Fachhochschule Kiel
University of Applied Sciences

Forschungs- und Entwicklungszentrum
Fachhochschule Kiel GmbH

C | A | U
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Technische Fakultät

Industriepartner:

WEB Andresen Wind- & Energieberatung, Breklum

M.O.E. Moeller Operating Engineering GmbH, Itzehoe

Optimierung und Langzeiterprobung eines Mittelspannungsnetzanalysators

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Hinrichs
Prof. Dr.-Ing. Marco Liserre

Projekt Nr.: 8/12-48, EKSH-Förderprogramm „HWT Energie und Klimaschutz“
Projektlaufzeit: 01. Juni 2020 - 31. Mai 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung....1

1.1 Allgemeine Aufgabenstellung....1
1.2 Aufbau des Containersystems....1
1.3 Spannungsmessung auf der Mittelspannungsebene....3
1.4 Strommessung....5

2 Systemkonfiguration des Impedanzanalysators für das Mittelspannungsnetz....6

2.1 Konfiguration mit sechs dreiphasigen dreistufigen NPC-Wechselrichtern....6
2.2 Hauptsteuerplatine....8

3 Experimentelle Ergebnisse....14

3.1 Betrieb eines Einzelumrichters....14
3.2 Parallelbetrieb von zwei Umrichtern....15
3.3 Auswertung der Versuchsergebnisse....16

4 Messsystem und Steuerung....17

4.1 Softwareanpassung....17
4.2 Hardwareanpassung....18
4.3 Transientenmessung mit neuer Messkarte 2-Kanal....24

5 Messungen....25

5.1 Frequenzgangmessungen....25
5.2 Aktivfilterung....28
5.3 Parallelbetrieb mehrerer Umrichter....33

6 Zusammenfassung....36

7 Abbildungsverzeichnis....38

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Aufgabenstellung

Mit dem vom BMWi geförderten Verbundprojekt „EEMSWEA, Analyse der elektrischen Eigenschaften von Mittelspannungsnetzen in Hinsicht auf eine Optimierung bei hoher Einspeisung aus Windenergieanlagen“ konnte ein Prototyp eines Messstromgenerators für Mittelspannungsnetze entwickelt und gebaut werden. Die Machbarkeit konnte in diesem Projekt nachgewiesen werden, hinsichtlich der Stabilität im Dauerbetrieb besteht jedoch noch Optimierungspotential.
Daher soll in diesem Folgeprojekt die Steuerung und Regelung des Umrichtersystems optimiert werden, damit verschiedene Betriebsweisen und Dauermessungen mit dem mobilen Messsystem möglich werden. Weiterhin sollen Dauermessungen, mit dem Ziel alle relevanten elektrischen Netzeigenschaften im Anschlusspunkt zu bestimmen, durchgeführt werden. Ferner soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen eingespeister Leistung und der Netzqualität besteht.
Die Durchführung von Langzeitmessungen zur aktiven Oberschwingungsspannungsfilterung mit dem Ziel, messtechnisch eine Basis zu legen, auf der eine Handlungsempfehlung zur Erbringung von Systemdienstleistungen aufgebaut werden kann.

1.2 Aufbau des Containersystems

Die Messeinrichtung besteht aus zwei 40“ High-Cube ISO-Containern, in denen alle für die Messung erforderlichen Komponenten integriert sind. Abbildung 1 zeigt die Container.

Die Container sind in mehrere Kammern unterteilt. Ein Container enthält die Transformatoren und die Mittelspannungsschaltanlage. Die Trafos und Schaltanlage sind für die 10 kV und die 20 kV Ebene geeignet. Das Einspeisefeld sowei die Abgänge zu den Haupttransformatoren sind mit einer dreiphasigen Strommessung versehen, die die Spannungsqualitätsmessungen bis zu einer Frequenz von 10 kHz ermöglichen. Die Strommessung erfolgt über Rogowskistromwandler.
Die Haupttrafos sind handelsübliche Stromrichtertransformatoren. Abbildung 2 zeigt die Transformatoren im Transformatorenraum des Mittelspannungscontainers.
Im Mittelspannungscontainer werden alle Strom- und Spannungssignale gemessen und an einem Isolationsverstärker im Schaltanlagenraum gesammelt und in den Messraum übertragen.

In dem anderen Container befinden sich mehrere Frequenzumrichter, welche die Messströme mit einer Frequenz von bis zu 10 kHz in das Stromnetz einprägen können. In der zweiten Hälfte dieses Containers befindet sich ein Messraum, wo die Mess- und Steuerrechner untergebracht sind und von dem aus die Messungen durchgeführt werden.

Abbildung 1: Die Container aufgebaut im Umspannwerk Vollstedt.

Abbildung 2: Die Haupttransformatoren zur Einprägung der Messströme in das Mittelspannungsnetz.

Abbildung 3: Vier Frequenzumrichter zur Einprägung der Oberschwingungsmeßströme ins Mittelspannungsnetz.

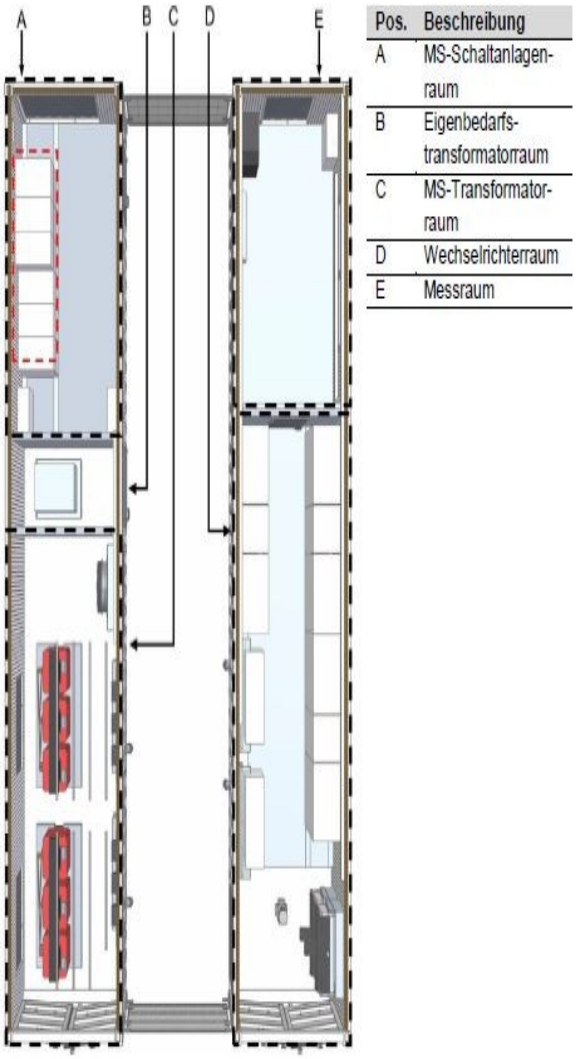


Abbildung 4: Raumaufteilung des Meßsystems in den beiden 40" HC Seecontainern.

1.3 Spannungsmessung auf der Mittelspannungsebene

Für die dreiphasige Messung der Strangspannungen in der Mittelspannungsebene werden drei kapazitive Spannungsteiler eingesetzt, die einen weiten Frequenzbereich aufweisen. Der Frequenzbereich von 50 Hz bis 10 kHz weist einen Amplitudenfehler von weniger als 0,5% und einen Phasenfehler von weniger als 1° auf.

Der Spannungsmesswandler teilt im Verhältnis 1:2500. Über den gesamten Frequenzbereich ist die Genauigkeit besser als ±0,3% im Frequenzbereich zwischen 10Hz und 10kHz. Der Frequenzgang ist von 1Hz bis 20kHz gemessen worden und zeigt einen sehr linearen Verlauf. Der Phasenfehler über den Frequenzbereich ist sehr klein liegt bei maximal 0.2°.

Bis zu einer Frequenz von 20 kHz funktionieren die Spannungswandler einwandfrei. Beim Erprobungsbetrieb stellte sich heraus, dass anscheinend hochfrequente Störanteile, die beim Umrichterbetrieb entstehen, übertragen werden und zu Fehlmessungen führen.

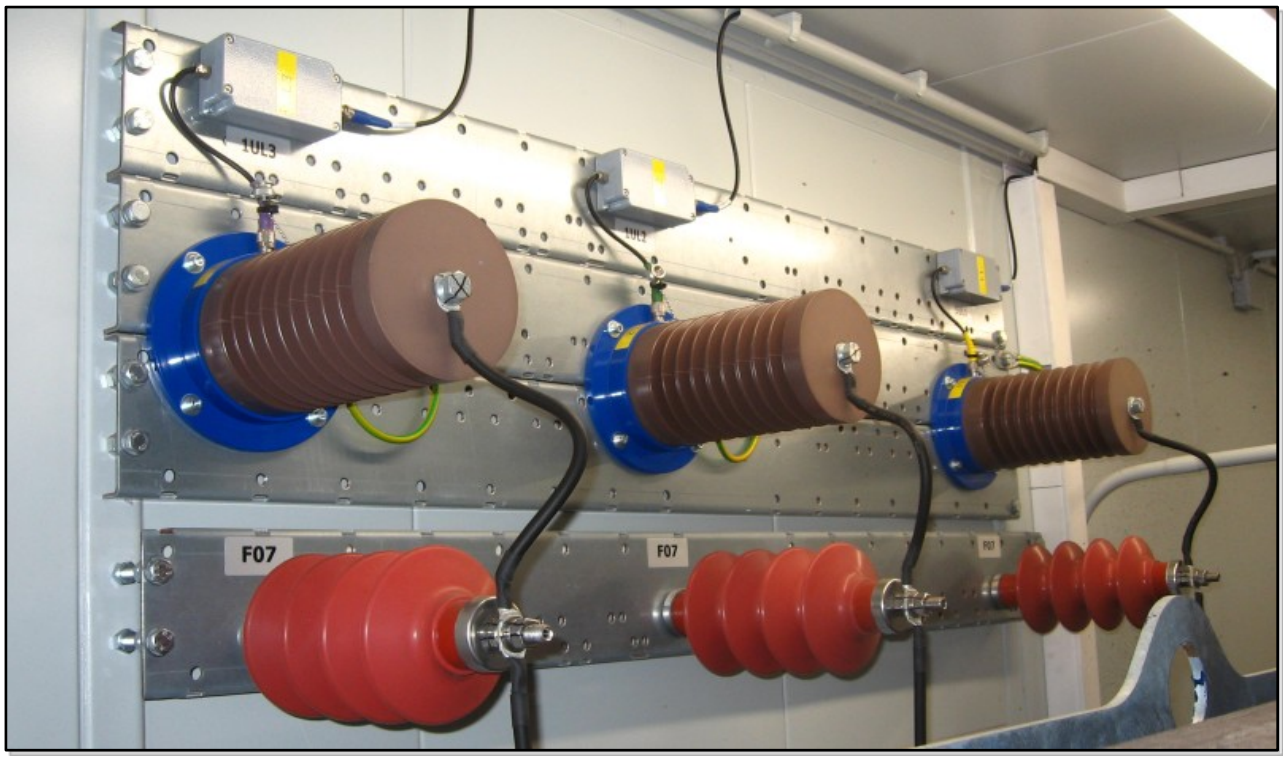


Abbildung 5: Die drei kapazitiven Spannungswandler für die Mittelspannungsmessung im Traforaum .

Vermutlich ist die obere Grenzfrequenz des Niederspannungskondensators nicht ausreichend, so dass der Teiler nocheinmal im hohen Frequenzbereich angepaßt werden muß. Optimiert werden muß außerdem Temperaturverhalten der Spannungswandlers. Da der Traforaum unklimatisiert, zeigte sich, dass das Teilerverhältnis mit der Temperatur schwankt. Eventuell muß ein Niederspannungskondensator mit einem anderen Temperaturkoeffizienten eingesetzt werden, der besser dem thermischen Verhalten des Hochspannungskondensators entspricht.

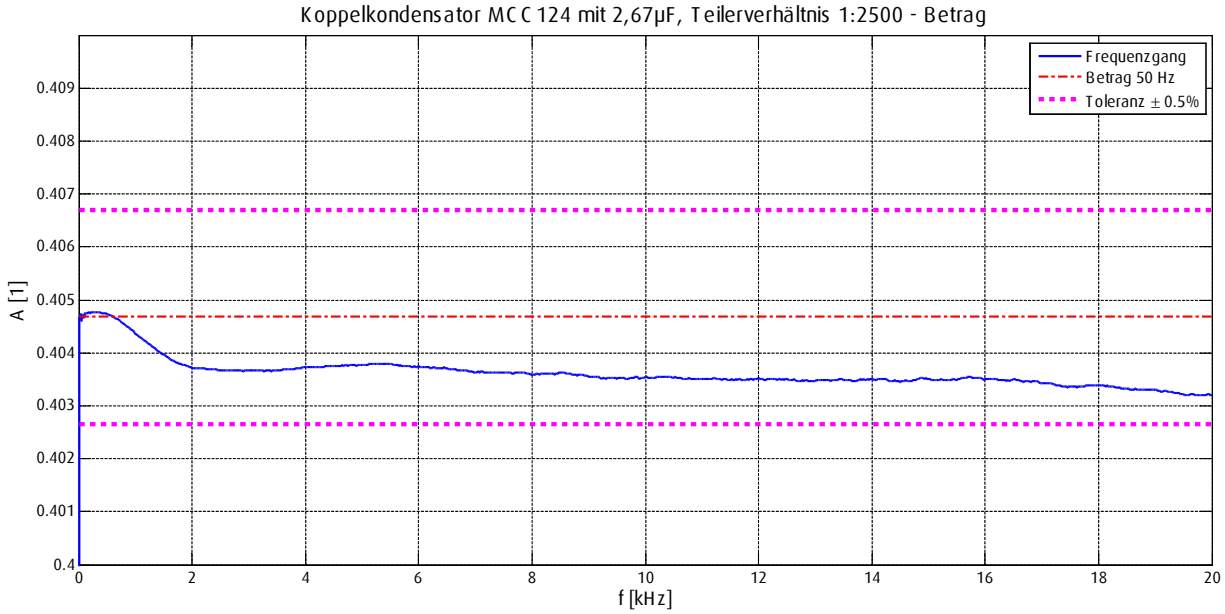


Abbildung 6: Amplitudenverlauf des kapazitiven Spannungsteilers bis 20kHz

1.4 Strommessung

In vorausgegangenen Projekten stehen geeignete Rogowskistromwandler zur Verfügung. Diese sind erprobt und in ihrer Genauigkeit und Frequenzgang getestet. Der integrierte Messverstärker (Rogowskistromwandler) erzeugt eine Ausgangsspannung, die dem zu messenden Strom proportional ist. Diese Stromwandler, die für die Niederspannungsebene gedacht sind, können auch die Ströme an isolierten Mittelspannungskabeln messen.
Hierzu eignet sich das Anschlussfeld innerhalb der Mittelspannungsschaltanlage im Bereich der Endverschlüsse. Abbildung 7 zeigt drei Stromwandler im Anschlussraum eines Schaltfelds der Mittelspannungsschaltanlage. Die Einspeisefelder und die Abgänge zu den Haupttransformatoren sind mit einer dreiphasigen Strommessung versehen. Im Messschrank im Schaltanlagenraum sind Anschlussmöglichkeiten für zusätzliche Messgeräte vorgesehen.

Abbildung 7: Rogowski-Stromwandler über den Endverschlüssen der Mittelspannungskabel im Anschlussraum der Schaltzelle zur dreiphasigen Messung der mittelspannungsseitigen Ströme.

2 Systemkonfiguration des Impedanzanalysators für das Mittelspannungsnetz

2.1 Konfiguration mit sechs dreiphasigen dreistufigen NPC-Wechselrichtern

Um das Mittelspannungsnetz anzuregen, werden gemäß dem Projektplan sechs dreistufige NPC-Stromrichter zur Einspeisung eines hochfrequenten Oberschwingungsstroms verwendet (siehe Abbildung 8). Es gibt zwei Transformatoren zwischen Niederspannungs- und Mittelspannungs-Wechselstrom (510Vrms / 20kV). Dabei sind drei Wechselrichter parallel an jeden Transformator angeschlossen. Obwohl die Wechselstromanschlüsse der drei Wechselrichter miteinander verbunden sind, ist der Gleichstromzwischenkreis des Wechselrichters nicht mit anderen Einheiten verbunden. Die detaillierte Spezifikation des Wechselrichters ist in Abbildung 7 dargestellt.

Nennleistung	400 kVA
Nennspannung AC	770 VAC
Nennspannung des Transformators	510 VAC
Nennstrom = maximaler Ausgangsstrom	300 AAC
Max. Ausgangsstrom bei 30kHz	150 AAC
Max. Zwischenkreisspannung	1500 VDC
Max. einzelne Zwischenkreisspannung	800 VDC
Zwischenkreiskapazität	16.64 mF
Einspeiseleistung	265 kVA
Schaltfrequenz (nom.)	15 kHz
max. Schaltfrequenz	30 kHz
IGBT Kühlung	Wasserkühlsystem
Maße	(100 x 200 x 80) cm

Abbildung 8: Spezifikation eines dreiphasigen dreistufigen NPC-Wechselrichters

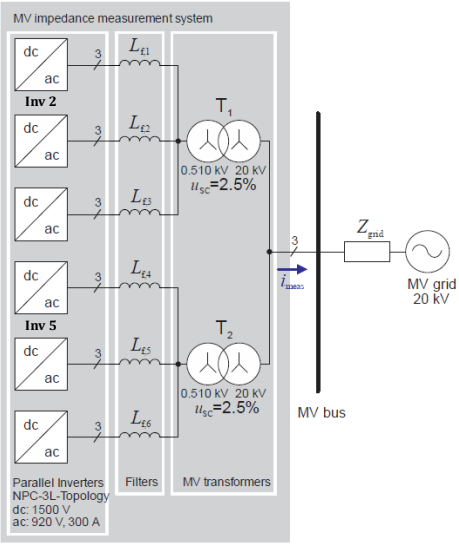


Abbildung 9: MV-Netzimpedanzanalysator, bestehend aus sechs dreiphasigen dreistufigen NPC-Wechselrichtern

Schnittstellenkarte des Wechselrichters

Jeder NPC-Wechselrichter wird von einer Schnittstellenkarte gesteuert, die mit einem FPGA ausgestattet ist (Xilinx Spartan III, vgl. Abbildung 9). Es ist erwähnenswert, dass diese Schnittstellenkarte keine eigene digitale Steuerung für den Betrieb des Wechselrichters enthält. Es handelt sich vielmehr um eine Schnittstellenplatine, die von einer Hauptsteuerplatine zur Steuerung aller

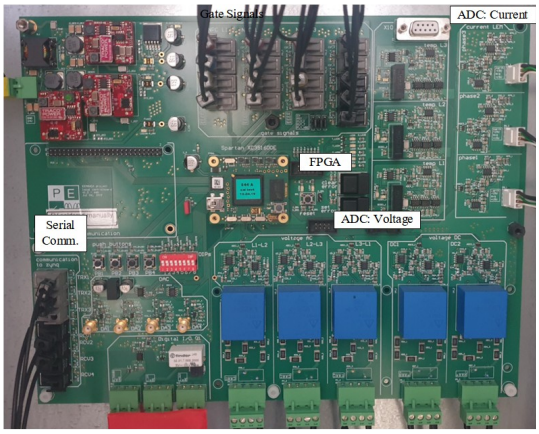


Abbildung 10: FPGA-basiertes Interfaceboard

Wechselrichters angesteuert wird. Die Schnittstellenkarte gibt zwölf PWM-Signale als optische Signale aus und misst analoge Signale, die von Strom- und Spannungssensoren im NPC-Wechselrichter ausgegeben werden. Es gibt drei Eingangsanschlüsse mit ADC-Schaltungen für die drei Phasenstromsensoren und insgesamt fünf für Spannungssensoren und die zugehörigen ADC-Schaltungen. Grundsätzlich wird diese Schnittstellenkarte von einer zentralen Hauptplatine über Lichtwellenleiter-Sender und -Empfänger gesteuert. Im FPGA der Schnittstellenkarte sind Module für die serielle Kommunikationsschnittstelle (SCI), für den PWM-Generator sowie für die Überstromerkennung vorhanden.

SCI-Module

Die Schnittstellenkarte ist über ein SCI-Modul mit der Hauptplatine verbunden. Das Protokoll für diese serielle Kommunikation ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Baudrate der Kommunikation beträgt 25MHz.

Hauptsteuerkarte zur Schnittstellenkarte

Type	Start byte	Mod index phase A	Mod index phase B	Mod index phase C	Switching frequency	Pre-charge	Clear Error	Enable	Stop byte
Size	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	1 Byte	1 Byte	1 Byte	1 Byte	1 Byte
Value	1	0…30000	0…30000	0…30000	5/10/15/20 /25/30	6/150	241/16	240/15	23

Schnittstellenkarte zur Hauptsteuerplatine - Kanal 1

Type	Start byte	Current phase A	Current phase B	Current phase C	DC-link voltage DC+	DC-link voltage DC-	Stop byte
Size	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	1 Byte
Value	1	0…4095	0…4095	0…4095	0…4095	0…4095	23

Schnittstellenkarte zur Hauptsteuerplatine - Kanal 2

Type	Start byte	Voltage phase A	Voltage phase B	Voltage phase C	Temperature	Error code	Stop byte
Size	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	1 Bytes	1 Byte
Value	1	0…4095	0…4095	0…4095	0…4095	0…4095	23

- Fehlercodes

1	Overcurrent	**6**	Overcurrent phase A
2	Overvoltage	**7**	Overcurrent phase B
3	Overtemperature	**8**	Overcurrent phase C
4	Optical fiber	**9**	Overvoltage DC+
5	Manual error	**10**	Overvoltage DC-

Abbildung 11: Serielles Kommunikationsprotokoll

PWM-Generator

Im Grunde genommen wurde das FPGA-Design in der Schnittstellenkarte gegenüber dem im vorherigen Projekt verwendeten Design nicht wesentlich verändert. Lediglich die Totzeitinjektion im PWM-Generator wurde angepasst. Im bestehenden Code aus dem vorherigen Projekt war eine Totzeitkompensation vorgesehen, die jedoch den Phasenstrom aufgrund eines falschen Tastverhältnisses der PWM-Signale verzerrt, wie in Abbildung 12(a) dargestellt. Das Problem mit der falschen Totzeitkompensation wurde behoben und die plötzliche Stromverzerrung tritt nicht mehr auf, wie in Abbildung 12(b) zu sehen ist.

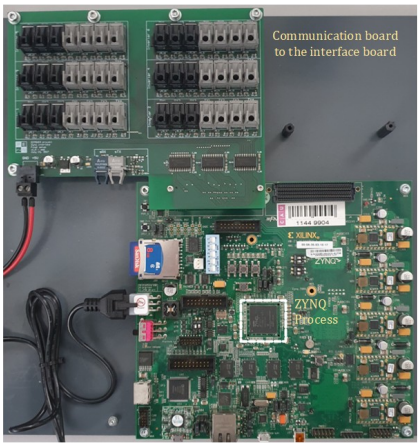


Abbildung 12: Hauptsteuerplatine (ZYNQ zc702 development kit)

2.2 Hauptsteuerplatine

Die Hauptsteuerplatine enthält alle für die Steuerung des Wechselrichters erforderlichen Regler, wie z. B. den Regler für die Einspeisung von Hochfrequenz-Oberschwingungsströmen. Der Wechselrichter kann über die bereits erwähnte FPGA-basierte Schnittstellenkarte betrieben und der Betriebsstatus kann gemessen werden. Die Hauptplatine basiert auf dem Xilinx ZYNQ Prozessor, der aus einer Dual-Core CPU und einem FPGA besteht. In der CPU, die als Processing System (PS) bezeichnet wird, sind alle Steuerungen in der Sprache C entworfen. Die SCI-Module, die für die Kommunikation mit den Schnittstellenkarten verwendet werden, sind im FPGA-Teil des Prozessors entworfen.

Systemkonfiguration

Das System wird als Interrupt-Service-Routine (ISR) entsprechend dem im FPGA-Bereich erzeugten Synchronisationssignal ausgeführt. Wenn beispielsweise die Schaltfrequenz für den

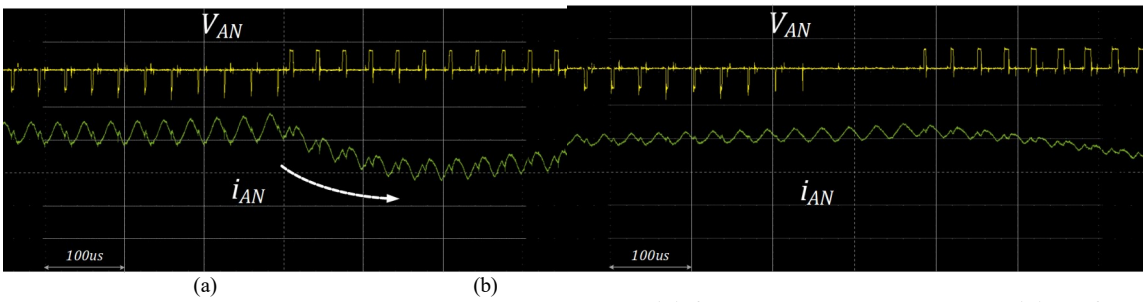


Abbildung 13: Ausgangsspannung und Strom der Phase A. (a) falsche Totzeitkompensation (b) entfernte Totzeitkompensation

Wechselrichter 30 kHz beträgt, wird die ISR alle 33,333 Sekunden ausgeführt. In der ISR sind Funktionen wie z. B. Regler enthalten, die der Reihe nach ausgeführt werden, wie unten dargestellt. Die Reihenfolge der Ausführung ist von oben nach unten und von links nach rechts. Im Falle der Kommunikation mit dem Controller für die Impedanzmessung über UART wird sie unabhängig von der ISR ausgeführt.

- ADC-Datenumwandlung und Fehlererkennung (Überstrom und Überspannung)
- Eingestellte Steuerbedingungen für die Wechselrichter 1 und 2
- Regler für Wechselrichter 1 (PLL, Zwischenkreisspannungsregler, Phasenstromregler und HF-Oberschwingungsstromregler, Einspeisung der Offsetspannung der dritten Harmonischen, Gleichspannungsausgleichsregler)
- Regler für Wechselrichter 2 (PLL, Zwischenkreisspannungsregler, Phasenstromregler und HF-Harmoniestromregler, Einspeisung der Offsetspannung der dritten Harmonischen, Gleichspannungsausgleichsregler)
- Datenumwandlung Digital-zu-Analog (DAC) - Variablenüberwachung

Die Hauptfunktionen des Systems werden im Folgenden beschrieben.

Phase-locked loop (PLL)

Für den Netzanschluss soll der Wechselrichter dreiphasige Spannungen entsprechend dem Phasenwinkel des Netzes erzeugen. Dieser kann mit Hilfe eines SRF-PLL-Reglers (Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop) berechnet werden. Der Eingang des PLL-Reglers ist die synchrone q-Achsen-Spannung, die durch die Transformation der gemessenen dreiphasigen Wechselspannungen bestimmt werden kann.
Zur Anregung des Netzes speist der Wechselrichter hochfrequente Oberschwingungsströme ein. Diese Oberschwingungsströme beeinflussen die Primärwicklungsspannungen des Transformators in Abbildung 8, und die gemessenen Netzwechselspannungen enthalten eine Oberschwingung, die der Frequenz des eingespeisten Stroms entspricht. Infolgedessen weist der geschätzte Netzphasenwinkel Schwingungen auf, die sich auf die Steuerung der Oberschwingungsstromeinspeisung übertragen und zu kritischen instabilen Bedingungen führen können. Um dieses Problem zu vermeiden, wurde die Dual Second-Order Generalized Integrator (DSOGI) PLL entwickelt, um den resultierenden Phasenwinkel vorab zu schätzen. Durch die Anwendung von DSOGI werden nur die Komponenten erfasst, die der Grundfrequenz der Netzspannung entsprechen, so dass der Einfluss der Oberschwingungsströme unterdrückt werden kann.

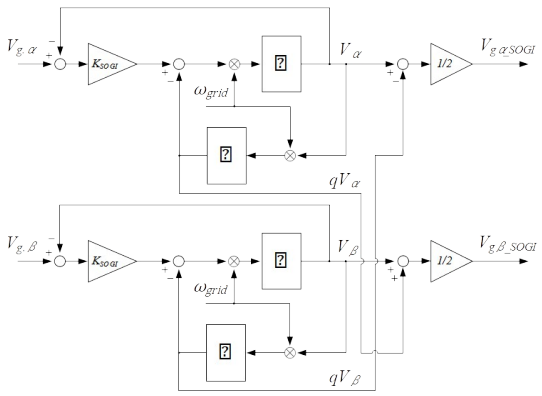


Abbildung 14: Extraktion der grundlegenden Komponenten mit DSOGI.

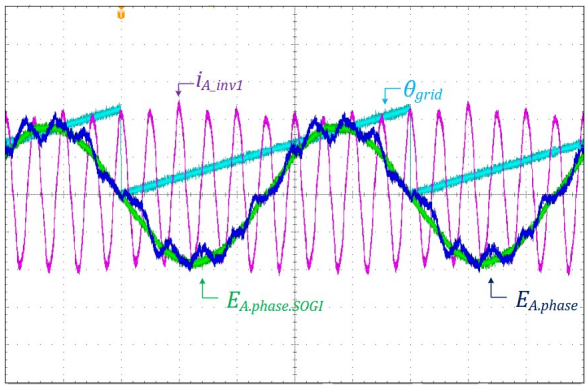
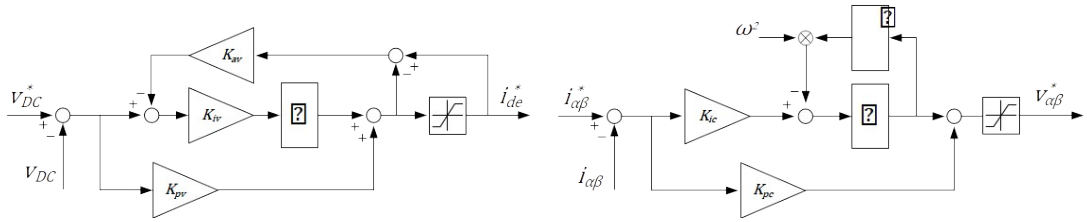


Abbildung 15: Grundlegende Komponenten mit DSOGI.



(a) (b)

Abbildung 16: Innere Steuerungen. (a) PI-Zwischenkreisspannungsregler (b) PR-Phasenstromregler

Zwischenkreisspannungs- und Phasenstromregler

Als Voraussetzung für die Einspeisung der HF-Oberschwingungsströme regelt jeder Wechselrichter die konstante Zwischenkreisspannung und den α-β-Achsenstrom (Betriebsgrundfrequenz, 50 Hz). Im System ist ein PI-Regler für die Regelung der konstanten Zwischenkreisspannung vorgesehen, wie in Abbildung 15(a) dargestellt. Da dieser Spannungsregler als übergeordneter Regler des Stromreglers verwendet wird, wird er einmal ausgeführt, während der oben beschriebene ISR zehnmal durchlaufen wird. Der Spannungsregler gibt einen der Wirkleistung entsprechenden d-Achsen-Stromsollwert der synchronen Koordinatentransformation an den α-β-Achsenstromregler aus. Für die Stromregelung wird der PR-Regler in Abbildung 15(b) durch die Eulersche Rückwärtsdiskretisierung für jede Achse (α und β) entworfen. Dieser Stromregler wird bei jedem ISR ausgeführt und gibt den Spannungsbefehl für die α-β-Achse aus. Nachdem dieser Spannungsbefehl mit dem Spannungsausgang des Reglers für hochfrequente Oberschwingungsströme kombiniert wurde, kann ein dreiphasiger Spannungsbefehl durch die inverse Clarke-Transformation erhalten werden.

Hochfrequenz-Oberschwingungsstromregler

Der Hochfrequenz-Oberschwingungsstromregler wird getrennt vom oben erwähnten Phasenstromregler entworfen. Dieser Regler wird durch impulsinvariante Diskretisierung entworfen und beinhaltet eine Verzögerungskompensation – er verhält sich also anders als der grundlegende α-β-Achsenstromregler. Die digitale Implementierung dieses Stromreglers ist in (1) dargestellt. Die Reglerverstärkungen K_p und K_i werden als $L_f/3T_s$ and $2f_{res}K_p$ bestimmt. Die Verstärkung K_i ist proportional zur Frequenz des eingespeisten Stroms.

$$G_{P+RES,\varphi}(s)=K_p+\frac{K_i T_s z[\cos(\varphi_{res})z-\cos(\varphi_{res}-\omega_{res}T_s)]}{z^2-2z\cos(\omega_{res}T_s)+1} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varphi_{res}=2\omega_{res}T_s & \omega_{res}<2\pi f_{co} \\ \varphi_{res}=\frac{\pi}{2}+1.5\omega_{res}T_s & \omega_{res}\geq 2\pi f_{co} \end{cases} \quad (2)$$

Wenn eine hochfrequente Oberschwingungsstromregelung erforderlich ist, muss eine Phasenverzögerungskompensation (φ_{res}) in die Struktur des Resonanzreglers implementiert werden, um die Phasenantwort des Systems richtig zu modifizieren, die Phasenspannen zu erhöhen und Instabilität zu vermeiden. Wie in (2) dargestellt, wird die Verzögerungskompensation auf den Regler in zwei Fällen angewendet, je nach der Frequenz ω_{res} des eingespeisten Stroms. Zusätzlich zum Regler wird eine Funktion für eine Phasenverschiebung des eingespeisten Stroms in den Regler eingefügt, um die Impedanz mit einem anderen Phasenwinkel zu messen.
Darüber hinaus treten bei der Einspeisung von Oberschwingungsstrom einige Oberschwingungen auf, speziell die 5., 11., 17., 23. und 29.

Speicherzuweisung für die Debugging-Umgebung

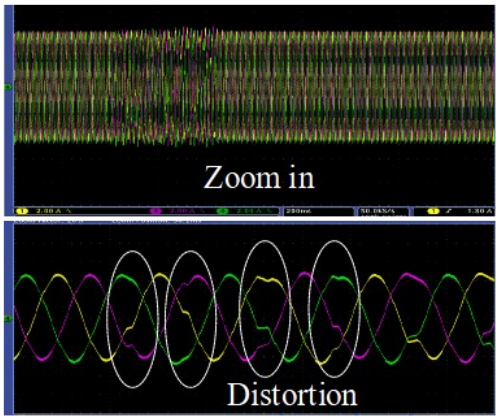


Abbildung 17: Bestehendes Problem der Fehlersuche bei Variablen.

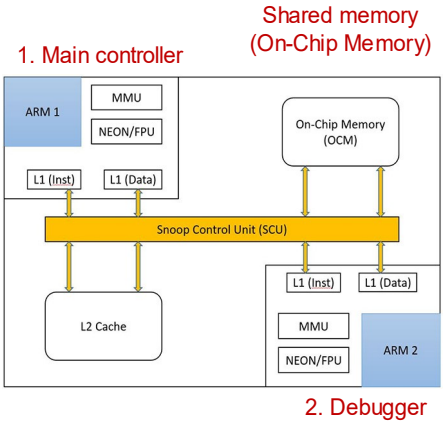


Abbildung 18: Speicherbereiche im ZYNQ-Prozessor

Bei der Entwicklung von Steuerungssystemen ist es unerlässlich, ein Debugging-System einzurichten, das die Variablen in Echtzeit überwachen und ändern kann, um die Fehler und die Leistung des entworfenen Systems zu überprüfen. In der Regel bietet die IDE (Integrated Design Environment) bereits Debugging-Funktionen. Darüber hinaus bietet das SDK (Software Development Kit), das in ZYNQ-Prozessoren verwendet wird, auch verwandte Funktionen wie "Expression"-Fenster. Aufgrund von Optimierungsproblemen zwischen SDK und Verarbeitungssystem, die ein inhärentes Problem des Prozessors sind, gab es jedoch ein fatales Problem, das sich auf das CPU-Verhalten auswirkte, wenn diese Funktion verwendet wurde, wie in Abbildung 11 dargestellt. Die Funktion des Gesamtsystem war nicht mehr gegeben, da das Problem direkt die Steuerung des Umrichters betraf. In früheren Tests wurde als Lösung eine externe Software verwendet, um die für die Steuerung erforderlichen Variablen zu ändern. Die Entwicklung kann jedoch sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, da dieser Ansatz sehr restriktiv ist. Daher war es notwendig, eine geeignete Debugging-Umgebung zu konfigurieren, um den Zeitaufwand und die Komplexität für Entwicklung und Tests zu verringern.

Um dieses Problem zu lösen, wird die zweite CPU (CPU2) im ZYNQ-Prozessor verwendet, um die in CPU1 verwendeten Variablen zu überwachen und zu ändern. Alle in CPU1 verwendeten Variablen werden in einem gemeinsamen Speicher definiert, wie in Abbildung 13 dargestellt. So kann die CPU2 an einen zentralen Ort auf die Variablen zugreifen. In CPU2 sollte eine Funktion für die Arbitrierung definiert und eingebunden werden, um Wechselwirkungen zwischen den zwei CPUs zu vermeiden. Auf diese Weise kann jetzt die CPU 2 auf den Speicher zugreifen, wenn CPU 1 einen Rechenschritt beendet hat. Es ist zu beachten, dass der ISR in CPU1 beeinträchtigt wird, wenn CPU1 im vorherigen ISR zu viel Zeit benötigt oder zu viele Variablen von CPU2 überwacht werden.

FPGA

Abbildung 18 zeigt eine Konfiguration der entworfenen Modelle im FPGA-Bereich des ZYNQ-Prozessors. In diesem FPGA-Bereich sind Kommunikationsmodule zum Senden von Daten, für den Betrieb des Wechselrichters sowie zum Empfangen analoger Messdaten vorgesehen. Dieses Modul wurde unter Berücksichtigung des in Tabelle 2 dargestellten Kommunikationsprotokolls entworfen. Darüber hinaus ist ein SPI-Modul (Serial Peripheral Interface) für die Kommunikation mit einem externen DAC-Gerät vorgesehen, um die analogen Signale der im Verarbeitungssystem verwendeten Variablen zu überwachen. Außerdem gibt es noch einen Generator für Synchronisationssignale. Die Frequenz des erzeugten Signals, ein Impuls mit 50 Zyklen, kann am System eingestellt werden. Mit diesem Synchronisationssignal können ISR, PWM-Signale und analoge Signalmessungen synchronisiert werden.

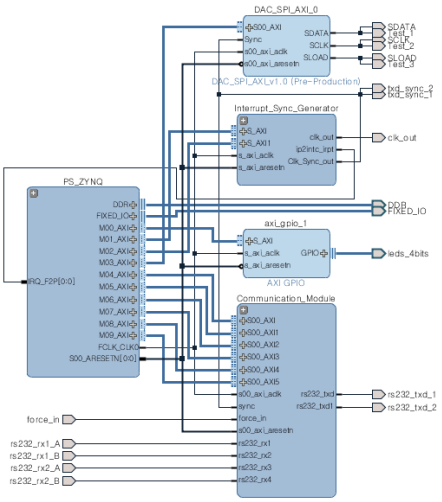


Abbildung 19: Konfiguration des FPGA-Bereichs im ZYNQ-Prozessor

3 Experimentelle Ergebnisse

3.1 Betrieb eines Einzelumrichters

Wenn ein hochfrequenter Oberschwingungsstrom in das Netz eingespeist wird, um das Netz für die Impedanzmessung anzuregen, wird die Frequenz beginnend bei 250 Hz in 50 Hz-Schritten mit der für die Impedanzmessung erforderlichen Stromstärke bis auf 4,5 kHz erhöht. Es wurde bestätigt, dass die Stromregelung ab 4,5 kHz instabil wurde und eine Regelung von 5 kHz und

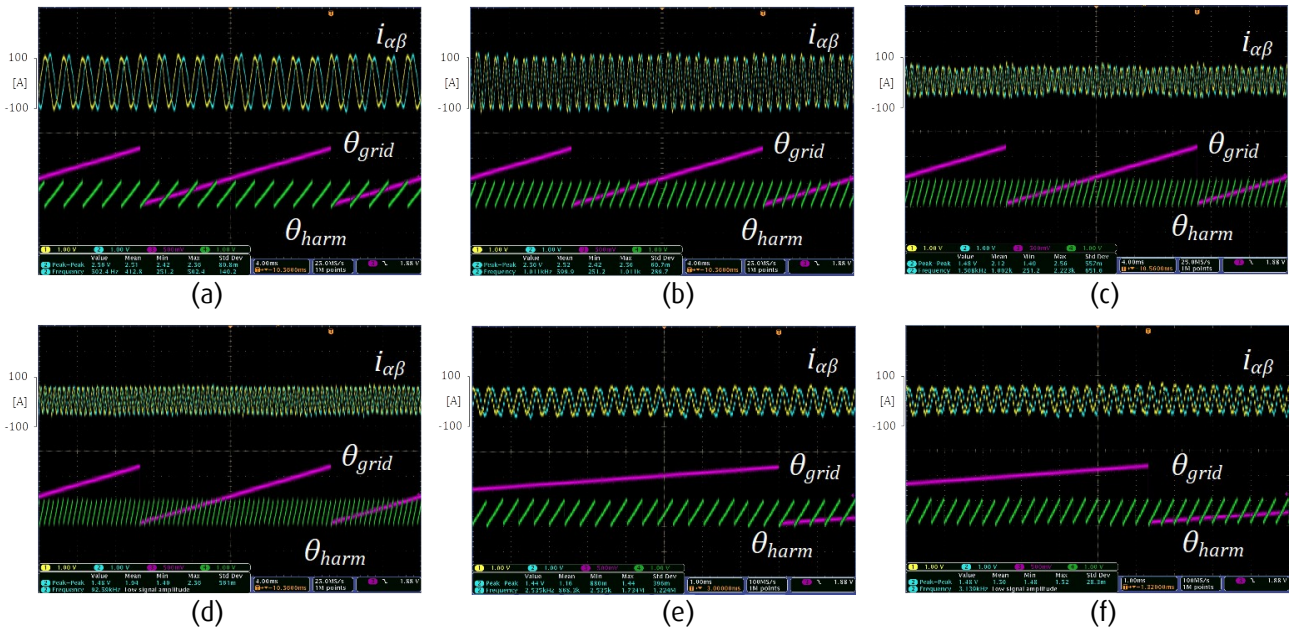


Abbildung 20: Hochfrequente Oberschwingungsstrominjektion (α-β-Achsenstrom). (a) 500Hz (b) 1kHz (c) 1,5kHz (d) 2kHz (e) 2,5 kHz (f) 3kHz.

etwas mehr möglich ist, wenn gleichzeitig die Stromstärke abnimmt. Obwohl es möglich war, diese Instabilität zu vermeiden, ist eine genaue Messung der Impedanz aufgrund des geringen Störeffekts des (kleineren) eingespeisten Stroms auf die Netzspannung nicht möglich. Als einer der Gründe für dieses Problem wird vermutet, dass der Wechselrichter die Spannung nicht mehr linear ausgeben kann, weil die Stromfrequenz zu hoch ist, um einen korrekten Spannungsvektor zu erzeugen, wenn man das niedrige Frequenzverhältnis zwischen der Schaltfrequenz und der Oberwellenfrequenz berücksichtigt.

3.2 Parallelbetrieb von zwei Umrichtern

Um die Impedanz des Mittelspannungsnetzes genau zu messen, ist vor allem im Hochfrequenzbereich ein höherer Strom erforderlich als bei einem einzeln eingesetzten Umrichter, da der im Mittelspannungsnetz fließende Strom hinter dem Transformator etwa 40-mal kleiner ist als auf der Niederspannungsseite. Aus diesem Grund ist geplant, sechs Wechselrichter mit zwei Transformatoren parallel zu betreiben. Im Experiment für den Parallelbetrieb zeigt Abb. 20 die beiden Parallelbetriebsergebnisse zur hochfrequenten Stromeinspeisung. Die Stromregelung ist stabil, so lange die Frequenz weniger als 2,5 kHz beträgt, jedoch wird die Stabilität der Regelung bei einer Stromfrequenz von mehr als 3 kHz

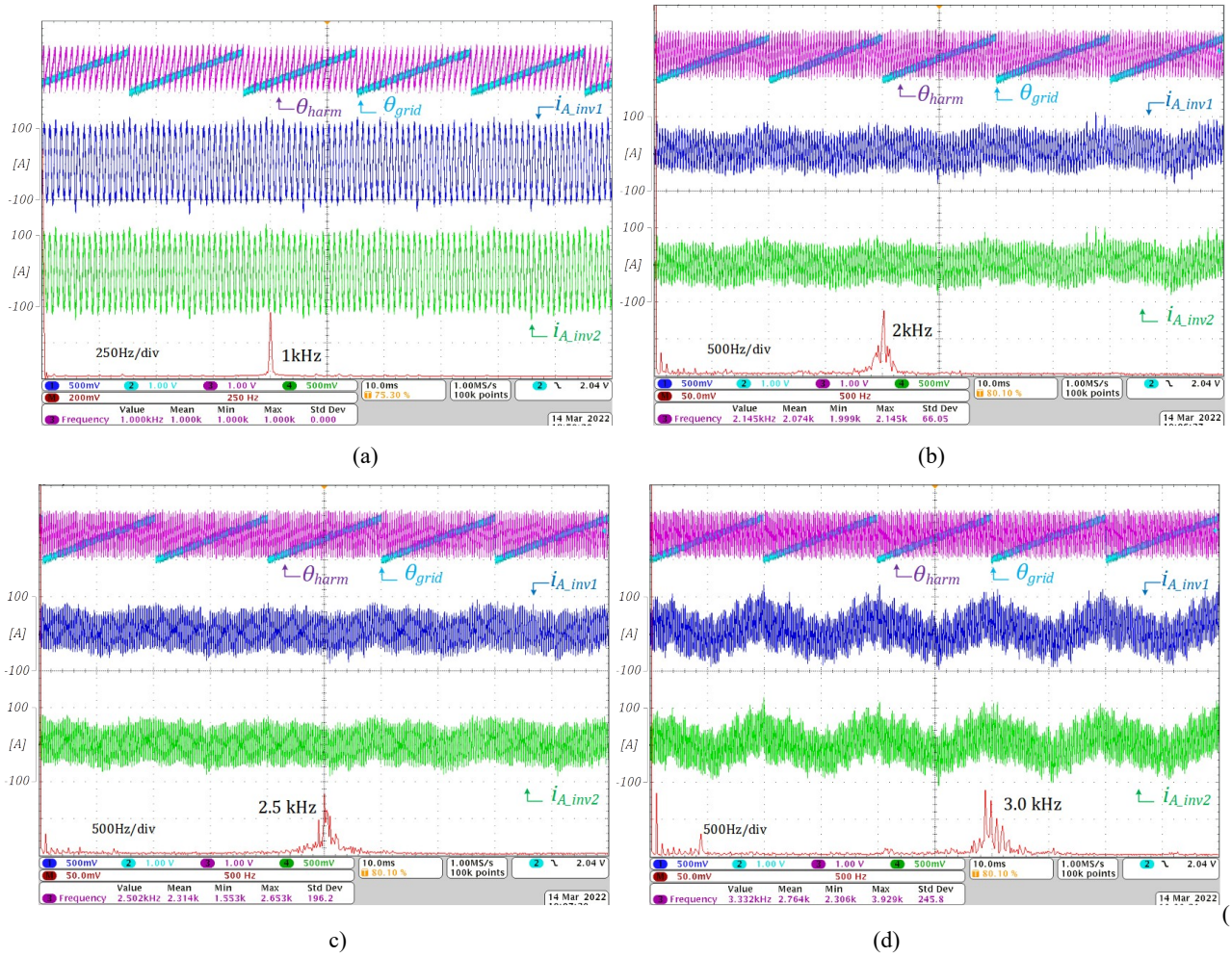


Abbildung 21: Hochfrequente Oberschwingungsstromeinspeisung mit zwei Parallelwechselrichtern (a) 1kHz (b) 2kHz (c) 2,5kHz (d) 3kHz

instabil, wie in Abb. 20(d) gezeigt. Dies ist auf die Wirkleistungsregelung zurückzuführen. Wenn die Frequenz weiter ansteigt, fließt nur der niederfrequente Strom bei 50 Hz ohne den hochfrequenten Strom und die Regelung wird leicht instabil. Wenn man bedenkt, dass der einzelne Wechselrichter den hochfrequenten Strom bis etwa 4,5 kHz regeln kann, sind die Frequenzbereiche, in denen die Stromeinspeisung reduziert wird, geringer. Es wird angenommen, dass die Wechselwirkung zwischen den beiden Wechselrichtern die

Hauptursache für dieses Problem ist, so dass weitere Forschung in diese Richtung erforderlich ist.

3.3 Auswertung der Versuchsergebnisse

In diesem Projekt wurde seitens der CAU das Mikrocontroller-Programm für die Steuerung von dreistufigen NPC-Wandlern entwickelt und Experimente durchgeführt. Auch wenn nur ein Wechselrichter verwendet wurde, war es möglich, die Impedanz des Mittelspannungsnetzes im Frequenzbereich unter etwa 3 kHz zu messen. Allerdings war die Regelung ab 4,5 kHz erst durch eine Absenkung der Stromstärke möglich. Aus diesem Grund müssen mehr Wechselrichter eingesetzt werden, um die Stromstärke zu erhöhen. Es war jedoch schwierig mehrere Wechselrichter mit mehr als 3 kHz zu betreiben, da die Regelung instabil wurde. Dieses Ergebnis bestätigt, dass es eine Wechselwirkung zwischen den Wechselrichtern gibt, die an verschiedene Transformatoren angeschlossen sind. Mit anderen Worten: Die Wechselwirkung zwischen den Wechselrichtern sollte genauer untersucht und analysiert werden, damit der MV-Analysator im Parallelbetrieb größere Ströme stabil einspeisen kann.

4 Messsystem und Steuerung

4.1 Softwareanpassung

Die Steuerung der Umrichter sowie die Aufnahme und Auswertung der Messwerte erfolgt über eine eigens entwickelte Mess- und Steuersoftware. Diese ist schon in mehreren Projekten bei Messungen in Niederspannungsnetzen erfolgreich eingesetzt worden. Für die geplanten Messungen im Mittelspannungsnetz mußte ein Modul hinzugefügt werden, welches die Umrichter des neuen Messsystems entsprechend ansteuert.
Die Steuerung der Umrichter erfolgt über eine optische serielle Schnittstelle, die über ein USB-Modul an dem Mess- und Steuerrechner angebunden ist. Diese sendet über die Schnittstelle die Werte für Frequenz, Stromstärke und Phasenwinkel an die Umrichtersteuerung, die dann den entsprechenden Strom über die Umrichterbrücken in das Netz einprägen soll.

Der maximale Ausgangsstrom der Umrichter muß mit steigender Frequenz begrenzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einerseits höhere Frequenzen höhere Verluste in den Leistungshalbleitern verursachen, zum anderen ist bei höheren Frequenzen, wegen der höheren Netzimpedanz, auch gar nicht mehr die volle Leistung nötig, wie im niedrigen Frequenzbereich.

Frequenz	Stromstärke Effektiv (rms)
f < 1000 Hz	300 A
1000 Hz < f <1500 Hz	200 A
1500 Hz < f < 2000 Hz	150 A
2000 Hz < f < 3000 Hz	100 A
3000 Hz < f < 4000 Hz	75 A
4000 Hz < f < 5000 Hz	60 A
5000 Hz < f < 10000 Hz	30 A

In dem untersuchten Mittelspannungsnetz gibt es im Frequenzbereich von 1500Hz bis 2500Hz eine stärker ausgeprägte Resonanzstelle. Hier führt schon die Einprägung eines kleineren Oberschwingungsstroms zu einer deutlich größeren Spannungserhöhung. Aus diesem Grund wurde eine Strombegrenzung in der Software realisiert, so dass im Bereich von Resonanzstellen nur sehr kleine Meßströme eingespeist werden.

Die Auswerte- und Steuerungsmodule für die Frequenzgangmessung und die Aktivfilterung funktionieren bereits einwandfrei. Diese sind in mehreren Projekten, die in den letzten Jahren erfolgreich abgeschlossen wurden, bei denen diese Messungen in Niederspannungsnetzen erfolgten, schon umfassend erprobt worden. Für Messungen in Mittelspannungsnetzen sind hier keine weiteren Anpassungen nötig.

Bei bisherigen Messungen war die Steuerung der Umrichter und das zugehörige Controlboard oftmals für Abstürze und Instabilitäten verantwortlich. Dies war oft der Fall bei Einprägung von Meßströmen mit höherer Frequenz. Die CAU hat in mehreren Schritten die Stabilität der Umrichtersteuerung verbessert. Außerdem wurde die Software für den Parallelbetrieb von zwei oder mehreren Umrichtern angepasst. Bisher war nur der Betrieb eines einzelnen Umrichters möglich.

4.2 Hardwareanpassung

An der Steuerung des Umrichtersystems durch die Mess- und Analysesoftware wurden etliche Anpassungen vorgenommen. Oftmals ist es durch die Einstrahlung elektromagnetischer Wellen (EMV) zu Problemen gekommen. Außerdem wurde versucht, den Messrechner fern von den Umrichtern in den Schaltanlagenraum im anderen Container zu verlagern, um die Störeinflüsse zu reduzieren.

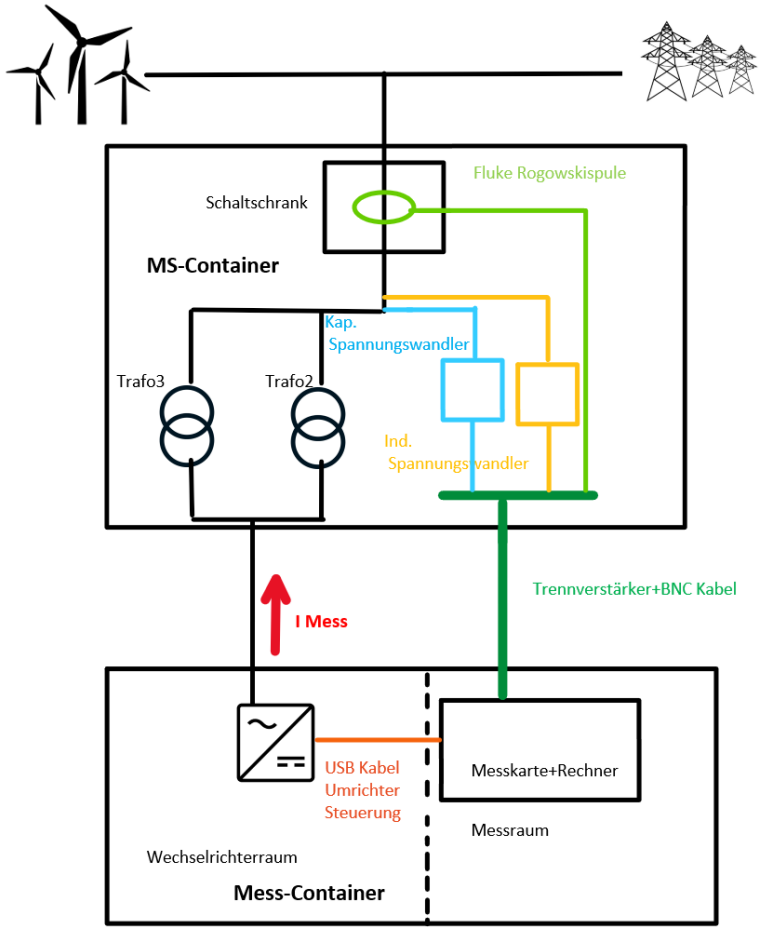


Abbildung 22: Bisheriger Aufbau des Messsystems

Eine besondere Herausforderung stellt die starke EMV-Belastung in der Messzelle dar. Diese ist mit den Umrichtern in einem gemeinsamen Container in getrennten Räumen untergebracht. Trotzdem dringen die von den Umrichtern ausgehenden elektromagnetischen Felder unmittelbar in das Messsystem ein und beeinflussen die Messsignale stark. Zur Beseitigung dieser Probleme wurden mehrere Versuche unternommen.

Zunächst wurde die USB-Leitung zur Steuerung des Umrichtersystems verlängert. Der Messrechner sollte dadurch in den anderen Container verlagert werden, wo sich auch die Messwandler für die Spannungs- und Stromsignale befinden. So sollte eine größere räumliche Distanz zu den Umrichtern erreicht werden.
Da die Entferung mit mehr als 5m zu groß ist für eine direkte Verlängerung der USB-Leitung, sollen USB-LAN Adapter zum Einsatz kommen. Diese Adapter wurden beschafft und im Labor der FH-Kiel und der CAU erfolgreich getestet, die Steuerung der Umrichter konnte damit im Labor über längere Kabel gesteuert werden. In den Containern im Testfeld in Vollstedt funktionierte die Verlängerung jedoch trotzdem nicht. Trotz Einsatz eines hochwertigen Cat 7 Netzwerkkabels mit sehr guter Abschirmung kam es wieder zu EMV Einstrahlungen und damit zu Fehlmessungen.

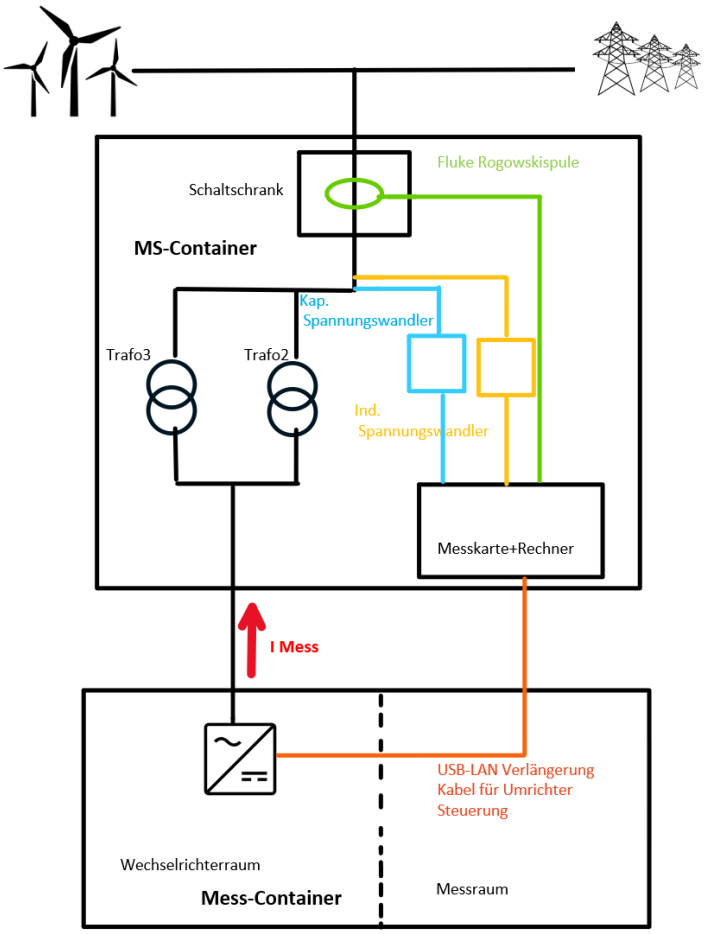


Abbildung 23: USB-LAN Verlängerung

Bisher wurden die Messsignale im MS-Container an einem Trennverstärker angeschlossen und mittels BNC-Kabel an Mess-Container weitergeleitet. Dort wurden die Signale an Messkarte und Messrechner angeschlossen. Für die Stromsignale gibt es kein Problem. Die EMV-Beeinflussung auf die Spannungsignale war unlösbar und verfälscht die ganzen Messergebnisse. Die Durchführung des Messvorhaben war für eine lange Zeit nicht möglich.

Bei einem weiteren Versuch wurden die 100V Signale der induktiven Spannungsteiler verlängert und in die Messzelle geführt. Mit dieser Anordnung konnten dann tatsächlich die ersten Filtermessungen erfolgreich durchgeführt werden und auf allen drei Phasen eine Absenkung des Oberschwingungspegels bewirkt werden. Die Messungen mit dem Umrichter sind somit grundsätzlich möglich.

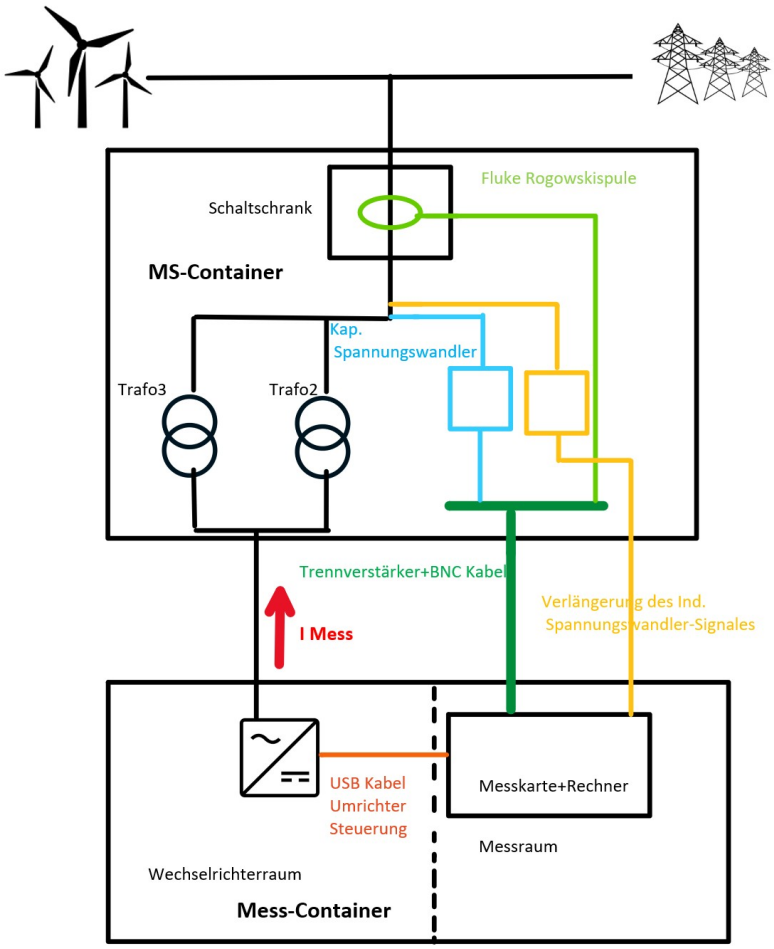


Abbildung 24: Induktive Signal Verlängerung

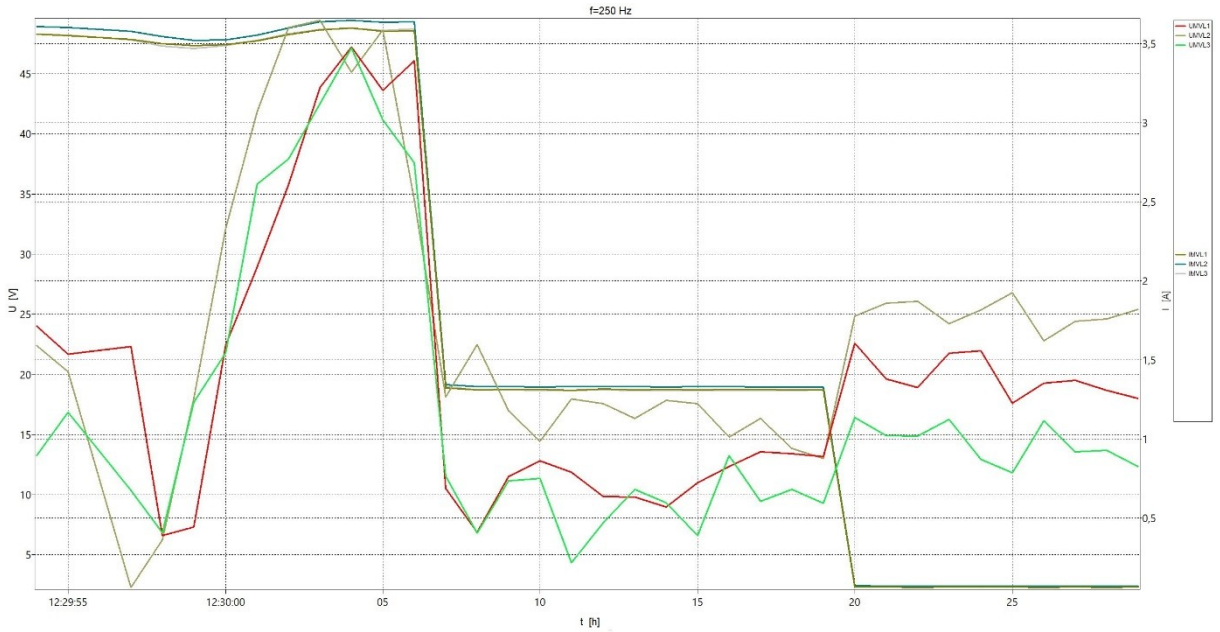


Abbildung 25: Filterung 250 Hz mit den Signalen über den verlängerten Kabel

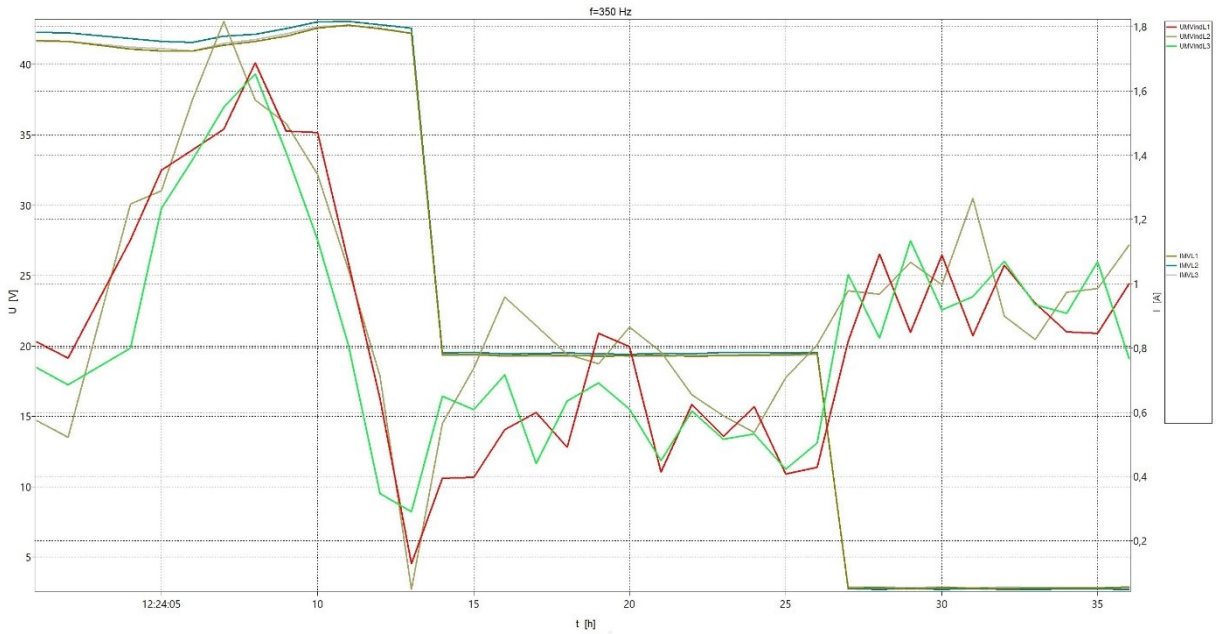


Abbildung 26: Filterung 350 Hz mit den Signalen über den verlängerten Kabel

Die Abbildungen 24 und 25 zeigen eine erfolgreiche Aktivfilterung bei 250 Hz und 350 Hz, bei denen die Spannungssignale der induktiven Wandler genutzt wurden. Bei beiden Frequenzen wird außerdem korrekt im Mitsystem oder im Gegensystem eingespeist. Andernfalls wäre keine Pegelabsenkung auf allen drei Phasen erreicht worden.

Nach der erfolgreichen Filtermessung wurde nun die Frequenzgangmessung umgesetzt. Hier traten abermals Probleme auf, die auf stark verrauschte Meßsignale zurückzuführen sind. Daher wurden mehrere Tiefpaßfilter USBPGF-S1 der Firma Alligatortech angeschafft und eingesetzt.

Mit diesen Filtern konnte auch bei der Frequenzgangmessung einwandfreie Ergebnisse erzielt werden.

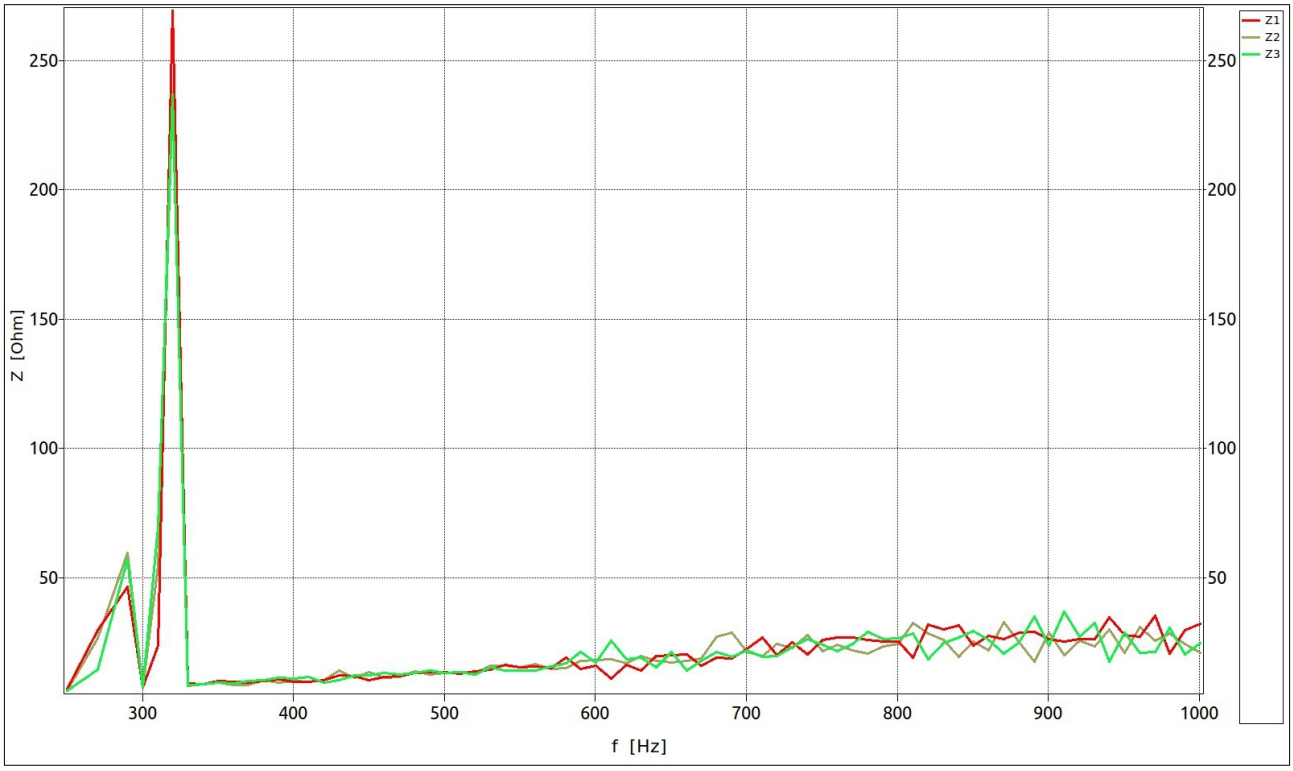


Abbildung 27: Frequenzgang ohne Alligator Filter(untere Frequenzbereich)

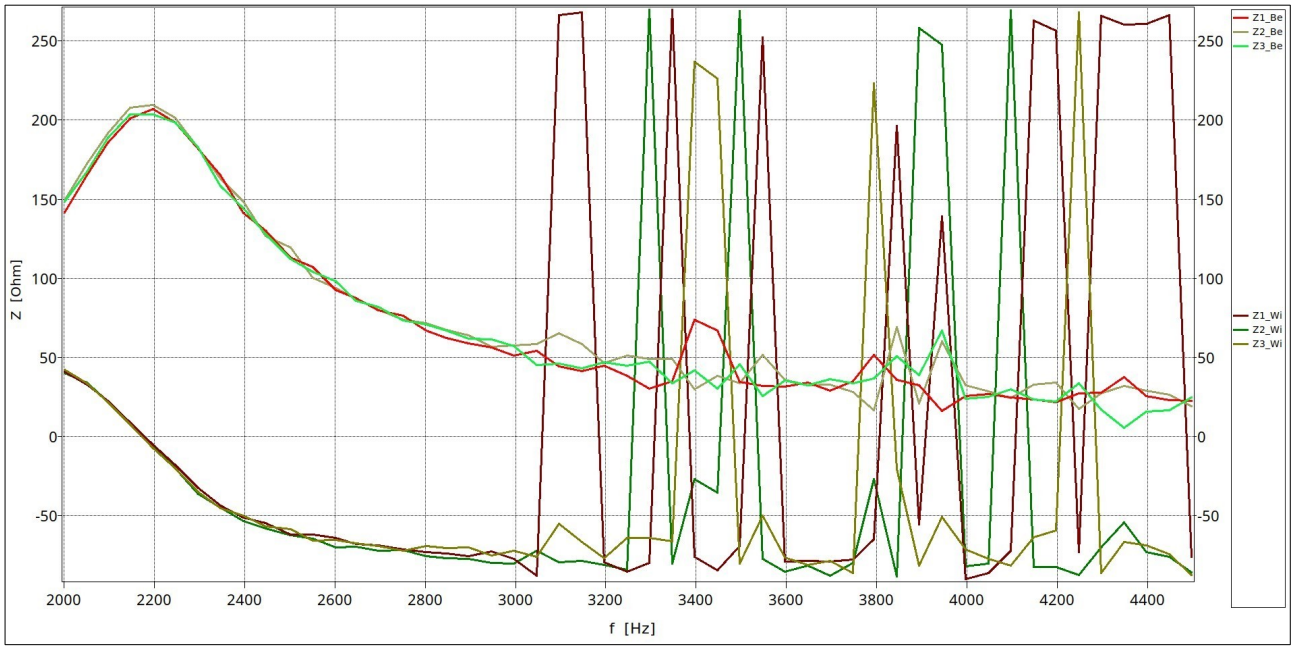


Abbildung 28: Frequenzgang ohne Alligator Filter(obere Frequenzbereich, Betrag und Winkel)

Abbildung 29: Alligator Filter

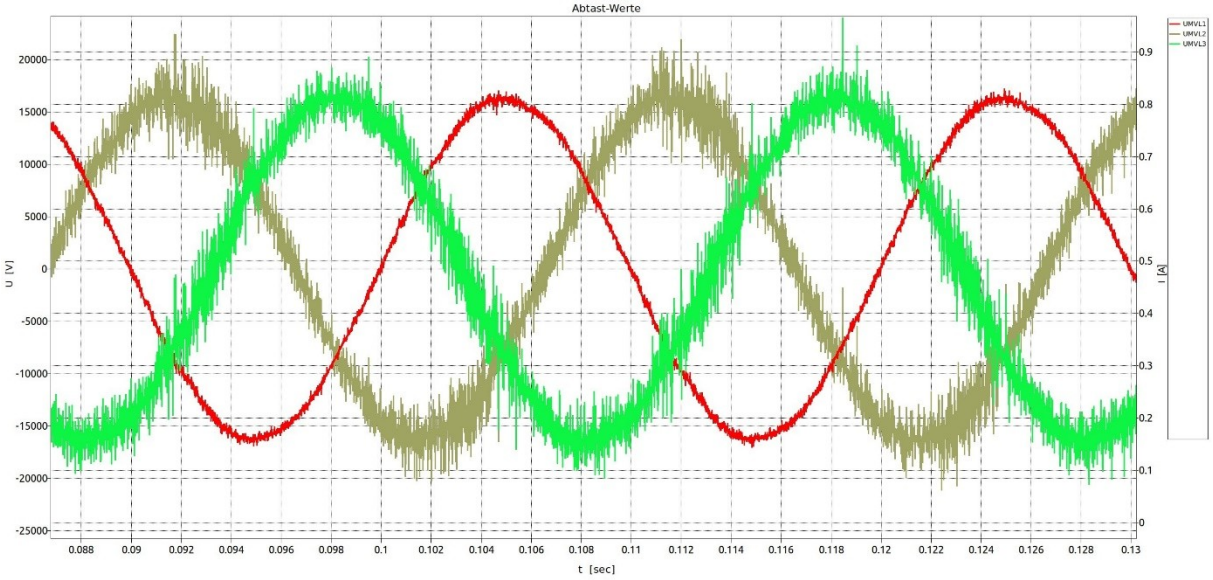


Abbildung 30: Spannungsverlauf eines Drehstromsystems. Die Phase L1 wurde mit einem Tiefpaßfilter gefiltert, die anderen Phasen sind ungefiltert.

4.3 Transientenmessung mit neuer Messkarte 2-Kanal

Goldammer Transient: beim Einspeisen von Strom konnte sehr hohe Spike im Spannungsverlauf festgestellt werden. Dieses Problem besteht seit Anfang des EEMSWEA. Im Rahmen des Nachfolgerprojektes wurde eine sehr schnelle Messkarte von der Firma Goldammer (G0M-1034-4, 16 Bit 2,5 MHz) angeschafft und eine dazu nötige Software entwickelt um Transienten zu erfassen. Das hat leider keine neue gewonnene Erkenntnis gebracht.

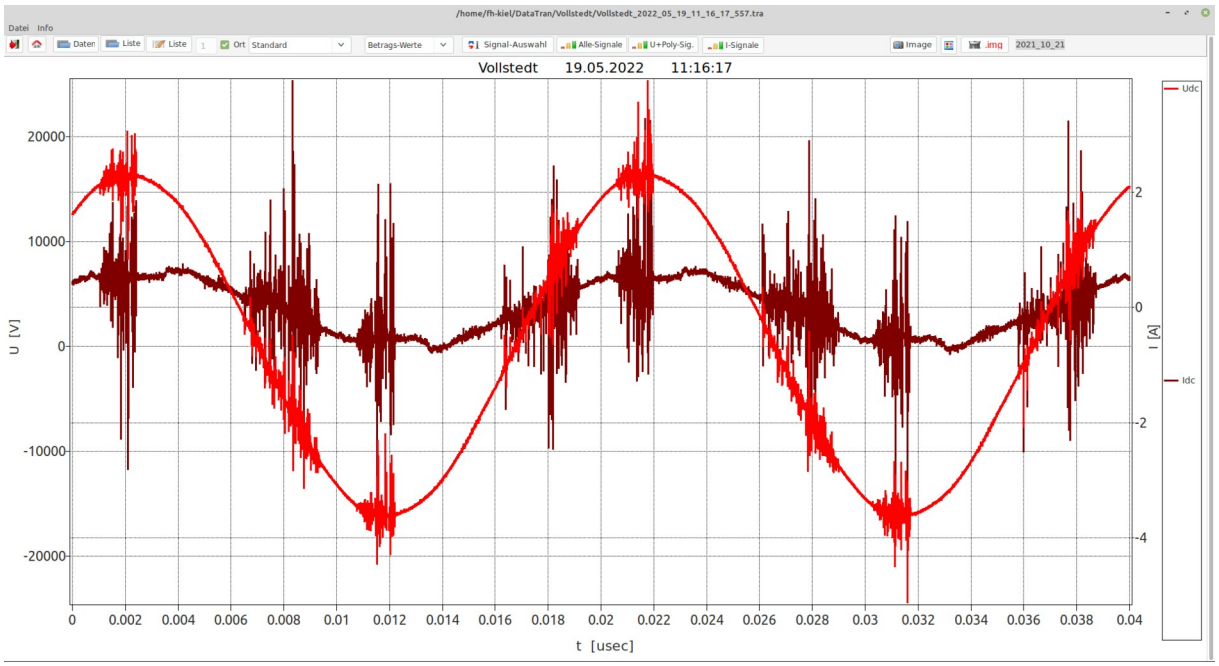


Abbildung 31: Transient beim Leerlauf

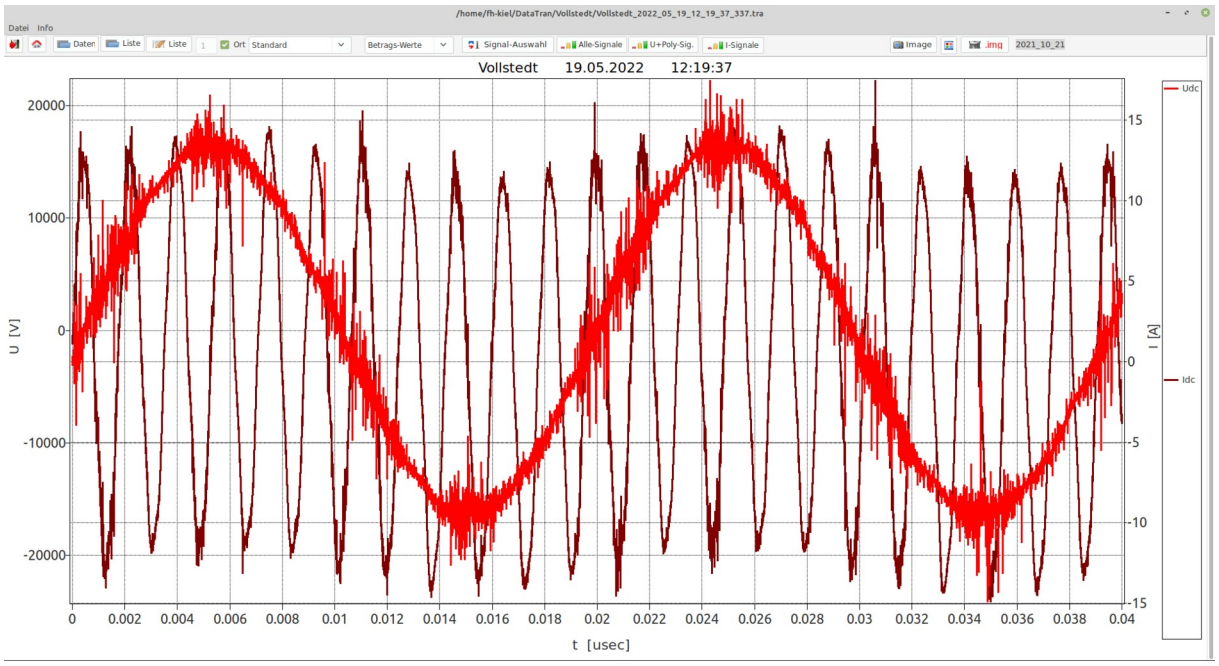


Abbildung 32: Transient beim Einspeisen

5 Messungen

Mit den in diesem Projekt vorgenommenen Hardware- und Softwareanpassungen an den Messsystemen konnten erfolgreich mehrere Messungen durchgeführt werden. Die Messung eines einzelnen Frequenzgangs funktioniert bei Einsatz eines einzelnen Frequenzumrichters bis zur einer Frequenz von 4500 Hz stabil. Oberhalb von 4500 Hz war kein stabiler Betrieb möglich. Neben der Frequenzgangmessung wurden auch Aktivfilterungen einzelner Harmonischer mit dem Umrichtersystem durchgeführt.

5.1 Frequenzgangmessungen

Der Frequenzgang kann mit dem Messsystem als einzelner Frequenzgang aufgenommen werden oder als Langzeitmessung ausgeführt werden. Bei einer Langzeitmessung wird der Frequenzgang in definierten Zeitschritten, z.B. jede halbe Stunde, aufgenommen. So lassen sich Änderungen im Frequenzgang über einen längeren Zeitraum feststellen.

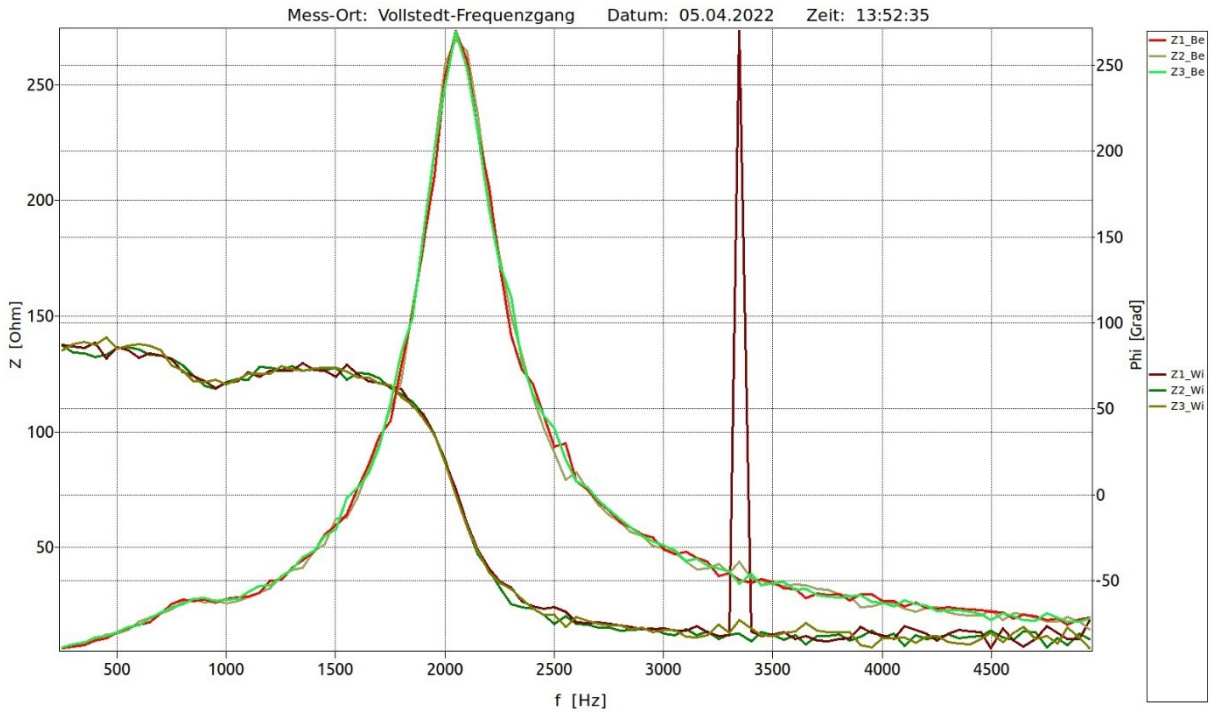


Abbildung 33: Einzelmessung Frequenzgang, Betrag und Winkel

Die Dauermessung des Frequenzgangs mit einem Umrichter funktioniert stabil bis zu einer Frequenz von 4500 Hz.
Am 27.04.2022 erfolgte eine Langzeitimpedanzmessung über eine Dauer von fünf Stunden. Hier wurde der Frequenzgang von 250 Hz bis 4500 Hz aufgenommen, die Messung wurde alle 3 Minuten wiederholt und ist in den Abbildungen 33-36 als 3D-Diagramm dargestellt.

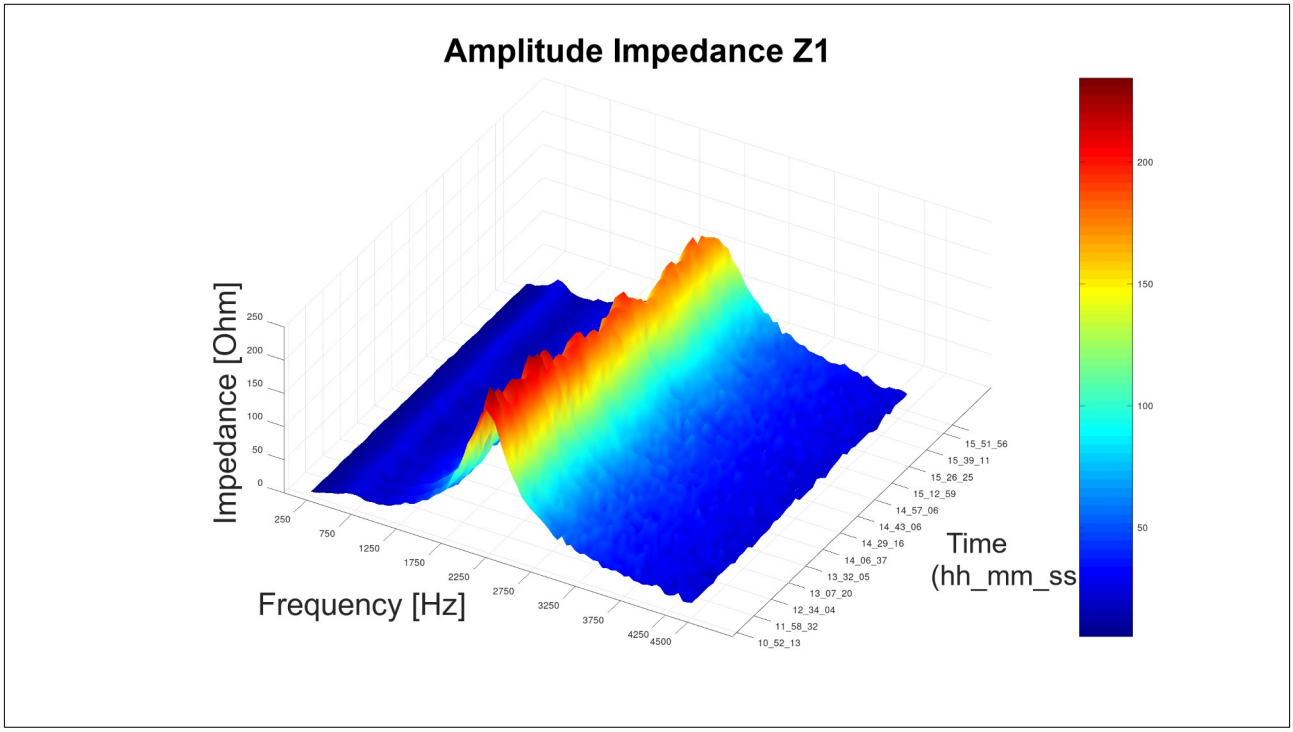


Abbildung 34: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang, Betrag

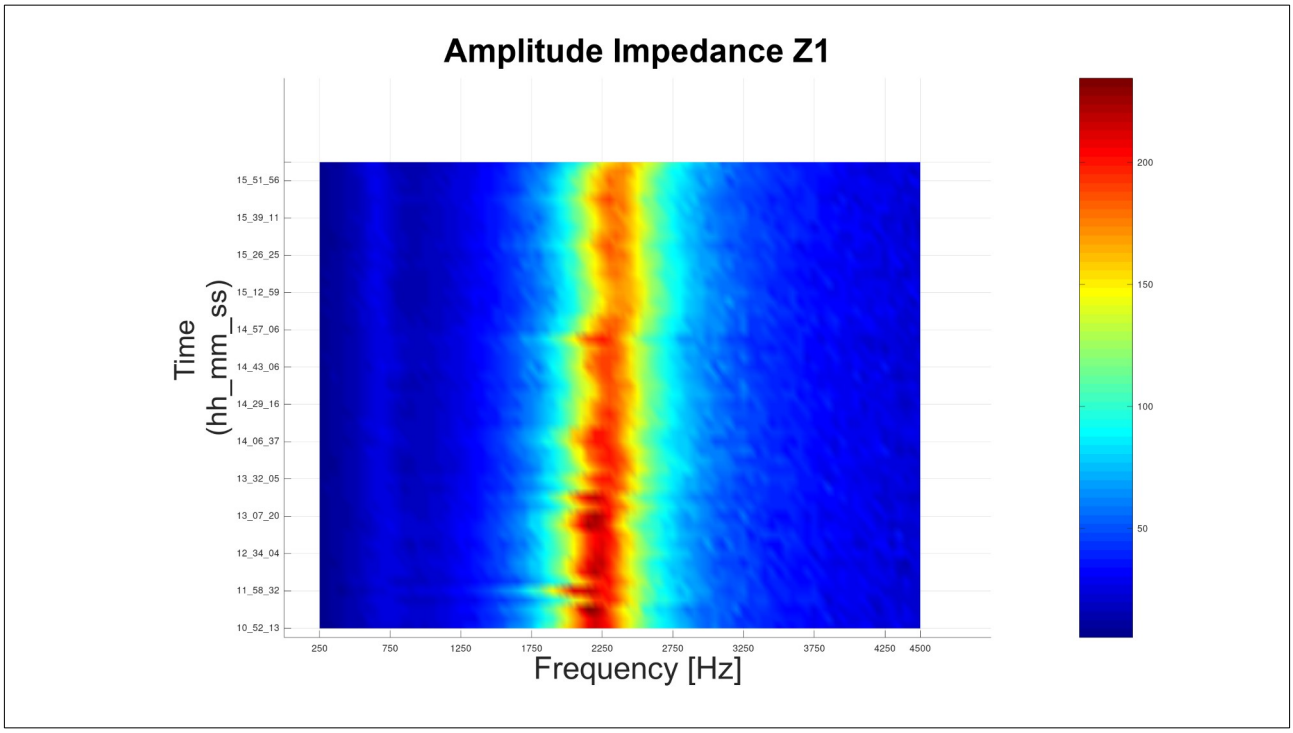


Abbildung 35: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang von oben, Betrag

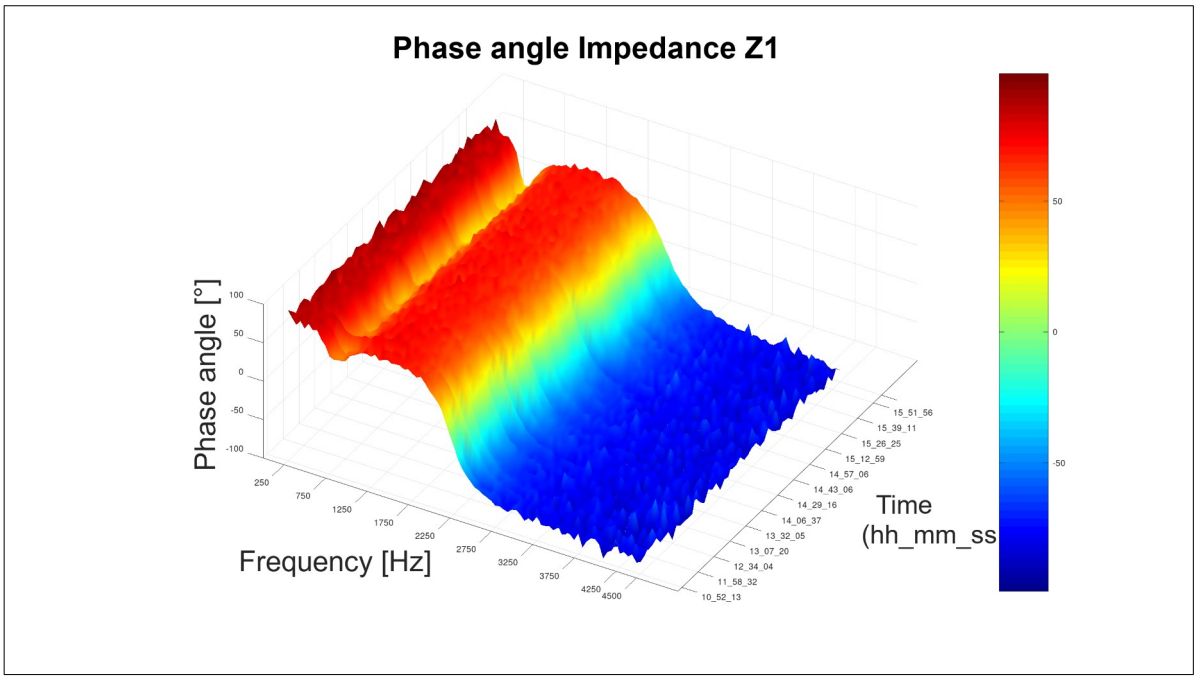


Abbildung 36: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang, Winkel

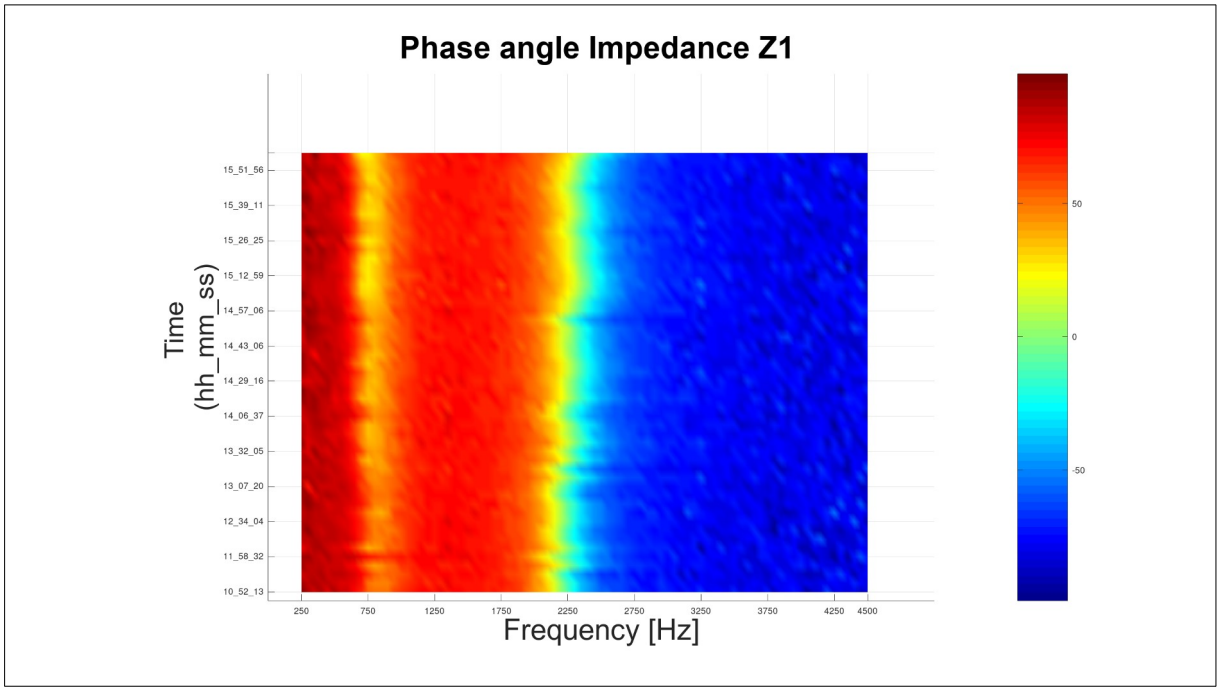


Abbildung 37: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang von oben, Winkel

Die Ergebnisse in den Abbildungen 33 bis 36 zeigen, dass die Resonanzstelle über den Messzeitraum gewandert ist. Die Frequenz hat sich von 230 Ohm zu 180 Ohm verändert. Außerdem hat die sich die Frequenz von 2200 Hz zu 2400 Hz verschoben.
Diese Veränderungen können z.B. durch eine Veränderung der Einspeisung aus den Winkraftanlagen, hervorgerufen worden sein.

5.2 Aktivfilterung

Die Meßergebnisse in Abbildung 38 zeigen eine Langzeitfiltermessung über eine Stunde. Hier wurde die Frequenz von 350 Hz gefiltert. Deutlich sind die höheren Spannungspegel ohne Filterung und die abgesenkten Pegelwerte während der Filterung zu erkennen.
Der THD ist während der Filterung hingegen gestiegen. Diese Werte sind in Abbildung 39 dargestellt. Dies deutet darauf hin, dass die Umrichter zu viele Nebenwellen aussenden und die Steuerung noch nicht optimal arbeitet.
Auch bei einer Frequenz von 250 Hz hat die Aktivfilterung einwandfrei funktioniert.

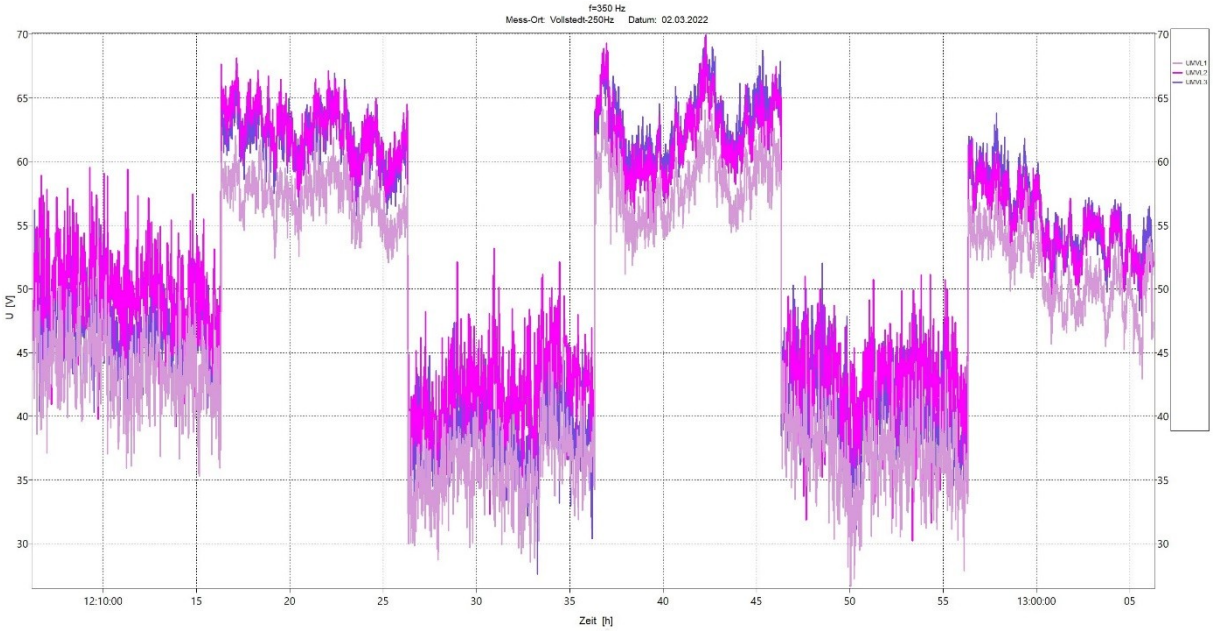


Abbildung 38: Dauermessung Filterung 350 Hz, Spannung

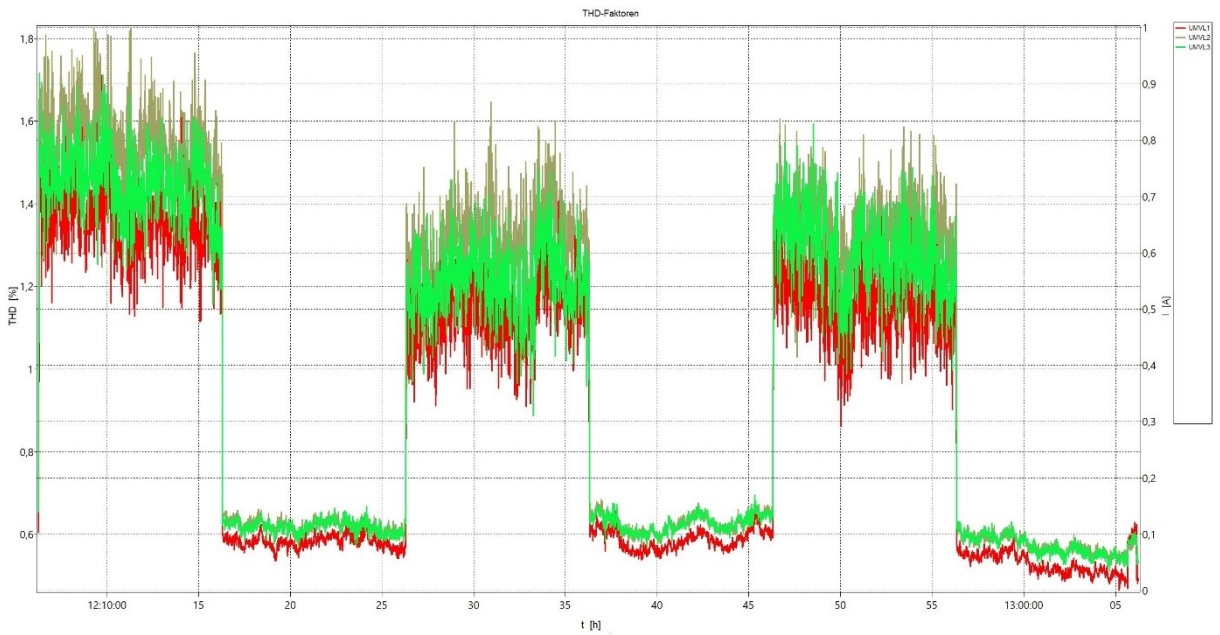


Abbildung 39: Dauermessung Filterung 350 Hz hat die THD verschlechtert

Das vorliegende Umrichtersystem ist bis zum Projektende nicht in der Lage einen sauberen Oberschwingungsstrom in das Netz einzuspeisen. Abbildung 38 zeigt zwar, dass die Oberschwingungspegel bei einer Frequenz von 350 Hz wie gewünscht abgesenkt werden. Der THD-Faktor, also die Summer aller Oberschwingungspegel bis zur 40. Harmonischen, dargestellt in Abbildung 39, steigt jedoch während der Filterung deutlich an. Ebenfalls ist das starke Rauschen der Pegelwerte zu erkennen, während der Umrichter den Filterstrom einprägt. Hinzu kommt außerem, dass die Pegel von hochfrequenten Störungen überlagert sind. Das FFT-Spektrum ist in Abbildung 41 dargestellt. Diese Störaussendungen führen zu der deutlichen Verschlechterung der THDu.

Bei den bisher durchgeführten Versuchen im Niederspannungsnetzen führte eine Aktivfilterung einzelner Harmonischer immer auch zu einer Verbesserung des THDu [4][5][6]. Im Projekt Add-On wurde eine Aktivfilterung in einem Standardumrichter mit großer Leistung realisiert. Trotz der aufgrund der niedrigen Pulsfrequenz des Standardumrichters begrenzten Möglichkeiten konnte die Aktivfilterung auch hier nachgewiesen werden und führte nicht zum Anstieg des THDu [6]. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Steuerung des Umrichters nicht korrekt arbeitet und kein stabiles Ausgangssignal erzeugt. Die Darstellung der Zeitsignale von Spannung und Strom in Abbildung 40 bestätigt diesen Sachverhalt ebenfalls, auf den Stromsignalen ist eine amplitudenmodulierte Störung sichtbar.

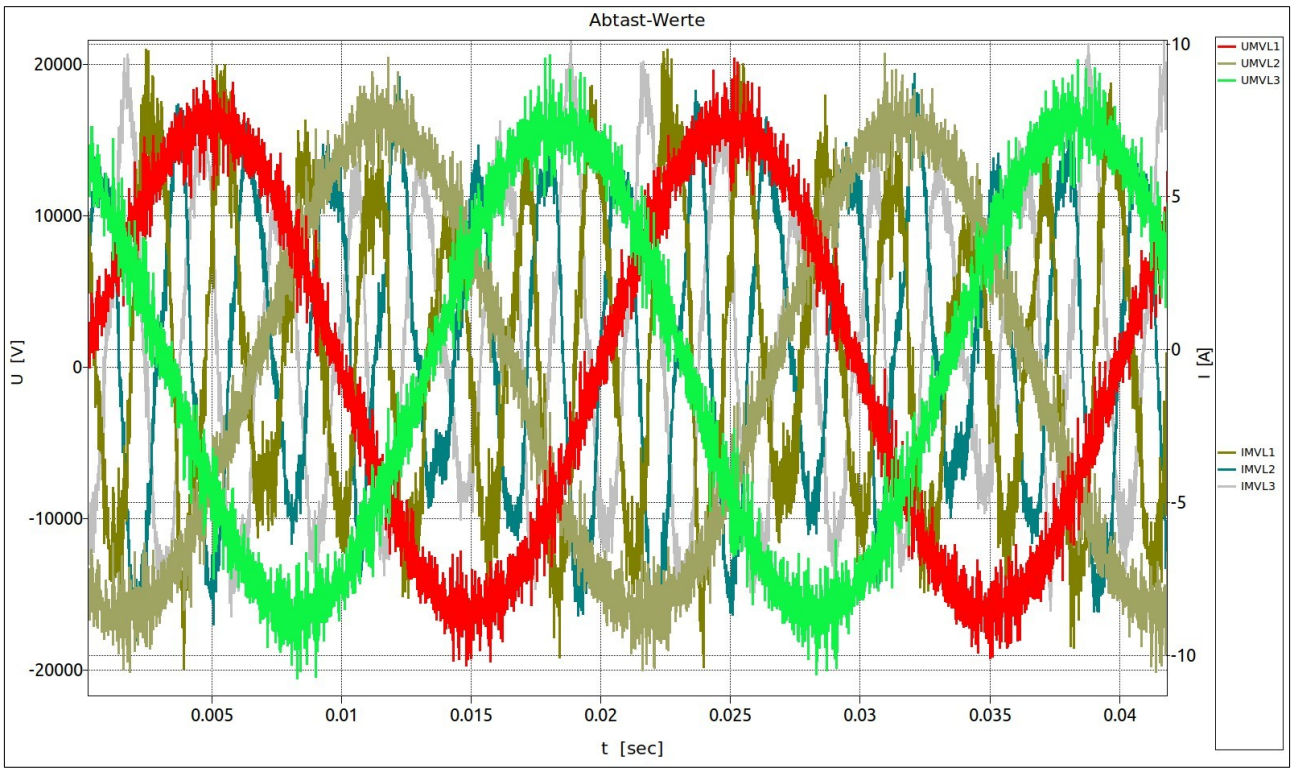


Abbildung 40: Abtastwerte Spannung und Strom während der Filterung 350 Hz

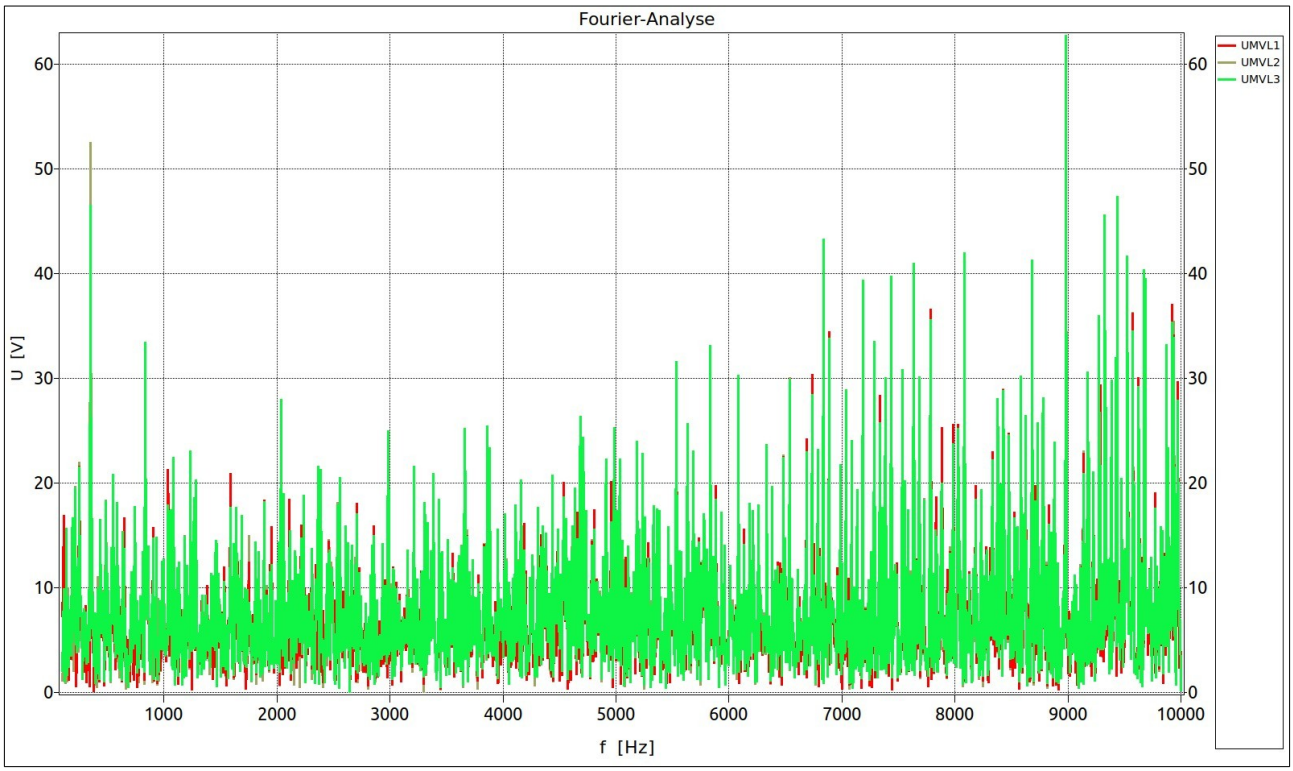


Abbildung 41: FFT der Abtastwerte während der Filterung 350 Hz, Spannung

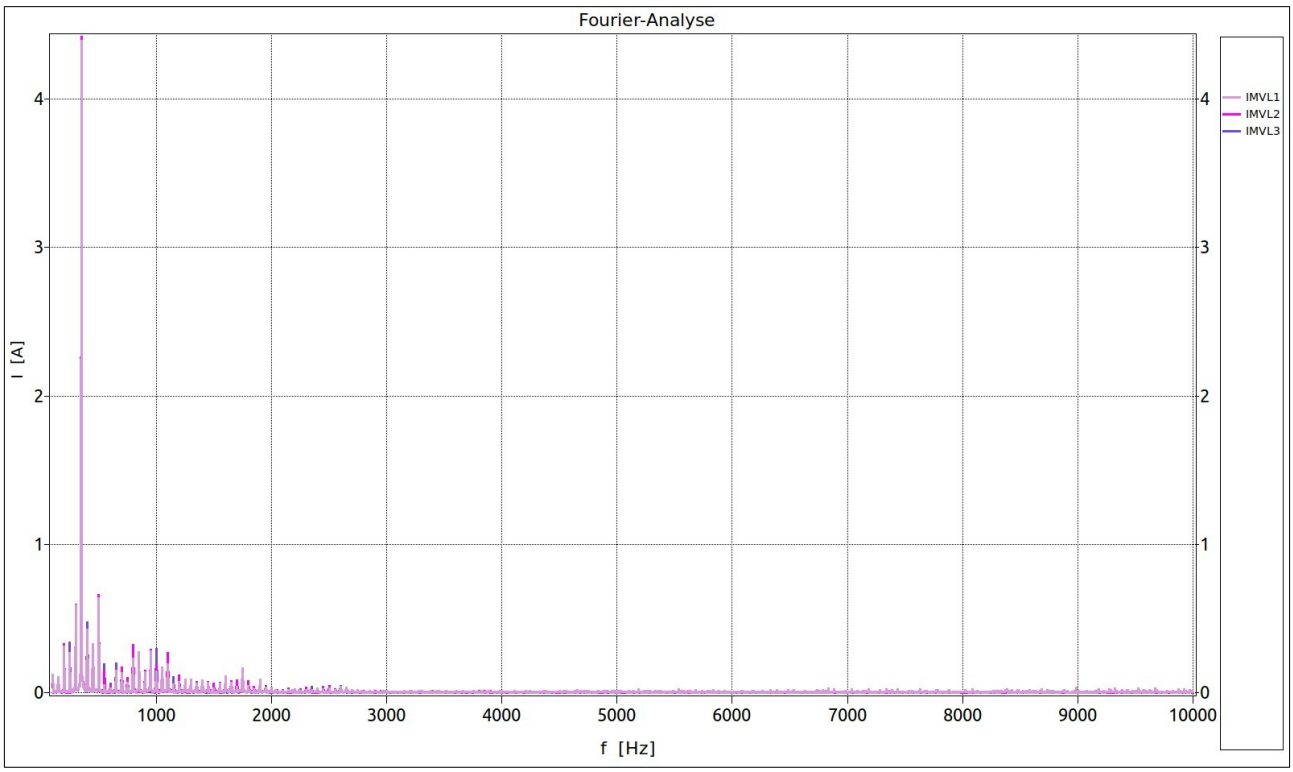


Abbildung 42: FFT der Abtastwerte während der Filterung 350 Hz, Strom

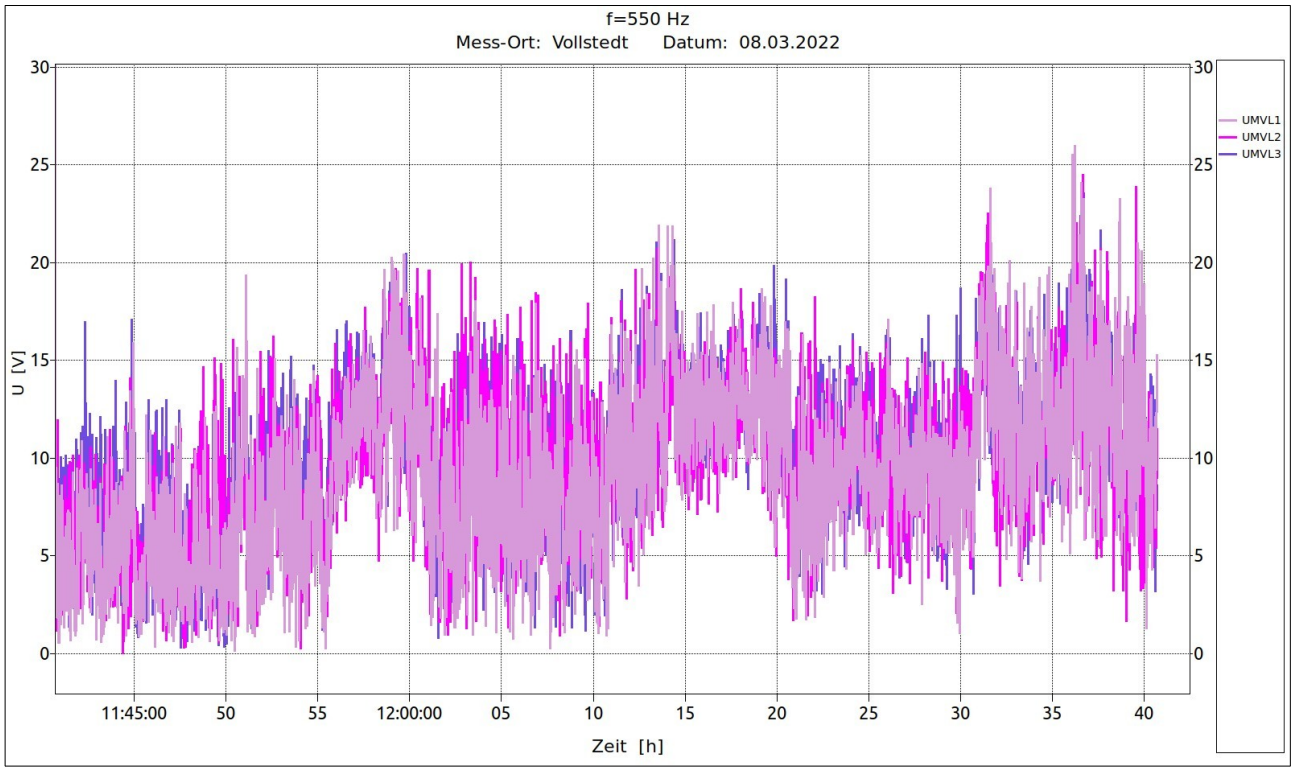


Abbildung 43: Dauermessung Filterung 550 Hz, Spannung

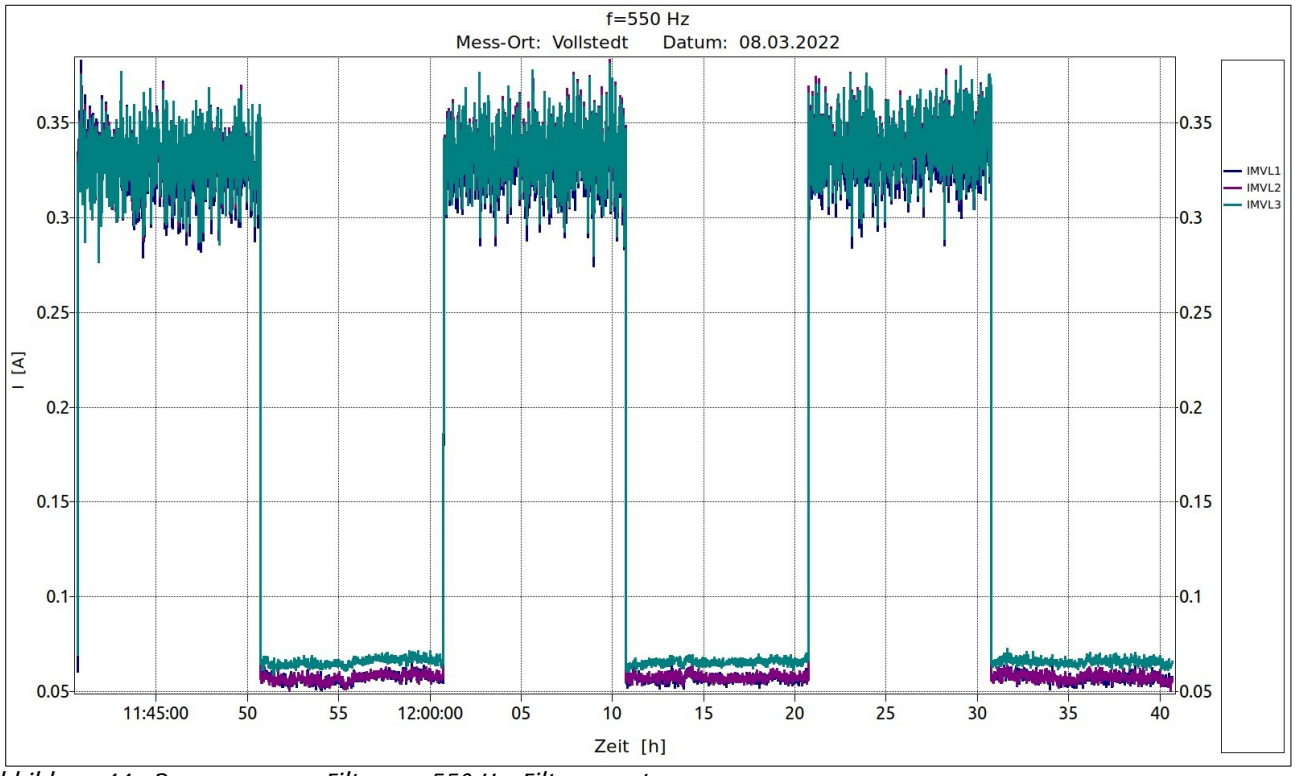


Abbildung 44: Dauermessung Filterung 550 Hz, Filterungsstrom

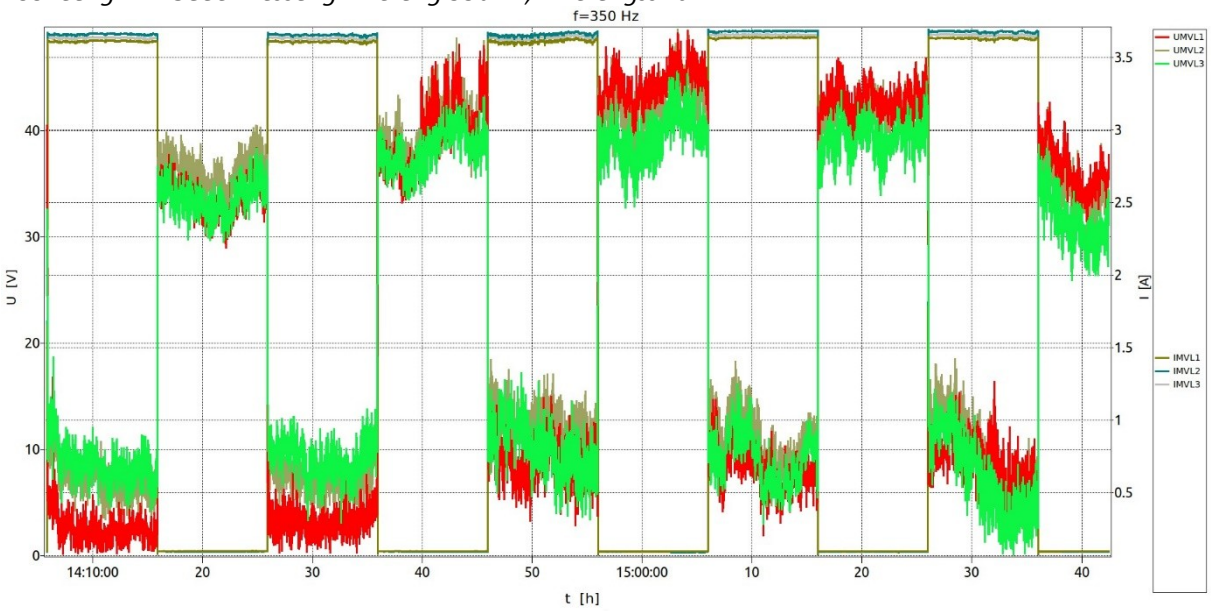


Abbildung 45: Dauermessung Filterung 350 Hz, Spannung und Strom

Abbildung 43 zeigt eine einstündige Filterung bei einer Frequenz von 550 Hz. Grundsätzlich funktioniert die Filterung auch bei dieser Freqeunz. Allerdings ist bei 550 Hz kaum ein nennenswerter Oberschwingungspegel vorhanden, so dass die Wirkung der Filterung kaum von der Netzvorbelastung ohne Filterung zu unterscheiden ist.

Bei der Durchführung der ersten Langzeitmessungen traten Stabilitätsprobleme auf, die stets zum Abbruch führten. Dies Problem wurde offenbar durch ein defektes Controlboard des Umrichtersystems verursacht. Nachdem die CAU dieses ausgetauscht hatte, funktionierte die Langzeitmessung einwandfrei und erzielte die gewünschten Ergebnisse.

5.3 Parallelbetrieb mehrerer Umrichter

Der Parallelbetrieb mehrerer Umrichter ist nötig, da die Leistung eines einzelnen Umrichters nicht ausreicht, um im Netz einen ausreichenden messbaren Spannungsfall zu erzeugen. Dies gilt insbesondere für die niedrigen Frequenzbereich, da hier die Netzimpedanzen niedriger sind.

Der Parallelbetrieb konnte für maximal zwei Umrichter realisiert werden, die über separate Trafos ins Netz eingespeist haben. Die maximale Frequenz beim Parallelbetrieb hat sich auf 3000 Hz reduziert gegenüber dem Betrieb eines einzelnen Umrichters.

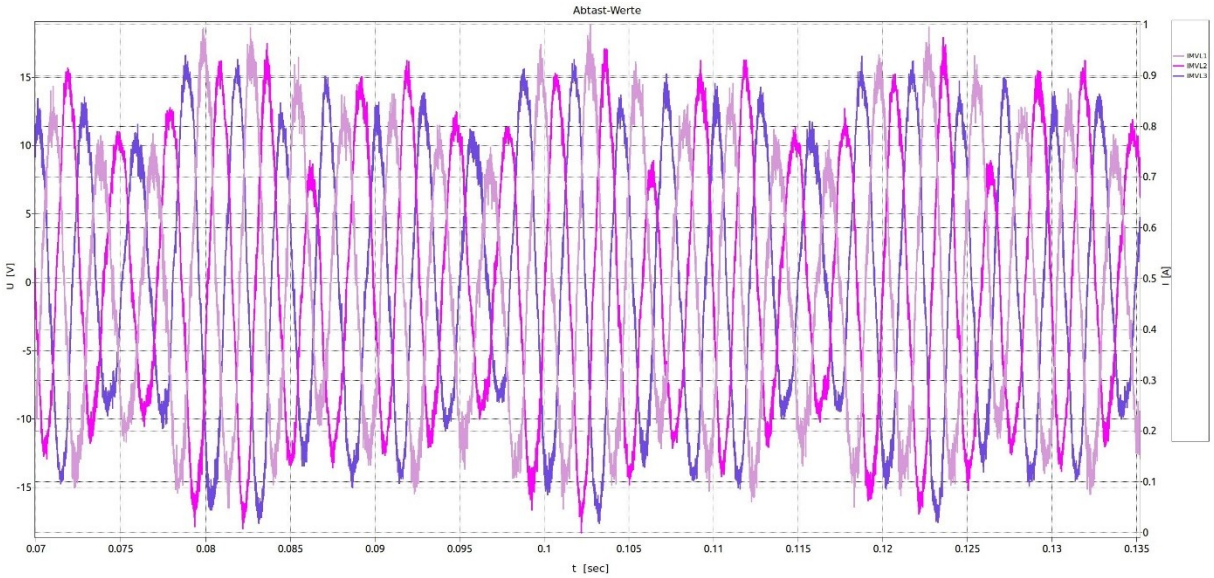


Abbildung 46: Abtastwerte Summe-Strom von 2 Umrichter

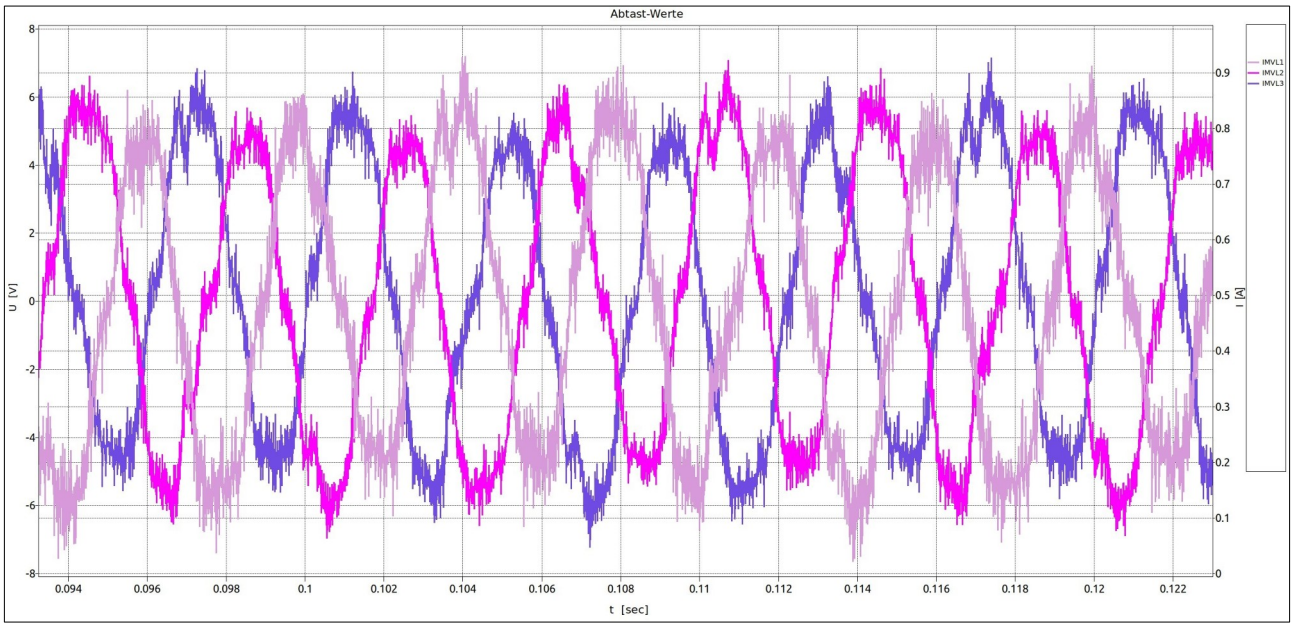


Abbildung 47: Abtastwerte Strom von 1 Umrichter

Abbildung 46 zeigt den Ausgangsstrom während des Parallelbetriebs zweier Umrichter. Beide Umrichter speisen jeweils für einen eigenen Transformator in das Mittelspannungsnetz ein. Die Hüllkurve des Signals zeigt deutliche regelmäßige Schwankungen. Vermutlich sind die beiden Umrichter nicht synchronisiert und haben untereinander Freqeunzabweichungen, so dass am Ausgang ein instabiles Signal auftritt.
Die Dauermessung des Frequenzgangs funktionierte bis zu einer Frequenz von 2500 Hz stabil. Eine Dauermessung über ca. 1,5 Stunden wurde am 11.05.2022 durchgeführt.

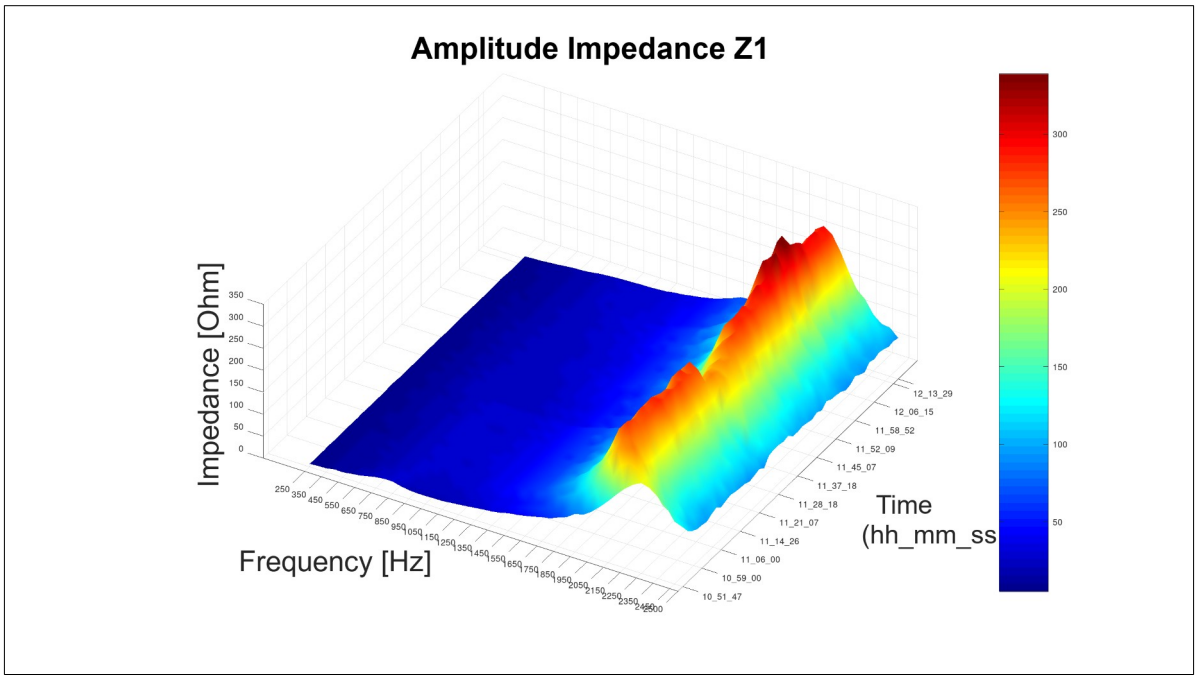


Abbildung 48: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang mit Strom vom 2 Umrichtern, Betrag

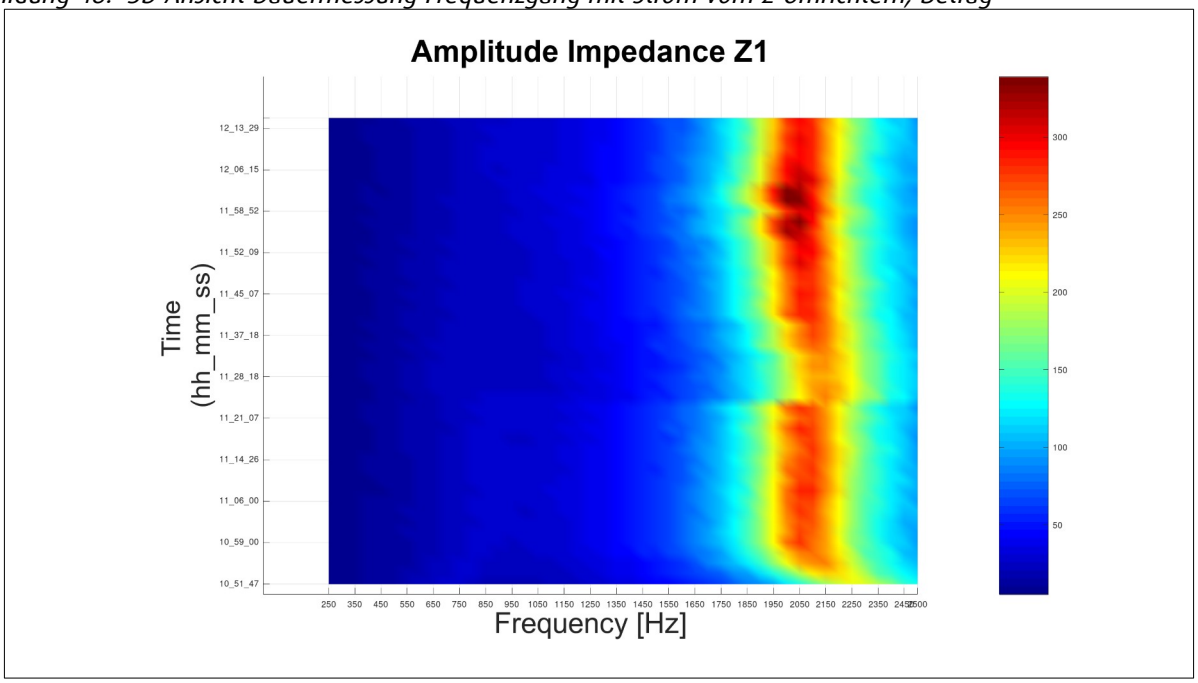


Abbildung 49: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang mit Strom vom 2 Umrichtern von oben

Die Messung in Abbildung 48 zeigt im Frequenzbereich von 2 kHz eine Resonanzstelle, die sich innerhalb kürzerer Zeit ändert. Während der Messung verschiebt sich die Resonanzstelle von 200 Ohm bei 2250 Hz zu 350 Ohm bei 2050 Hz. Der Sprung deutet auf einen Schaltvorgang im Netz hin, z.B. könnte eine Windkraftanlage zu- oder abgeschaltet worden sein. Die Verschiebung der Resonanzstelle kann auch durch den zeitlichen Verlauf der eingespeisten Windenergie ergeben. Erfahrungen aus anderen Projekten zeigen, dass bei Einspeisung elektrischer Energie aus regenerativen Erzeugungsanlagen über Umrichter die Ausprägung von Resonanzstellen mit steigender Einspeiseleistung abnimmt.

6 Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass die Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz sowie die Aktivfilterung einzelner Harmonischer mit dem entwickelten Messsystem grundsätzlich möglich ist. Dies waren wesentliche Ziele des Projektes. Das Prinzip ein Netz mit monofrequenten Oberschwingungsströmen anzuregen und die dabei auftretenden Strom- und Spannungsschwankungen auszuwerten hat sich in zwei Anschlusspunkten auch auf der Mittelspannungsebene bewährt. Die dem Mess- und Analyseprinzip zu Grunde liegenden Annahmen, dass weder die Netzimpedanz noch die Oberschwingungsvorbelastung während zweier unmittelbar nacheinander ausgeführten Differenzmessungen ändern, haben sich auch bestätigt. So treten nur sehr selten einzelne Fehlmessungen auf, die auf eine Verletzung der Annahmen hindeuten.

Die Feldversuche haben gezeigt, das sich wesentliche elektrische Eigenschaften von Anschlusspunkten messtechnisch bestimmen lassen, ohne das es zu nennenswerten Netzrückwirkungen durch die Messungen selbst kommt. In Niederspannungsnetzen treten im allgemeinen höhere Oberschwingungsspannungspegelwerte als in Mittelspannungsnetzen auf. Eine geringere Oberschwingungsvorbelastung in Mittelspannungsnetzen wirkt sich vorteilhaft auf die Netzanregeleistung und damit auf die Bemessungsleistung für das mobile Messsystem aus. So ist es möglich, mit Spannungsänderungen unter einem Prozent zu arbeiten. Ob auch in höher vorbelasteten Stadtnetzen mit Spannungsänderungen unter 1 Prozent gearbeitet werden kann, sollte in weiteren Feldversuchen geklärt werden.

Wie bereits aus dem Vorgängerprojekt EEMSWEA bekannt hat sich die Anordnung des Messraums direkt neben dem Umrichterraum im selben Container als ungünstig erwiesen, da der Betrieb der Frequenzumrichter zu starken elektromagnetischen Feldern führt, die in die Messtechnik einstrahlen. Daher sollte bei künftigen Folgeprojekten die Anschaffung eines weiteren 20 Fuß Containers nachgedacht werden, der dann als Mess- und Bedienraum dient.

Teilweise gestaltete sich die Aktivfilterung in dem Mittelspannungsnetz mit sehr guter Spannungsqualität und sehr niedriger Oberschwingungsvorbelastung als schwierig, da keine Störpegel vorhanden waren, die zu filtern waren.

Der Parallelbetrieb von mehr als zwei Umrichtern wurde nicht erreicht. Im Vorgängerprojekt EEMSWEA wurde ursprünglich ein Parallelbetrieb von sechs Umrichtern geplant. Höchtens zwei Umrichter konnten zum Projektende parallel betrieben werden, wenn jeder Umrichter über einen separaten Trafo ans Netz gekoppelt ist. Dabei konnten Ströme bis maximal 3 kHz erzeugt werden. Oberhalb dieser Frequenz konnten keine stabilen Ausgangssignale erreicht werden. Um höhere stabile Frequenzen zu erreichen muss die Linearität der Inverter genauer erforscht

werden. Um mehr als zwei Umrichter nutzen zu können, sind Unteruchungen zu möglichen zirkulierenden Strömen zwischen den Umrichtern notwendig, um die Interaktionen zwischen den Umrichtern genauer verstehen zu können.

Von den ursprünglich sechs vorgesehenen Powerstacks sind mehrere defekt. Reparaturen sind nicht mehr möglich, da Ersatzteile vom Hersteller nicht mehr verfügbar sind.

Eine Störung, die nicht analysiert werden konnte betrifft die kapazitive Spannungsmessung auf der Mittelspannungsseite. Es kam hier oft zu Störungen, deren Grund nicht gefunden werden konnte. Mit den induktiven Wandlern der Schaltanlage funktionierte die Messung hingegen. Da die induktiven Wandler nur in einem sehr eingeschränkten Messbereich funktionieren und ein Tiefpaßverhalten aufweisen wird vermutet, dass Störanteile höherer Frequenzen in die Messung eingestrahlt sind. Es kann sich allerdings auch Seiteneffekte handeln, die sich aus einer nicht ausreichenden Anregung des Netzes durch eine zu geringe Einspeiseleistung ergeben.

Aufgrund der starken EMV-Belastung und der Einstrahlung in die Messtechnik wäre ein weiterer Container als Messraum wünschenswert. Hierzu reicht ein 20-Fuß Container aus, von wo aus die Messung durchgeführt werden kann und mehrere Personen platz finden.

Die Projektziele wurden teilweise erreicht. Der Dauerbetrieb ist möglich und führt zu guten Ergebnissen bei Frequenzgangmessungen bis 4500 Hz und bei einer Filterung bei 350 Hz. Andere Frequenzen konnten nicht gefiltert werden, da das Netz eine hohe Spannungsqualität aufweist mit einer sehr geringen Oberschwingungsbelastung. Die Freqeunzgangmessung über 4500 Hz bis 10kHz wurde nicht erreicht. Beim Parallelbetrieb wurde lediglich der Betrieb zweier Umrichter, die aber über separate Trafos ins Netz einspeisen müssen, erreicht. Damit konnten Messungen bis zu 2500 Hz durchgeführt werden.

Bei einer Langzeitmessung des Impedanzgangs, die über 5 Stunden durchgeführt wurde, konnte ein Zusammenhang zwischen der Einspeiseleistung und einer Resonanzstelle im Impedanzgang erkannt werden. Da diese Messung aber nur an einem Tag durchgeführt wurde und keine längeren Messreihen, bzw auch Messdaten von anderen Netzanschlusspunkten vorliegen, ist noch keine verläßliche Aussage möglich.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Container aufgebaut im Umspannwerk Vollstedt.....2
Abbildung 2: Die Haupttransformatoren zur Einprägung der Messströme in das Mittelspannungsnetz.....2
Abbildung 3: Vier Frequenzumrichter zur Einprägung der Oberschwingungsmeßströme ins Mittelspannungsnetz.....3
Abbildung 4: Raumaufteilung des Meßsystems in den beiden 40“ HC Seecontainern.....3
Abbildung 5: Die drei kapazitiven Spannungswandler für die Mittelspannungsmessung im Traforaum 4
Abbildung 6: Amplitudenverlauf des kapazitiven Spannungsteilers bis 20kHz.....4
Abbildung 7: Rogowski-Stromwandler über den Endverschlüssen der Mittelspannungskabel im Anschlussraum der Schaltzelle zur dreiphasigen Messung der mittelspannungsseitigen Ströme.....5
Abbildung 8: Spezifikation eines dreiphasigen dreistufigen NPC-Wechselrichters.....6
Abbildung 9: MV-Netzimpedanzanalysator, bestehend aus sechs dreiphasigen dreistufigen NPC-Wechselrichtern.....6
Abbildung 10: FPGA-basiertes Interfaceboard.....6
Abbildung 11: Serielles Kommunikationsprotokoll.....7
Abbildung 12: Hauptsteuerplatine (ZYNQ zc702 development kit).....8
Abbildung 13: Ausgangsspannung und Strom der Phase A. (a) falsche Totzeitkompensation (b) entfernte Totzeitkompensation.....8
Abbildung 14: Extraktion der grundlegenden Komponenten mit DSOGI.....10
Abbildung 15: Grundlegende Komponenten mit DSOGI.....10
Abbildung 16: Innere Steuerungen. (a) PI-Zwischenkreisspannungsregler (b) PR-Phasenstromregler 10
Abbildung 17: Bestehendes Problem der Fehlersuche bei Variablen.....12
Abbildung 18: Speicherbereiche im ZYNQ-Prozessor.....12
Abbildung 19: Konfiguration des FPGA-Bereichs im ZYNQ-Prozessor.....13
Abbildung 20: Hochfrequente Oberschwingungsstrominjektion (α-β-Achsenstrom). (a) 500Hz (b) 1kHz (c) 1,5kHz (d) 2kHz (e) 2,5 kHz (f) 3kHz.....14
Abbildung 21: Hochfrequente Oberschwingungsstromeinspeisung mit zwei Parallelwechselrichtern (a) 1kHz (b) 2kHz (c) 2,5kHz (d) 3kHz.....15
Abbildung 22: Bisheriger Aufbau des Messsystems.....18
Abbildung 23: USB-LAN Verlängerung.....19
Abbildung 24: Induktive Signal Verlängerung.....20
Abbildung 25: Filterung 250 Hz mit den Signalen über den verlängerten Kabel.....21
Abbildung 26: Filterung 350 Hz mit den Signalen über den verlängerten Kabel.....21
Abbildung 27: Frequenzgang ohne Alligator Filter(untere Frequenzbereich).....22
Abbildung 28: Frequenzgang ohne Alligator Filter(obere Frequenzbereich, Betrag und Winkel)….22
Abbildung 29: Alligator Filter.....23
Abbildung 30: Spannungsverlauf eines Drehstromsystems. Die Phase L1 wurde mit einem Tiefpaßfilter gefiltert, die anderen Phasen sind ungefiltert.....23
Abbildung 31: Transient beim Leerlauf.....24
Abbildung 32: Transient beim Einspeisen.....24
Abbildung 33: Einzelmessung Frequenzgang, Betrag und Winkel.....25
Abbildung 34: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang, Betrag.....26
Abbildung 35: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang von oben, Betrag.....26
Abbildung 36: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang, Winkel.....27

Abbildung 37: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang von oben, Winkel.....27
Abbildung 38: Dauermessung Filterung 350 Hz, Spannung.....28
Abbildung 39: Dauermessung Filterung 350 Hz hat die THD verschlechtert.....29
Abbildung 40: Abtastwerte Spannung und Strom während der Filterung 350 Hz.....30
Abbildung 41: FFT der Abtastwerte während der Filterung 350 Hz, Spannung.....30
Abbildung 42: FFT der Abtastwerte während der Filterung 350 Hz, Strom.....31
Abbildung 43: Dauermessung Filterung 550 Hz, Spannung.....31
Abbildung 44: Dauermessung Filterung 550 Hz, Filterungsstrom.....32
Abbildung 45: Dauermessung Filterung 350 Hz, Spannung und Strom.....32
Abbildung 46: Abtastwerte Summe-Strom von 2 Umrichter.....33
Abbildung 47: Abtastwerte Strom von 1 Umrichter.....33
Abbildung 48: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang mit Strom vom 2 Umrichtern, Betrag.....34
Abbildung 49: 3D Ansicht Dauermessung Frequenzgang mit Strom vom 2 Umrichtern von oben..34

Literaturverzeichnis

[1] Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen CENELEC, Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung

[2] Jessen, L. Gunter, S.; Fuchs, F.W. ; Gottschalk, M. ; Hinrichs, H.-J., Measurement results and performance analysis of the grid impedance in different low voltage grids for a wide frequency band to support grid integration of renewables, 20-24 Sept. 2015

[3] V. H. Nguyen, H. -J. Hinrichs, J. -H. Jung and M. Liserre, "Impedance Measurement of a Medium-Voltage Grid by a Mobile Measuring System with the Capability to Improve Power Quality," 2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2022, pp. 1-6.

[4] Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Hinrichs, M.Sc. Dipl.-Ing. Martin Gottschalk; Entwicklung und Bau einer mobilen Versuchseinrichtung zur Erprobung von Spannungsqualitäts-Optimierungsstrategien in Niederspannungsnetzen, Aufbau einer mobilen Versuchseinrichtung für Messungen im Niederspannungsnetz und Erstellung der Mess- und Analysesoftware, Förderkennzeichen: 0325377A.

[5] Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Hinrichs, M.Sc. Dipl.-Ing. Martin Gottschalk, EEMSWEA-Verbund, Analyse der elektrischen Eigenschaften von Mittelspannungsnetzen in Hinsicht auf eine Optimierung bei hoher Einspeisung aus Windenergieanlagen, Konzept für die Messeinrichtung zur Netzanalyse, Aufbau der Messtechnik und Erstellung der Mess- und Analysesoftware, Förderkennzeichen: 0325797B.

[6] Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Hinrichs, Dr.-Ing. Ahmad Al Homsy, B. Eng. Viet Hung Nguyen; Add-On, Entwicklung eines Add-Ons für Umrichter zur aktiven Filterung der Netzspannung und Resonanz-Dämpfung basierend auf der gemessenen Netzimpedanz, Messung der Netzimpedanz und der Oberschwingungsvorbelastung, Förderkennzeichen: 0350022A.

[7] Hinrichs, Hans-Jürgen: Rechnergestützte Anschlussüberprüfung von Windenergieanlagen 9. Energietechnische Forum an der Fachhochschule Kiel, 15 und 16 November 2005

[8] Hans-Jürgen Hinrichs, Thomas Ott : Impedanzmessung, ERNEUERBARE ENERGIEN, Heft 9/2007

[9] Knop, Andre; Fuchs, Friedrich W.: High Frequency Converter for Grid Analysis with FPGA Based Hysteresis Control, accepted for publication on CPE 2009, 6th International Conference Workshop Compatibility and Power Electronics, Badajoz, Spain, may 20 – 22, 2009.