2 als auch dynamische Größen wie die Ausregelungszeit oder das Überschwingen untersucht werden. Der Aufbau, die Durchführung und die Auswertung dieser Simulationsszenarien sind im Folgenden beschrieben.

### 5.1 Simulationsdurchführung

#### 5.1.1 Simulationsumgebung

Wie im statischen Fall wird die dynamische Simulation in der Simulink/MATLAB Umgebung durchgeführt. Dabei kommt erneut der „ode23tb(stiff/TR-BDF2)“ Solver aufgrund seiner Robustheit und schnellen Rechenzeit zum Einsatz. Die Fehlertoleranz sowie die Schrittweite werden ebenfalls von der statischen Simulation übernommen. Der Simulationstyp für den rONT und den SLR sowie dem Grundmodell ohne Regler ist der „phasor“ Simulationstyp. Für den ZZ-Lastregler wird aus simulationstechnischen Gründen der „discrete“ Simulationstyp genutzt.

#### 5.1.2 Simulationsszenarien

Für die simulationstechnische Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Reglerarten auf eine sprunghafte Einspeisung- oder Lastleistung werden zwei Simulationsszenarien definiert. Der Grundriss der beiden dynamischen Szenarien entstammt dabei aus der statischen Simulation. Diese werden darüber hinaus mit den aus ihnen gewonnen Erkenntnissen modifiziert.

### Szenario 1

Das erste dynamische Simulationsszenario ist vom Grundprinzip wie das statische Simulationsszenario aufgebaut. Hier speisen die einphasigen PV-Systeme punktuell am Leitungsende der Phase A ein. Dabei wird jedoch nicht die Leistung stetig gesteigert, sondern einmalig nach 2 Sekunden um 62,1 kW erhöht und für 20 Sekunden auf diesem Niveau gehalten. Diese Leistung ist im vorherigen Kapitel als maximale einphasige Leistung ohne Regler ermittelt und aus diesem Grund für den dynamischen Versuch ausgewählt worden. Wie auch in der statischen Untersuchung ist der Leistungsfaktor bei der Einspeisung  $\cos(\varphi) = 1$ . Der rONT und der ZZ-Lastregler werden gemäß der Abbildung 3.6 für deren jeweilige Untersuchung im Grundmodell platziert. Die optimale Position des SLRs ist bereits im statischen Fall ermittelt worden und liegt 265,4 m hinter dem Verteilnetztransformator. Der SLR regelt dabei direkt die Spannung an dessen Ausgang. Der rONT arbeitet mit einer Schlechtpunktregelung bei welcher die Spannung am Leitungsende ausgeregelt wird.

### Szenario 2

Beim zweiten dynamischen Simulationsszenario wird wie im statischen Simulationsszenario zwei einphasige Last in Form von Elektrofahrzeugen am Leitungsende der Phase A angeschlossen. Bei dieser Simulation wird nach 2 Sekunden ein Leistungssprung von 60,9 kW durchgeführt und ebenfalls für 18 Sekunden gehalten. Diese Leistungshöhe wurde zuvor beim statischen Fall als maximale Leistungsgrenze ermittelt und wird daher hier genutzt. Der Leistungsfaktor für die Elektrofahrzeuge ist mit  $\cos(\varphi) = 0,93$  (induktiv) übernommen worden. Somit ist im zweiten dynamischen Verfahren keine reine Wirkleistung mehr vorhanden. Auch hier werden der rONT und der ZZ-Lastregler gemäß der Abbildung 3.6 im Grundmodell platziert. Die optimale Position wird den Erkenntnissen der statischen Untersuchung entnommen und liegt bei 230,3 m hinter dem Verteilnetztransformator. Wie im ersten Szenario regelt der SLR die Spannung an dessen Ausgang, wohingegen der rONT die Spannung am Leitungsende ausregelt. Die für die Auswertung beider Simulationsszenarien notwendigen Spannungen werden nach der Schlechtpunktmessung am Leitungsende gemessen.

## 5.2 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der dynamischen Simulationen beider Simulationsszenarien präsentiert und ausgewertet. Für die Analyse der Sprungantworten aller drei Reglerarten werden der Spannungsverlauf, der Unsymmetriefaktor und das Zeigermodell der symmetrischen Komponenten betrachtet. Die Messdaten werden dafür als Schlechtpunktmessung am

Leitungsende aufgenommen. Ausgewertet wird das allgemeine Reglerverhalten, wie zum Beispiel das Über- oder Unterschwingen der Phasenspannung. Darüber hinaus wird das zeitliche Verhalten in Form von eventuellen Totzeiten und der Ausregelzeit betrachtet und die Performance hinsichtlich der Nähe zum Sollwert bewertet. Zusätzlich wird die dynamische Veränderung des Unsymmetriefaktors beleuchtet und für den ausgeregelten Zustand die symmetrischen Komponenten analysiert. Als Vergleichswert dient in diesem Kapitel die Sprungantwort des Grundmodells ohne Regler.

### 5.2.1 Szenario 1 - Dynamischer Einspeisungssprung

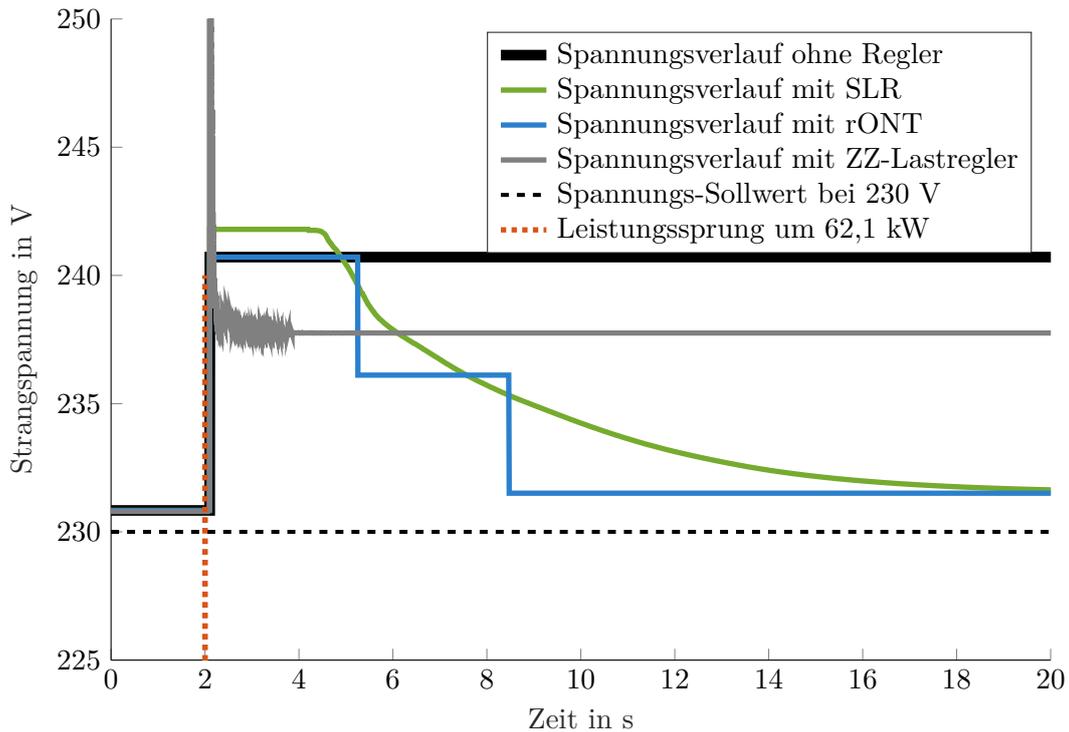
Das erste dynamische Szenario befasst sich mit der sprunghaften Einspeisung von PV-Systemen am Leitungsende mit einer Leistung von 62,1 kW. Der Spannungsverlauf, der Unsymmetriefaktor und die symmetrischen Komponenten werde hier separat betrachtet.

#### Spannungsverlauf

Die Ergebnisse des ersten Szenarios für den Spannungsverlaufs am Leitungsende während des Leistungssprungs durch die PV-Systeme sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Hier ist der Zeitverlauf von 20 Sekunden auf der X-Achse aufgetragen. Die Y-Achse zeigt den Verlauf der Strangspannungen. Der Leistungssprung durch die PV-Systeme erfolgt bei Sekunde zwei. Des Weiteren sind alle drei Reglerarten sowie das Grundmodell ohne Regler in der Abbildung enthalten. Ohne Regler erzeugt der Leistungssprung eine Spannungserhöhung auf 240,7 V, welches in der Abbildung 5.1 mit der schwarzen durchgezogenen Linie dargestellt ist.

Der SLR reagiert mit einem leichten Überschwingen auf die Leistungserhöhung, welche für die Gesamtheit seiner Totzeit andauert und auf die durch ihn zusätzlich entstehende Netzimpedanz zurückzuführen ist. Erst nach 2 Sekunden beginnt der SLR mit der Buck-Modus Regelung, da die Ansteuerungslogik zunächst eine zwei Sekunden andauernde Verletzung der vorgegebenen Hysterese von + 3,45 V und - 4,6 V zum Sollwert 230 V benötigt. Ab dem Zeitpunkt regelt der SLR die Strangspannung kontinuierlich bis zu einem Endwert von 231,2 V und benötigt dafür insgesamt 18 Sekunden. Die bleibende Abweichung ist hier auf die Entfernung zum Leitungsende zurückzuführen, welcher ohne Schlechtpunktregelung arbeitet. Diese beträgt wie in der statischen Simulation der PV-System 265,4 m nach dem Verteilnetztransformator.

Der ZZ-Lastregler reagiert mit einem starken Überschwinger auf den Lastsprung, was auf den plötzlich umgekehrten Lastfluss durch die PV-Einspeisung zurückzuführen ist. Es entladen sich die Spulen des ZZ-Lastreglers schlagartig und erzeugen so einen kurzzeitigen Spannungspeak. Nach 2,5 Sekunden ist der ZZ-Lastregler ausgeregelt und erreicht einen Endwert von 237,8 V.



**Abbildung 5.1:** Spannungsverlauf aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch PV-Systeme

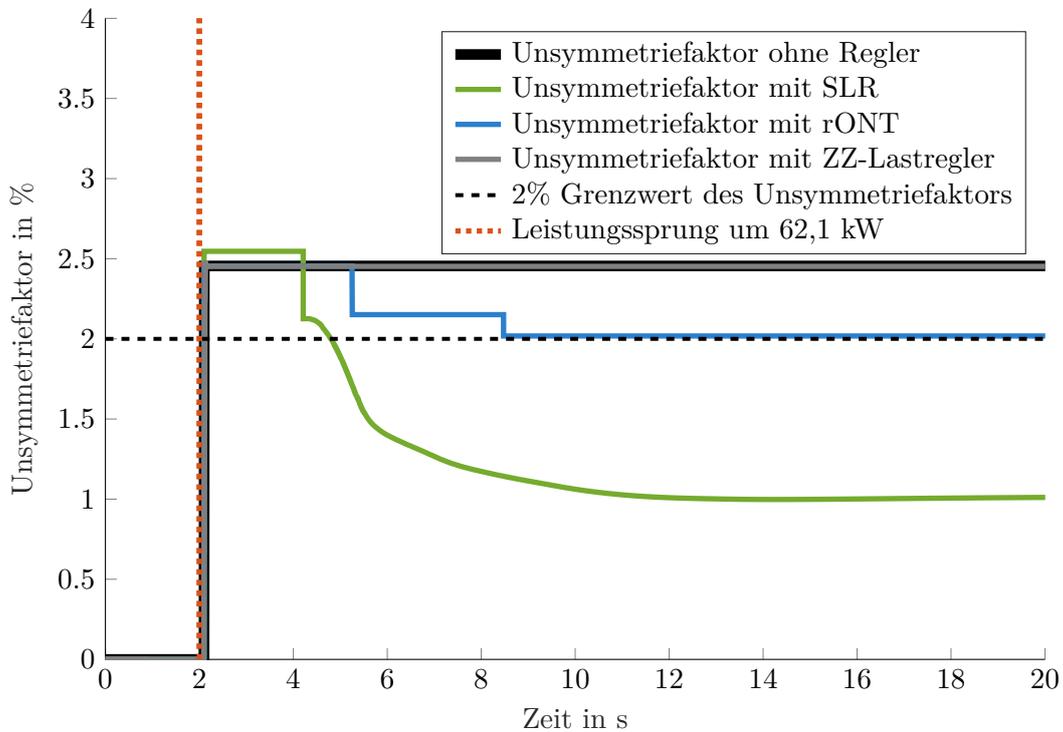
Bei dem rONT tritt kein Überschwingen auf. Dieser regelt nach einer Totzeit von drei Sekunden die Spannung mit zwei Anzapfungswechseln auf einen Endwert von 231,5 V. Dabei benötigt er insgesamt 6,5 Sekunden für die Ausregelung. Die Totzeit besteht aufgrund der eingestellten Zeit zwischen den Anzapfungen, welche den rONT erst nach drei Sekunden anhaltender Abweichung von 4,6 V gegenüber dem Sollwert von 230 V schalten lässt.

### Unsymmetriefaktor

Die Ergebnisse des ersten Szenarios für den Unsymmetriefaktor sind für alle drei Regler in Abbildung 5.2 dargestellt. Auf der Y-Achse ist der Unsymmetriefaktor in % dargestellt und auf der X-Achse ist erneut die Zeit aufgetragen. Bei dem Grundmodell ohne Regler entsteht hier durch den Leistungssprung ein Unsymmetriefaktor von 2,46 %.

Für den SLR ist auch beim Unsymmetriefaktor das leichte Überschwingen zu beobachten. Nach dem Einschalten des Buck-Modus verbessert der Unsymmetriefaktor mit einem kleinen Sprung nach unten und wird anschließend kontinuierlich ausgeregelt. Nach 10 Sekunden Regelzeit erreicht der Unsymmetriefaktor seinen maximalen Wert von 1,1 %, obwohl der SLR den Effektivwert der Phasenspannung noch weitere 8 Sekunden verbessert. Der unveränderte

Unsymmetriefaktor ist hier auf die bleibende Unsymmetrie bei der Phasenlage zurückzuführen.



**Abbildung 5.2:** Unsymmetriefaktor aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch PV-Systeme

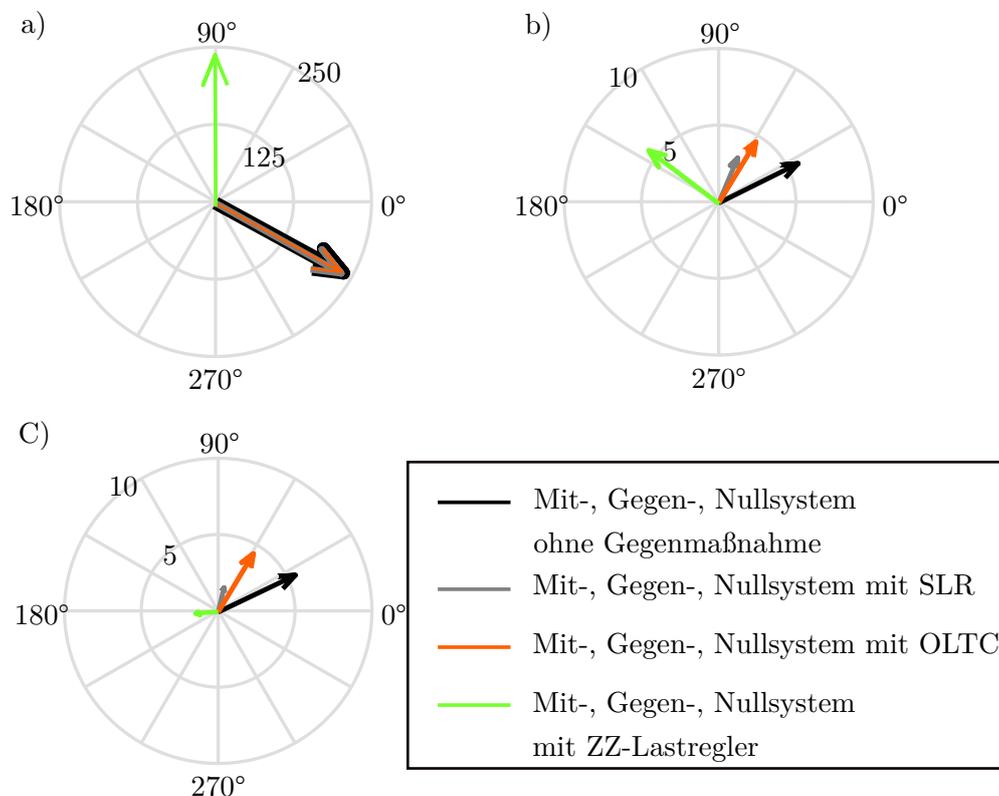
Wie die statischen Untersuchungen bereits zeigen konnten, hat der ZZ-Lastregler keinen Einfluss auf die Spannungsbalance, sondern auf die Strombalance. So bleiben das Mit- und Gegensystem der Phasenspannung unverändert.

Der rONT verbessert den Unsymmetriefaktor wie die Phasenspannung stufenweise mit jeder zusätzlichen Anzapfung. Dabei werden kleine Abweichungen der unbelasteten Phasen wie bei dem SLR nicht ausgeregelt, da diese nicht groß genug sind, um das Umschalten zu der nächsten Anzapfung zu erzwingen. Den Hauptanteil des Unsymmetriefaktors bilden jedoch die Unsymmetrien der Phasenlage. Bei dem umgekehrten Lastfluss schafft der rONT es nicht, diese auszugleichen. So verringert er den Unsymmetriefaktor nach 6,5 Sekunden auf lediglich 2,02 %.

### Symmetrische Komponenten

In Abbildung 5.3 sind die symmetrischen Komponenten der dreiphasigen Spannung am Leitungsende dargestellt, welche mittels der Transformationsgleichung 2.14 ermittelt werden. Der Betrag des Mitsystems beträgt bei dem Grundmodell ohne Regler 234,1 V, der Betrag des

Gegensystems 5,8 V und der Betrag des Nullsystems 5,8 V. Für die Verbesserungen der Unsymmetrien, insbesondere des Unsymmetriefaktors, ist das Gegensystem zu reduzieren. Eine Reduzierung des Mitsystems führt im Falle einer Überspannung zunächst zu einer Verschlechterung des Unsymmetriefaktors. Dies liegt an der Berechnung des Unsymmetriefaktors nach Gleichung 2.19. Hier steht das Mitsystem im Nenner. Eine Verkleinerung des Nenners erzeugt demnach eine Vergrößerung bzw. Verschlechterung des Unsymmetriefaktors. Eine Reduzierung der Phasenspannung ist demnach eine notwendige Bedingung, den Unsymmetriefaktor zu reduzieren, jedoch nicht hinreichend. Eine Reduzierung des Betrag des Nullsystems ist ein Indikator für die Entlastung des Neutralleiters. Zusatzmessungen konnten hier jedoch zeigen, dass dies nicht immer der Fall ist. Vielmehr kann es auch eine Verlagerung des Nullsystems der Neutralleiterspannung zum Nullsystem des Phasenstroms darstellen.



**Abbildung 5.3:** Symmetrische Komponenten der Phasenspannung in Zeigerform des 1. Szenarios a) Mitsysteme b) Gegensystem c) Nullsysteme

Der SLR reduziert den Betrag des Mitsystems um 2,95 V, den Betrag des Gegensystems um 3,42 V und den Betrag des Nullsystems um 3,43 V. Indem der Betrag des Gegensystems stärker reduziert wird als die des Mitsystems, verbessert sich der Unsymmetriefaktor. Die Reduzierung des Betrags des Nullsystems lässt eine Entlastung des Neutralleiters vermuten, sofern der SLR in einem Szenario eingesetzt wird, bei dem alle drei Phasen unsymmetrisch

belastet werden. Zusatzmessungen haben jedoch gezeigt, dass sich bei diesem Fall lediglich der Betrag des Nullsystems von der Spannung zum Strom verlagert. Dadurch entsteht keine Entlastung des Neutralleiters, sondern vielmehr eine Zusatzbelastung durch einen gesteigerten Neutralleiterstrom.

Der ZZ-Lastregler verändert weder die Amplitude des Mitsystems noch die Amplitude des Gegensystems, wodurch der Unsymmetriefaktor ebenfalls unverändert bleibt. Dieser kann lediglich den Betrag des Nullsystems um 3,99 V reduzieren. In diesem Fall ist das reduzierte Nullsystem ein Anzeichen für eine verringerte Neutralleiterbelastung, was die statischen Messungen zuvor gezeigt haben.

Der rONT reduziert den Betrag des Mitsystems um 3,1 V und den Betrag des Gegen- und Nullsystems um jeweils 1,09 V und 1,11 V. Indem das Mitsystem stärker als das Gegensystem reduziert wird, verringert sich der Unsymmetriefaktor nicht so stark, wie man es aufgrund der gut ausgeregelten Phasenspannung erwartet. Dennoch kann hier gezeigt werden, dass die direkte Spannungsregelung auch im Fall des rONTs Unsymmetrien im Netz reduzieren kann.

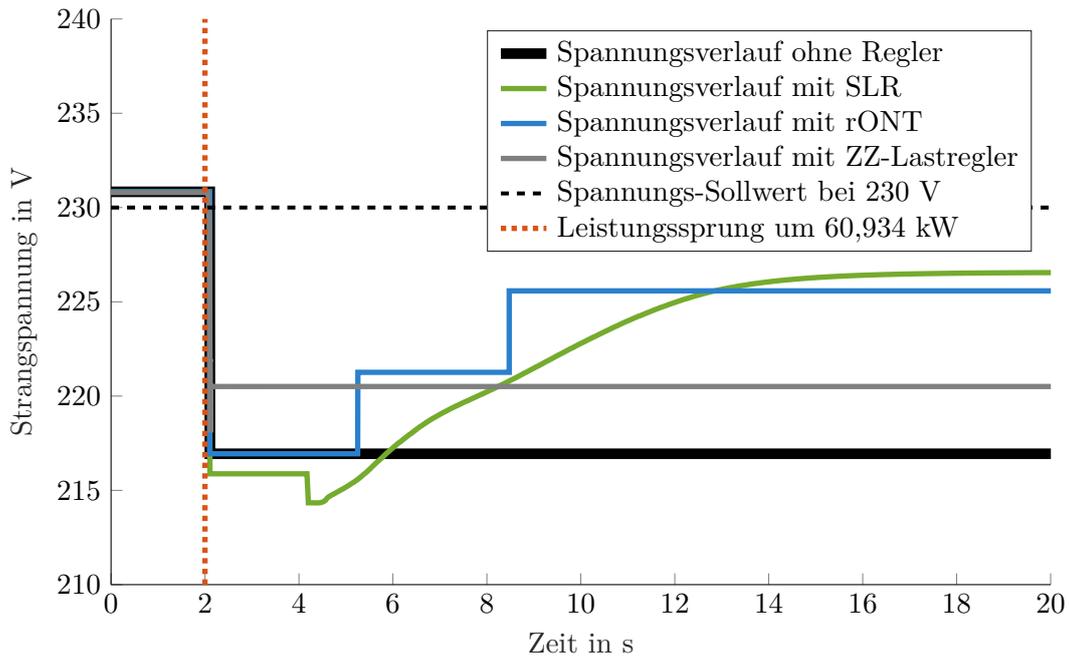
### 5.2.2 Szenario 2 - Dynamischer Lastsprung

Das zweite Szenario befasst sich mit der sprunghaften Belastung durch Elektrofahrzeuge am Leitungsende mit einer Leistung von 60,94 kW und einem Leistungsfaktor von  $\cos(\varphi) = 0,93$ . Wie zuvor werden hier der Spannungsverlauf, der Unsymmetriefaktor und die symmetrischen Komponenten separat betrachtet.

#### Spannungsverlauf

Die Spannungsverläufe für die drei Regler und des Grundmodells ohne Reglereingriff sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Wie zuvor wird der Lastsprung nach zwei Sekunden ausgeführt. Wie im ersten dynamischen Szenario ist auf der X-Achse die Zeit und auf der Y-Achse die Strangspannung der belasteten Phase aufgetragen. Ohne Reglereingriff sackt die Spannung auf 216,9 V ab, welches mit der schwarzen durchgezogenen Linie dargestellt ist.

Der SLR hat nach dem Lastsprung zunächst eine zwei Sekunden Totzeit, welcher Teil der Ansteuerungslogik ist. Diese aktiviert den SLR erst nach einer über zwei Sekunden andauernden Regelabweichung vom Sollwert von +1,5 % und -2 %. Bei der Aktivierung des SLRs ist ein Überschwinger erkennbar, welche auf die zusätzliche Netzimpedanz zurückzuführen ist. Der Peak bei Sekunde 4 kommt von dem Integrierer des SLR welcher seine Wirkung erst beim Einschalten zeigt. Darauf folgt wie im ersten Szenario eine kontinuierliche Ausregelung, die nach 18 Sekunden die Spannung am SLR-Ausgang auf 226,6 V regelt. Die bleibende



**Abbildung 5.4:** Spannungsverlauf aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch Elektrofahrzeuge

Regelungsabweichung vom Sollwert ist auf die Distanz des SLRs zum Leitungsende zurückzuführen. Der SLR ist wie im zweiten statischen Worst Case Szenario bei 230,3 m hinter dem Verteilnetztransformator platziert.

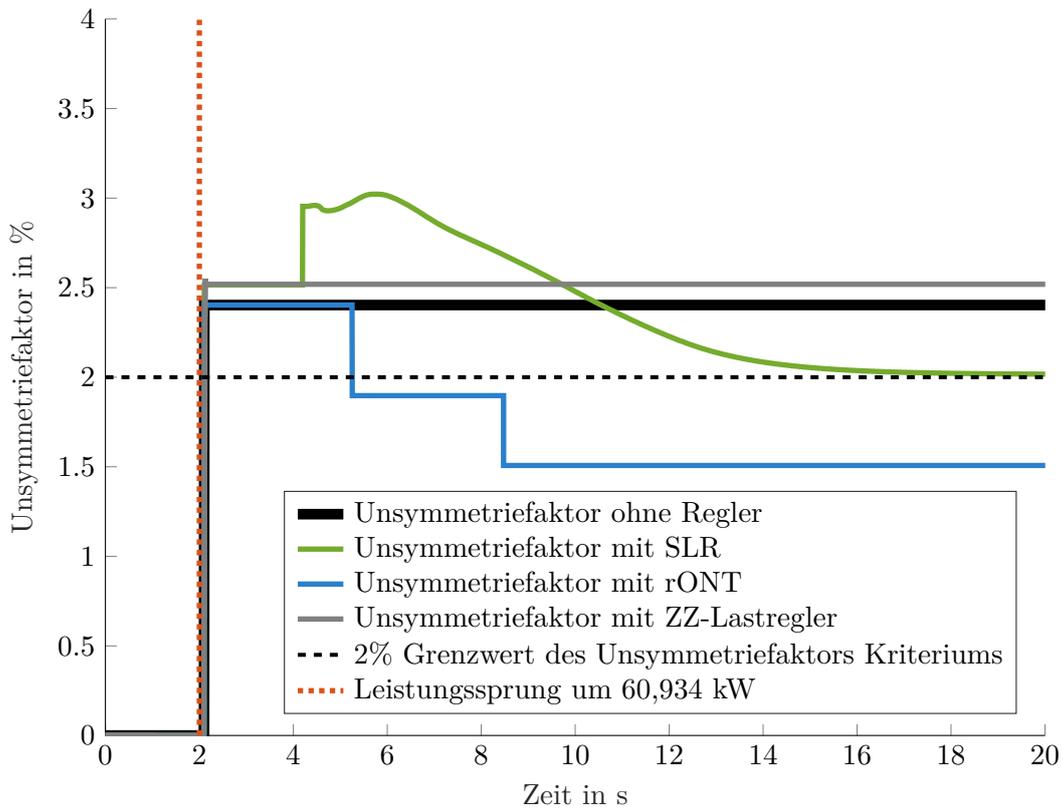
Der ZZ-Lastregler reagiert im zweiten Szenario mit deutlich geringerem Überschwingen, als im ersten Szenario, da hier keine Umdrehung des Lastflusses stattfindet. Das führt auch zu einem sehr schnellen Einschwingen, sodass der ZZ-Lastregler nach 0,2 Sekunden einen ausgeglichenen Wert von 220,5 V erreicht. Damit erreicht er eine Verbesserung von 3,6 V.

Der rONT regelt hier mit einer initialen Verzögerung von 3 Sekunden und insgesamt 6,5 Sekunden in zwei Anzapfungsschritten auf 225,6 V. Die bleibende Abweichung ist hier wie im ersten Szenario auf die Größe der Anzapfungsstufen von 4,6 V je Anzapfung zurückzuführen. Ein besserer Regelwert ist somit nur über die Verkleinerung der Anzapfungsstufen erreichbar.

### Unsymmetriefaktor

Die Ergebnisse des Unsymmetriefaktors für das zweite dynamische Szenario sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Durch den Lastsprung nach zwei Sekunden entsteht bei dem Grundmodell ohne Reglereingriff ein Unsymmetriefaktor von 2,46 %.

Beim SLR ist hier der Überschwinger sowie die Totzeit des Spannungsverlaufs der Ansteue-



**Abbildung 5.5:** Unsymmetriefaktor aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch Elektrofahrzeuge

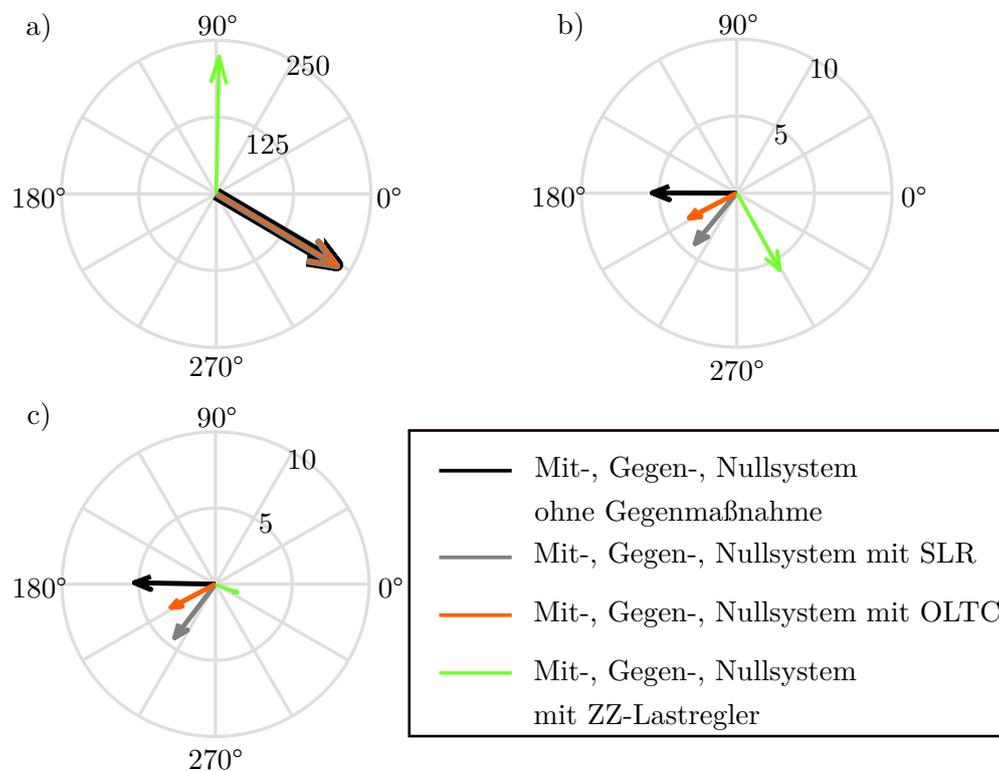
rungslogik ebenfalls beim Unsymmetriefaktor erkennbar. Das Überschwingen verlangsamt die Ausregelungszeit des Unsymmetriefaktors, sodass dieser nach 18 Sekunden seinen stationären Wert von 2,02 % erreicht. Damit liegt der ausgeregelte Wert oberhalb der 2 % Grenze nach DIN EN 50160. Die liegt zum einen an der Distanz zum Leitungsende, aber hauptsächlich an dem Leistungsfaktor der Last. Durch den induktiven Anteil entstehen die Unsymmetrien nicht nur bei dem Betrag der Strangspannung, sondern auch bei dessen Phasenlage.

Der ZZ-Lastregler ist auch hier nicht in der Lage, den Unsymmetriefaktor zu verbessern. In diesem Szenario verschlechtert sich dieser sogar um 0,12 %. Die Reduzierung des Neutralleiterstroms erfolgt demnach zu Lasten der Spannungssymmetrie.

Der rONT reduziert den Unsymmetriefaktor erneut mit jeder geschalteten Anzapfung, sodass nach 6,5 Sekunden der Endwert von 1,1 % erreicht wird. Es gibt bei der Regelung keine Probleme bezüglich des Leistungsfaktors. Ein Vergleich mit dem ersten Szenario zeigt, dass dieser bei einem kleineren induktiven Leistungsfaktor besser abschneidet. Ob dies ein simulationstechnisches Phänomen darstellt, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden.

### Symmetrische Komponenten

In Abbildung 5.6 sind die symmetrischen Komponenten der dreiphasigen Spannung am Leitungsende für das zweite Szenario dargestellt. Wie zuvor im ersten Szenario werden diese mittels der Transformationsgleichung 2.14 ermittelt. Für das Grundmodell ohne Reglereingriff ergibt sich für den Betrag des Mitsystems 226,2 V, für den Betrag des Gegensystems 5,43 V und für den Betrag des Nullsystems 5,28 V. Für die Verbesserung des Unsymmetriefaktors ist bei diesem Szenario sowohl die Erhöhung des Betrags des Mitsystems als auch die Verringerung des Gegensystems zielführend.



**Abbildung 5.6:** Symmetrische Komponenten der Phasenspannung in Zeigerform des 2. Szenarios a) Mitsysteme b) Gegensystem c) Nullsysteme

Der SLR erhöht den Betrag des Mitsystems um 3,15 V, jedoch das Gegensystem um lediglich 0,81 V, weshalb der Unsymmetriefaktor nicht so stark wie im ersten dynamischen Szenario reduziert wird. Zusatzmessungen zeigen, dass der induktive Leistungsfaktor von  $\cos(\varphi) = 0,93$  hierfür verantwortlich ist.

Der Abbildung 5.6 ist entnehmbar, dass der ZZ-Lastregler nur das Nullsystem deutlich um 3,71 V reduzieren kann, was hier auf seine Eigenschaft den Neutralleiter bei Unsymmetrien zu entlasten zurückzuführen ist. Das Mitsystem wird durch ihn um 0,29 V reduziert, jedoch

erhöht sich das Gegensystem um 0,26 V, was zu dem leicht angehoben Unsymmetriefaktor führt.

Der rONT erhöht den Betrag des Mitsystems um 2,87 V und reduziert gleichzeitig den Betrag des Gegensystems um 1,98 V, was zu einem deutlich verbesserten Unsymmetriefaktor führt. Das Nullsystem wird um 2,03 V reduziert, was ein Indiz für die Reduzierung der Neutralleiterbelastung darstellt. Zusatzmessungen konnten jedoch zeigen, dass auch hier der Neutralleiter bei einer dreiphasigen unsymmetrischen Belastung zusätzlich belastet wird und die Reduzierung des Nullsystems der Strangspannung eine Erhöhung des Nullsystems des Stromes zur Folge hat.



## 6 Gegenüberstellung der Reglervarianten

In diesem Kapitel erfolgt die Gegenüberstellung der Reglerarten hinsichtlich des von ihnen gesteigerten Integrationspotentials von unsymmetrischer Leistung und ihrer dynamischen Performance im Kontext der Begrenzungskriterien. Im Anschluss dazu erfolgt die Evaluierung der Reglerarten mittels der aus dem Vergleich gewonnenen Erkenntnisse.

Anhand des ergebnisbezogenen Vergleiches werden die Simulationsergebnisse jeder Reglerart der statischen und dynamischen Szenarien miteinander verglichen. Dafür werden zunächst die Rahmenbedingungen für die gesammelten Simulationsergebnisse zusammengefasst und erörtert. Im Anschluss dazu wird das gesteigerte Integrationspotential durch die Regler für Unsymmetrien im Kontext der Begrenzungskriterien verglichen und bewertet. Darüber hinaus werden die Sprungantworten der Regler auf die Einspeise- und Lastsprünge ausgewertet und verglichen.

### 6.1 Rahmenbedingung

Die Rahmenbedingungen werden durch das erstellte Grundmodell, der Simulationsszenarien und der Reglermodelle festgelegt. In jeder Simulation wird das NS-Netz über eine dreiphasige 20 kV Spannungsquelle versorgt und mittels des modellierten Verteilnetztransformators auf 0,4 kV heruntertransformiert. Darüber hinaus bleibt die modellierte Netzstruktur mit den unterschiedlichen Kabelsegmenten konstant. Außerdem durchlaufen sämtliche Regler die gleichen Simulationsszenarien mit identischer Einspeise- und Lastleistung, damit deren Funktionalität gegenübergestellt werden kann. Bei dem statischen Fall sind das die drei Worst Case Szenarien mit der einphasigen Einspeise- und Lastleistung und der Mischung dieser beiden Fälle. Die dynamische Untersuchung betrachtet in zwei Szenarien die Sprungantworten auf einem Einspeise- und Lastsprung welche stets nach 2 Sekunden ausgeführt werden, um auch hier die Vergleichbarkeit der Sprungantworten zu gewährleisten. Des Weiteren werden sämtliche Simulationen mit dem gleichen Solver und identischer Fehlertoleranz von  $1 \cdot 10^{-4}$  ausgeführt.

## 6.2 Vergleich des gesteigerten Integrationspotentials im Kontext der Begrenzungskriterien

Bei der Betrachtung des gesteigerten Integrationspotentials für unsymmetrische Leistungen durch die Regler wird jedes Simulationsszenario einzeln analysiert. Hierbei werden die maximal übertragbare Leistung bezüglich der thermischen Leistungsgrenze, des Spannungshubs und des Unsymmetriefaktors als Vergleichswerte für die Regler genutzt. Abschließend wird die limitierende Leistung der einzelnen Regler für jedes Simulationsszenario identifiziert und als resultierende übertragbare Leistung festgelegt.

### 6.2.1 Szenario 1 - unsymmetrische Einspeisung

In Tabelle 6.1 werden die drei Reglerarten SLR, rONT und ZZ-Lastregler (ZZ-LR) miteinander verglichen. Die absoluten Zahlen geben dabei den Wert an, bei dem die Grenzen des betrachteten Kriteriums verletzt und somit die Leistung limitiert wird. Die darunter liegende Prozentzahl steht für die prozentuale Leistungssteigerung im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des Grundmodells ohne Reglereingriff.

**Tabelle 6.1:** Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer unsymmetrischer Leistungen für Szenario 1

Szenario 1								
$P_{max}$ [kW]			Spannungshub [kW]			Unsymmetriefaktor [kW]		
SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR
62,1	62,1	76,9	111,67	>150	55,16	76,9	61,7	50,7
<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>35,9 %</b>	<b>195 %</b>	<b>&gt;297 %</b>	<b>46,1 %</b>	<b>51,8 %</b>	<b>21,8 %</b>	<b>0,1 %</b>

Die maximal übertragbare Leistung wird durch die thermische Leistungsgrenze des Kabels festgelegt. Hier ist von den drei Reglern nur der ZZ-Lastregler in der Lage, eine höhere Leistung zu ermöglichen. Seine strombalancierende Eigenschaft entlastet den Neutralleiter und verteilt die Ströme auf die anderen Phasen. Der rONT und der SLR haben dabei als direkte Spannungsregler keinen Einfluss. Bezüglich des Spannungshubes ist der rONT mit >297 % mit seiner Schlechtpunktregelung am effektivsten. Im betrachteten Leistungsspektrum von 150 kW konnte zu keinem Zeitpunkt eine Verletzung des Spannungshubes erzeugt werden. Auch der SLR liefert jedoch mit einer Leistungssteigerung von 195 % gute Ergebnisse. Somit dominieren die beiden direkten Spannungsregler das Spannungshubkriterium gegenüber dem ZZ-Lastregler deutlich. Beim Unsymmetriefaktor ist der SLR mit einer Steigerung von 51,8 % am stärksten. Dies ist auf die kontinuierliche Regelung aller Phasen zurückzuführen, welche bei

dem rONT mit der festen Anzahl an Anzapfungen nicht gegeben ist. Dies führt vor allem zu einem schlechten Ergebnis bei dem Unsymmetriefaktor, wenn die Spannungsabweichung kurz vor dem Umschalten auf die nächste Anzapfung endet und somit Regelpotential des rONTs ungenutzt bleibt. Der ZZ-Lastregler bleibt bezüglich des Unsymmetriefaktors wirkungslos.

### 6.2.2 Szenario 2 - unsymmetrische Belastung

Die Vergleichswerte der Reglerarten sind für das zweite Szenario in der Tabelle 6.2 aufgelistet. Bezüglich der Leistung der thermischen Leistungsgrenze sind hier der rONT und der SLR eine hinzukommende Belastung. Die Spannungsquellen erzeugen einen zusätzlichen Strom, der mit dem Laststrom fließt und dadurch das Netz zusätzlich belastet. Hier ermöglicht der ZZ-Lastregler mit 83,6 kW eine um 30,7 % höhere Leistungsintegration durch seine Eigenschaft, den Strom auf die anderen Phasen zu verteilen.

**Tabelle 6.2:** Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un-symmetrischer Leistungen für Szenario 2

Szenario 2								
$P_{max}$ [kW]			Spannungshub [kW]			Unsymmetriefaktor [kW]		
SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR
60,9	60,3	83,6	82,1	146,1	58,5	65,2	76,9	47,6
-4,7 %	-5,7 %	30,7 %	93,6 %	244,2 %	37,8 %	31,4 %	55 %	-3,9 %

Bei dem Spannungshub ist auch hier der rONT durch seine Schlechtpunktregelung und einer Leistungssteigerung von 244,2 % am besten. Der SLR erreicht eine Steigerung von 96,6 %, welche aufgrund der weiteren Entfernung zum Leitungsende geringer ausfällt als im ersten Szenario. Durch die Entlastung des Neutralleiters wird der Spannungshub durch den ZZ-Lastregler um 37,8 % verbessert, ist jedoch gegenüber den direkten Spannungsreglern am schwächsten. Der Unsymmetriefaktor wird durch den rONT bis zu einer Leistung von 76,9 kW gehalten. Mit einer Leistungssteigerung von 55 % ist der rONT damit im zweiten Szenario der beste Regler. Der SLR kann hier eine Leistungssteigerung von 31,4 % ermöglichen. Dies fällt geringer aus als zuvor im ersten Szenario. Das liegt vor allem an dem Leistungsfaktor der Elektrofahrzeuge. Zusatzmessungen konnten zeigen, dass der erhöhte induktive Spannungsanteil zu einem erhöhten Gegensystem führt und dadurch der Unsymmetriefaktor belastet wird. Der ZZ-Lastregler hat auch in diesem Szenario keinen Einfluss auf den Unsymmetriefaktor und ist damit als allein stehender Regler für die Reduzierung von Unsymmetrien ungeeignet.

### 6.2.3 Szenario 3 - unsymmetrische Einspeisung und Belastung

Die Vergleichsergebnisse des dritten Szenarios sind sowohl für die homogene als auch punktuelle Leistungsverteilung in der Tabelle 6.3 aufgelistet. Zunächst wird hier der Fall der homogenen Leistungsverteilung verglichen und im Anschluss dazu der punktuelle Fall am Leitungsende gegenübergestellt.

Bei der maximalen Leistung bezüglich der thermischen Belastungsgrenze des Kabels zeigt hier der ZZ-Lastregler wie in den beiden Szenarien zuvor, dass dieser als einziger Regler mehr Leistung integrieren kann. So bewirken der SLR und rONT mit der direkten Spannungsregelung keine Verbesserung, wohingegen der ZZ-Lastregler eine Steigerung von 81,9 % ermöglicht. Das Spannungshubkriterium wird hier von dem rONT dominiert. Sein Vorteil ist wie zuvor die Schlechtpunktregelung, die auf die Spannungswerte am Leitungsende reagiert. Bei dem SLR wird lediglich der Wert ausgeregelt, welcher an dessen Ausgang vorliegt. So kann dieser nicht mit dem rONT mithalten, auch wenn das Reglerpotential bei dem SLR vorhanden ist. Der ZZ-Lastregler bildet hier mit einer Leistungssteigerung von 32,8 % die am geringsten effektive Reglerform. Der Unsymmetriefaktor wird bei dem homogenen Fall lediglich durch den rONT verbessert. Die unsymmetrische Belastung sowohl vor als auch hinter dem SLR erzeugt Probleme bei der Ausregelung der Unsymmetrien, wodurch der Unsymmetriefaktor um 6,1 % verschlechtert wird. Die Unsymmetrie geht dabei hauptsächlich von der Phasenverschiebung und nicht von dem Betrag der unsymmetrisch belasteten Phasenspannungen aus. Der ZZ-Lastregler bleibt wie zuvor auch bei der Verbesserung des Unsymmetriefaktors wirkungslos.

**Tabelle 6.3:** Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer unsymmetrischer Leistungen für Szenario 3

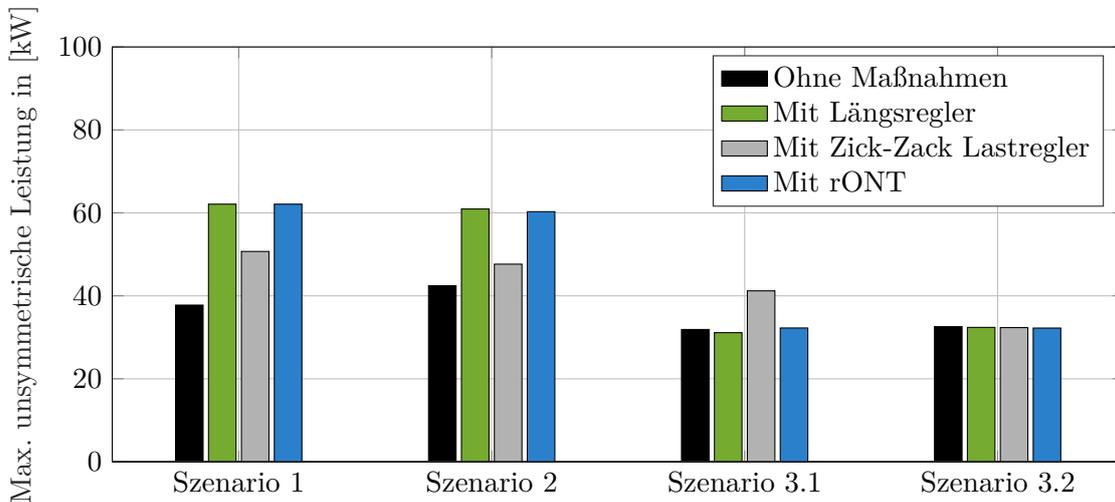
Szenario 3, homogene Leistungsverteilung								
$P_{max}$ [kW]			Spannungshub [kW]			Unsymmetriefaktor [kW]		
SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR
31,1	32,3	58	111,35	>150	88,8	39,8	53,3	41,2
<b>-0,2 %</b>	<b>0 %</b>	<b>81,9 %</b>	<b>76,4 %</b>	<b>&gt;123,6 %</b>	<b>32,8 %</b>	<b>-6,1 %</b>	<b>25,6 %</b>	<b>-2,9 %</b>
Szenario 3, punktuelle Leistungsverteilung								
$P_{max}$ [kW]			Spannungshub [kW]			Unsymmetriefaktor [kW]		
SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR
32,4	32,2	101,1	56,2	>150	64,1	33,7	47,7	32,3
<b>-0,1 %</b>	<b>0 %</b>	<b>210 %</b>	<b>50,1 %</b>	<b>&gt;237 %</b>	<b>71,3 %</b>	<b>0,4 %</b>	<b>42,5 %</b>	<b>-3,5 %</b>

Bei der punktuellen Lastverteilung am Leitungsende steigt die Belastung auf das Netz im Vergleich zum homogenen Fall. So steigt auch die Anforderung an die Reglerarten. Bezüglich

der maximalen Leistungsübertragung zeigt erneut der ZZ-Lastregler seine Neutralleiter entlastende Eigenschaft. Diese ist im Vergleich zum homogenen Fall noch effektiver, da dieser nun direkt an der Quelle der Unsymmetrien sitzt und dadurch eine Leistungssteigerung von 210 % ermöglicht. Der rONT und SLR haben auch hier mit der direkten Spannungsregelung keinen Einfluss auf das Ergebnis. Den Spannungshub verbessert der rONT erneut am effektivsten mit einer Leistungssteigerung von 237 %. Dabei ist die Begründung analog zu den anderen Szenarien auf die Schlechtpunktregelung zurückzuführen. In diesem Szenario ist der SLR mit 50,1 % Leistungssteigerung die schwächste Reglervariante. Aufgrund der Entfernung zum Leitungsende und der Spannungsregelung direkt am SLR schneidet der Regler in diesem Worst Case Szenario am schlechtesten ab. Beim Unsymmetriekriterium ist erneut der rONT der stärkste Regler mit einer Leistungssteigerung von 42,5 %. Sowohl der SLR als auch der ZZ-Lastregler können keine Verbesserung erzeugen.

#### 6.2.4 Gesamtergebnis des Integrationspotentials

Bei dem Gesamtergebnis liegt der Fokus auf das gesteigerte Integrationspotential für unsymmetrische Leistung. Es werden die limitierenden Kriterien für jeden Regler als Schwachpunkt in dem jeweiligen Szenario identifiziert und in Abbildung 6.1 dargestellt.



**Abbildung 6.1:** Gesamtergebnis der Integrationspotentialsteigerung aller Reglerarten

In der Abbildung 6.1 ist erkennbar, dass alle drei Reglerarten eine Steigerung des Integrationspotential erreichen. Der SLR erreicht mit einer Leistungssteigerung von 64,5 % die mögliche maximale Leistung von 62,1 kW und wird nur durch diese ausgebremst. Mit einer dicken Kabelstärke könnte der SLR weitere Leistung im unsymmetrischen Einspeisefall ermöglichen.

Der rONT wird kurz vor der Leistungsgrenze durch den Unsymmetriefaktor limitiert, erreicht dabei jedoch eine gesteigerte Leistungsintegration von 63,3%. Auch der ZZ-Lastregler wird durch die Grenze des Unsymmetriefaktors limitiert, ermöglicht dabei aber eine Leistungssteigerung von 34,26%, indem er die Phasenspannung absenken kann.

Auch für das zweite Szenario wird in Abbildung 6.1 erkennbar, dass alle Reglerarten eine Steigerung des Integrationspotentials ermöglichen. Der SLR sowie der rONT werden in diesem Fall durch die maximal übertragbare Leistung limitiert und ermöglichen damit jeweils eine Leistungssteigerung von 43,5%. Der ZZ-Lastregler wird erneut durch die Grenze des Unsymmetriefaktors limitiert, erhöht jedoch durch das Anheben der Phasenspannung die integrierbare Leistung um 12,25%.

Für das dritte Szenario ist aus der Abbildung 6.1 zu entnehmen, dass lediglich der ZZ-Lastregler im homogenen Fall eine Steigerung der Leistungsintegrationspotentials um 29,21% aufweist. Dies ermöglicht er durch die Entlastung des Neutralleiters. Die beiden anderen Regler mit direkter Spannungsregelung konnten dabei keine Entlastung des Neutralleiters bewirken und werden sowohl im homogenen als auch im punktuellen Worst Case Fall durch diesen limitiert. Im punktuellen Leistungsfall des dritten Szenarios reduziert der ZZ-Lastregler zwar die Neutralleiterbelastung, wird jedoch durch die Unsymmetrien limitiert, da der ZZ-Lastregler keinen Einfluss auf den Unsymmetriefaktor hat.

### 6.3 Dynamisches Verhalten der Reglerarten

Im Folgenden werden die Reglerarten bezüglich ihres dynamischen Verhaltens auf einen Einspeiseleistungs- oder Lastleistungssprung verglichen. Dafür sind in der Tabelle 6.4 die Werte der Reglerabweichung zum Sollwert der Strangspannung, die Entfernung zu der 2% Grenze des Unsymmetriefaktors und die benötigte Ausregelzeit gegenübergestellt. Ein negatives Vorzeichen bei dem Unsymmetriefaktor bedeutet hier, dass der entsprechende Wert unterhalb der 2% Grenze liegt und damit die Anforderungen der DIN EN 50160 erfüllt.

**Tabelle 6.4:** Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un-symmetrischer Leistungen

Sz.	Abweichung			Entfernung			Ausregelzeit [s]		
	Spannungssollwert[kW]			2 % Grenze [%]					
	SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR	SLR	rONT	ZZ-LR
<b>1</b>	1,6	1,52	7,78	-0,99	0,02	0,46	18	6,5	2,5
<b>2</b>	3,44	4,42	9,49	0,02	-0,49	0,5	18	6,5	0,2

### 6.3.1 Szenario 1 - Dynamischer Einspeisesprung

Bezüglich der Abweichung des Spannungssollwertes regeln die beiden direkten Spannungsregler SLR und rONT am genauesten aus. Die bleibende Abweichung ist zum einen auf die Entfernung, aber auch auf die Ansteuerungslogik der beiden Regler zurückzuführen, welche zuvor genau beschrieben wurden. Der ZZ-Lastregler liegt hier an dritter Stelle mit einer Abweichung von 7,78 V, welche jedoch im Rahmen des Spannungshubkriteriums liegt.

Der Unsymmetriefaktor zeigt hier erneut, dass der ZZ-Lastregler wirkungslos bei der Reduzierung des Mitsystems ist und daher als Regler gegen Unsymmetrien nach DIN EN 50160 ungeeignet ist. Der SLR regelt hier besser als der rONT, wofür der gedrehte Lastfluss identifiziert werden konnte. Hier liegt der schlechtere Unsymmetriefaktor des rONTs an der unsymmetrischen Phasenlage, da die Ausregelung der Spannungsamplitude dem des SLRs gleicht. Wird die Ausregelungszeit betrachtet, regelt der ZZ-Lastregler am schnellsten. Aufgrund seiner Einfachheit gibt es weder eine Ansteuerungslogik noch eine Reglerlogik. Er wird daher direkt bei der Entstehung von Unsymmetrien aktiv. Durch ein Überschwingen aufgrund des umgekehrten Lastflusses benötigt dieser eine Ausregelungszeit von 2,5 Sekunden. Der rONT benötigt für die Ausregelung des Einspeisungssprunges 6,5 Sekunden. Bei einer Schaltdauer von 6 Sekunden für die zwei Anzapfungen kommen zusätzlich 0,5 Sekunden Verzögerungen in der Regelungslogik hinzu. Die Dauer der Ausregelungszeit bei dem SLR beträgt 18 Sekunden. Zunächst benötigt dieser eine dauerhafte Abweichung von +1,5 % der Ausgangsspannung des SLR, um aktiv zu werden. Dies verhindert schnelles Umherschalten und stabilisiert so den Regler. Die übrigen 16 Sekunden werden für die kontinuierliche Änderung der regelbaren Induktivität des SLRs aufgewandt.

### 6.3.2 Szenario 2 - Dynamischer Lastsprung

Im zweiten dynamischen Szenario ist die Abweichung des Spannungssollwertes auch hier bei dem SLR und rONT am niedrigsten. Sie fällt im Vergleich zum ersten Szenario jedoch etwas höher aus, was auf die höhere Scheinleistung im Szenario zwei zurückzuführen ist. So sind Szenario eins und zwei nicht ohne weiteres vergleichbar. Dabei ist die Abweichung des Spannungssollwertes beim rONT 0,18 V entfernt, um das Umschalten auf die nächste Anzapfung auszulösen. In diesem Falle wäre eine deutlich bessere Regelleistung erkennbar. So steht der rONT hinter dem SLR an zweiter Stelle. Mit einer bleibenden Abweichung von 9,49 V von dem Sollwert bleibt der ZZ-Lastregler an letzter Stelle, hält jedoch den Grenzwert für die Spannungsabsenkung von 4 % nach DIN EN 50160.

Der Unsymmetriefaktor wird von dem rONT am stärksten verbessert. Der Leistungsfaktor  $\cos(\varphi) = 0,93$  erschwert bei dem SLR die Ausregelung der Unsymmetrien aufgrund der Phasenlage. Der ZZ-Lastregler erweist sich auch hier als ungeeignet und schneidet bei dem Un-

symmetriefaktor am schlechtesten ab.

Bei der Ausregelungszeit ist erneut der ZZ-Lastregler der schnellste, welcher aufgrund seines einfachen Aufbaus direkt auf die Unsymmetrien reagiert. Indem der Lastfluss sich in diesem Szenario nicht dreht, gibt es auch einen kurzen Einschwingvorgang von 0,2 Sekunden. Der rONT hat durch seine zwei Stufungen eine Ausregelungszeit von 6,5 Sekunden und ist mit seiner Regelungslogik schneller als der SLR. Dieser benötigt auch hier 18 Sekunden, um die Unsymmetrien kontinuierlich auszuregeln.

## 6.4 Gesamtevaluierung der Reglerarten

Im Rahmen dieser Arbeit sind neben dem SLR der rONT und der ZZ-Lastregler simulationstechnisch modelliert worden. Im Folgenden wird beurteilt inwiefern diese drei Reglerarten sich im Rahmen der simulationstechnischen Untersuchung als geeignet erwiesen haben das Integrationspotential für unsymmetrische Leistungen zu erhöhen und welche Eigenschaften sie dabei mitbringen.

Der ZZ-Lastregler konnte weder im statischen noch im dynamischen Fall Spannungsunsymmetrien bezüglich des Unsymmetriefaktors nach DIN EN 50160 reduzieren. Das durch ihn gesteigerte Integrationspotential ist lediglich auf die Einhaltung des Spannungshubkriteriums zurückzuführen, womit sich der ZZ-Lastregler als Spannungsregler jedoch nicht als Regler für Spannungsunsymmetrien eignet. Allerdings ermöglicht dieser die Entlastung des Neutralleiters und ist aufgrund seines einfachen Aufbaus der schnellste Regler von den betrachteten Reglerarten. Des Weiteren ist der Einfluss des ZZ-Lastreglers auf die Spannungsqualität bezüglich harmonischer Schwingungen während der Regelung gering, insofern keine Schaltvorgänge stattfinden. Durch seine Platzierung am Leitungsende ist dieser darüber hinaus flexibel an Leitungssträngen einsetzbar, bei welchen Spannungsprobleme bekannt sind.

Der rONT konnte in allen Simulationsszenarien zeigen, dass dieser den Unsymmetriefaktor mittels direkter Spannungsregelung reduzieren kann. Darüber hinaus kann er das Spannungshubkriterium von allen drei Reglerarten am besten einhalten. Diese Erkenntnis ist jedoch nur in den hier betrachteten Szenarien gültig, da im Grundmodell lediglich ein Strahl eines NS-Netzes nachgebildet worden ist. Bei einem vollwertigen NS-Netz mit mehreren Strahlen, wird der rONT durch unbelastete Abschnitte limitiert und kann so gegebenenfalls nicht sein ganzes Reglerpotential ausschöpfen. Des Weiteren belastet sein Schaltverhalten bei dem Anzapfungswechsel die Spannungsqualität bezüglich harmonischer Schwingungen.

Auch der SLR konnte in allen Simulationsszenarien den Unsymmetriefaktor mit seiner direkten Spannungsregelung reduzieren. Bei dem Spannungshubkriterium liefert der SLR ähnlich gute Ergebnisse wie der rONT. Sein Vorteil dabei ist, dass der SLR flexibler im Netz platziert werden kann. Es limitieren ihn dadurch keine unbelasteten Phasen, sodass er direkt bei

den gefährdeten Leistungsabschnitten einsetzbar ist und sein volles Reglerpotential ausschöpfen kann. Des Weiteren regelt er die Spannung kontinuierlich ohne Schaltvorgänge, was sich positiv auf die Spannungsqualität während der Regelung auswirkt.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen dieser Masterarbeit erstellte Netzmodell zeigt sich als geeignet, Spannungsunsymmetrien zu analysieren, welche von einphasigen PV-Systemen und Elektrofahrzeugen verursacht werden. Des Weiteren konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass unter Einhaltung der getroffenen Begrenzungskriterien der SLR sowie der rONT Spannungsunsymmetrien im Netz reduzieren können. Der ZZ-Lastregler kann im Bezug auf die Spannungsunsymmetrien keine Verbesserung bewirken, sondern lediglich Stromunsymmetrien reduzieren.

Die Begrenzungskriterien setzten sich hier aus thermischen Belastungsgrenzen des Verteilnetztransformators und des Kabels sowie aus der geforderten Spannungsqualität nach DIN EN 50160 bezüglich des Spannungshubs und des Unsymmetriefaktors zusammen.

Mit den gesammelten Erkenntnissen aus der Literaturrecherche ist das Netzmodell erstellt und parametrisiert worden. Für das SLR-Modell wurde ein bereits bestehendes einphasiges Modell in ein dreiphasiges überführt und mit einer Ansteuerungslogik versehen. Die Reglermodelle des rONTs und des ZZ-Lastreglers sind hier ebenfalls anhand der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche erstellt und parametrisiert worden.

Für die statische Analyse der Unsymmetrien sind drei Worst Case Szenarien erstellt und mit einem dafür entwickelten vierstufigen Auswertungsverfahren untersucht worden. Hier konnte gezeigt werden, dass der SLR und der rONT erfolgreich Spannungsunsymmetrien im Netz reduzieren und dadurch das Integrationspotential für unsymmetrische Leistung gesteigert wird. Auch der ZZ-Lastregler ermöglicht hier eine Steigerung des Integrationspotentials für unsymmetrische Leistung, jedoch liegt dies an seiner Eigenschaft die Spannungsqualität bezüglich des Spannungshubs zu verbessern. Spannungsunsymmetrien kann dieser nicht korrigieren, was ihn für die reine Ausregelung von Spannungsunsymmetrien disqualifiziert. Jedoch ermöglicht seine strombalancierende Eigenschaft als einziger Regler eine Entlastung des Neutralleiters.

Für die dynamische Analyse sind zwei Szenarien erstellt worden, welche die Sprungantworten der Regler bei negativem sowie positivem Leistungssprung betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass der ZZ-Lastregler hier die schnellste Ausregelungszeit aufweist und mit dem SLR zusammen eine kontinuierliche Regelung ohne Schaltvorgänge ermöglicht.

Die abschließende Evaluierung der Reglerarten zeigt, dass lediglich der SLR und der rONT geeignet sind, um Spannungsunsymmetrien im Netz zu reduzieren. Dabei liefert der rONT bezüglich des Spannungshubes die besseren Ergebnisse. Dies kommt jedoch mit dem Nachteil, dass dieser unflexibler im Netz einsetzbar ist. Sofern nicht alle Strahlen eines NS-Netzes

Spannungsprobleme aufweisen, kann der rONT sein volles Reglerpotential nicht ausschöpfen, ohne die unbelasteten Strahle zu gefährden. Hier hat der SLR den großen Vorteil, direkt an den betroffenen Leitungsabschnitten eingesetzt zu werden.

## **Ausblick**

Aus dieser Arbeit geht ein Niederspannungsnetzmodell hervor, was eine realistische Niederspannungsumgebung nachbildet und damit als Werkzeug für weitere Untersuchungen wie beispielsweise Loadmanagement oder Zeitreihenbetrachtungen genutzt werden kann. Außerdem können die drei erstellten Reglermodelle genutzt werden, um diese mit der Software Opal in eine Laborumgebung zu integrieren und anhand weiterer Anwendungsfälle zu erproben.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der simulationstechnischen Untersuchungen, dass der ZZ-Lastregler lediglich Ströme, aber nicht die Spannung ausbalancieren kann. Dadurch wird jedoch der Neutralleiter entlastet, was im Falle des rONTs und des SLRs eine notwendige Eigenschaft darstellt, um weitere Leistungen im Netz zu integrieren. Daher könnte eine Analyse bezüglich der Kombination des rONTs oder SLRs mit dem ZZ-Lastregler erfolgen, insofern die Einfachheit des ZZ-Lastreglers eine Nachrüstung in der Realität kostengünstig ermöglicht.

Da in dieser Arbeit lediglich die Grundfrequenz betrachtet worden ist, wäre eine Untersuchung bezüglich des harmonischen Schwingungsverhaltens der Regler von Interesse. Hier ist zu erwarten, dass der SLR aufgrund seiner kontinuierlichen Regelung deutlich bessere Ergebnisse erzielt als beispielsweise der gestufte rONT.

Es empfiehlt sich zudem den Regler des SLRs hinsichtlich der Ein- und Ausschaltung zu überarbeiten, so dass ein Überschwingen durch den Integrationsanteil des Reglers gemindert wird. Außerdem zeigen die Simulationsergebnisse, dass der rONT Spannungsunsymmetrien hervorgerufen durch Elektrofahrzeuge besser ausregelt als der SLR. Umgekehrt regelt der SLR jedoch die Spannungsunsymmetrien hervorgerufen durch PV-Systeme besser aus als der rONT. Dieses unterschiedliche Wirken auf die Spannungsunsymmetrien konnte in diesem Verlauf der Arbeit nicht abschließend geklärt werden und bedarf weiterer Analysen.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollte eine messtechnische Untersuchung in einer Laborumgebung stattfinden. So können die Simulationsergebnisse validiert und gegebenenfalls mit den dort gesammelten Erkenntnissen die Modelle verbessert werden, was zu einer Steigerung der Genauigkeit für zukünftige Untersuchungen führt.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktureller Ablauf dieser Arbeit . . . . .	2
2.1	Typische Netzarten a) Strahlennetz b) Ringnetz c) Maschennetz . . . . .	6
2.2	Die wesentlichen Netzformen a) TN-C-S-Netz b) TT-Netz c) IT-Netz . . . . .	9
2.3	Schematische Darstellung eines zwischenkligen Transformators . . . . .	9
2.4	T-ESB des Transformators mit auf die Oberspannungsseite bezogenen Größen	11
2.5	Vereinfachtes ESB des Transformators im Leerlaufversuch . . . . .	11
2.6	Vereinfachtes ESB des Transformators im Kurzschlussversuch . . . . .	12
2.7	ESB des Transformators für die Verschaltungsart Dyn5 . . . . .	13
2.8	$\pi$ -ESB einer kurzen Leitung . . . . .	14
2.9	Symmetrische Spannung im a) Zeigerdiagramm b) Spannungsdreieck . . . . .	16
2.10	Zerlegung eines unsymmetrischen Drehstromsystems in das Mit-, Gegen- und Nullsystem . . . . .	17
2.11	Potentialdifferenz $\underline{U}_{PEN}$ des Symmetrischen Nullpunktes $X_{sym}$ und des unsymmetrischen Sternpunktes $X_{unsym}$ . . . . .	17
2.12	Spannungsabsenkung durch viele einphasige Elektrofahrzeuge auf einer einzelnen langen Phase . . . . .	20
2.13	Spannungserhöhung durch viele einphasige PV-Systeme auf einer einzelnen langen Phase . . . . .	21
2.14	Schematische Abbildung des Zick-Zack Lastreglers in einem Vierleiternetz . .	23
2.15	Anordnung der Stamm- und Reglerwicklungen des rONTs a) Primärseitige Regelung b) Sekundärseitige Regelung . . . . .	24
2.16	Schematische Abbildung des Einsatzes eines SLRs bei Überlast im Netz auf einer langen Leitung . . . . .	25
2.17	Vereinfachtes ESB des SLR . . . . .	26
2.18	Mögliche Aufteilung des Spannungsbandes im ungestörten Betrieb . . . . .	27
3.1	Strukturdiagramm der fundamentalen Blöcke einer Phasenregelschleife . . . .	34
3.2	Strukturdiagramm des einphasigen PV-Systems . . . . .	34
3.3	Darstellung der Vereinfachten Reglerlogik des SLR . . . . .	35
3.4	Vereinfachte Darstellung der Ansteuerungslogik des SLRs . . . . .	36

3.5	Strukturdiagramm der fundamentalen Blöcke des rONT-Reglermoduls . . . . .	38
3.6	Gesamtmodell des NS-Strahl mit Platzierungsorte der Reglerarten . . . . .	39
4.1	Ermittlung der maximal übertragbaren, unsymmetrischen Leistung . . . . .	44
4.2	Betrachtung der Strangspannung am Leitungsende bei steigender unsymmetrischer Leistung auf Phase A mit und ohne SLR . . . . .	45
4.3	Betrachtung des symmetrischen Kriteriums am Leitungsende bei steigender unsymmetrischer Leistung auf Phase A mit und ohne SLR . . . . .	46
4.4	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 1 mit SLR	47
4.5	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 1 mit ZZ-Lastregler . . . . .	49
4.6	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 1 mit rONT	50
4.7	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 2 mit SLR	51
4.8	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 2 mit ZZ-Lastregler . . . . .	52
4.9	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 2 mit rONT	53
4.10	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit SLR bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende . . . . .	55
4.11	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit ZZ-Lastregler bei homogener Leistungsverteilung . . . . .	56
4.12	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit ZZ-Lastregler bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende . . . . .	57
4.13	Resultierende Grenzkurven des Auswertungsverfahrens für Szenario 3 mit rONT bei punktueller Leistungsverteilung am Leitungsende . . . . .	58
5.1	Spannungsverlauf aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch PV-Systeme	62
5.2	Unsymmetriefaktor aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch PV-Systeme . . . . .	63
5.3	Symmetrische Komponenten der Phasenspannung in Zeigerform des 1. Szenarios a) Mitsysteme b) Gegensystem c) Nullsysteme . . . . .	64
5.4	Spannungsverlauf aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch Elektrofahrzeuge . . . . .	66
5.5	Unsymmetriefaktor aller Reglerarten bei einem Leistungssprung durch Elektrofahrzeuge . . . . .	67
5.6	Symmetrische Komponenten der Phasenspannung in Zeigerform des 2. Szenarios a) Mitsysteme b) Gegensystem c) Nullsysteme . . . . .	68
6.1	Gesamtergebnis der Integrationspotentialsteigerung aller Reglerarten . . . . .	75

## Tabellenverzeichnis

2.1	Bedeutung der Abkürzungen aus der DIN-VDE-0100 . . . . .	8
2.2	Bedeutung der Kurzzeichen des NAYY Kabeltyps nach DIN VDE 0293-308 . . . . .	14
2.3	Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un- symmetrischer Leistungen . . . . .	28
3.1	Elektrische Parameter des Leitungstypen aus dem SimBench Datensatz . . . . .	30
3.2	Elektrische Parameter für die Modellierung in MATLAB . . . . .	31
3.3	Elektrische Parameter des Verteilungstransformators aus dem SimBench Da- tensatz . . . . .	31
3.4	Elektrische Parameter des Verteilungstransformators für die Parametrierung des MATLAB-Bausteins . . . . .	33
3.5	Elektrische Parameter des Zick-Zack Lastreglers für die Parametrierung des MATLAB-Bausteins . . . . .	38
3.6	Parameter des rONT Reglermoduls für das Simulink/MATLAB Modell . . . . .	39
3.7	Netzbeschreibende Parameter für das Gesamtmodell . . . . .	40
6.1	Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un- symmetrischer Leistungen für Szenario 1 . . . . .	72
6.2	Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un- symmetrischer Leistungen für Szenario 2 . . . . .	73
6.3	Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un- symmetrischer Leistungen für Szenario 3 . . . . .	74
6.4	Begrenzungskriterien für die Betrachtung der Integrationsfähigkeit weiterer un- symmetrischer Leistungen . . . . .	76



---

## Literatur

- [1] S. Meinecke, S. Drauz, A. Klettke und D. Srajlic, *SimBench - Elektrische Benchmarknetzmodelle, Dokumentation*. 2019.
- [2] H. Wirth. (14.10.2019). "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland." Fraunhofer ISE, Hrsg., Adresse: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html> (besucht am 16.11.2019).
- [3] Amprion GmbH, TransnetBW GmbH, 50Hertz Transmisson GmbH, Tennet TSO GmbH. (2018). "EEG-Anlagestammdaten zur Jahresabrechnung 2018," Adresse: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Anlagenstammdaten> (besucht am 02.06.2020).
- [4] R. Pardatscher, R. Witzmann, G. Wirth, G. Becker, M. Garhamer und J. Brantl, "Untersuchung zu den Auswirkung von Photovoltaikeinspeisung auf das Nieder- und Mittelspannungsnetz," *Energietechnische Gesellschaft; Internationaler ETG-Kongress*, 2011.
- [5] J. Meyer, F. Moller, S. Perera und S. Elphick, "General Definition of Unbalanced Power to Calculate and Assess Unbalance of Customer Installations," *Power Quality and Supply Reliability Conference, PQ*, 2019.
- [6] F. G. Dias, M. Mohanpurkar, A. Medam, D. Scoffield und R. Hovsopian, "Impact of controlled and uncontrolled charging of electrical vehicles on a residential distribution grid," eng, *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems; Institute of Electrical and Electronics Engineers; PMAPS*, 2018.
- [7] Kraftfahrtbundesamt. (). "Jahresbilanz der Neuzulassungen 2018," Adresse: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_node.html) (besucht am 11.02.2020).
- [8] M. Holt, "Optimizing Line-Voltage Regulators with regard to Power Quality," *Power Quality and Supply Reliability Conference, PQ*,
- [9] T. P. Bako, "Einsatz von Stromrichtern in der Energieversorgung zur Netzstützung und Fehlerstromlöschung," Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, Ruhr-Universität, Bochum, 2008.
- [10] DIN-EN-50160, Hrsg., *Merkmale der Spannung in öffentlichen Energieversorgungsnetzen*, 2010.

- 
- [11] A. J. Schwab, *Elektroenergiesysteme, Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*, 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, ISBN: 978-3-662-55315-2. DOI: 10.1007/978-3-662-55316-9.
- [12] M. Wagler und R. Witzmann, “Unsymmetrie in NS-Netzen durch dezentrale PV-Anlagen,” *Magazin für die Energiewirtschaft*, 2016.
- [13] DIN-VDE -0100, Hrsg., *Errichten von Niederspannungsanlagen*, 2009.
- [14] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1, Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik*, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [15] S. Papathanassiou, N. Hatziaargyriou und K. Strunz, “A Benchmark Low Voltage Microgrid Network,” in *GIGRE Symposium 2005*.
- [16] R. Marenbach, D. Nelles und C. Tuttas, *Elektrische Energietechnik, Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-1740-2. DOI: 10.1007/978-3-8348-2190-4.
- [17] R. R. Cichowski und M. Kliesch, Hrsg., *Kabelhandbuch*, ger, 8. Aufl., Frankfurt am Main: EW Medien und Kongresse, 2012, ISBN: 9783802210563.
- [18] G. Balzer und C. Neumann, *Schalt- und Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [19] A. Baghini, *Handbook of Power Quality*. Chichester, England und Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [20] S. Winter, *Schlussbericht, Vergleich von technischer Wirksamkeit sowie Wirtschaftlichkeit zeitnah verfügbarer Verfahren zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen mit starker dezentraler Einspeisung*, FNN, Hrsg., 2014.
- [21] C. Oramas-Piero, E. Vega-Fuentes und F. Déniz, “Genetic algorithm based control for unbalanced low voltage networks,” *AELIT International Annual Conference*, 2018.
- [22] J. Meyer, S. Hahle, P. Schegner und C. Wald, “Impact of electrical car charging on unbalance in public low voltage grids,” *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation; EPQU*, 2011.
- [23] F. Möller, J. Meyer und P. Schegner, “Load model of electric vehicles chargers for load flow and unbalance studies,” *Annual IEEE Computer Conference*, 2014.
- [24] A. Ul-Haq, C. Cecati, K. Strunz und E. Abbasi, “Impact of Electric Vehicle Charging on Voltage Unbalance in an Urban Distribution Network,” *Intelligent Industrial Systems*, 2015, ISSN: 2363-6912.
- [25] VDE ARN 4105, Hrsg., *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*, 2018.

- [26] R. Pardatscher, R. Witzmann, G. Wirth, G. Becker, M. Garhamer und J. Brantl, "Untersuchung zu den Auswirkungen von Photovoltaikeinspeisung auf das Nieder- und Mittelspannungsnetz," *Internationaler ETG-Kongress*, 2011.
- [27] D. Schwanz, F. Möller, S. K. Ronnberg, J. Meyer und M. H. Bollen, "Stochastic assessment of voltage unbalance due to single-phase-connected solar power," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, ISSN: 0885-8977.
- [28] M. Wagler und R. Witzmann, "Effects of asymmetrically connected PV and battery systems on the node voltages and pen-conductor currents in low-voltage grids," *CIREED - Open Access Proceedings Journal*, 2017.
- [29] H. Rui, S. Lang, H. Kreten und W. H. Wellßow, "Guidelines for the Integration of Voltage Control Applications," *International ETG Congress 2015*, 2015.
- [30] P. Fristot, O. Constant und C. Moncet, "3-PHASE LOW VOLTAGE NETWORK LOAD BALANCER, A COST EFFECTIVE SOLUTION TO LINE VOLTAGE VARIATIONS," *CIREED*, 2015.
- [31] H. L. Jou, J.-C. Wu, K.-D. Wu, W.-J. Chiang und Y.-H. Chen, "Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, ISSN: 0885-8977.
- [32] O. V. Kulkarni und M. K. Mishra, "Power quality improvement using Zig-Zag transformer and DSTATCOM in three phase power distribution system," *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2013.
- [33] D. Dohnal. (). "On-Load Tap-Changers for power Transformers." Maschinenfabrik Reinhausen GmbH 2013, Hrsg., Adresse: <https://www.reinhausen.com/de/DesktopDefault.aspx?tabid-11/>.
- [34] Y. Li und P. A. Crossley, "Voltage control on unbalanced LV networks using tap changing transformers," *11th IET International Conference*, 2012.
- [35] M. Holt, "Erforschung eines Simulations- und Messkonzeptes für Niederspannungslängsregler," Master Thesis, Technische Universität Dortmund, 2016.
- [36] H. Wang, T. Wang, M. Xue, J. Sun, W. Xiong und Y. Hou, "Research on Overload Capability of Dry Distribution Transformer Based on Hot Spot Temperature Model," *22nd International Conference*, 2019.
- [37] MathWorks. (2020). "MATLAB Manuel: Simscape Electrical, Model and simulate electronic, mechatronic, and electrical power systems," Adresse: <https://de.mathworks.com/help/physmod/sps/>.
- [38] A. Mann, A. Karalkar, L. He und M. Jones, "The design of a low-power low-noise phase lock loop," *Institute of Electrical and Electronics Engineers, International Symposium on Quality Electronic Design et al. 2010 - 2010 11th International Symposium*, 2010.



# Eidesstattliche Versicherung (Affidavit)

Jahn, Robert

149021

Name, Vorname  
(Last name, first name)

Matrikelnr.  
(Enrollment number)

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit\* mit dem folgenden Titel selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

I declare in lieu of oath that I have completed the present Bachelor's/Master's\* thesis with the following title independently and without any unauthorized assistance. I have not used any other sources or aids than the ones listed and have documented quotations and paraphrases as such. The thesis in its current or similar version has not been submitted to an auditing institution.

Titel der ~~Bachelor~~/Masterarbeit\*:  
(Title of the ~~Bachelor's~~/ Master's\* thesis):

Einsatz eines Niederspannungslängsreglers zur Behebung von Spannungsunsymmetrien hervorgerufen durch Elektromobilität und dezentrale Energieerzeugung

\*Nichtzutreffendes bitte streichen  
(Please choose the appropriate)

Dortmund, 16.06.2020

Ort, Datum  
(Place, date)

Unterschrift  
(Signature)



## Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG - ).

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird ggf. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

## Official notification:

Any person who intentionally breaches any regulation of university examination regulations relating to deception in examination performance is acting improperly. This offense can be punished with a fine of up to €50,000.00. The competent administrative authority for the pursuit and prosecution of offenses of this type is the chancellor of TU Dortmund University. In the case of multiple or other serious attempts at deception, the examinee can also be unenrolled, section 63, subsection 5 of the North Rhine-Westphalia Higher Education Act (*Hochschulgesetz*).

The submission of a false affidavit will be punished with a prison sentence of up to three years or a fine.

As may be necessary, TU Dortmund will make use of electronic plagiarism-prevention tools (e.g. the "turnitin" service) in order to monitor violations during the examination procedures.

I have taken note of the above official notification:\*\*

Dortmund, 16.06.2020

Ort, Datum  
(Place, date)

Unterschrift  
(Signature)



**\*\*Please be aware that solely the German version of the affidavit ("Eidesstattliche Versicherung") for the Bachelor's/ Master's thesis is the official and legally binding version.**

