



Bachelorabschlussarbeit

Thema auf Deutsch: Untersuchung von netzseitigen
Sekundäreinflüssen als Folge von dynamische
Umrichterregelprozessen

Thema auf Englisch: Investigation of grid-side secondary
influences as a result of dynamic converter control processes

Fachbereich: Ingenieurwissenschaften

Student: Fares, Belaiba

Matrikelnummer: 6022112

Fachsemester: 9

Ersterprüfer: Prof. Dr.- Ing. Sebastian, Koj

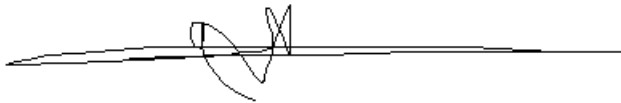
Zweiterprüfer: Dr.- Stefan, Geißendörfer

Abgabetermin: 05.10.2022

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Stellen in meiner Arbeit, die textlich oder sinngemäß aus anderen Werken entnommen wurden, habe ich in jedem Fall unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Wilhelmshaven 05.10.2022

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke, positioned above a solid horizontal line.

Fares Belaiba

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Abstract.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Theoriebezug/Grundlagen.....	2
2.1 Topologie.....	2
2.2 Funktion und Einsatz von MOSFET Leistungshalbleitern.....	2
2.3 Wechselrichteransteuerung/Pulsweitenmodulation.....	3
2.4 Stromnetz.....	4
2.5 Sekundäreinflüsse.....	5
3 Rahmenbedingungen und Versuchsumgebung.....	7
3.1 Versuchsbeschreibung.....	11
3.2 Versuchsszenarien.....	11
4 Versuchsdurchführung & Auswertung.....	13
4.1 Simulativer Versuch.....	13
4.1.1 Versuchsauswertung & Interpretation des simulativen Versuchs.....	13
4.1.2 Zusammenfassung des simulativen Versuchs.....	24
4.2 Hardwarebasierter Versuch.....	25
4.2.1 Versuchsaufbau & Komponentenbeschreibung.....	25
4.2.2 Versuchsauswertung & Interpretation des hardwarebasierten Versuchs.....	27
4.2.3 Zusammenfassung des hardwarebasierten Versuchs.....	43
5 Vergleich von Simulation und Hardware.....	43
6 Zusammenfassung.....	45
7 Literaturverzeichnis.....	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: B6- Vollbrückenschaltung bestehend aus drei Halbbrücken-Leistungsmodulen [6].....	2
Abbildung 2: Einphasige Wechselrichter [7].....	3
Abbildung 3: Pulsweitenmodulation bei Steuerung eines Halbbrücken-Wechselrichters [7].....	4
Abbildung 4: Graphische Darstellung vom Referenznetz MONA 1 [4].....	4
Abbildung 5: Control Schleife zwischen simulierten Hardwareteil und der Reglereinheit.....	7
Abbildung 6: Simulationsmodell der Anlage.....	7
Abbildung 7: Simulation der DC-Zwischenkreis	8
Abbildung 8: Simulationsabschnitt des dreiphasigen Wechselrichters	8
Abbildung 9: Regeleinheit Wechselrichter - Strom-Implementierung.....	9
Abbildung 10: Bestimmung der maximale Schaltfrequenz.....	9
Abbildung 11: Graphische Darstellung von Strom-Referenznetz MONA 3 [4].....	10
Abbildung 12: Stromverlauf Szenario 1	12
Abbildung 13: Stromverlauf Szenario 2	12
Abbildung 14: Dreiphasiger Verlauf der Netzspannung (U_{L1} =blau, U_{L2} =rot, U_{L3} =grün)	14
Abbildung 15: Simulativer Versuch: Stromverlauf von Szenario 1 (Cyan) und der dreiphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	14
Abbildung 16: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz.....	15
Abbildung 17: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1(Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters und die Zeitverzögerung dazwischen bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz.....	15
Abbildung 18: Simulativer Versuch: Szenario 1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	16
Abbildung 19: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1(Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	17
Abbildung 20: Simulativer Versuch: Szenario1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	17
Abbildung 21: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1(Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz	18
Abbildung 22: Simulativer Versuch: Szenario 1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz	19
Abbildung 23: Simulativer Versuch: Stromverlauf von Szenario 2 (Cyan) und der dreiphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	19
Abbildung 24: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	20
Abbildung 25: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	20
Abbildung 26: Simulativer Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	21
Abbildung 27: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der einphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters I_{L2} (rot)bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	22
Abbildung 28: Simulativer Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	22

Abbildung 29: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2(Cyan) und der einphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz	23
Abbildung 30: Simulativer Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz	24
Abbildung 31: Versuchsaufbau des hardwarebasierten Versuches.....	25
Abbildung 32: B-Box Rapid Control prototyping [6].....	26
Abbildung 33: Dreiphasiger Verlauf der Netzspannung (U_{L1} =blau, U_{L2} =rot, U_{L3} =grün)	27
Abbildung 34: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt der dreiphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz.....	28
Abbildung 35: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz ...	28
Abbildung 36: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	29
Abbildung 37: Szenario 1: FFT Messung bei einem Strom von 4 A (Schaltfrequenz =22 kHz)	30
Abbildung 38: Szenario 1: Messungen der fünften und dreizehnten Harmonischen bei einem Strom von 4 A.....	30
Abbildung 39: Szenario 1: FFT Messung bei einem Strom von 8 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)	31
Abbildung 40: Szenario 1: Messungen der fünften und elften Harmonischen bei einem Strom von 8 A	31
Abbildung 41: Szenario 1: FFT Messung bei einem Strom von 6 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)	32
Abbildung 42: Szenario 1: Messungen der fünften und elften Harmonischen bei einem Strom von 6 A	32
Abbildung 43: Hardwarebasierter Versuch: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	33
Abbildung 44: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	33
Abbildung 45: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1 - Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz .	34
Abbildung 46: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz	35
Abbildung 47: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz ...	36
Abbildung 48: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der Stromverlauf bei der ersten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (blau) Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	36
Abbildung 49: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz	37
Abbildung 50: Szenario 2: FFT Messung bei einem Strom von 3,5 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)	38
Abbildung 51: Szenario 2: Messungen der dritten und 13. Harmonischen bei einem Strom von 6 A	38
Abbildung 52: Szenario 2: FFT Messung bei einem Strom von 10 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)	39
Abbildung 53: Szenario2: FFT Messung bei einem Strom von 6 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)	40
Abbildung 54: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz .	40
Abbildung 55: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz	41
Abbildung 56: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz .	42
Abbildung 57: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz	42

Abstract

Innerhalb der Arbeitsgruppe Netztechnologie am DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme (DLR-VE) werden systemstabilisierende Netzressourcen und deren Regelungsstrategien für dezentrale Stromnetzarchitekturen mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Primärenergieträgern untersucht. [1]

Diese Forschungsarbeit wird im Rahmen des Forschungsprojekts „SINED“ durchgeführt, welches das Ziel hat, die bestehende Systemdienstleistung (SDL) für zukünftige Stromnetze weiterzuentwickeln und die SDL an die sich ändernden Anforderungen und Möglichkeiten anzupassen, die sich aus der digitalen Transformation und der fortschrittlichen Energiewende ergeben. [1]

Diese Bachelorarbeit untersucht die sekundären Einflüsse eines Wechselrichters mit einem dynamischen Verhalten auf eine referenzierbare Niederspannungsnetzarchitektur zunächst in einer rein simulierten Umgebung, und dann in einer hybriden Umgebung mit einem realen Wechselrichter und einem simulierten Netzmodell. Im Rahmen dieser Arbeit wird sowohl eine simulative als auch hardwarebasierte Versuchsumgebung aufgebaut, mit der zwei unterschiedlich dynamische Wechselrichter-Verhaltensweisen untersucht werden, um die unterschiedlichen Netzreaktionen zu beobachten. Insbesondere werden sekundäre Netzeinflüsse wie die Netzimpedanz und der Oberwellenanteil untersucht. Es wird überprüft ob die Grenzwerte eingehalten werden bzw. im Fall der Abweichung ein Vorschlag gemacht, wie man der Grenzabweichung entgegenwirken kann. Abschließend wird ein Vergleich zwischen den simulierten und den hardwarebasierten Versuchsergebnissen durchgeführt.

1 Einleitung

In Photovoltaik-Systemen verursachen Wolkentransienten zum Beispiel schnelle Schwankungen in der Leistung, die die Spannungspegel in einem Niederspannungsnetz erheblich beeinflussen können. Diese volatile Erzeugung kann zu Spannungsschwankungen und schließlich zu einer Verletzung der bestehenden Netzqualitätsstandards führen. [2]

Dezentrale Erzeugungseinheiten sind in den meisten Fällen auf einen Wechselrichter angewiesen, um den Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln, der vom Stromnetz integriert und genutzt werden kann. [3]

Diese Bachelorarbeit führt Versuche an einem MONA Stromreferenznetz durch, während ein Wechselrichter mit unterschiedlichen Lastcharakteristika an verschiedenen Netzknoten im Netz integriert wird. [4] Dies dient dazu, um Änderungen, die unerwünschten Störungen und mögliche Sekundäreinflüsse im System zu untersuchen, die entsprechend anschließend bei der Entwicklung von Umrichter-Algorithmen für zukünftige Energienetze berücksichtigt werden sollten. Diese hier erarbeiteten Systemgrenzen können zukünftig bei der Entwicklung von SDL-Algorithmen für zukünftige Energienetze den Rahmen setzen und Einfluss finden.

Diese Bachelorarbeit untersucht die Fähigkeit eines elektrischen Netzes, mit dynamischen Laständerungen umzugehen sowie vorhandene Systemgrenzen zu ermitteln. Unabhängig von der Größe oder Zusammensetzung des Stromnetzes sollte eine zuverlässige und richtig ausgelegte Stromversorgung einige grundlegende Anforderungen erfüllen:

- Das Stromnetz muss in der Lage sein, die wechselnde Last zu bewältigen.
- Stromqualität und Systemstabilität sicherstellen (Spannung, Impedanz und Zuverlässigkeit). [3]
- Reduktion von Kosten und Umweltbelastung.

Mögliche Ursachen bei stark dynamischen Verhalten der Wechselrichter beziehungsweise einer hohen Durchdringung von Erzeugungssystemen sind die Erzeugung von Spannungsunsymmetrie im Netz, die sich nachteilig auf die am Netz angeschlossenen Verbraucher und Geräte auswirkt, was beispielsweise zu Überhitzung und schneller thermischer Alterung führt. [3]

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung möglicher Sekundäreinflüsse des Stromnetzes, die durch dynamische Umrichterregelprozessen resultieren. Neben einer rein simulativen Methode wird auch eine hybrider Lösungsansatz mit realer Wechselrichterkomponente und simulativer Netzumgebung untersucht.

Diese Bachelorarbeit beginnt mit dem theoretischen Bezug der Experimente, dem Aufbau und der Durchführung und endet mit einem Vergleich der beiden Experimente und einem Blick auf die möglichen sekundären Einflüsse auf die Netzqualität.

2 Theoriebezug/Grundlagen

Dieses Kapitel zeigt die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen auf. So wird zum Anschluss von dezentralen Erzeugungsanlagen an das Stromnetz werden Wechselrichter benötigt. Demzufolge wird innerhalb dieser Arbeit die B6-Vollbrückenschaltung Umrichter untersucht, auf die nachfolgend genauer eingegangen wird. Außerdem werden Themen wie der Einsatz von Leistungshalbleitern und die Ansteuerung von Wechselrichtern genauer betrachtet. Anschließend wird auf das Stromnetz eingegangen und die Sekundäreinflüsse definiert.

2.1 Topologie

Zum Anschluss von dezentralen Erzeugungsanlagen an das Stromnetz werden Wechselrichter benötigt. Innerhalb dieser Arbeit wird eine B6-Vollbrückenschaltung als Umrichtertopologie untersucht. Der Aufbau einer B6-Vollbrückentopologie ist in Abbildung 1 dargestellt.

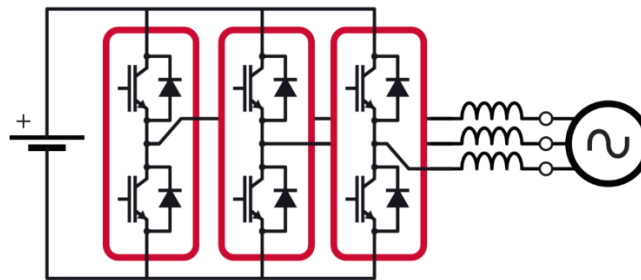


Abbildung 1: B6- Vollbrückenschaltung bestehend aus drei Halbbrücken-Leistungsmodulen [6]

Die Topologie setzt sich aus drei zueinander parallel geschalteten Halbbrücken-Leistungsmodulen mit zwei Siliziumkarbid (SiC)-MOSFETs zusammen. SiC-MOSFETs wurden wegen ihrer hohen Effizienz und insbesondere wegen ihrer hohen Schaltfrequenzen für diese Bachelorarbeit ausgewählt.[6] Über Lichtwellenleiteringänge (LWL) wird über ein optisches Signal eine direkte Ansteuerung der Gate-Eingänge geboten, während galvanisch getrennte On-Board-Sensoren analoge Messungen in Bezug auf die DC-Spannung und den AC-Ausgangsstrom liefern. Weitere Messung wie beispielsweise die AC-Phasenspannungen oder der DC-Strom werden mithilfe externer Sensoren aufgenommen. Die Module bieten außerdem einen integrierten Schutz gegen Überstrom, Überspannung und Übertemperatur. Die Ansteuerung des Leistungsmoduls erfolgt über den Rapid Prototyping Controller (RCP), der über Lichtwellenleiter direkt mit dem Gate der MOSFETs verbunden ist. [6]

In dieser Arbeit werden drei PEB 8024 Halbbrückenmodule des Herstellers Imperix parallel geschaltet um die Topologie einer B6-Vollbrückenschaltung darzustellen. Somit kann der Wechselrichter für dreiphasige Netzanwendungen genutzt werden. Durch die Verwendung von MOSFETs-Leistungshalbleitern, kann die B6-Brückenschaltung bidirektional, das heißt sowohl im Gleich- als auch im Wechselrichterbetrieb, arbeiten. [6] In diesem Fall und wie Abbildung 1 gezeigt, arbeitet die Schaltung als Wechselrichter.

2.2 Funktion und Einsatz von MOSFET Leistungshalbleitern

MOSFET ist die Abkürzung für Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor. Ein MOSFET ist ein spannungsgesteuerter Halbleiter, der zur Steuerung von Strömen verwendet werden kann.

Häufige Einsatzgebiete zeigen MOSFETs im Bereich Umrichtertechnik, hier am Beispiel eines einphasigen Wechselrichters. Die Hauptfunktion eines Einphasigen-Wechselrichters besteht darin, eine Eingangsgleichspannung in eine symmetrische Ausgangswchelspannung mit der gewünschten Amplitude und Frequenz umzuwandeln. [12] Die Wellenformen der

Ausgangsspannung idealer Wechselrichter sollten sinusförmig sein. Die Wellenformen praktischer Wechselrichter sind jedoch nicht ideal und enthalten gewisse Oberwellen. [13] Die Hauptkomponenten des Umrichters sind die Leistungshalbleiter. Diese haben die Fähigkeit, den Verlauf des Stroms zwischen Drain und Source durch das Gate-Signal zu steuern. [6]

In diesem Projekt wird ein 3-Phasen-Wechselrichter zu den Untersuchungen hinzugezogen, um dreiphasige Lasten ans Stromnetz zu koppeln.

2.3 Wechselrichteransteuerung/Pulsweitenmodulation

Um den Wechselrichter über das Gate anzusteuern, ist eine Pulsweitenmodulation (PWM) erforderlich. Hierzu ist in Abbildung 2 ein einphasiger Umrichter abgebildet, an dem die Ansteuerung und PWM-Generierung genauer erläutert wird.

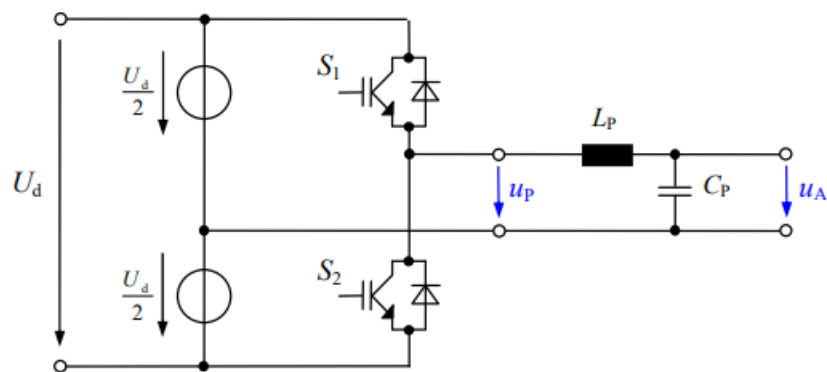


Abbildung 2: Einphasige Wechselrichter [7]

Die Schaltelemente S1 und S2 in dem einphasigen Wechselrichter werden abwechselnd eingeschaltet. Auf diese Weise können zwei Spannungszustände am Brückenweitzgang eingestellt werden: [7]

$$u_P = \begin{cases} +\frac{U_d}{2} & \text{für } S_{1\text{ein}} \text{ und } S_{2\text{aus}} \\ -\frac{U_d}{2} & \text{für } S_{1\text{aus}} \text{ und } S_{2\text{ein}} \end{cases}$$

Für die Herleitung der Umschaltpunkte werden sogenannte Modulationsverfahren eingesetzt. Das wohl bekannteste Modulationsverfahren ist die Pulsweitenmodulation. [7]

PWM ist eine Art der digitalen Modulation, bei der die Spannung in schneller Folge ein- und ausgeschaltet wird. Bei der PWM handelt es sich in der Regel um eine Rechtecksignal mit wechselnden Ein- und Ausschaltzeiten bei konstanter Frequenz und Amplitude. Über dieses Verhältnis von Spannungsimpulsen am Gain kann die gewünschte Wechsel-Ausgangsspannung erzeugt werden. [7]

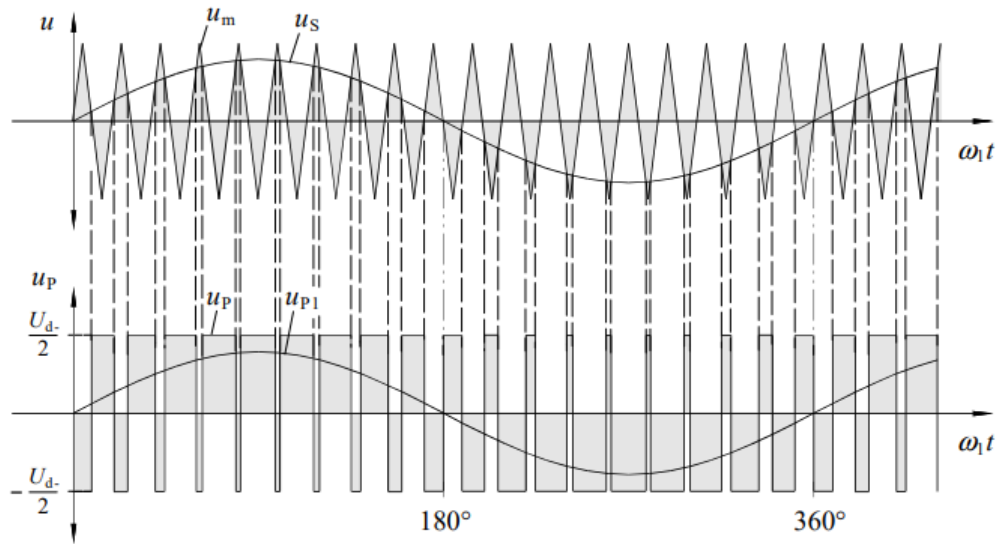


Abbildung 3: Pulsweitenmodulation bei Steuerung eines Halbbrücken-Wechselrichters [7]

U_m : Modulationsspannung

U_s : Steuerspannung

U_p : Pulsweitenmodulierte Spannung (Ausgang des Brückenzeigs)

Abbildung 3 zeigt, dass mit dem PWM-Verfahren das Ansteuerungssignal für die Gates der MOSFET-Leistungshalbleiter erzeugt werden kann.

2.4 Stromnetz

In dieser Arbeit werden die verwendeten Stromnetze die typischen Netze von MONA2030 sein, wie in der Abbildung gezeigt.

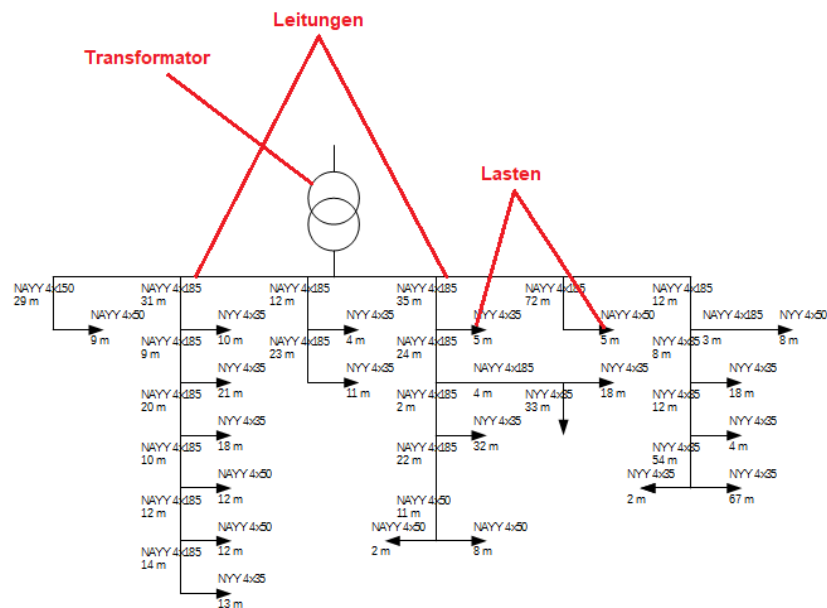


Abbildung 4: Graphische Darstellung vom Referenznetz MONA 1 [4]

Unabhängig von der Art des Stromnetzes, besitzen alle Mona 2030-Niederspannungsnetze einen ähnlichen Aufbau unter Nutzung von gleichen Komponenten.

Der Transformator wandelt die Mittelspannung in Niederspannung um und stellt damit die Spannung für das unterlagerte Netz. Die Leitungen verbinden die einzelnen Komponenten untereinander und weisen spezifischen Leitungsparameter auf. Die Knoten zwischen den einzelnen Leitungsabschnitten bilden die Abzweigungen zu den Lasten. [4]

Dabei verfügt jeder Knoten über einen oder mehrere Lastenabgänge, die beispielsweise an einen Haushalt oder an eine erneuerbare Energiequelle angeschlossen sind. [4]

Um die dezentralen Erzeugungseinheiten mit dem Netz zu verbinden, dienen die Wechselrichter als Bindeglied.

2.5 Sekundäreinflüsse

Sekundäre Einflüsse auf ein Netz sind jede Art von ungewöhnlichem und unerwünschtem Verhalten, das in Spannung, Strom oder Impedanz zu sehen ist. [8]

Das hochdynamische Verhalten eines Wechselrichters beziehungsweise die hohe Durchdringung von dezentralen Erzeugungseinheiten, welche über Wechselrichter an das Niederspannungsnetz gekoppelt sind, können eine Spannungsunsymmetrie im Netz verursachen.[4] Diese Asymmetrie könnte eine Überspannung in Niedriglastperioden, eine Überlastung oder eine instabile Impedanz verursachen oder die Reaktionszeit des Stromnetzes beeinflussen.[4] Es ist wichtig, die Impedanz des Netzes zum Zeitpunkt der Steuerung und Modellierung des Systems zu kennen und zu beobachten, weil eine hohe Netzimpedanz auf die Wechselrichter zurückwirken könnte, was zu einem instabilen System führen könnte. [10] Diese Information ist notwendig, um die Stromqualität bei Schwankungen der Belastung eines Stromnetzes aufrechtzuerhalten. [9]

Im Allgemeinen wird wie folgt die Impedanz (Z) berechnet, siehe Tabelle 1: [16]

Tabelle 1: Formeln und Einheiten

$\underline{Z} = R + jX = \underline{Z} e^{j\varphi}$	R: Widerstand [Ω] (Realteil) X: Reaktanz [Ω] (Imaginärteil) φ : Phasenverschiebungswinkel [$^\circ$]	(1)
Mit: $R = \frac{1}{\Delta U}$	I: Strom [A] U: Spannung [V]	(2)
$X_L = 2\pi fL = \omega L$	X_L : Induktiver Blindwiderstand [Ω] f: Frequenz [Hz] L: Induktivität [H]	(3)
$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$	X_C : Kapazitiver Blindwiderstand [Ω] C: Kapazität [F]	(4)

Gemäß Referenz [3] beträgt die Netzimpedanz in Niederspannungsnetzen zwischen $0,04 \Omega \leq Z \leq 0,2 \Omega$ und der Phasenwinkel wird zwischen $27^\circ \leq \varphi \leq 75^\circ$ angenommen.

Eine der wichtigsten Messungen bei der Überprüfung der Netzqualität sind die Oberschwingungen. Oberschwingungen sind Spannungen oder Ströme mit Frequenzanteilen, die ganzzahlige Vielfache der Netzfrequenz sind. In deutschen Netzen beträgt die Netzfrequenz 50 Hz. Tabelle 2 zeigt den maximalen Oberschwingungsstrom je nach Variation von Ordnung der individuellen Harmonischen nach der Norm IEC 61000-3-2. [13] Die hier betrachtete Anlage (Wechselrichtersystem) ist in die Klasse A einzuordnen. [13]

Tabelle 2: Maximaler Oberschwingungsstrom je nach Variation von Ordnung der individuellen Harmonischen [13]

Oberschwingungsordnung n	Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes A
Ungeradzahlige Oberschwingungen	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$
Geradzahlige Oberschwingungen	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$

Um einen stabilen Netzbetrieb sicherzustellen, müssen die gemessenen Oberschwingungsanteile innerhalb der in Tabelle 2 festgelegten Grenzen vorliegen.

Weitere Regelungen zur Einhaltung von Netzstabilitätsgrenzen sind in der Norm DIN EN 50160 Bericht festgehalten. Diese Norm legt die wichtigsten Eigenschaften fest, die die Netzspannung an der Versorgungsklemme des Benutzers erfüllen muss. Sie gilt für öffentliche Nieder-, Mittel- und Hochspannungs-Wechselstromnetze unter normalen Betriebsbedingungen. [3] Laut DIN EN 50160 dürfen die Schwankungen der Versorgungsspannung unter normalen Betriebsbedingungen 10 % nicht überschreiten und die Überspannung in Klemme und Leitungen darf 1,5 kV RMS nicht überschreiten. [3]

3 Rahmenbedingungen und Versuchsumgebung

Zur Untersuchung von Einflüssen durch dynamisches Umrichterverhalten auf den Netzbetrieb wird sowohl eine rein simulative Untersuchung als auch ein hybrider Lösungsansatz untersucht.

Im Allgemeinen setzt sich der Versuchsaufbau aus drei wesentlichen Umgebungen zusammen: der Verbraucherseite (DC-Speisung), dem Wechselrichter einschließlich der zugehörigen Regelung und dem Netzmodell.

Das Anlagenmodell kann sowohl simulativ (siehe Abbildung 6) als auch real in Hardware (DC Quelle + B6 Brückentopologie auf SiC Basis + Netzstellende Komponente) abgebildet werden, jedoch mit der gleichen Regelung angesteuert werden. Es entsteht eine Schleife zwischen dem System (Plant) und der Regelung durch den Austausch von Messgrößen und Ansteuerungssignalen.

So werden die im System gemessenen DC- und AC-Spannungen und Ströme an die Reglerinstanz übergeben. Die Regeleinheit nutzt diese Messgrößen dann wiederum um die PWM-Signale der Leistungshalbleiter zu generieren. Außerdem werden die gemessenen Größen zur Betriebsführung und Relaisansteuerung weiterverwendet.

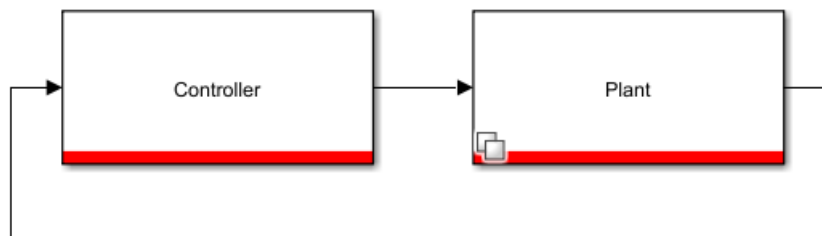


Abbildung 5: Control Schleife zwischen simulierten Hardwareteil und der Reglereinheit

Abbildung 5 zeigt, die Matlab/Simulink-Schleife zwischen einem Steueralgorithmus und dem zu testenden System.

Das System (Plant) beschreibt die Anlagenkomponenten eines dreiphasigen netzkoppelten Wechselrichtersystems und besteht aus drei Hauptteilen, dem DC-Zwischenkreis, dem Wechselrichter und dem Stromnetz. (Siehe Abbildung 6)

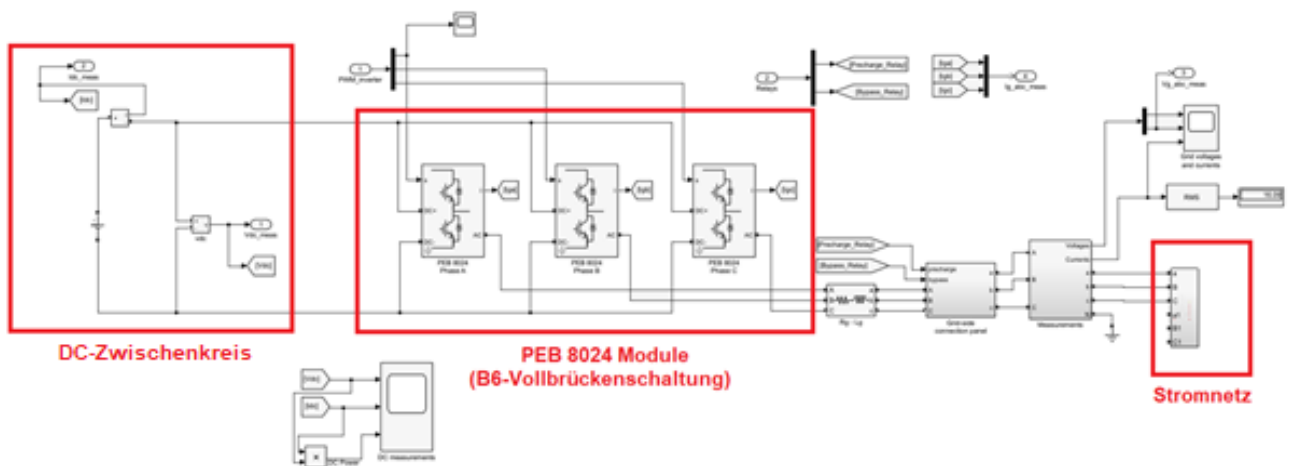


Abbildung 6: Simulationsmodell der Anlage

DC-Zwischenkreis

Wie links in Abbildung 6 zu sehen, ist der DC Zwischenkreis gespeist aus einer DC Quelle mit mindestens $U_{DC} = 700 \text{ V}$. Um Ausgangsseitig eine stabile Wechselspannung von $230 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$ zu erzeugen, ist es erforderlich, dass die DC-Zwischenkreisspannung nicht unter die Mindestspannung von 700 V fällt. Diese Mindestspannung berechnet sich unter Berücksichtigung eines Puffers wie folgt:

$$U_{DC,min} = U_{RMS,AC} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} + 10\% = 230 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 1,1 = 622,25 \text{ V} \quad (5)$$

Die DC Seite ist gleichzusetzen mit der Anbindung einer dezentralen Erzeugungseinheit, wie beispielsweise einer PV-Anlage. Dessen Spannungsausgang muss allerfings mindestens auf die 700 V Zwischenkreisspannung hochgesetzt werden, um netzeinspeisend zu fungieren.

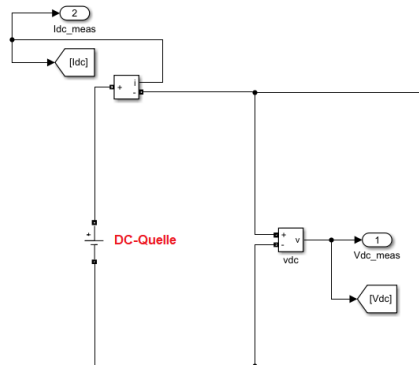


Abbildung 7: Simulation der DC-Zwischenkreis

Wechselrichter

Der Wechselrichter besteht in diesem Fall aus drei PEB 8024-Modulen von Imperix, die parallel geschaltet sind, um eine B6-Vollbrückenschaltung (3-phasig) darzustellen. Die simulierten Halbbrücken-Blöcke des Wechselrichters sind mit den Angaben vom Hersteller parametrisiert und repräsentieren deren Eigenschaften. Die Halbbrückenmodule mit je zwei SiC-Leistungs-MOSFETs verfügen über eine maximale Strombelastbarkeit von $I_{max} = 36 \text{ A}$ und einer maximalen Spannungsfestigkeit von $U_{max} = 1200 \text{ V}$. Die Pulsweitenmodulation erfolgt innerhalb des Controller-Blocks.

Der rechte Teil der Abbildung umfasst eine relaisgesteuerte Netzkopplung zum Stromnetz, einem MONA 3 Referenznetz [4].

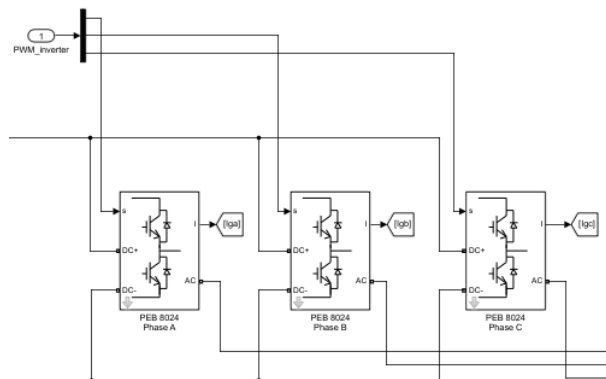


Abbildung 8: Simulationsabschnitt des dreiphasigen Wechselrichters

Regeleinheit: Strom-Implementierung

Die Stromimplementierung zur Leistungsvorgabe erfolgt auf der AC Seite des Wechselrichters. Hierbei wird der Stromregelung der Spitzenstromwert, siehe Formel 6, vorgegeben. Ein Einblick in die Stromregelung basierend auf einem PI-Regler zeigt Abbildung 9.

$$\hat{I} = I_{RMS} \cdot \sqrt{2} \quad (6)$$

Die Stromsollwertvorgabe erfolgt als Eingangssignal der AC-Stromregelung zur Generierung der PWM aller drei Phasen.

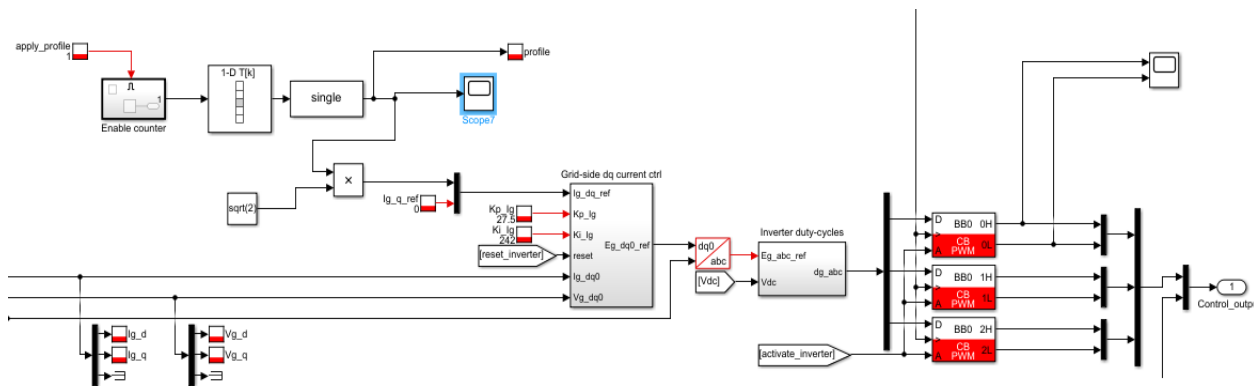


Abbildung 9: Regeleinheit Wechselrichter - Strom-Implementierung

Der maximal zulässige Strom auf der DC-Seite des Wechselrichters beträgt 16 A, sodass die maximale Leistung 11 kW beträgt.

Maximale Leistungsübertragung:

$$P_{max} = 3 \cdot I_{Max} \cdot U_{Netz} = 3 \cdot 16 \text{ A} \cdot 230 \text{ V} \approx 11 \text{ kW} \quad (7)$$

Nach Abbildung 10 lässt sich die maximale Schaltfrequenz unter Berücksichtigung der maximalen Strombelastbarkeit der Leistungshalbleiter und der anliegenden Gleichspannung am Zwischenkreis bestimmen. Die maximale Schaltfrequenz des Wechselrichters bei einem Strom von $I=16\text{A}$ und einer Gleichspannung $U_{DC}=700\text{V}$ beträgt somit $f_{max} \approx 175\text{kHz}$. Unter Wahrung eines Puffers, liegt die in diesem Projekt verwendete maximale Schaltfrequenz beträgt bei $f_{max}=150\text{kHz}$, um ein Überschreiten der Grenzwerte zu vermeiden.

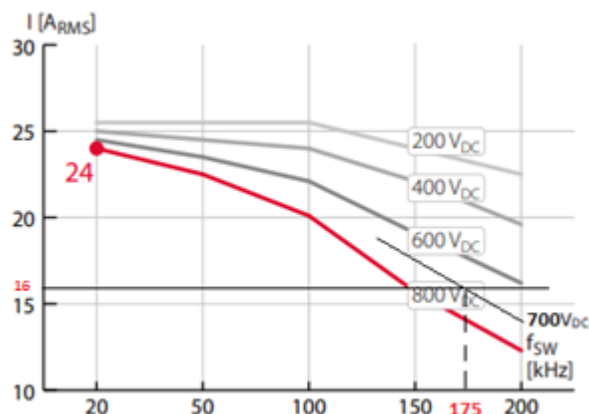


Abbildung 10: Bestimmung der maximale Schaltfrequenz

Netzmodell

Das Projekt „MONA2030“ schlägt die Verwendung von neun referenzierbaren Niederspannungsnetzarchitekturen. [4] Für diese Arbeit wird das Stromnetz „MONA3“ verwendet. Dieses Netz besteht aus einem Transformator (11kV/0,4kV) und sechs Lasten, welche über Leitungen miteinander verbunden sind. Im Modell werden die verwendeten Leitungsparameter zur realitätsnahen Netznachbildung eingesetzt. Der Wechselrichter ist an der Stelle eines der Lastknoten mit dem Netz verbunden, die anderen Lastknoten werden als normale Haushalte betrachtet, hierfür werden die Lastprofile der HTW Berlin verwendet [15]. Der Wechselrichter wird sowohl einmal am dichtesten Netzanschlusspunkt (NAP) zu Transformator liegend als auch am entferntesten NAP untersucht. Der „MONA 3“ Stromnetz wird durch einen Regatron-Generator (Netzgerät) repräsentiert.

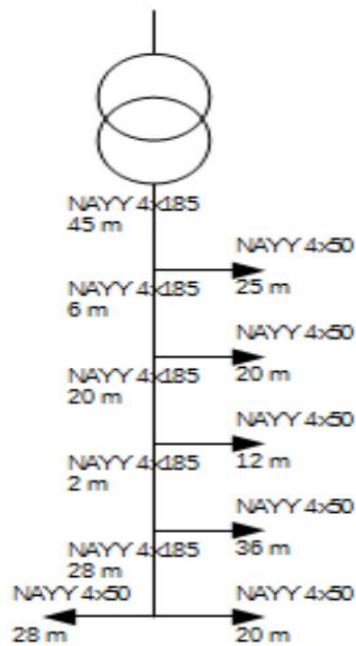


Abbildung 11: Graphische Darstellung von Strom-Referenznetz MONA 3 [4]

3.1 Versuchsbeschreibung

Wie bereits erläutert wird der Versuch zur Untersuchung der Netzsekundäreinflüsse unter zwei unterschiedlichen Ansätzen betrachtet: dem rein simulativen und dem hybriden Ansatz. Die Unterschiede im Versuchsaufbau sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3 Übersicht der Versuchskomponenten

	Simulativer Ansatz	Hybrider Ansatz (Hardwarebasiert)
DC-Speisung	Simulierte DC-Speisung aus konstanter DC-Quelle mit $U_{DC}=700\text{ V}$	Hardware: Delta Electronika DC-Quelle $U_{DC}= 700\text{ V}$ Strombegrenzung: + 20 A Leistungsbegrenzung: +13 kW
3-phasiger Wechselrichter	Simuliertes Modell eine 3-phasigen Wechselrichtermodells B6 Brückentopologie inkl. Simulierter Relaisansteuerung	Hardware: B6 Brückentopologie 3 parallel geschaltete SiC-Halbrückenleistungsmodule (PEB 8024/ Imperix) inkl. Relaissteuerung
Netzmodell	Simuliertes MONA 3 Referenzmodell [4]	Simuliertes MONA 3 Referenzmodell [4]

3.2 Versuchsszenarien

Die Leistungsprofile werden anhand von zwei verschiedenen Stromverlaufs-Szenarien dem Umrichter vorgegeben: Die Szenarien weisen jeweils ein unterschiedliches dynamisches Verhalten auf. Die Charakteristischen Eigenschaften der Szenarien-Verläufe sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Szenarien Einstellungen

	Signalverlauf	Min. Leistung	Max. Leistung	DC Spannung	Max. Strom	Simulationszeit	Schaltfrequenz
Szenario 1	Softstufige Treppe	2800 W	5600 W	700 V	8 A	5 s	22 kHz
							100 kHz
							150 kHz
Szenario 2	Starkstufige Treppe	2800 W	11,2 kW	700 V	15,5 A	5 s	22 kHz
							100 kHz
							150 kHz

Das Szenario 1 beschreibt ein softeres Szenario und dient in erster Linie der Systemfunktionsprüfung unter Anwendung unterschiedlicher Schaltfrequenzen. Das Szenario fährt die Leistung treppenförmig. Hierbei nimmt der Strom einen Bereich zwischen 4 A und 8 A an. Der Startwert liegt bei 4 A. Das vollständige Szenario 1 ist in Abbildung 12 dargestellt. Die maximale Leistung in diesem Szenario beträgt 5600 W und wird als relativ weiches Szenario angesehen. Die Leistungshalbleiter takten hier mit jeweils einer Schaltfrequenz von 22 kHz, 100 kHz und 150 kHz.

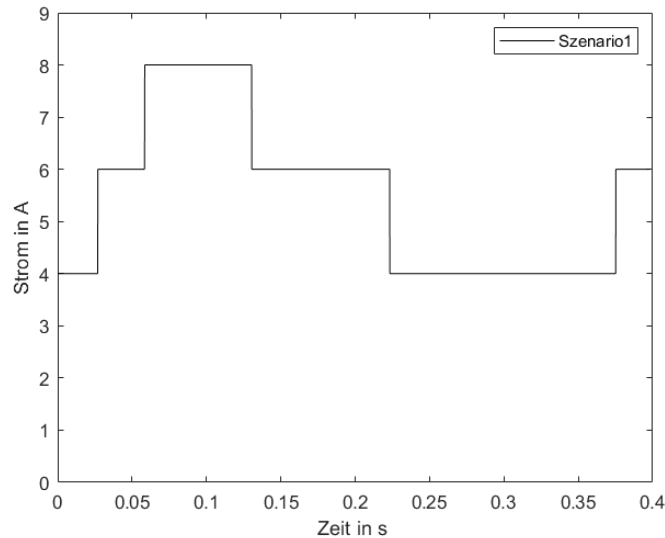


Abbildung 12: Stromverlauf Szenario 1

Im zweiten Szenario liegt die Leistung auch in Form einer Treppe vor, bei dem die Leistung zwischen 2 kW und 11,2 kW wechselt. Allerdings springt der Strom in diesem Szenario größeren Schritten. Die Dynamik der Stromfluktuation wird erhöht und ändert sich in jeder Sinus-Periode mindestens einmal und höchstens zweimal. Das vollständige Szenario ist in Abbildung 13 dargestellt. Mit dieser Art der Dynamiksteigerung bleibt es weiterhin möglich, unerwartet aufgetretenes Netzverhalten auf explizite Stromsprünge zurück zu führen. Demnach wird dieses Szenario verwendet, um die Einflüsse des Wechselrichters auf das Netz genauer zu untersuchen, wenn sich die Leistung in kurzer Zeit ändert. Die hier betrachteten Schaltfrequenzen sind ebenfalls 22 kHz, 100 kHz und 150 kHz.

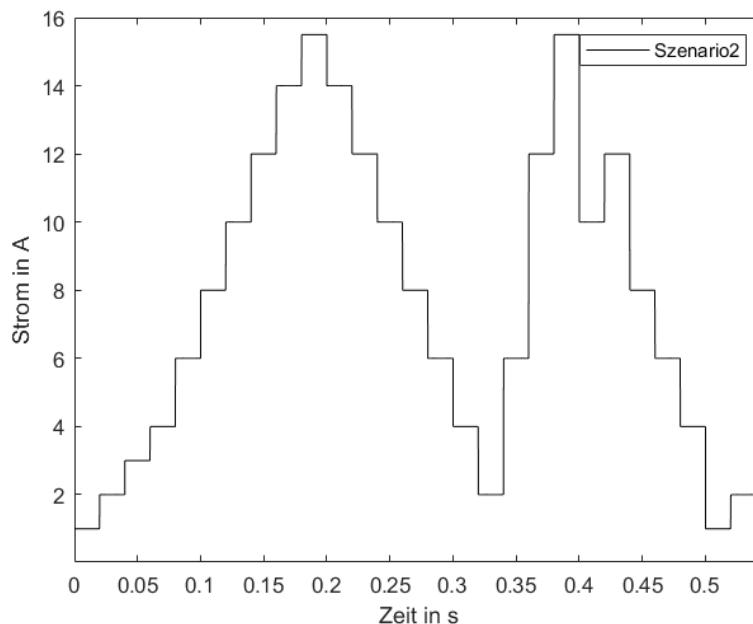


Abbildung 13: Stromverlauf Szenario 2

Die Implementierung dieses Szenarios auf der Eingangsseite des Wechselrichters erzeugt dieses dynamische Verhalten, das sekundäre Einflüsse auf das Stromnetz haben sollte. Schwerpunkt dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung von Netzimpedanz- und Strommessungen neben einem kurzen Blick auf die Spannungsverläufe, Reaktionszeit und die Oberschwingungen.

4 Versuchsdurchführung & Auswertung

Zur Untersuchung der sekundären Netzeinflüsse wird sowohl eine simulative als auch ein hybrider Ansatz unter Nutzung von realen Hardwarekomponenten angestrebt. Sowohl im simulierten als auch im hardware-basierten Versuch ist es wichtig, die Stromverläufe in den Leitungen, die gesamte Netzimpedanz, den Phasenwinkel des Stromnetzes als auch den Oberwellenanteil zu untersuchen, zusätzlich zu einem kurzen Blick auf die Reaktionszeit des Netzes auf den Strom am Eingang Seite des Wechselrichters. Neben der Versuchsbeschreibung werden jeweils die Versuchsergebnisse bezogen auf jedes Szenario veranschaulicht und anschließend interpretiert.

4.1 Simulativer Versuch

Im simulierten Versuch ist das Netzmodell (MONA 3) an einem Lastknoten mit der AC-Seite der simulierten Wechselrichter-Hardware verbunden. Auf der DC-Seite des Wechselrichters wird die DC Spannung mithilfe einer konstanten DC Spannungsquelle in Matlab/Simulink abgebildet. Die erarbeiteten Stromszenarien, die ein dynamisches Verhalten aufweisen, prägen die zu übertragende Leistung des Wechselrichters und werden innerhalb der Regeleinheit des Wechselrichters der Stromregelung als Sollwertgröße vorgegeben. Der Stromsollwert ist hier eine Eingangsgröße der PI-Stromregelung, siehe Abbildung 9. Die Verläufe der durchzuführenden Szenarien sind in den Abbildungen 12 und 13 zu sehen.

In dem simulativen Versuch, wie in Abbildung 6 gezeigt, wird das gesamte System simuliert und es werden keine echten Hardwarekomponenten benötigt. Mit der Simulation konnten die Szenarien in Form von Stromzeitreihen der Umrichterregelung implementiert und ausgeführt werden, und alle erforderlichen Messungen konnten simulativ erzeugt und übermittelt werden wie beispielsweise die Größen auf der AC-Seite, wie die drei Phasenspannung U_{L1} - U_{L3} und die entsprechenden drei AC-Phasenströme I_{L1} - I_{L3} , aber auch die der DC-Seite wie die Gleichspannung am Zwischenkreis U_{DC} , sowie der DC-Strom I_{DC} . Eine weitere gemessene Größe im Rahmen der Netzsimulation ist die Netzimpedanz.

4.1.1 Versuchsauswertung & Interpretation des simulativen Versuchs

Zunächst werden die Funktion und der sichere Betrieb der wesentlichen Komponenten der Simulation überprüft. Hierzu zeigt Abbildung 14 einen Ausschnitt aus dem dreiphasigen Verlauf der Netzspannung in Abhängigkeit von der Zeit. Diese Messungen wurden zwischen den Phasen und dem Neutralleiter durchgeführt. Anhand von Abbildung 14 ist erkennbar, dass sich die drei Phasenspannungen U_{L1} - U_{L3} in einem stabilen Zustand befinden. Dabei beträgt die Verschiebung zwischen den Phasen 120° . Dieses wurde vor jeder Simulation der einzelnen Szenarien und Schaltfrequenzen untersucht.

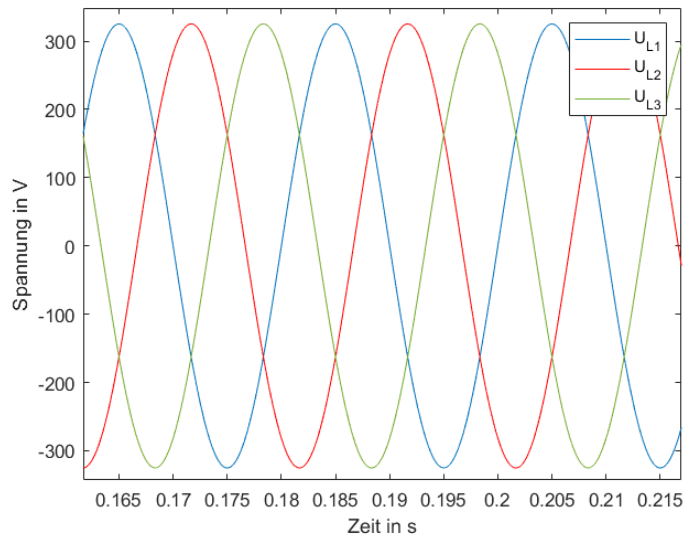


Abbildung 14: Dreiphasiger Verlauf der Netzspannung (U_{L1} =blau, U_{L2} =rot, U_{L3} =grün)

Nachfolgend wird auf das Simulationsergebnis von Szenario 1 eingegangen. Es werden Strom und Impedanz für beide Szenarien mit drei verschiedenen Schaltfrequenzen untersucht.

Szenario 1:

Abbildung 15 zeigt einen Zyklus von Szenario 1 (Cyan) und die entsprechenden Stromverläufe ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1-L3 (I_{L1} =blau, I_{L2} =rot, I_{L3} =grün) bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz.

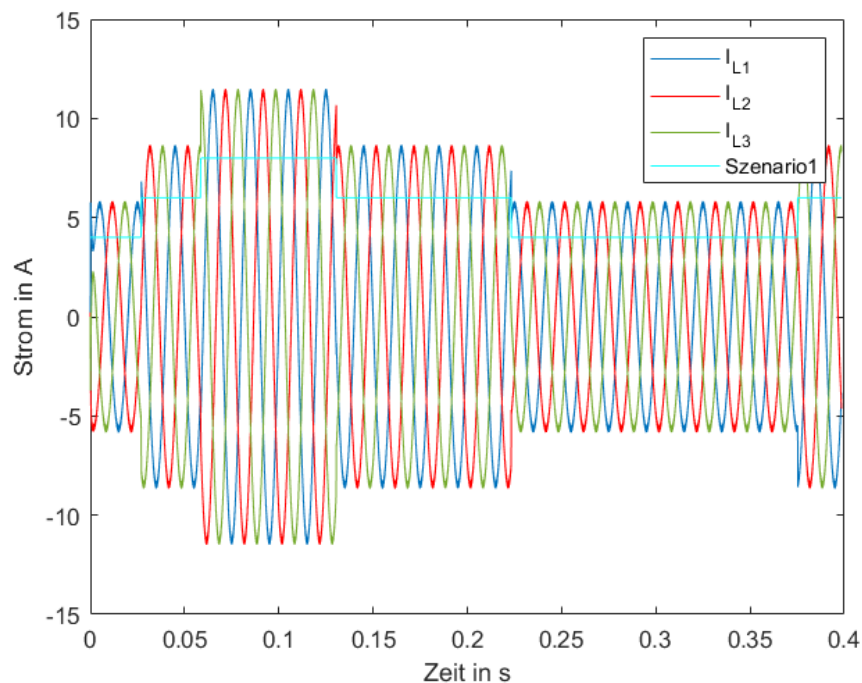


Abbildung 15: Simulativer Versuch: Stromverlauf von Szenario 1 (Cyan) und der dreiphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen des Szenarios reagiert und den Strom ausgangseitig entsprechend der Vorgabe ändert. Konkrete Schaltvorgänge werden in den nachfolgenden Abbildungen genauer betrachtet.

Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt des Zeitbereiches zwischen 0,2 und 0,295 Sekunden des Stromverlaufes ausgangsseitig des Wechselrichters der Phase L2 (rot). Es wird das Verhalten der Stromänderung veranschaulicht, während sich die Stromsollwertvorgabe des Wechselrichters von 6 A auf 8 A ändert.

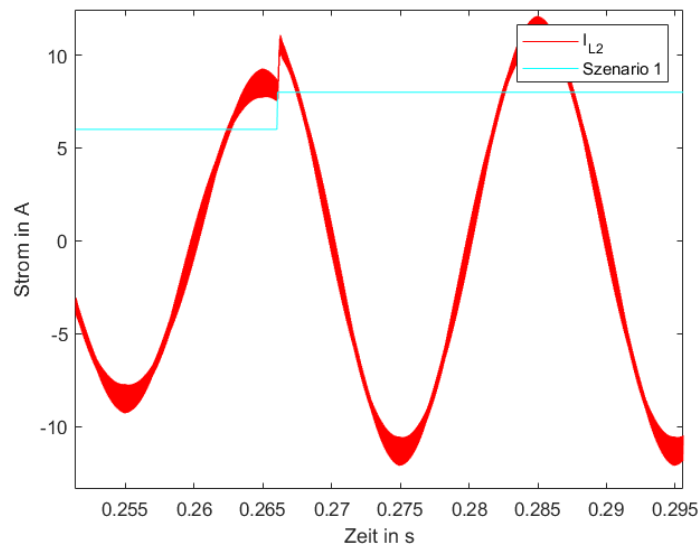


Abbildung 16: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Erkennbar ist zunächst, dass der Stromsprung nahezu im Maximum der Sinushalbwellen erfolgt. Der Verlauf des Sinus wird abrupt unterbrochen und eine Stromanpassung erfolgt ebenfalls auf den Spitzenwert des neuen Stromwertes. Ein solches Schaltverhalten hat deutliche Auswirkung auf die Form und den Verlauf des Sinussignals.

Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt des Stromverlaufes ausgangsseitig des Wechselrichters der Phase L2 (rot) und der Stromverlauf von Szenario 1 über den Zeitbereich von 0,0796 bis 0,0806 s.

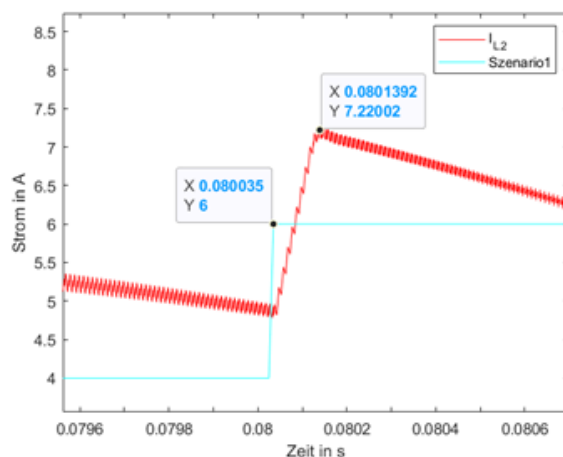


Abbildung 17: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters und die Zeitverzögerung dazwischen bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Es ist zu sehen, dass die Änderung des Stroms in der Phase zwei mit geringer Verzögerung erfolgt. Die Zeit Verzögerung bzw. die Reaktionszeit beträgt 0,104 ms. Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass für einen Stromanstieg von 2 A ein Zeitaufwand von 0,104 ms bis zum Erreichen des neuen Sollwertes erforderlich ist.

Die Abbildung 18 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,053 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,385 \Omega$ bei 600 Hz an.

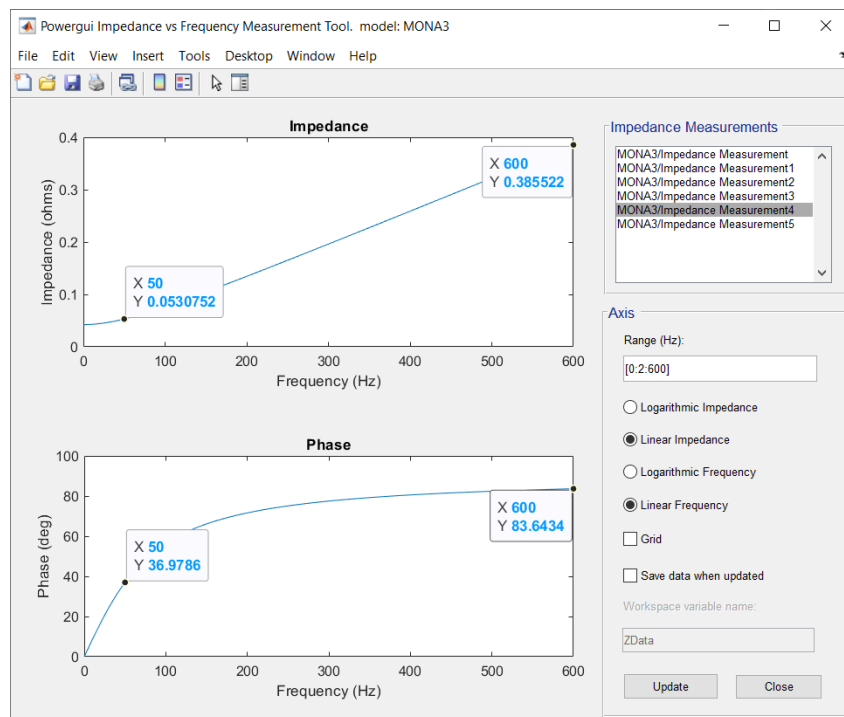


Abbildung 18: Simulativer Versuch: Szenario 1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22 \text{ kHz}$

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $36,97^\circ$ bei 50Hz und sie steigt auf $83,64^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich änderndes Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist.

Es lässt darauf vermuten, dass der noch höherfrequente Anteile an Oberwellen dazu führen, dass sich die Netzimpedanz außerhalb der zulässigen Grenzbereiche bewegt. Es müssen Maßnahmen bzw. Untersuchung hinsichtlich der Oberwellen Belastung durchgeführt werden. Der Einsatz von Tiefpassfiltern wären hier eine geeignete Maßnahme um höherfrequenten Anteilen entgegenzuwirken und somit den Blindleistungsanteil zu reduzieren.

Abbildung 19 Zeigt der Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L2 (rot) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 8 A auf 6 A absteigt. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

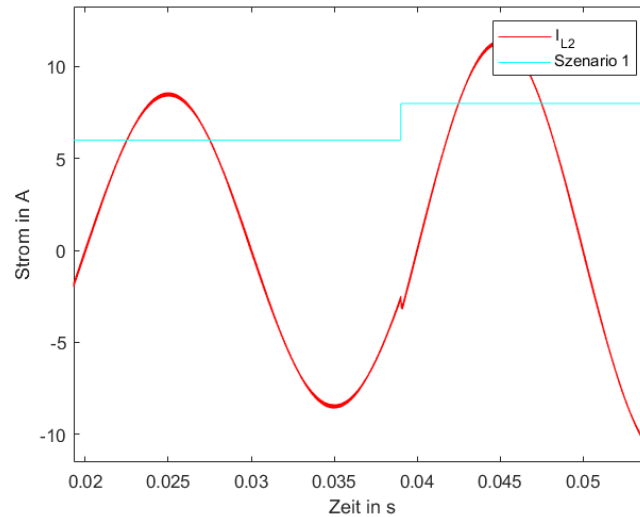


Abbildung 19: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1(Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Die Abbildung 20 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,055 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,378 \Omega$ bei 600 Hz an.

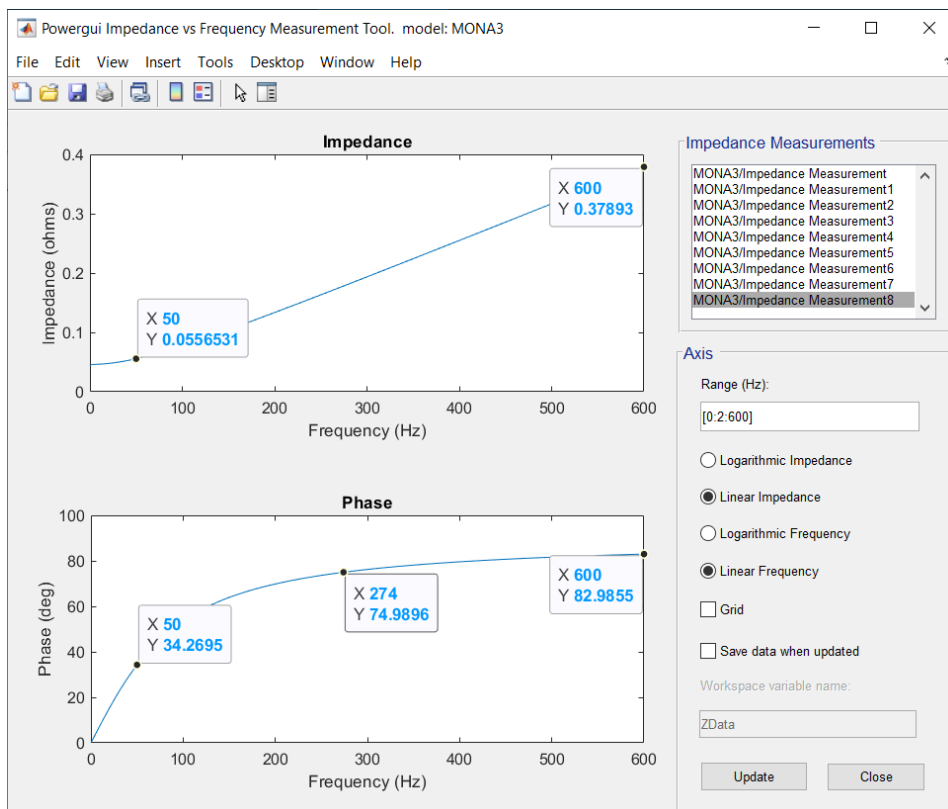


Abbildung 20: Simulativer Versuch: Szenario1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $34,26^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $82,98^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist. Der gemessene Phasenwinkel liegt bis zu einer Frequenz von 274 Hz im zulässigen Bereich.

Abbildung 21 Zeigt den Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L2 (rot) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 6 A auf 8 A springt. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

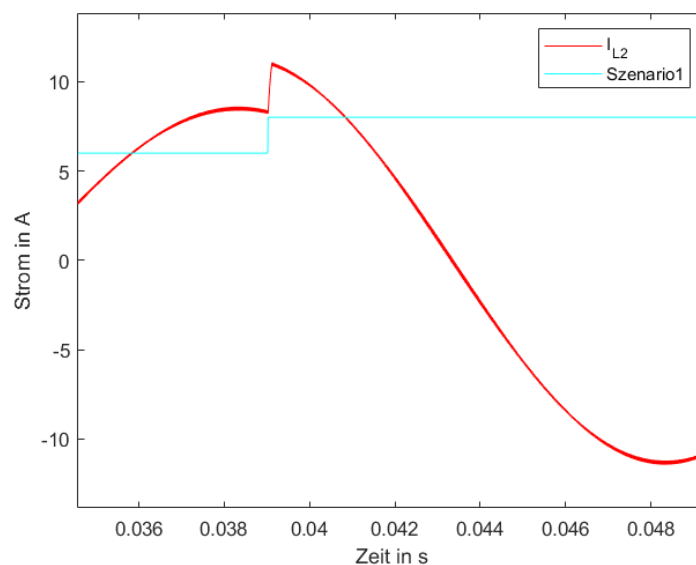


Abbildung 21: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 1 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz

Die Abbildung 22 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,0806 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,417 \Omega$ bei 600 Hz an.

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $25,15^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $79,9^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist.

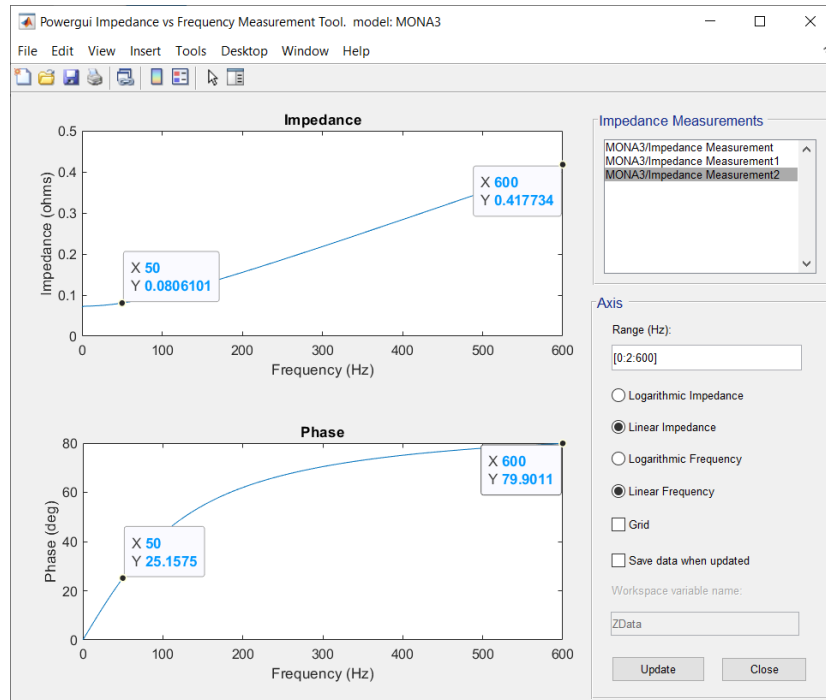


Abbildung 22: Simulativer Versuch: Szenario 1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz

Szenario 2:

Abbildung 23 zeigt einen Zyklus von Szenario 2 (Cyan) und die entsprechenden Stromverläufe ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1-L3 (I_{L1} =blau, I_{L2} =rot, I_{L3} =grün) bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

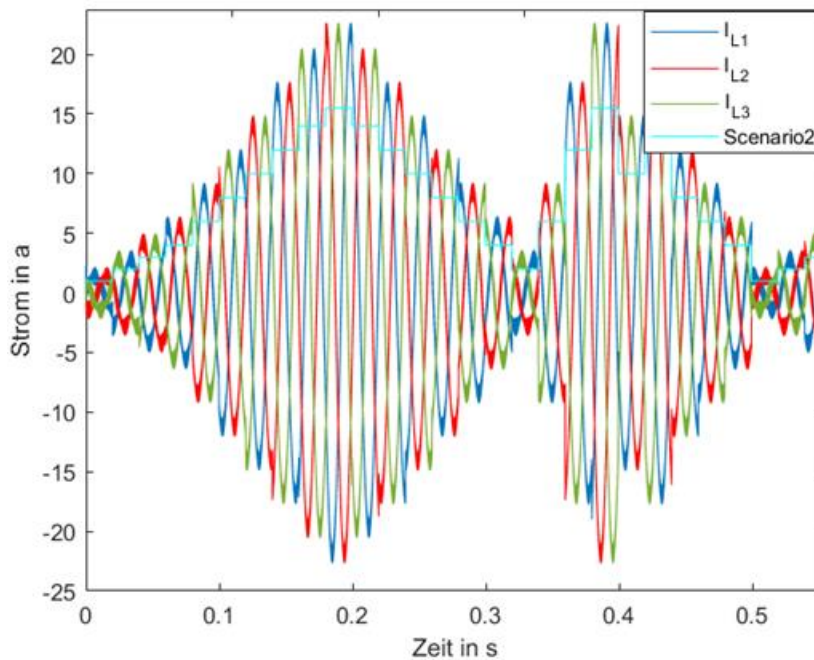


Abbildung 23: Simulativer Versuch: Stromverlauf von Szenario 2 (Cyan) und der dreiphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Abbildung 24 zeigt den Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L2 (rot) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 3,5 A auf 10 A springt. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

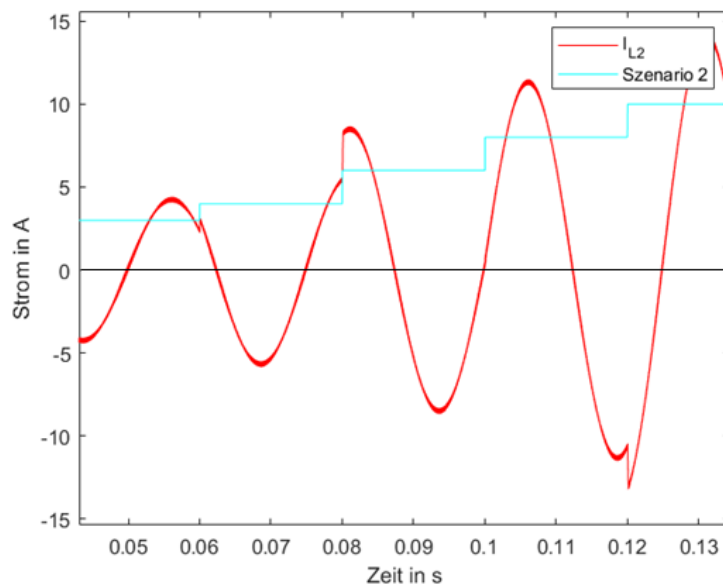


Abbildung 24: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Es ist aber auch zu beachten, dass die Sinuswelle wegen der schnellen Stromänderung auf der DC-Seite unterbrochen wird. Bei 0,1s und beim dritten Takt ist keine Stromunterbrechung zu bemerken, da der Strom in diesem Moment fast 0 A beträgt.

Abbildung 25 zeigt einen Ausschnitt des Stromverlaufs ausgangseitig des Wechselrichters der Phasen L2 und der Stromverlauf von Szenario 2.

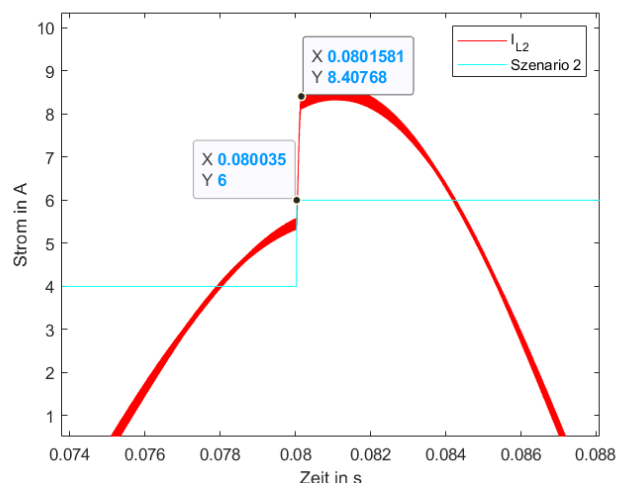


Abbildung 25: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der Stromverlauf bei der zweiten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (rot) Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Es ist zu sehen, dass die Änderung des Stroms in der Phase zwei mit geringer Verzögerung erfolgt. Die Zeit Verzögerung bzw. die Reaktionszeit beträgt 0,123 ms. Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass für einen Stromanstieg von 2 A ein Zeitaufwand von 0,123 ms bis zum Erreichen des neuen Sollwertes erforderlich ist.

Die Abbildung 26 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,059 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,379 \Omega$ bei 600 Hz an.

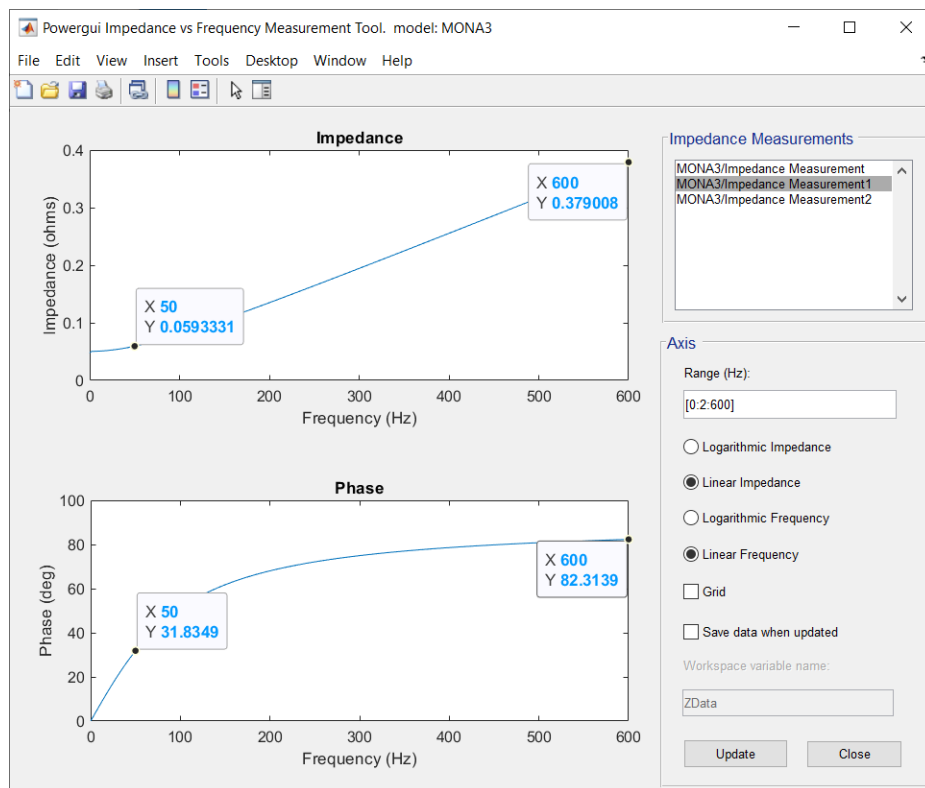


Abbildung 26: Simulativer Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22 \text{ kHz}$

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $31,83^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $82,31^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist.

Abbildung 27 zeigt den Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L2 (rot) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 6 A auf 14 A springt.

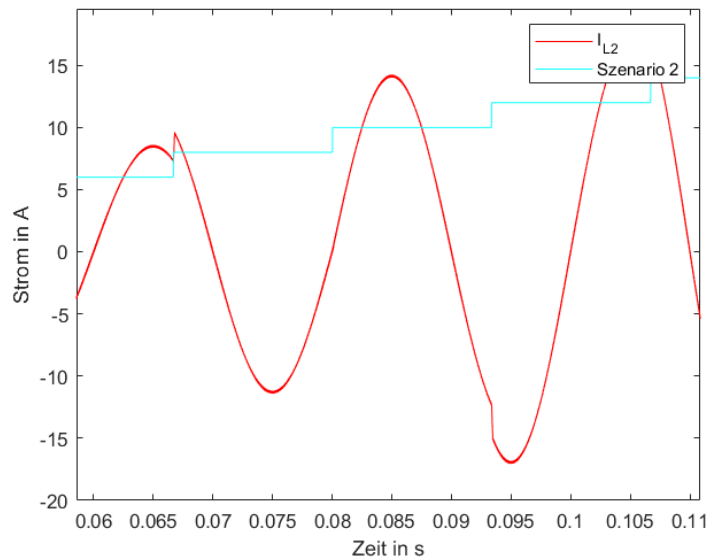


Abbildung 27: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der einphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters I_{L2} (rot) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangseitig entsprechend der Vorgabe ändert. Aber es ist auch zu beachten, dass die Sinuswelle wegen der schnellen Änderung des Stroms auf der DC-Seite unterbrochen wird.

Die Abbildung 28 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,071 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,411 \Omega$ bei 600 Hz an.

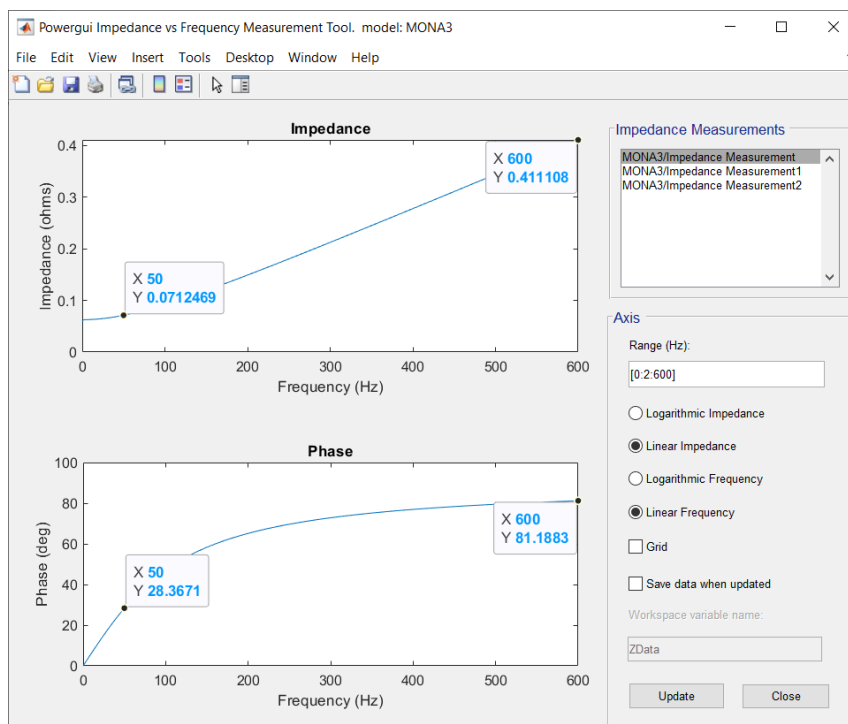


Abbildung 28: Simulativer Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $28,36^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $81,18^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist.

Abbildung 29 Zeigt der Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L2 (rot) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 6 A auf 14 A springt. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert. Aber es ist auch zu beachten, dass die Sinuswelle wegen der schnellen Änderung des Stroms auf der DC-Seite unterbrochen wird.

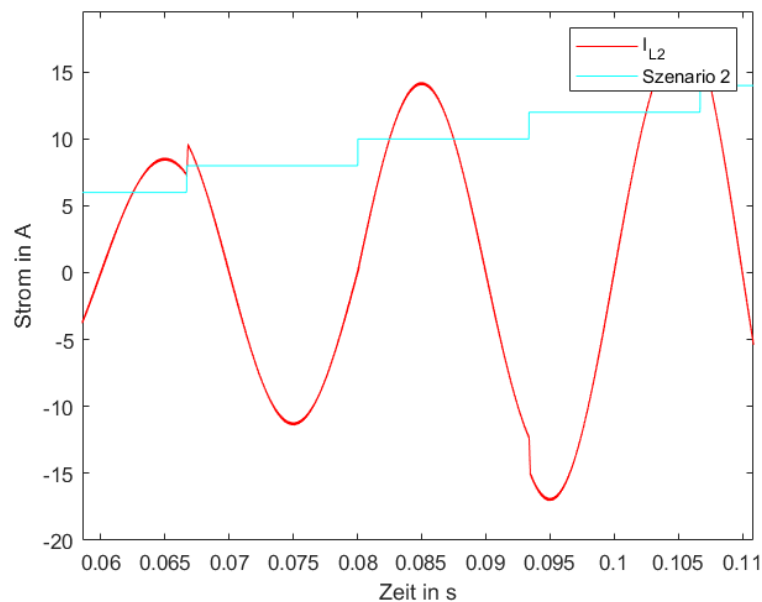


Abbildung 29: Simulativer Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der einphasige Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=150 \text{ kHz}$

Die Abbildung 30 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,081 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,406 \Omega$ bei 600 Hz an.

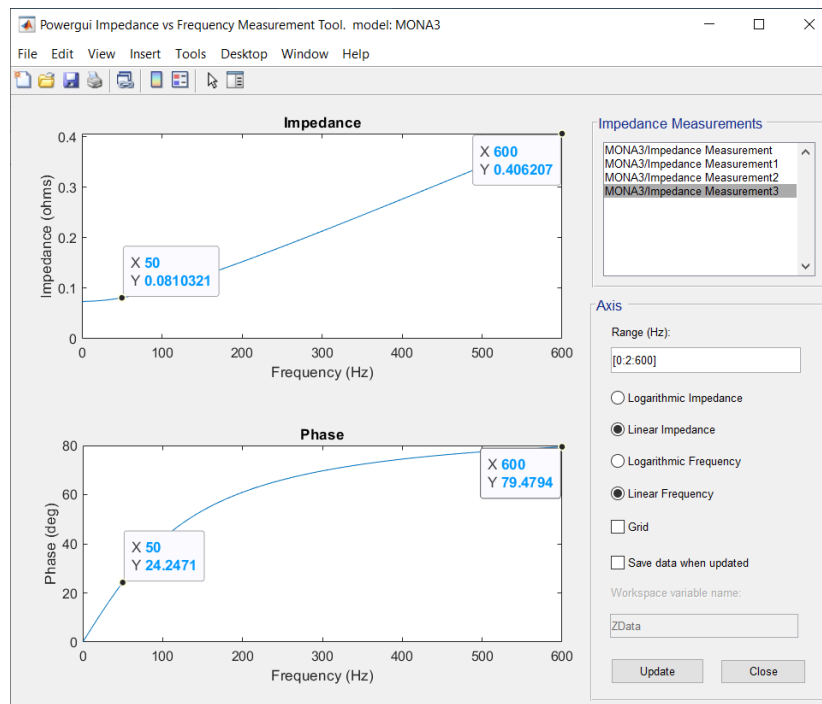


Abbildung 30: Simulativer Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $24,24^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $79,47^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist.

4.1.2 Zusammenfassung des simulativen Versuchs

Nachfolgend werden die Grunderkenntnisse der beiden Szenarien unter Durchführung des simulativen Versuches zusammengefasst.

Szenario 1:

Für das erste Szenario und bei all den unterschiedlichen Frequenzen fällt auf, dass das Stromnetz eine hohe Stromqualität aufrechterhält. In diesem Fall unterliegt der Strom im Moment der Stromänderung leichten Schwankungen, bleibt aber durchaus im zulässigen Bereich. Die Spannung zwischen Phase und Neutral, und wie in den Abbildungen gezeigt, behält eine saubere sinusförmige Wellenform bei. Die Netzimpedanz steigt mit zunehmender Schaltfrequenz, die aufgezeichnete minimale Impedanz beträgt $Z=0,053 \Omega$ und $\varphi = 36,97^\circ$ bei der Schaltfrequenz von 22 kHz und die maximale Impedanz beträgt $Z=0,0806 \Omega$ und $\varphi = 25,15^\circ$ bei der Schaltfrequenz von 150 kHz. Die Winkelverschiebung bei der 150 kHz Schaltfrequenz liegt leicht außerhalb des zulässigen Bereichs, was durch die hohe Schaltfrequenz erklärt werden könnte.

Abhängig vom Verlauf der Netzspannung kann man mit Sicherheit sagen, dass das System in diesem Szenario stabil geblieben ist und die Stromqualität nicht beeinträchtigt wurde.

Szenario 2:

Im zweiten Szenario fällt auf, dass die Stromqualität im Vergleich zum ersten Szenario abgenommen hat. Durch die schnelle Änderung des Stroms (ein- bis zweimal pro Periode) wird die sinusförmige Stromwelle häufig unterbrochen und erzeugt unerwünschte Schwingungen. Die Netzimpedanz steigt wie üblich mit zunehmender Frequenz und erreicht $Z=0,810 \Omega$ und eine Phasenverschiebung $\varphi = 24,24^\circ$ bei der Frequenz von 150 kHz, was ebenfalls außerhalb des zulässigen Bereichs liegt.

4.2 Hardwarebasierter Versuch

In dem hardwarebasierten Experiment werden alle Elemente der Anlage, die zuvor in Abbildung 6 erwähnt wurden, durch reale Komponenten ersetzt, einschließlich des Wechselrichters, der Relaissteuerung und des DC-Zwischenkreises einschließlich der DC Quelle. Es werden wie im softwarebasierten Versuch beide Stromlauf-Szenarien in die Stromregelung des Wechselrichters implementiert und die netzseitigen Stromverläufe des Wechselrichters ins Netzmodell zurückgegeben. Nachfolgend werden neben dem detaillierten Versuchsaufbau auch die eingesetzten Komponenten beschrieben.

4.2.1 Versuchsaufbau & Komponentenbeschreibung

Um die Versuche in einer hardwarebasierten Umgebung durchführen zu können, wurde der Versuchsaufbau aus Abbildung 31 verwendet.

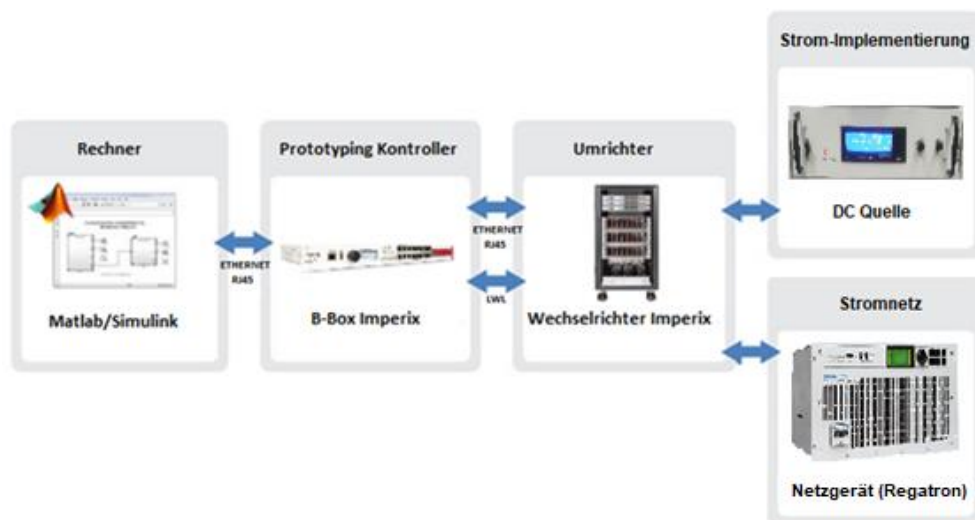


Abbildung 31: Versuchsaufbau des hardwarebasierten Versuches

Wie in der Abbildung 31 gezeigt, beginnt der Versuch mit der Anpassung und Weiterentwicklung eines Steueralgorithmus in Matlab/Simulink. Die Simulationsdatei wird anschließend auf dem RCP-Controller geflasht. Der Controller ist auch für die Steuerung des Wechselrichters verantwortlich und steuert über Lichtwellenleiter die Gain-Eingänge der SiC-MOSFETs des Wechselrichters, um somit das hochdynamische Verhalten zu erreichen. Der Wechselrichter ist auch mit der Gleichstromquelle und dem Regatron-Generator verbunden, die das Stromnetz darstellen. Ein Messgerät ist mit dem Regatron verbunden, um Echtzeit Messungen des Stroms und der Spannung im Stromnetz zu liefern, die anschließend in das Netzmodell über gesteuerte Stromquellen zurückgeführt werden. Das Messgerät erfasst und exportiert die Spannungs- und Strommesswerte gemäß dem Nyquist-Shannon-Theorem mit einer Frequenz, die mindestens doppelt so hoch ist wie die Schaltfrequenz der Wechselrichter. [14] Die Implementation des Wechselrichters kann schließlich an unterschiedlichen Knotenpunkten des Netzes durchgeführt werden.

Imperix Wechselrichtersystem [7]

Für dieses Projekt wird ein 3-phasiger Wechselrichter benötigt, also werden drei identische einphasige Wechselrichter Halbbrückenmodelle von Imperix parallel zueinander und zur DC-Quelle verbunden, um eine Vollbrücke B6-Schaltung zu schaffen. Jedes einzelne Halbbrückenmodell hat die folgenden Eigenschaften:

Tabelle 2: Eigenschaften 800V/24A SiC Power Module (Halbbrücke) [7]

DC Spannung	800 V
Ausgangstrom	24 A (RMS)
Topologie	Einphasig
Leistungshalbleiter	2 * SiC MOSFETs
Leistung	4-8 kVA

- Strom- und Spannungssensoren (an B-Box durch RJ45 angeschlossen)
- Grid-side connection panel: 3-Phasige Circuit breaker, 2 * 3-Phasige Relais (Vorladereleis und Bypassrelais), 3 * Vorladewiderstand
- Analoge Messeingänge via RJ45 + Optische PWM Signalübertragung via LWL

Der 3-phasiger Wechselrichter soll die Gleichspannung von der DC-Seite in eine 3-phasige Netzspannung $3 \cdot 230 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ umwandeln. Um diese Ausgangsspannung auf der AC-Seite zu erreichen, muss die Zwischenkreisspannung mindestens $622,25 \text{ V}$ betragen, wohl wissend, dass der Strom in jeder Leiter 16 A nicht überschreiten darf. (Hausanschlussabsicherung)

B-Box RCP Prototyping Controller:

Die B-Box, dargestellt in Abbildung 32, ist ein Rapid Control Prototyping (RCP)-System für leistungselektronische Anwendungen. Der Controller erleichtert die experimentelle Validierung von Steuertechniken für Leistungswandler. Über die Matlab/Simulink basierte Ansteuerung des Controllers wandelt dieser den Code in erkennbare LWL Signale zur Leistungshalbleiteransteuerung um. Außerdem ist eine Messsignalauswertung über die Analog Inputs möglich.



Abbildung 32: B-Box Rapid Control prototyping [6]

Das System ist vollständig programmierbar, sodass selbst die fortschrittlichsten Steueralgorithmen effektiv in einer Laborumgebung getestet werden können. Der RCP-Controller unterstützt auch Echtzeitüberwachung und Debugging. [6]

4 Quadranten Umrichter zur Netzstellung

Der 4 Quadranten Umrichter des Herstellers Regatron [11] wird im Amplifier Mode angesteuert und impliziert die dreiphasige Netzspannung mit einem Effektivwert von $U_{\text{Netz}}=230 \text{ V}$ Phasenspannung. Der hier eingesetzte Regatron Umrichter verfügt über eine Leistungskapazität von 30 kVA . Der am Netzanschluss gemessene Strom wird messtechnisch aufgenommen und in das simulierte Netzmodell zurückgespielt.

4.2.2 Versuchsauswertung & Interpretation des hardwarebasierten Versuchs

Unter Einsatz eines realen Wechselrichters wurden die gemessenen Ströme auf Netzseite in das simulierte Netzmodell von MONA 3 implementiert und die ebenfalls eine Impedanzmessung sowie die Durchführung einer FFT zur Bestimmung des Oberwellenanteils, wie im simulierten Versuch, durchgeführt. Hinsichtlich der Interpretationsergebnisse des Phasenwinkels ist hinzuzufügen, dass die Ergebnisse invertiert interpretiert werden müssen, da die Strommessung in entgegengesetzter Richtung durchgeführt wurde, dieses ist bei Auswertung der Ergebnisse aufgefallen. Demzufolge sind positiv gemessene Phasenwinkel als kapazitives Verhalten zu deuten und negative Phasenwinkel als induktives Verhalten.

Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt aus dem dreiphasigen gemessenen Verlauf der Netzspannung am Regatron in Abhängigkeit von der Zeit. diese Messungen wurden zwischen den Phasen und dem Neutralleiter durchgeführt. Auffällig ist, dass die Spannung im Netz leicht schwingt.

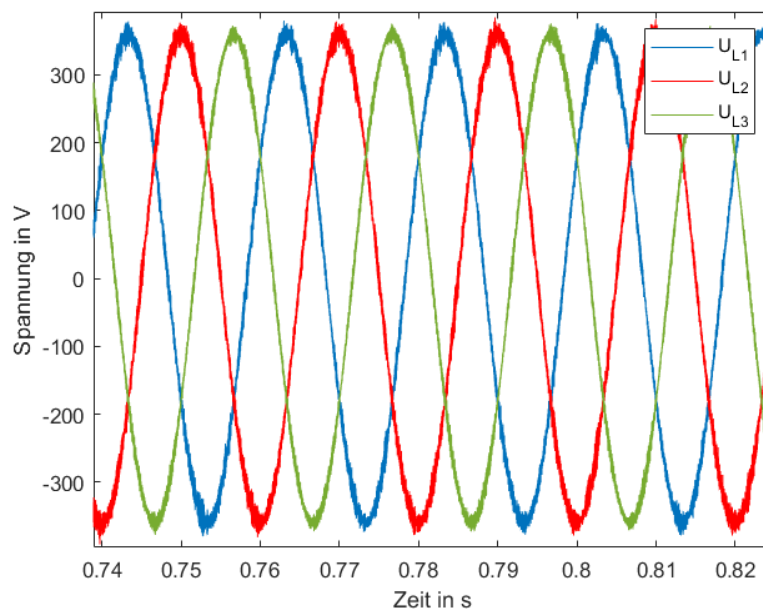


Abbildung 33: Dreiphasiger Verlauf der Netzspannung (U_{L1} =blau, U_{L2} =rot, U_{L3} =grün)

Als nächstes werden unter Einbindung der beiden Szenarien die Stromverläufe ausgangsseitig des Wechselrichters generiert und anschließend an das simulierte Netzmodell übergeben. Das simulierte Netz wird dann auf mögliche Netzsekundäreinflüsse mit dem Fokus auf der Netzimpedanz und möglichen Oberwellenanteilen untersucht. Dieses Vorgehen wird für die drei verschiedenen Schaltfrequenzen ausgeführt.

Szenario 1

Abbildung 34 zeigt die Stromverläufe ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1-L3 (I_{L1} =blau, I_{L2} =rot, I_{L3} =grün) bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend das Szenario 1 (siehe Abbildung 12) ändert.

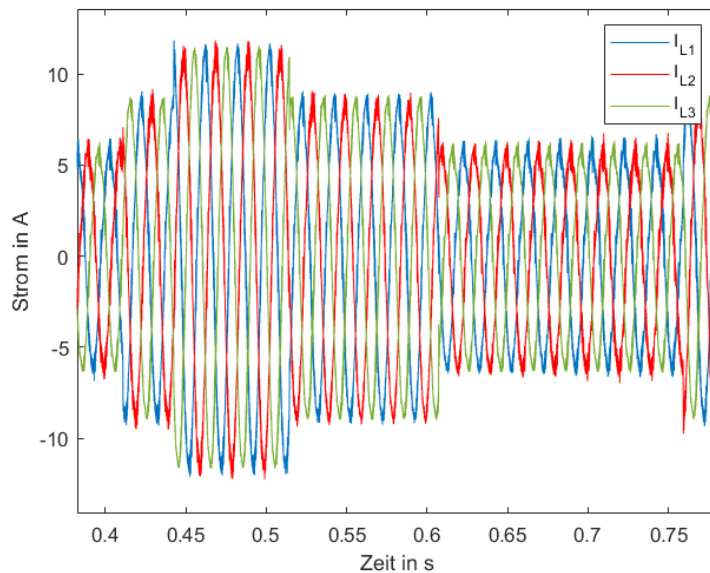


Abbildung 34: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt der dreiphasigen Stromverläufe ausgangsseitig des Wechselrichters bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Abbildung 35 zeigt den Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phase L1 (blau) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 4 A auf 8 A springt. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

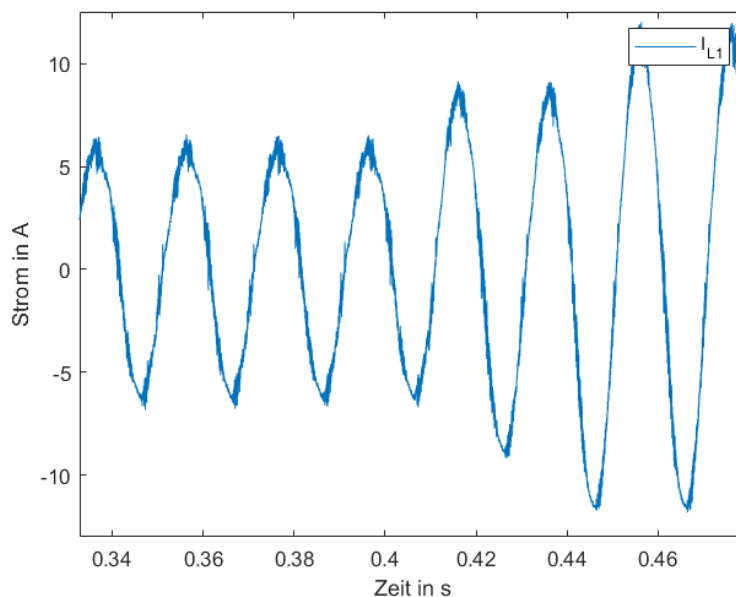


Abbildung 35: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Zur Überprüfung der Netzimpedanz wird in Abbildung 36 die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels φ als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-Faches der Grundfrequenz) dargestellt. Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,035 \Omega$ bei 50 Hz und steigt auf $0,36 \Omega$ bei 600 Hz an.

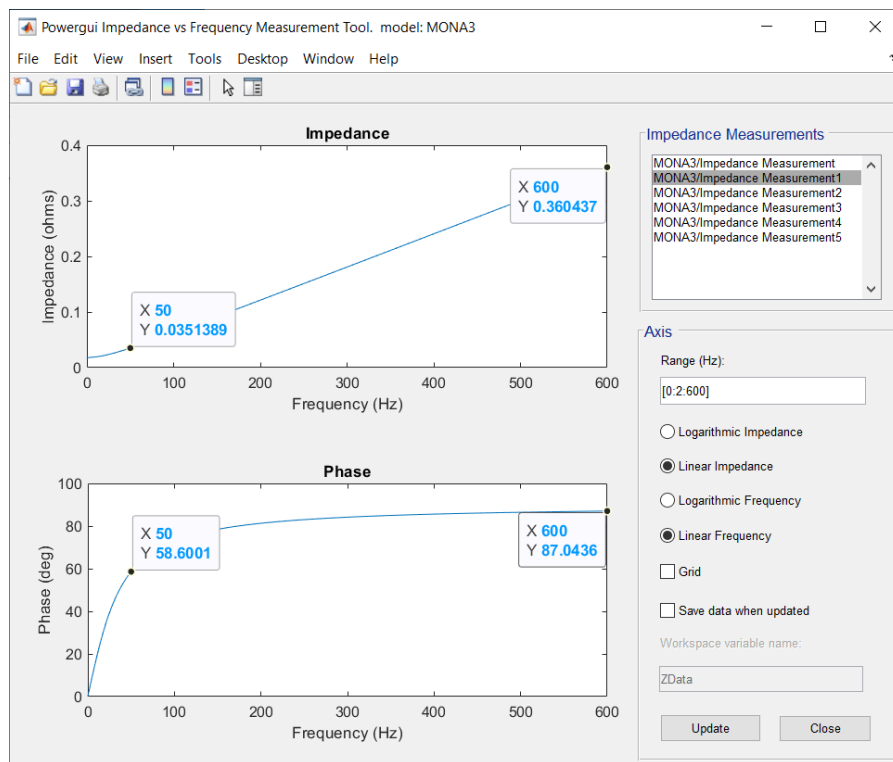


Abbildung 36: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22 \text{ kHz}$

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern oder aber der frequenzabhängige Blindanteil im Netz mit steigender Frequenz zunimmt. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$. Trotz des Anstieges der Netzimpedanz befinden sich diese Werte im zulässigen Bereich.

Die zweite, untere Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels φ in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $58,6^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $87,04^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass der Blindanteil mit steigender Frequenz zunimmt. Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist.

Es lässt darauf vermuten, dass der hohe Anteil an Oberwellen dazu führt, dass sich die Netzimpedanz außerhalb der zulässigen Grenzbereiche befindet. Es müssen Maßnahmen bzw. Untersuchung hinsichtlich der Oberwellen Belastung durchgeführt werden.

Hierzu wurde eine Fast Fourier Analyse anhand von drei definierten Zeitpunkten innerhalb des Szenario 1 durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Zeitpunkte untersucht, um eine Einhaltung des Oberwellenanteils innerhalb der Grenzen über die gesamte Dauer des Szenarios zu gewährleisten. Die untersuchten Zeitpunkte sind im Bereich zwischen 0,03 s und 0,06 s bei 4 A, im Bereich zwischen 0,06 s und 0,13 s bei 8 A und im Bereich zwischen 0,13 s und 0,22 s bei 6 A (vgl. Abbildung 12). Die dort ermittelten Oberwellenanteile wurden mit den Grenzwerten aus Tabelle 2 verglichen und bewertet.

Abbildung 37 zeigt die Fast-Fourier-Transformation (FFT) des Stromverlaufs im ersten Szenario bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz und einem momentanen Strom von 4 A. Auf der X-Achse ist die Oberschwingungsordnung dargestellt, auf der Y-Achse der Oberschwingungsstrom in Prozent. Es ist erkennbar, dass der Oberschwingungsstrom bei der 5. und 13. Ordnung 1 % überschreitet. Daher werden diese beiden Ordnungen nachfolgend genauer auf deren Grenzwerte überprüft.

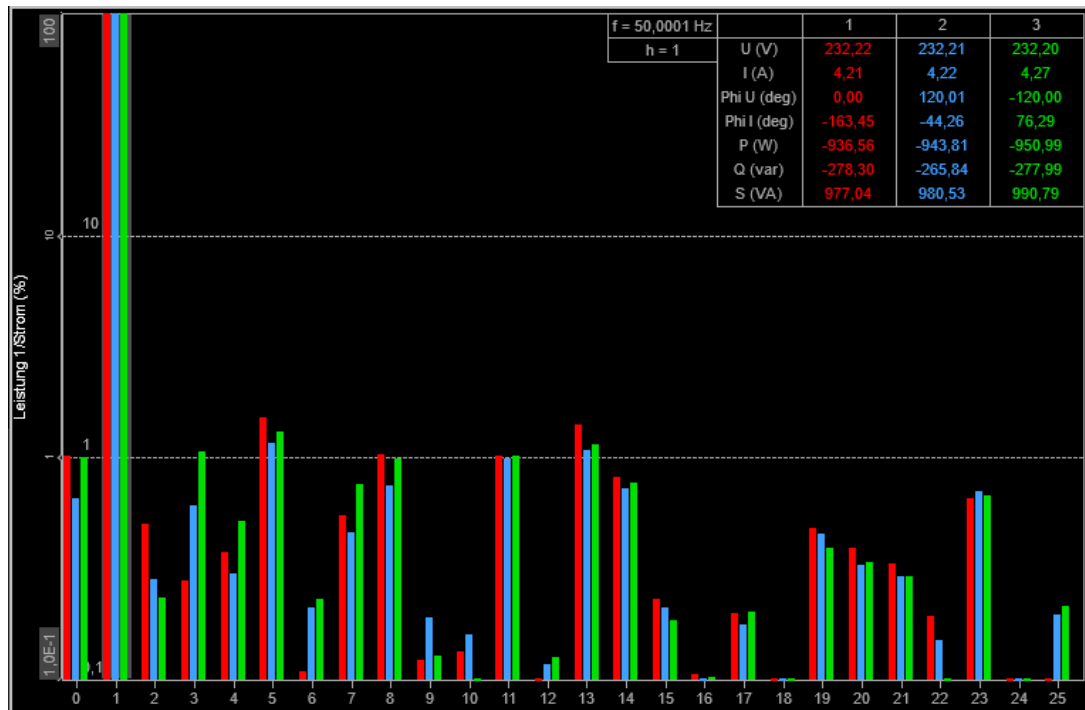


Abbildung 37: Szenario 1: FFT Messung bei einem Strom von 4 A (Schaltfrequenz =22 kHz)

Abbildung 38 (Rechts) zeigt die Messungen bei der fünften Harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,064 A. Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstroms der fünften Ordnung, dieser 1,14 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich (siehe Tabelle 2).

Abbildung 38 (Links) zeigt die Messungen bei der 13. Harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,06 A. Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstroms der fünften Ordnung, dieser 0,21 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

f = 250,0016 Hz		1	2	3	f = 650,0041 Hz		1	2	3
h = 5	U (V)	0,656	0,595	0,676	h = 13	U (V)	0,178	0,185	0,169
	I (A)	0,064	0,053	0,055		I (A)	0,060	0,048	0,050
	Phi U (deg)	-157,670	77,254	-40,226		Phi U (deg)	30,684	148,952	-87,951
	Phi I (deg)	43,699	-83,714	173,016		Phi I (deg)	-161,301	-37,606	70,221
	P (W)	-0,039	-0,030	-0,031		P (W)	-0,010	-0,009	-0,008
	Q (var)	-0,015	-0,010	-0,020		Q (var)	0,002	0,001	0,003
	S (VA)	0,042	0,031	0,037		S (VA)	0,011	0,009	0,009

Abbildung 38: Szenario 1: Messungen der fünften und dreizehnten Harmonischen bei einem Strom von 4 A

Abbildung 39 zeigt die Fast-Fourier-Transformation (FFT) des Stromverlaufs im ersten Szenario bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz und einem momentanen Strom von 8 A. Auf der X-Achse ist die Oberschwingungsordnung dargestellt, auf der Y-Achse der Oberschwingungsstrom in Prozent. Es ist erkennbar, dass der Oberschwingungsstrom bei der 5. und 13. Ordnung 1 % überschreitet. Daher werden diese beiden Ordnungen nachfolgend genauer auf deren Grenzwerte überprüft.

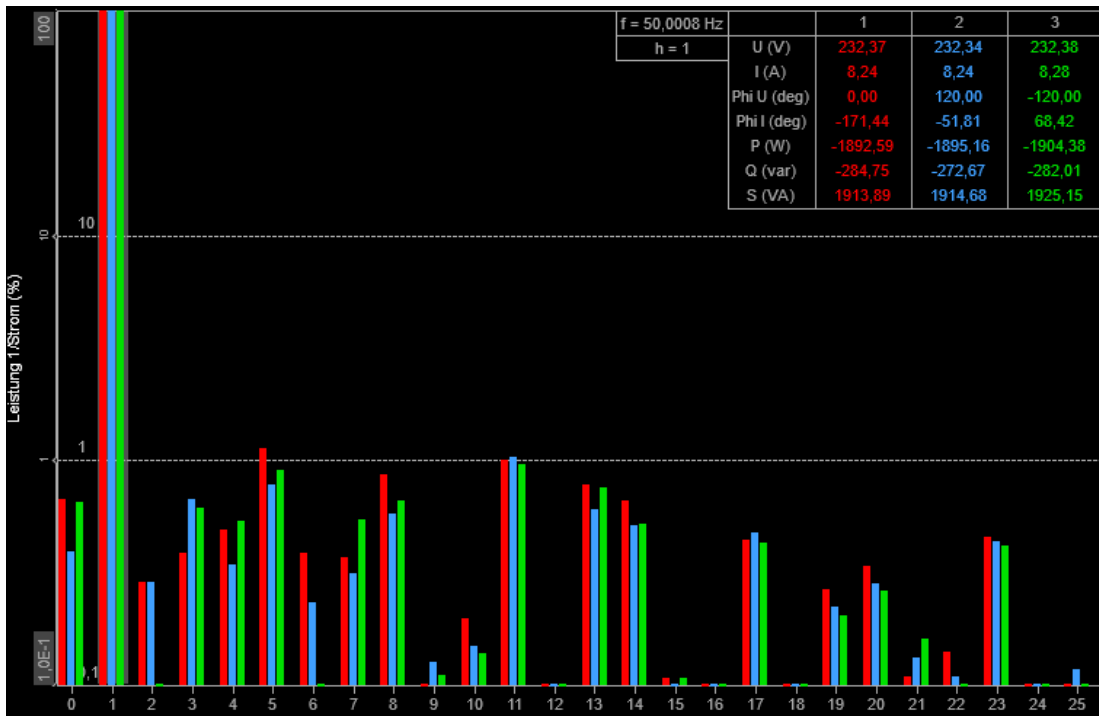


Abbildung 39: Szenario 1: FFT Messung bei einem Strom von 8 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)

Abbildung 40 (links) zeigt die Messungen bei der fünften Harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,093 A. Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstroms der fünften Ordnung, dieser 1,14 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

Abbildung 40 (rechts) zeigt die Messungen bei der elften. harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,085 A. Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstrom der elften Ordnung, dieser 0,33 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

f = 250,0038 Hz		1	2	3	f = 550,0084 Hz		1	2	3
h = 5	U (V)	0,599	0,548	0,599	h = 11	U (V)	0,075	0,091	0,101
	I (A)	0,093	0,064	0,075		I (A)	0,083	0,085	0,080
	Phi U (deg)	-162,464	76,521	-39,782		Phi U (deg)	-160,102	65,162	-46,927
	Phi I (deg)	45,323	-80,720	-177,774		Phi I (deg)	6,769	-114,703	123,370
	P (W)	-0,049	-0,032	-0,033		P (W)	-0,006	-0,008	-0,008
	Q (var)	-0,026	-0,014	-0,030		Q (var)	0,001	0,000	0,001
	S (VA)	0,056	0,035	0,045		S (VA)	0,006	0,008	0,008

Abbildung 40: Szenario 1: Messungen der fünften und elften Harmonischen bei einem Strom von 8 A

Abbildung 41 zeigt die Fast-Fourier-Transformation des Stromverlaufs im ersten Szenario bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz und einem Strom von 6 A. auf der X-Achse ist die Oberschwingungsordnung dargestellt, auf der Y-Achse der Oberschwingungsstrom in Prozent. Es ist erkennbar, dass der Oberschwingungsstrom bei der 5. und 11. Ordnung 1 % überschreitet. Daher werden diese beiden Ordnungen nachfolgend genauer auf deren Grenzwerte überprüft.

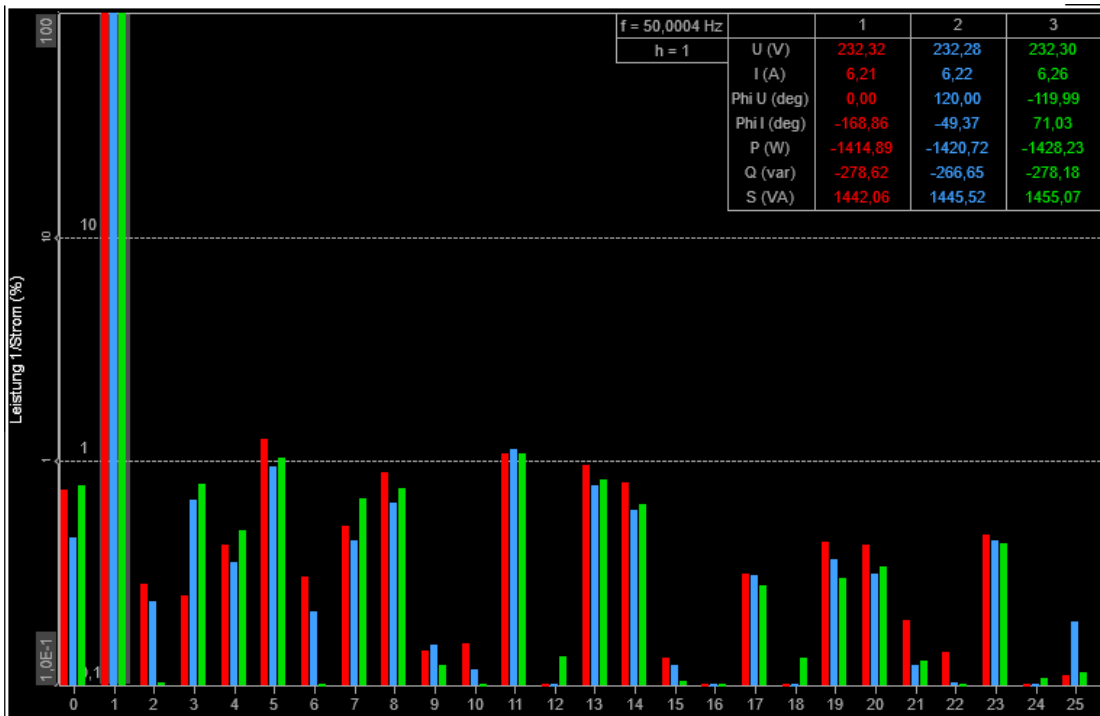


Abbildung 41: Szenario 1: FFT Messung bei einem Strom von 6 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)

Abbildung 42 (links) zeigt die Messungen bei der fünften harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,079 A, was weniger ist als der maximal zulässige Oberschwingungsstrom der fünften Ordnung, der 1,14 A beträgt (siehe Tabelle 2). Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

Abbildung 42 (rechts) zeigt die Messungen bei der elften. harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,07 A, Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstroms der fünften Ordnung, dieser 0,33 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

f = 250,0019 Hz		1	2	3	f = 550,0042 Hz		1	2	3
h = 5	U (V)	0,490	0,434	0,472	h = 11	U (V)	0,011	0,031	0,032
	I (A)	0,079	0,059	0,065		I (A)	0,067	0,070	0,068
	Phi U (deg)	-168,572	67,699	-49,636		Phi U (deg)	170,149	1,100	-97,259
	Phi I (deg)	37,861	-87,732	170,617		Phi I (deg)	4,409	-116,551	122,846
	P (W)	-0,034	-0,023	-0,023		P (W)	-0,001	-0,001	-0,002
	Q (var)	-0,017	-0,011	-0,020		Q (var)	0,000	-0,002	-0,001
	S (VA)	0,038	0,025	0,031		S (VA)	0,001	0,002	0,002

Abbildung 42: Szenario 1: Messungen der fünften und elften Harmonischen bei einem Strom von 6 A

Abbildung 43 zeigt der Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1 (blau) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 4 A auf 8 A springt. Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

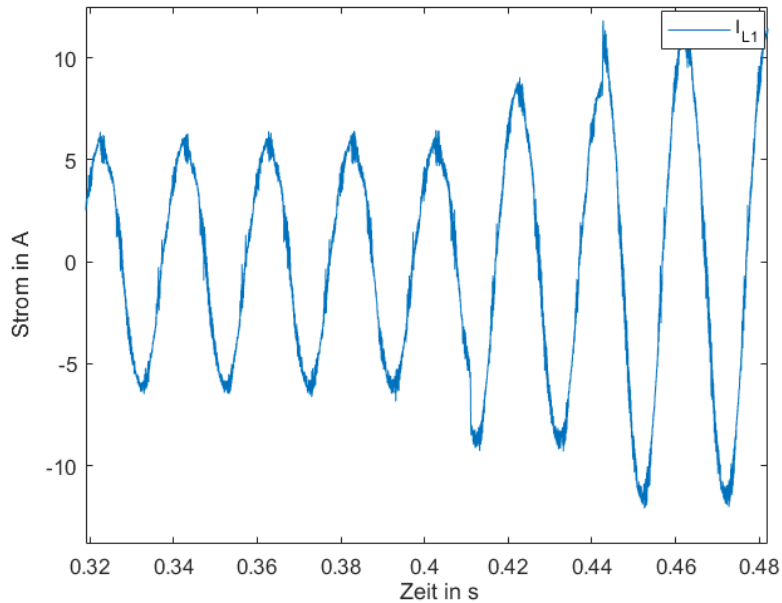


Abbildung 43: Hardwarebasierter Versuch: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Die Abbildung 44 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,041 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,376 \Omega$ bei 600 Hz an.

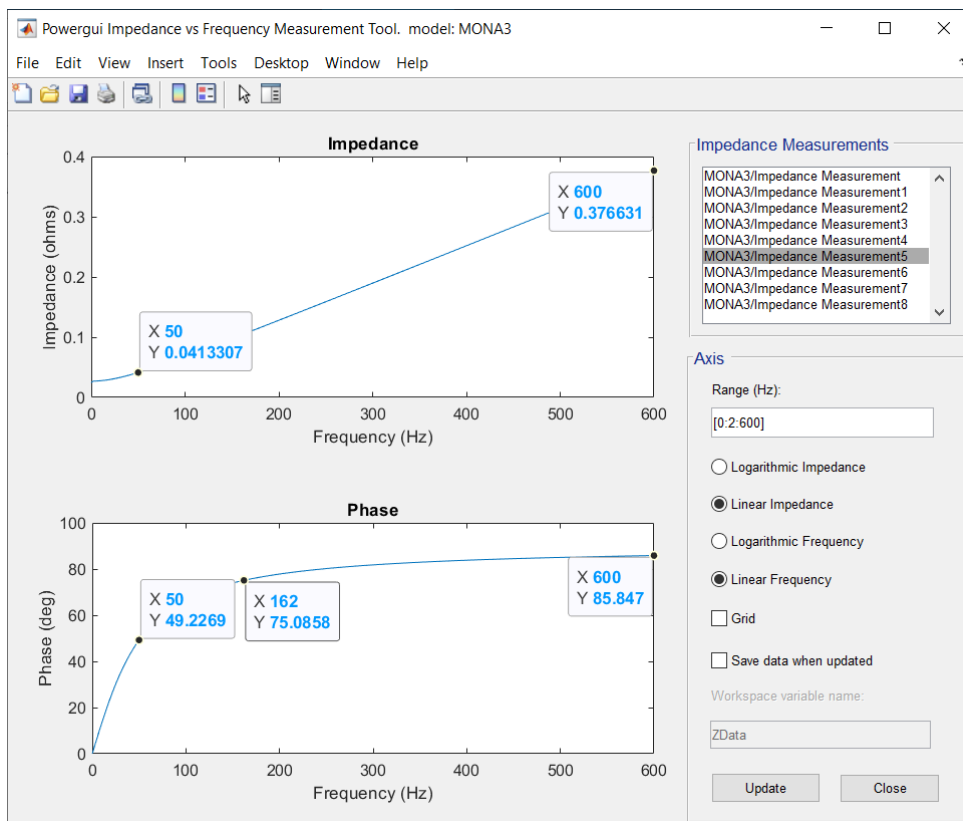


Abbildung 44: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $49,22^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $85,84^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist. Der gemessene Phasenwinkel liegt bis zu einer Frequenz von 162 Hz im zulässigen Bereich.

Es lässt darauf vermuten, dass der hohe Anteil an Oberwellen dazu führt, dass sich die Netzimpedanz außerhalb der zulässigen Grenzbereiche befindet. Es müssen Maßnahmen bzw. Untersuchung hinsichtlich der Oberwellen Belastung durchgeführt werden

Abbildung 45 Zeigt der Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=150 \text{ kHz}$ und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters zwischen 2 A und 15,5 A springt (siehe Abbildung 12). Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

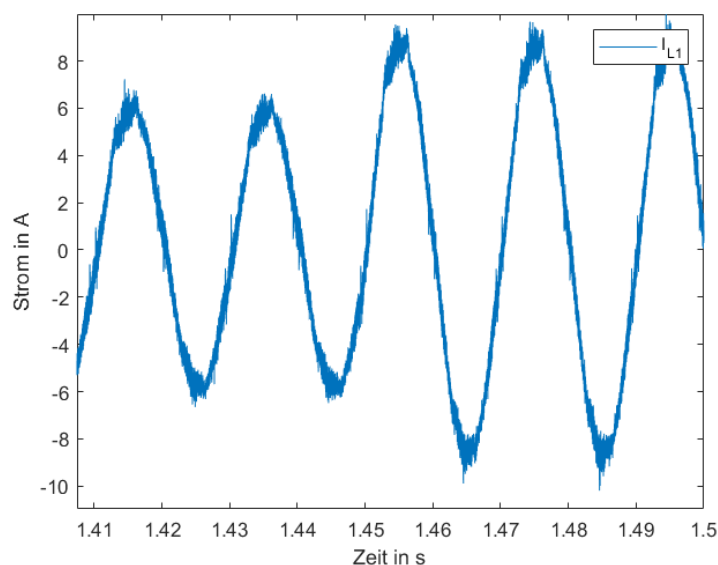


Abbildung 45: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1 - Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=150 \text{ kHz}$

Die Abbildung 46 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,041 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,376 \Omega$ bei 600 Hz an.

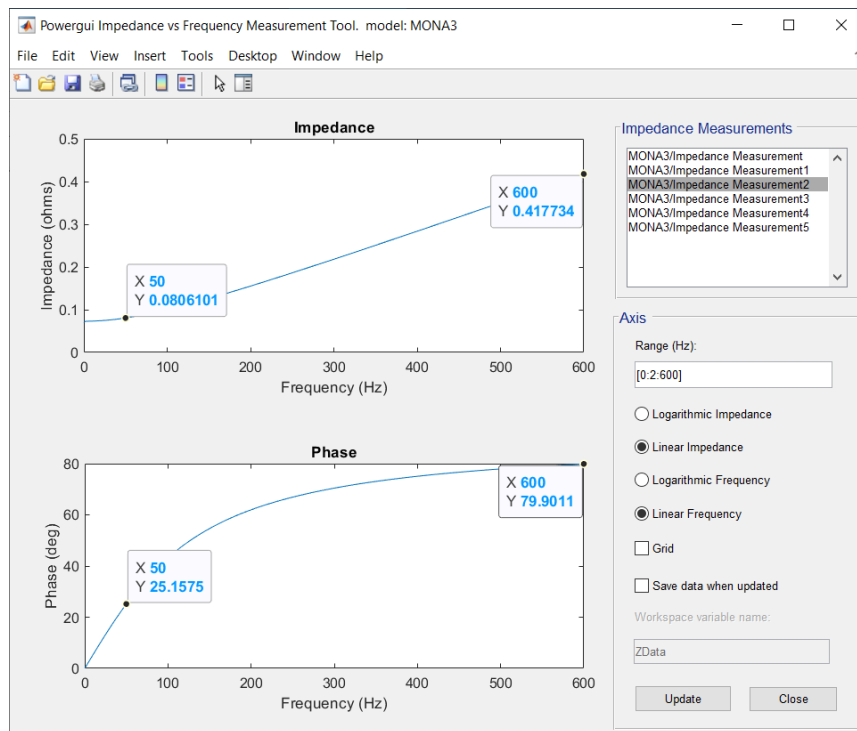


Abbildung 46: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 1 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150$ kHz

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $49,22^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $85,84^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° . Es ist erkenntlich, dass der Phasenwinkel ein induktives Verhalten aufzeigt ($\varphi > 0$), welches auf den induktiven Leitungsanteil im Netz zurückzuführen ist. Es lässt darauf vermuten, dass der hohe Anteil an Oberwellen dazu führt, dass sich die Netzimpedanz außerhalb der zulässigen Grenzbereiche befindet. Es müssen Maßnahmen bzw. Untersuchung hinsichtlich der Oberwellenbelastung durchgeführt werden.

Szenario 2:

Abbildung 47 zeigt den Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters zwischen 2 A und 15,5 A springt (siehe Abbildung 13). Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

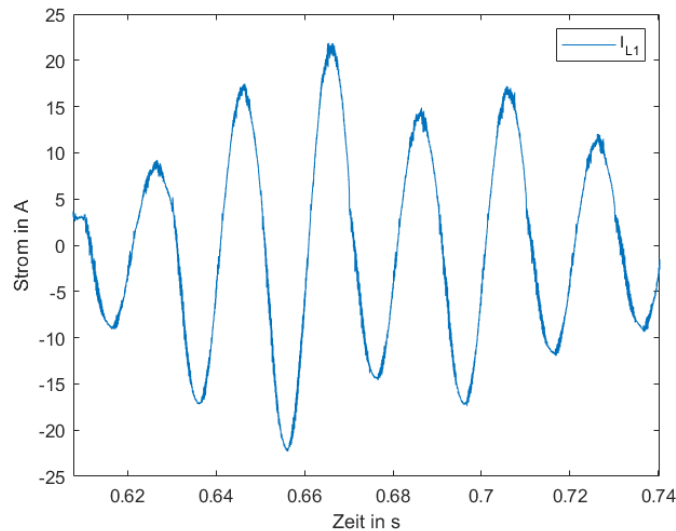


Abbildung 47: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Abbildung 48 zeigt einen Ausschnitt des Stromverlaufs ausgangseitig des Wechselrichters der Phasen L1 und den Stromverlauf von Szenario 2.

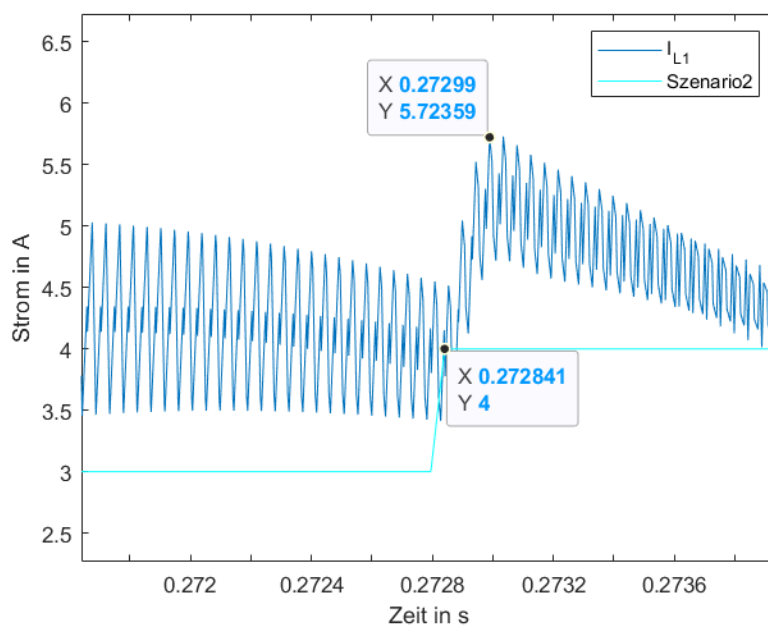


Abbildung 48: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des Stromverlaufes von Szenario 2 (Cyan) und der Stromverlauf bei der ersten Phase ausgangsseitig des Wechselrichters (blau) Schaltfrequenz von $f=22$ kHz

Es ist zu sehen, dass die Änderung des Stroms in der Phase eins mit geringer Verzögerung erfolgt. Die Zeitverzögerung bzw. die Reaktionszeit beträgt 0,149 ms.

Die Abbildung 49 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,041 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,377 \Omega$ bei 600 Hz an.

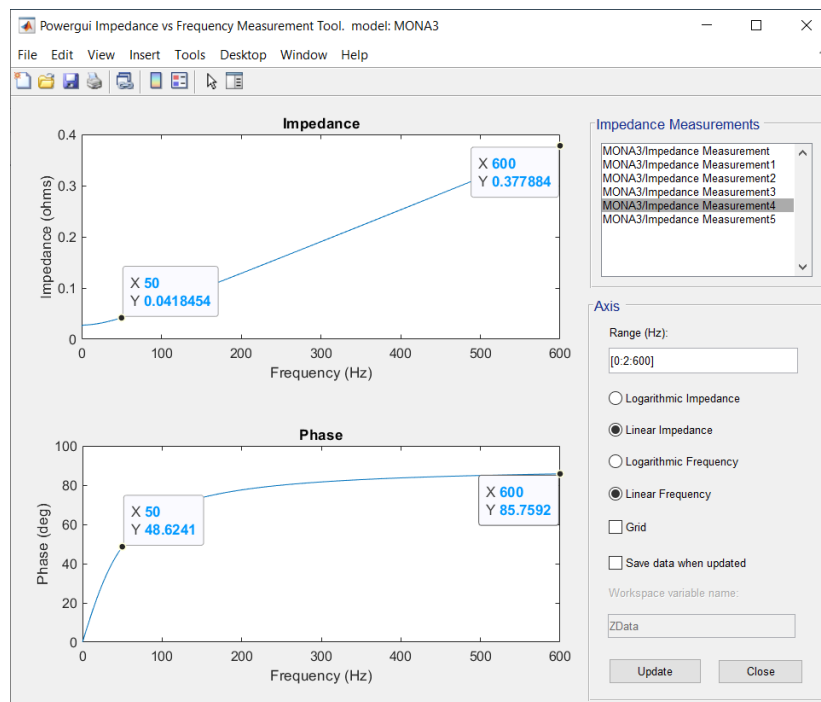


Abbildung 49: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2: Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=22 \text{ kHz}$

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $48,62^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $85,75^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° .

Hierzu wurde eine FFT-Analyse anhand von drei definierten Zeitpunkten innerhalb des Szenario 2 durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Zeitpunkte untersucht, um eine Einhaltung des Oberwellenanteils innerhalb der Grenzen über die gesamte Dauer des Szenarios zu gewährleisten. Die untersuchten Zeitpunkte sind im Bereich zwischen 0,04 s und 0,07 s bei 3,5 A, im Bereich zwischen 0,13 s und 0,16 s bei 10 A und im Bereich zwischen 0,46 s und 0,48 s bei 6 A (vgl. Abbildung 13). Die dort ermittelten Oberwellenanteile wurden mit den Grenzwerten aus Tabelle 2 verglichen und bewertet.

Abbildung 50 zeigt die Fast-Fourier-Transformation des Stromverlaufs im zweiten Szenario bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz und einem Strom von 3,5 A. Auf der X-Achse ist die Oberschwingungsordnung dargestellt, auf der Y-Achse der Oberschwingungsstrom in Prozent. Es ist erkennbar, dass der Oberschwingungsstrom bei mehreren Ordnungen 1 % überschreitet. Hier werden die dritte und 13. Ordnung analysiert, da das Stromnetz empfindlicher auf hohe Oberschwingungsordnungen reagiert (siehe Tabelle 2).

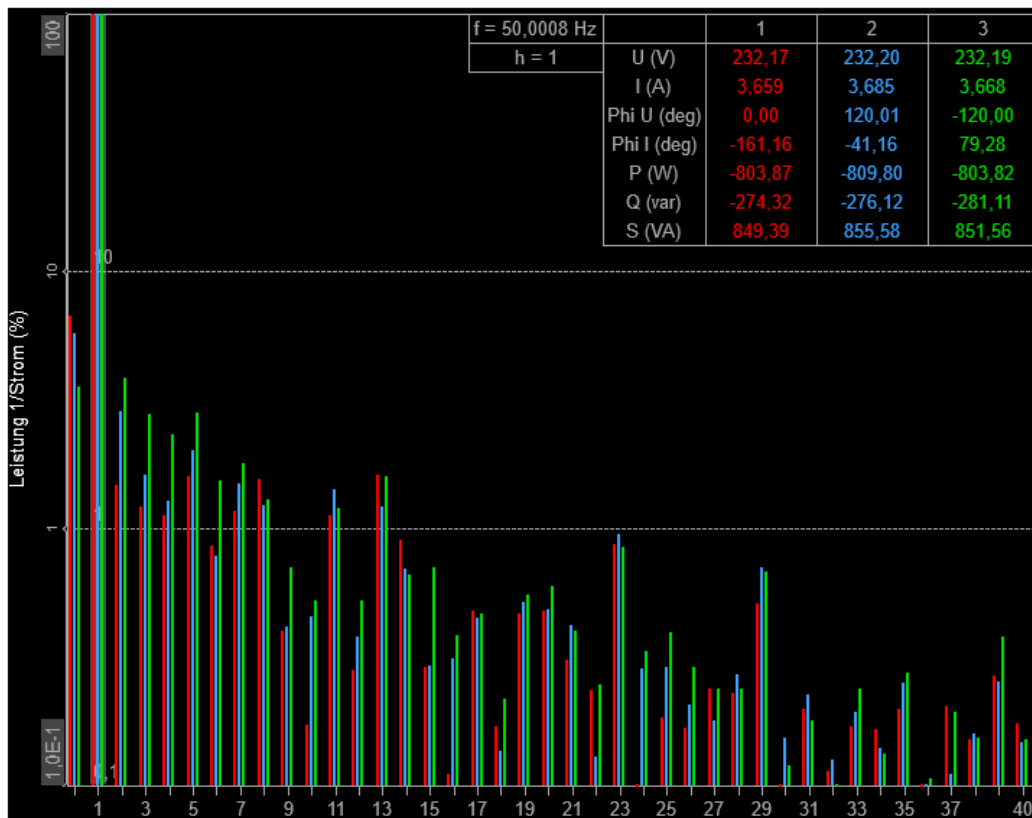


Abbildung 50: Szenario 2: FFT Messung bei einem Strom von 3,5 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)

Abbildung 51 (links) zeigt die Messungen bei der dritten Harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,101 A. Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstroms der dritten Ordnung, dieser 2,3 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

Abbildung 51 (rechts) zeigt die Messungen bei der 13. harmonischen Ordnung. Der höchste gemessene Oberschwingungsstrom beträgt 0,059 A. Dieser Wert liegt unterhalb des maximal zulässigen Oberschwingungsstrom der 13 Ordnung, dieser 0,21 A beträgt. Demnach befindet dieser sich um zulässigen Bereich.

f = 150,0024 Hz				f = 650,0103 Hz					
h = 3		1	2	3	h = 13		1	2	3
U (V)	1,317	1,425	1,593	U (V)	0,173	0,154	0,153		
I (A)	0,044	0,059	0,101	I (A)	0,059	0,045	0,059		
Phi U (deg)	-171,255	-172,331	-172,793	Phi U (deg)	24,975	138,589	-95,771		
Phi I (deg)	35,775	-39,689	122,534	Phi I (deg)	-160,696	-44,196	60,853		
P (W)	-0,052	-0,057	0,069	P (W)	-0,010	-0,007	-0,008		
Q (var)	-0,027	0,062	-0,146	Q (var)	0,001	0,000	0,004		
S (VA)	0,059	0,084	0,161	S (VA)	0,010	0,007	0,009		

Abbildung 51: Szenario 2: Messungen der dritten und 13. Harmonischen bei einem Strom von 6 A

Abbildung 52 zeigt die Fast-Fourier-Transformation des Stromverlaufs im zweiten Szenario bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz und einem Strom von 10 A. auf der X-Achse ist die Oberschwingungsordnung dargestellt, auf der Y-Achse der Oberschwingungsstrom in Prozent. Nach Überprüfung der einzelnen Oberschwingungsanteile ist keine Verletzung der Grenzwerte nach Tabelle 2 erkennbar. Laut der FFT Messungen, liegt die Stromqualität bei 10 A in den zulässigen Bereich.

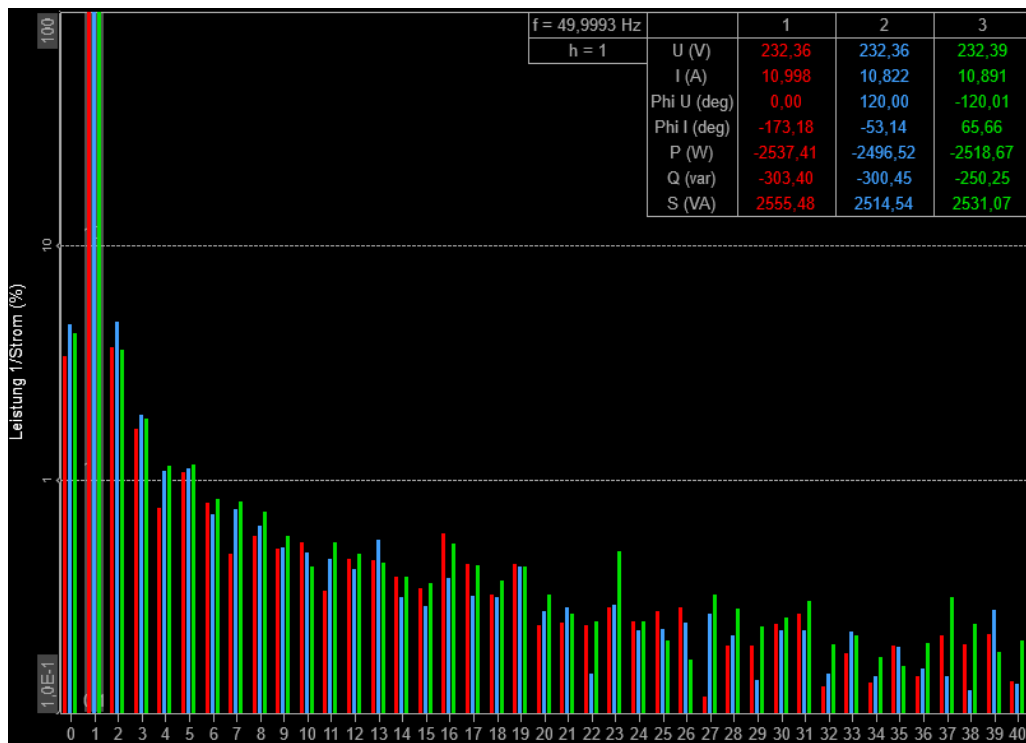


Abbildung 52: Szenario 2: FFT Messung bei einem Strom von 10 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)

Abbildung 53 zeigt die Fast-Fourier-Transformation des Stromverlaufs im zweiten Szenario bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz und einem Strom von 6 A. auf der X-Achse ist die Oberschwingungsordnung dargestellt, auf der Y-Achse der Oberschwingungsstrom in Prozent. Nach Überprüfung der einzelnen Oberschwingungsanteile ist keine Verletzung der Grenzwerte nach Tabelle 2 erkennbar. Laut der FFT Messungen, liegt die Stromqualität bei 6 A in den zulässigen Bereich.

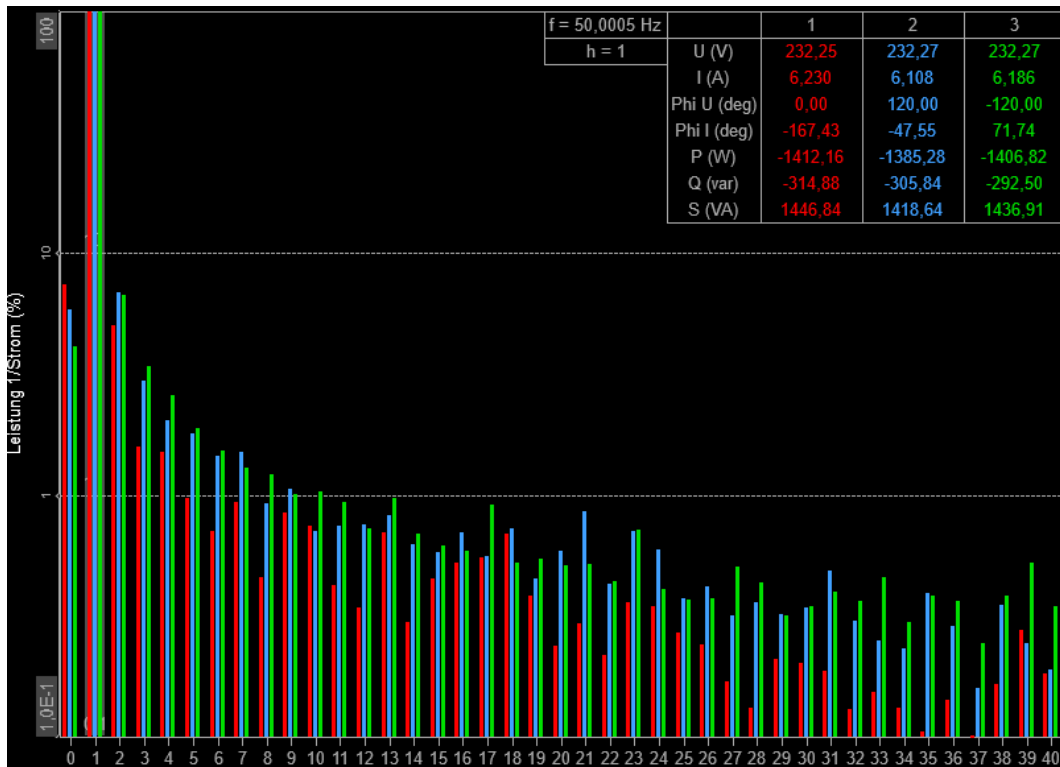


Abbildung 53: Szenario2: FFT Messung bei einem Strom von 6 A (Schaltfrequenz = 22 kHz)

Abbildung 54 Zeigt der Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1 (blau) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters von 8 A auf 12 A springt (siehe Abbildung 13). Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

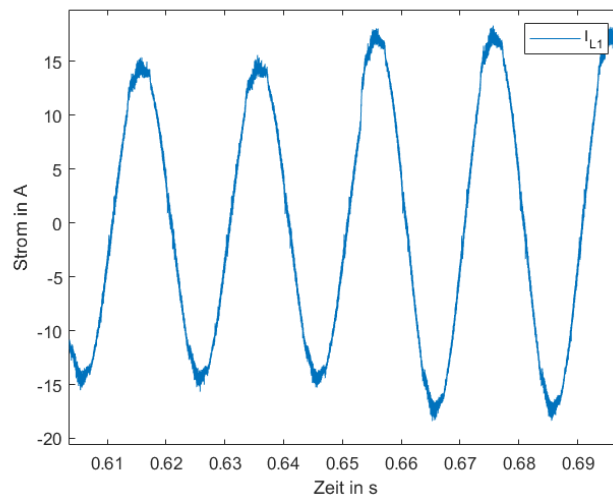


Abbildung 54: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangsseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Die Abbildung 55 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,0494 \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,395 \Omega$ bei 600 Hz an.

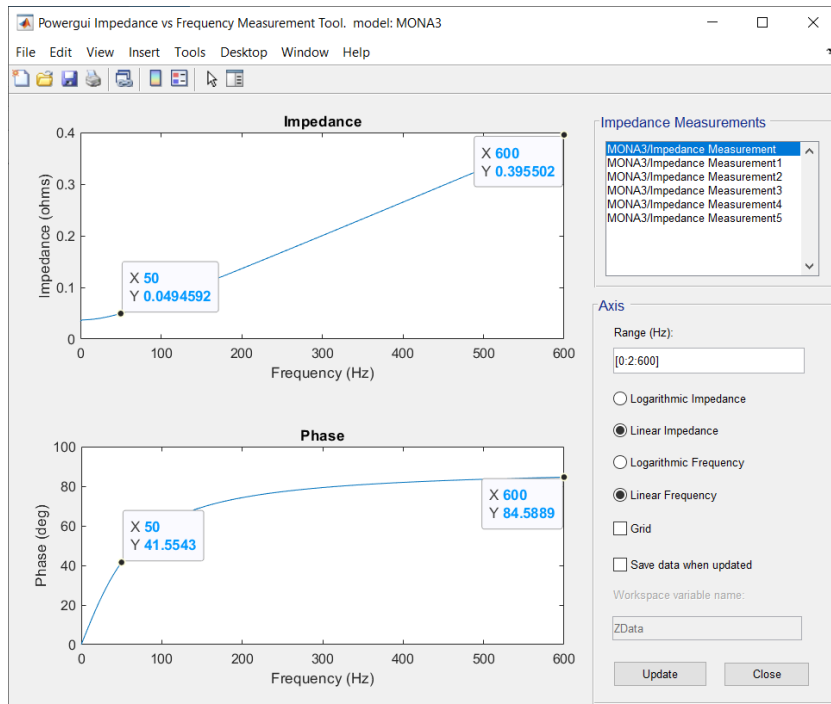


Abbildung 55: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=100$ kHz

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2 \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $41,55^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $84,58^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich änderndes Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1.Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° .

Abbildung 56 Zeigt der Stromverlauf ausgangsseitig des Wechselrichters der Phasen L1 (blau) und seine Änderung, wenn der Strom eingangsseitig des Wechselrichters zwischen 4 A und 12 A springt (siehe Abbildung.13). Es ist zu sehen, dass das System auf die Stromsollwertänderungen reagiert und den Strom ausgangsseitig entsprechend der Vorgabe ändert.

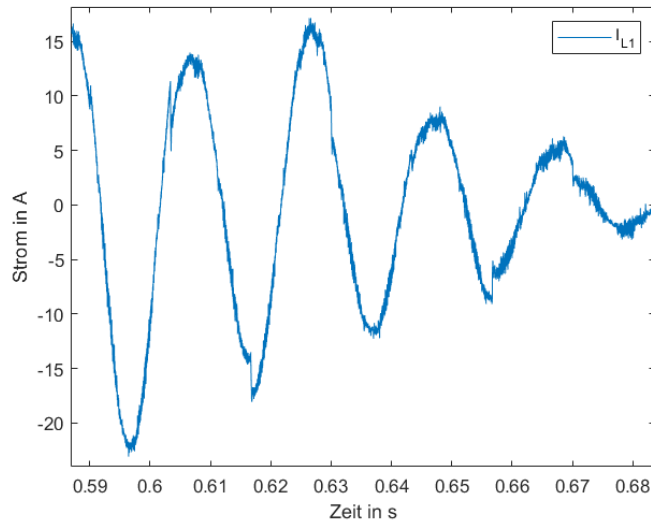


Abbildung 56: Hardwarebasierter Versuch: Ausschnitt des einphasigen Stromverlaufs ausgangseitig des Wechselrichters von Phase L1 (blau) bei einer Schaltfrequenz von $f=150\text{ kHz}$

Die Abbildung 57 zeigt die Messungen der Gesamtnetzimpedanz und des Phasenwinkels als Funktion der Frequenz im Bereich von 0 Hz bis 600 Hz (12-fach). Die erste Kurve beschreibt den Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $0,081\ \Omega$ bei 50 Hz und sie steigt auf $0,406\ \Omega$ bei 600 Hz an.

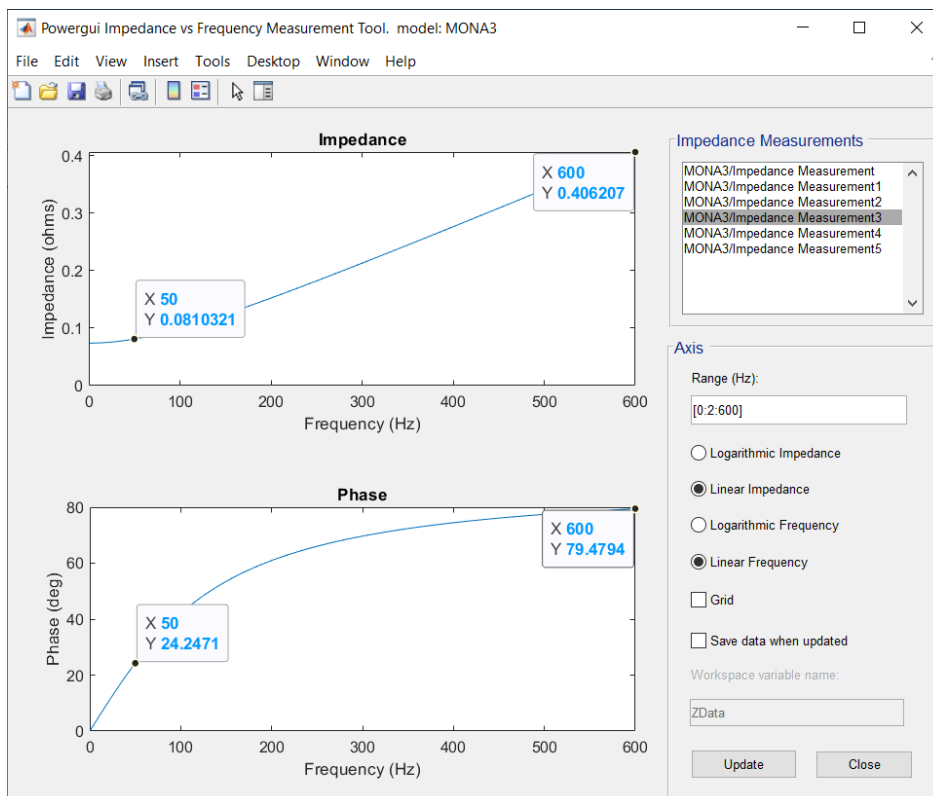


Abbildung 57: Hardwarebasierter Versuch: Szenario 2 - Netzimpedanzmessung bei einer Schaltfrequenz von $f=150\text{ kHz}$

Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Impedanzanstieg erkennbar. Aufgrund der sich ändernden Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Die maximal zulässige Netzimpedanz beträgt $0,2\ \Omega$

Die zweite Kurve beschreibt den Verlauf des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz und beträgt $24,24^\circ$ bei 50 Hz und sie steigt auf $79,47^\circ$ bei 600 Hz an. Demnach ist mit zunehmender Frequenz ein Phasenwinkelanstieg erkennbar. Aufgrund des sich ändernden Phasenwinkels in Abhängigkeit der Frequenz ist anzunehmen, dass sich Oberwellen dem Sinus 1. Ordnung überlagern. Der maximal zulässige Phasenwinkel beträgt 75° .

4.2.3 Zusammenfassung des hardwarebasierten Versuchs

Nachfolgend werden die Grunderkenntnisse der beiden Szenarien unter Durchführung des hardware-basierten Versuches zusammengefasst.

Szenario 1:

Im ersten Szenario fällt auf, dass die strom- und Spannungsqualität nicht perfekt ist und vor allem sehr viel Schwingung vorhanden ist. Bei niedrigen Frequenzen wie 22 kHz und 100 kHz sind die Schwingungen relativ mild, aber bei 150 kHz wird die Sinuswelle fast vollständig gebrochen. Andererseits, steigt die Netzimpedanz mit der Frequenz und erreicht bei der höchsten Frequenz $Z=0,0806 \Omega$ und einer Phasenverschiebung $\varphi=25,15^\circ$ was leicht aus dem zulässigen Bereich fällt.

Die Fast Fourier-Transformation der Stromverläufe bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz beweist, dass die Stromqualität trotz der Schwingungen in dem zulässigen Bereich liegt.

Szenario 2:

Im zweiten Szenario behält das Netz trotz des dynamischen Verhaltens eine relativ gute Stromqualität bei den Frequenzen 22 kHz und 100 kHz, aber bei der Frequenz von 150 kHz werden die Schwingungen deutlicher. Die maximale Spannung, gemessen zwischen einer Phase und einem Neutralleiter bei 150 kHz, beträgt 415,8 V, und der maximal zulässige Wert in $U_{\max} = 380 \text{ V} + 10\% = 418 \text{ V}$, sodass die Spannung immer noch in den zulässigen Bereich fällt. Die Netzimpedanz bei 150 kHz beträgt $Z=0,0810 \Omega$ und die Phasenverschiebung beträgt $\varphi = 24,24^\circ$ was aus dem zulässigen Bereich fällt.

Die Fast Fourier-Transformation der Stromverläufe bei einer Schaltfrequenz von 22 kHz zeigt, dass die Stromqualität trotz der Schwingungen im zulässigen Bereich liegt.

5 Vergleich von Simulation und Hardware

In diesem Kapitel wird ein Vergleich zwischen dem simulativen und dem hardwarebasierten Versuch aufgestellt und prägnante Unterschiede aber auch Gemeinsamkeiten ausgearbeitet.

Beim hardwarebasierten Versuch ist eine Abweichung von der idealen Sinusform in den Spannungsverläufen (siehe Simulation) erkennbar. Dieses hängt mit der realen Versuchsumgebung des Wechselrichters, dem Netzgerätes und den damit verbundenen parasitären Effekten und Wechselwirkungen des Gesamtsystems zusammen. Diese Effekte sind in einer Simulation nicht abbildbar, wie z. B. Verluste oder aber parasitäre Effekte. Es ist zu erwähnen, dass sich der Wechselrichter im hardwarebasierten Versuch und bei hohen Schaltfrequenzen erwärmt und demnach hohe Wärmeverluste jedoch geringe Schaltverluste mit steigender Schaltfrequenz aufweist. Außerdem ist es auch deutlich akustisch wahrnehmbar, dass der Wechselrichter bei 150 kHz nahe seiner Grenzschaftfrequenz betrieben wird. Eine genaue Verlustbetrachtung bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen wurde an dieser Stelle nicht weiter durchgeführt, ist aber ausblickend ein spannender Punkt für weitergehende Arbeiten.

Für jedes Szenario und jede Schaltfrequenz sind die im hardwarebasierten Versuch gemessenen Impedanzen höher als die im simulierten Versuch und haben einen Abweichungsbereich von bis zu $0,01 \Omega$.

Unabhängig vom Szenario ist jedoch in beiden Versuchen auffällig, dass bei der Schaltfrequenz von 150 kHz der Phasenwinkel φ sich außerhalb des zulässigen Grenzbereiches befindet. Im schlimmsten Fall beträgt der Phasenwinkel 24,24 °, was 2 ° vom zulässigen Bereich entfernt ist und daher nicht als systemstabilisierender Problematiken angesehen wird.

Bei der Schaltfrequenz von 22 kHz, wenn die Stromsollwertvorgabe in der Stromregelung von 4A auf 6A springt, ist die Reaktionszeit des Stromnetzes im hardwarebasierten Versuch 45 μ s länger als die Reaktionszeit beim simulierten Versuch (Siehe Abbildungen 17 und 48).

Im simulierten Versuch ist der Phasenwinkel bis zur Frequenz von 274 Hz im zulässigen Bereich geblieben. Im hardwarebasierten Versuch hingegen ist er nur bis zur 162 Hz geblieben. Der Höhere Phasenwinkel gemessen im hardwarebasierten zeigt wieder, dass die Einflüsse des realen Wechselrichters deutlicher sind als die des simulierten.

Ein weiterer auffälliger Aspekt lässt sich hinsichtlich des operativen Verhaltens erkennen. So erkennt man anhand des Phasenwinkels im simulierten Versuch eindeutig ein induktives Systemverhalten, welches auf die Eigenschaften der Leitungen innerhalb des Stromnetzmodells zurückzuführen ist. Im hardwarebasierten Versuch hingegen liegt ein stark kapazitives Verhalten vor (positive Phasenwinkel sind hier aufgrund der gemessenen Stromrichtung umzukehren und als negative und daher als kapazitiv zu deuten). Das kapazitive Verhalten des gemessenen Stromes ist auf den 4-Quadranten Umrichter zurückzuführen, der eine hohe Grundkapazität aufgrund intern verbauter Eingangs-Kondensatoren aufweist. Diese Grundkapazität ist bereits in vergangenen Versuchen messtechnisch nachgewiesen worden.

Da das zweite Szenario mindestens einmal und maximal zweimal pro Periode taktet, wird die Sinuswelle aufgrund des Schaltverhaltens deutlich in seiner Ursprungsform beeinträchtigt. Das Netzmodell hingegen bleibt stabil und hält eine gute Reaktionszeit und eine gute Stromqualität trotz des dynamischen Verhaltens des Wechselrichters. Das lässt auf eine sehr robuste Netzauslegung schließen.

Schließend, ist der simulierte Versuch definitiv gut genug, um das System in einer sicheren, rein simulierten Umgebung zu betreiben, aber um die Einflüsse des Wechselrichters auf das Netz genau zu messen, ist die Verwendung eines echten Hardware-Wechselrichters mit echten Relais erforderlich, da alle realen Faktoren berücksichtigt sind.

6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war es, die netzseitigen Sekundäreinflüsse durch dynamische Umrichterregelprozessen zu untersuchen. Durch das simulierte und hardwarebasierte Experiment war es möglich, die sekundären Einflüsse und die aufgetretenen Änderungen im Netz zu analysieren, wie z. B. die Strom- und Spannungsverläufe, die Impedanz- und Phasenwinkelwerte und die Reaktionszeit und die Oberschwingungen.

Hierzu wurde innerhalb dieser Arbeit eine hardwarebasierte Testumgebung aufgebaut, um anschließend sowohl simulativ als auch hardwarebasiert die sekundären Einflüsse am Netz zu untersuchen, die aufgrund des dynamischen Umrichterhaltens entstehen können. Mit dieser Umgebung wurde ermöglicht unterschiedliche Testszenarien hardwarebasiert durch Einflussnahme in die Stromregelung des Wechselrichters zu analysieren und diese Ergebnisse in beliebigen Stromnetzmodellen mit beliebigen Einstellungen einzubinden und deren Ergebnisse zu interpretieren.

Demzufolge wurden zunächst Modellanpassungen vorgenommen, die es ermöglichen, den Regler eines simulativen Umrichtermodells (simulierte Hardware + simulierter Regler) direkt auf die Ansteuereinheit (BBox) der realen Hardware übertragen zu können. Anschließend wurden zwei Szenarien erstellt. Das erste Szenario galt nach der Inbetriebnahme des Systems zunächst als erste dynamische Funktionsprüfung. Das zweite hingegen bot mit eins bis zu zwei Schaltvorgängen pro Periodendauer ein bereits deutlich dynamischeres Verhalten. Erwähnenswert ist, dass die maximale zulässige Schaltfrequenz des Wechselrichters 175 kHz und der maximale Strom 16 A beträgt, aber in dieser Bachelorarbeit betrug die maximale Schaltfrequenz 150 kHz und der maximale Strom 15,5 A, um eine Überschreitung der zulässigen Grenzen zu vermeiden.

Abschließend wurde alle vorangegangenen Schritte als ein Gesamtsystem betrieben und sowohl der simulativ geplante Versuch als auch der hybride Ansatz umgesetzt und die Ergebnisse dokumentiert, interpretiert und verglichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die sekundären Einflüsse, aufgrund des sich dynamisch verhaltenden Wechselrichters, sowohl in der Netzspannung, dem Netzstrom und der Impedanz durch die in den Sinuswellen auftretenden Schwingungen erkennbar sind. Das dynamische Verhalten beeinflusst die Sinusform zwar erheblich. In den meisten Fällen allerdings werden diese Schwingungen als mild und nicht schädlich für die Stromqualität angesehen, da die hier untersuchten Kenngrößen innerhalb der tolerierbaren Grenzen liegen. Untersuchungen hinsichtlich der Oberwellen wurden bisher im hardwarebasierten Versuch zur Schaltfrequenz von 22 kHz durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigten, dass alle vorliegenden Oberschwingungen im zulässigen Bereich nach Norm IEC 61000-3-2 (Klasse A) liegen. Dieses wurde unter Durchführung von FFT-Analysen gezeigt. Daraus ist zu schließen, dass sich die Netzqualität im zulässigen Bereich befindet und sich das Netzmodell als sehr robust erweist und dem hochdynamischen Verhalten des Wechselrichters standhält. Für die Fälle, in denen der Phasenwinkel und die Impedanz geringfügig außerhalb des zulässigen Bereichs liegen, sollten diese Untersuchungen ausblickend ebenfalls durchgeführt werden, um gegebenenfalls zum einen erhöhten Blindleistungsanteil zu kompensieren oder aber einen zu hohen Oberwellenanteil zu filtern, um Impedanz und Oberwellen innerhalb der Grenzen zu halten. Die zu filternde Grenzfrequenz hinsichtlich der Oberwellenbelastung kann mithilfe einer FFT tiefgründiger analysiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch die Ergebnisse der beiden durchgeführten Versuche verglichen, um der Abweichungsbereich zwischen der realen und der simulierten Umgebung zu beobachten. Die Einflüsse des realen Anlagensystems auf das Stromnetz sind erwartungsgemäß stärker als die des simulierten. Der Grund dafür ist, dass die simulierten Komponenten idealer sind als die Hardwarekomponenten, die realen Faktoren unterliegen.

Der Unterschied der Einflüsse des ersten und zweiten Leistungsszenarios auf das Stromnetz war in beiden Umgebungen sichtbar. Da sich im zweiten Szenario die Stromwerte auf der DC-Seite des Wechselrichters ein- bis zweimal pro Zyklus ändern, wurden die Sprünge in den Stromkurven häufiger und die Reaktionszeit des Systems etwas länger.

Ausblickend wäre eine Untersuchung des Einflusses des Abstandes zwischen Wechselrichter und Transformator innerhalb des Netzes auf die Netzqualität erwähnenswert. Auch die Untersuchung der Einflüsse mehrerer Wechselrichter mit dynamischem Verhalten, insbesondere bei der hohen Nachfrage nach Eigenerzeugungsanlagen, ist ein sehr interessantes Thema für die Zukunft.

7 Literaturverzeichnis

- [1] SiNED, „Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation“, Deutschland, 2021 (Vertraulich)
- [2] N.B.G. Brinkel, „Electrical Power and Energy Systems“, Niederlande, 2020
- [3] A.El-Naggar, „Control approach of three-phase grid connected PV inverters for voltage unbalance mitigation in low-voltage distribution grids“, Deutschland, 2016
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Projekt MONA 2030: Grundlage für die Bewertung von Netzoptimierenden Maßnahmen“, Deutschland, 2016 (Vertraulich)
- [5] Imperix, „B-Box Rapide Prototyping Controller“, Schweiz, 2020
- [6] Imperix, „PEB8024 - Half-bridge SiC power module“, Schweiz, 2021
- [7] F. Renken, „Skript Leistungselektronik“, Wilhelmshaven, 2013.
- [8] B. Verhelst, „Influence of grid-connected inverters on the power quality of the distribution grid“, Ghent University Belgium, 2014
- [9] S. Kohler, „Dena-Studie Systemdienstleistungen 2030“, Deutschland, 2014.
- [10] X. Chen, „Impedance-Phased Dynamic Control Method for Grid-Connected Inverters in a Weak Grid“ China, 2017
- [11] Regatron, „AG TC.ACS PROGRAMMABLE AC SOURCE-SINK SERIES“ [Datenblatt]
- [12] L. Stiny, „Aktive elektronische Bauelemente“, Deutschland, 2015
- [12] 519-1992 IEEE, „Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems“, USA,1993
- [13] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2,“ Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter), April, 2015.
- [14] P. Vaidyanathan, „Generalizations of the Sampling Theorem: Seven Decades After Nyquist“, USA, 2001
- [15] T. Tjaden, „Repräsentative elektrische Lastprofile für Wohngebäude in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis“, Deutschland, 2001
- [16] H. Edelmann, „Die Berechnung von Impedanz-, Admittanz- und gemischten Matrizen für besondere Klemmenpaare eines Netzes“, Deutschland, 1961

