

# Laboruntersuchung zu Einflussfaktoren auf die Impedanzcharakteristik von Wechselrichtern

Johannes Schröder\*, Detlef Schulz

Professur für Elektrische Energiesysteme  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr  
Hamburg, Deutschland  
\*johannes.schraeder@hsu.hamburg

Sebastian Kaiser, Christoph Siedle\*, Sönke Rogalla

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme  
Freiburg, Deutschland  
\*christoph.siedle@ise.fraunhofer.de

**Kurzfassung** – Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz fordert bis 2030 ein Verfahren zur Prüfung der Resonanzstabilität von stromrichtergekoppelten Anlagen am Netz. Grundlage eines solchen Verfahrens ist das impedanzbasierte Stabilitätskriterium, welches die Kenntnis der Netz- und Anlagenimpedanzen erfordert. In diesem Beitrag werden die Impedanzen von Wechselrichtern, als wichtige Komponente von PV-Anlagen, unter verschiedenen Betriebsbedingungen gemessen und im Kontext des Arbeitspunkts und der gewählten Anregungsmethode bewertet. Die Messergebnisse zeigen, dass die Impedanzcharakteristik von Wechselrichtern vom Arbeitspunkt abhängig und zur Ermittlung der Mitsystemimpedanz eine symmetrische, dreiphasige Anregung des Wechselrichters notwendig ist.

**Stichworte** – Oberschwingungen, Resonanzstabilität, Netzimpedanzmessung, Impedanzspektroskopie, Bewertungsverfahren

## NOMENKLATUR

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
DUT	Device Under Test
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
MPP	Maximum Power Point
OS	Oberschwingungen
PV	Photovoltaik
WR	Wechselrichter
$Z_A, Z_B, Z_C$	Leiterimpedanzen
$Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$	Schleifenimpedanzen
$Z_{mit}$	Mitsystem-Impedanz

## I. EINLEITUNG

Mit der Roadmap Systemstabilität hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im November 2023 den Fahrplan zum Erreichen eines sicheren Betriebs des zukünftigen Stromversorgungssystems mit 100 % Erneuerbaren Energien festgelegt [1]. Bisher wurde die Stabilität des Stromnetzes durch die drehenden Massen der zentralen konventionellen Generatoren sichergestellt. Diese werden sukzessive durch dezentrale leistungselektronische Stromrichter ersetzt. Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen und Anforderungen. Eine dieser zukünftigen

Anforderungen ist in Meilenstein 12b beschrieben. Dieser Meilenstein legt fest, dass bis zum Jahr 2030 ein Verfahren zur Bewertung der Resonanzstabilität vorliegt [1].

Resonanzinstabilität wird verursacht, wenn zwei Subsysteme (Netz und Anlage) gemeinsam eine Serienresonanz bilden. Dadurch entstehen resonanzbedingte Oberschwingungen (OS), welche sich verstärken können, bis es zur Abschaltung oder Zerstörung von Anlagen kommt [2]. Ob sich eine Serienresonanz bildet, kann mit Hilfe des impedanzbasierten Stabilitätskriteriums geprüft werden [3]. Um diese Bewertung durchführen zu können, ist lediglich die Kenntnis der frequenzabhängigen Netz- und Anlagenimpedanz notwendig. Eine Bewertung ist daher bereits während des Planungsprozesses möglich. Entsprechende Verfahren zur praktischen Anwendung im Feld werden in dem Projekt ImaStabil entwickelt und untersucht [4, 5].

Eine umfangreiche Messkampagne zu Netzimpedanzmessungen auf der Niederspannungsebene wird in [6] vorgestellt. Ergebnisse auf der Mittelspannungsebene werden in [7] präsentiert. Der Fokus in diesem Beitrag liegt auf Betrachtung der Anlagenseite. Dabei stellt die Ermittlung von Parkimpedanzen im Feld eine noch bestehende Herausforderung dar. Um Anlagen im zu vermessen soll in dem Projekt ImaStabil ein mobiles Anlagenimpedanzmessgerät entwickelt werden. Anhand von Voruntersuchungen an Wechselrichtern (WR) auf dem Prüfstand zur differentiellen Impedanzspektroskopie des Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) sollen Rahmenbedingungen für die Vermessung von Anlagenimpedanzen definiert werden. Der Prüfstand wird in [8] vorgestellt.

## II. AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE VON WECHSELRICHTERN

Photovoltaik (PV)-Parks bestehen in der Regel aus einer Übergabestation zum Mittelspannungsnetz, Kabelstrecken, einem oder mehreren Transformatoren zur Anpassung des Spannungsniveaus und einem Zentral-WR oder mehreren String-WR zur Umwandlung der DC-Spannung der PV-Generatoren in AC-Spannung. Neben dieser Kernaufgabe bieten WR, abhängig vom Betriebsführungskonzept, prinzipiell die Möglichkeit ihre Ausgangsleistung zu steuern, etwa nach Nutzervorgaben oder zur Netzstützung. Die funktionalen Gruppen zum Aufbau eines WR werden in ABBILDUNG 1 schematisch dargestellt. WR bestehen grundsätzlich aus einer Halbleiterbrücke, deren Schalt-

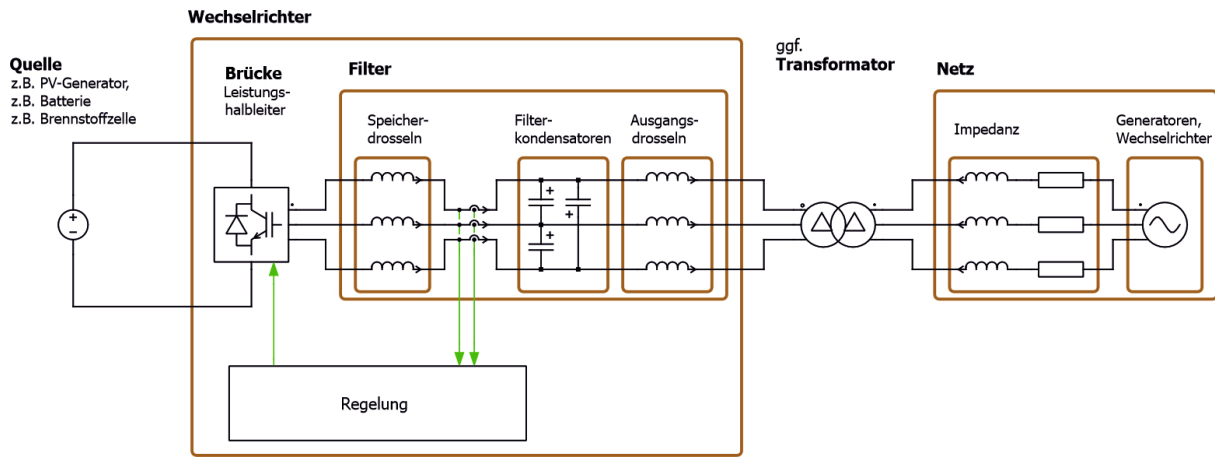


ABBILDUNG 1: DIE FUNKTIONALEN GRUPPEN EINES NETZGEKOPPELTEN WECHSELRICHTERS.

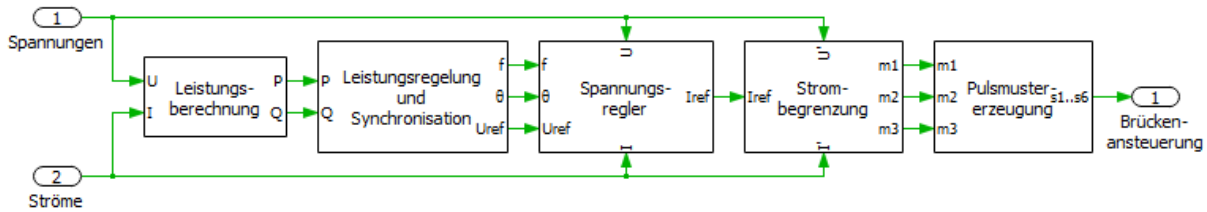


ABBILDUNG 2: ALLGEMEINE STRUKTUR EINER NETZSTÜTZENDEN WECHSELRICHTERREGELUNG.

elemente mit Frequenzen zwischen einigen kHz bis über 100 kHz (je nach Leistungsklasse und Technologie). Die elektrische Leistung der Eingangsseite wird in Energiepaketen über das Filter an das Wechselstromnetz weitergeben. Die Speicherdrosseln und die Kondensatoren des Filters wandeln die Energiepakete auf der Ausgangsseite wieder in kontinuierliche Leistungsflüsse um. Eine Regelung überwacht und steuert diesen Vorgang.

Die Regelung hat eine Kaskadenstruktur mit unterschiedlichen Zeitkonstanten in den verschiedenen Ebenen. Dabei weisen auf der untersten Ebene Pulsmustererzeugung und Strombegrenzung die höchste Dynamik auf. Das Beispiel in ABBILDUNG 2 zeigt eine netzstützende Regelung, deren Aufgabe es ist, Wirk- und Blindleistung nach bestimmten Vorgaben einzuspeisen. Diese Vorgaben können beispielsweise vom Netzbetreiber kommen oder von einem Algorithmus, der den Punkt maximaler Leistung am PV-Generator einstellt (MPP-Tracker). Zunächst werden die Leistungen aus den Spannungs- und Strommesswerten berechnet. Der Leistungsregler selbst hat inhärent synchronisierendes Verhalten. Er erzeugt Spannungswerte mit Amplitude, Frequenz und Phasenlage, die vom Spannungsregler über die unterlagerte Strombegrenzung in entsprechende Tastverhältnisse der Brückenarme umgesetzt werden. Der Spannungsregler gibt dem Wechselrichter die gewünschte Charakteristik einer Spannungsquelle, die Strombegrenzung schützt die Halbleiter vor Überlastung, ohne einfach abzuschalten. Dieser Regelungsansatz stützt einerseits das Netz, andererseits passt sich der Wechselrichter elastisch an die Momentanbedingungen des Netzes an.

Der WR besitzt eine innere Impedanz, die zum einen passiv durch das physikalische Filter vorgegeben ist (siehe ABBILDUNG 3). Zum anderen kann diese Impedanz jedoch auch aktiv durch die Regelung – insbesondere bei einer hochdynamischen Zustandsregelung – im Frequenzbereich bis maximal zur halben Schaltfrequenz flexibel angepasst werden. Damit bietet sich die Möglichkeit, vernetzte schwingungs-

fähige Systeme wie beispielsweise Wechselrichterverbünde in PV-Parks zu stabilisieren [8]. Der Vergleich zwischen ABBILDUNG 3 und ABBILDUNG 4 zeigt exemplarisch die dämpfende Eigenschaft der Regelung. Weitere Beispiele für die Impedanzverläufe von WR unterschiedlicher Leistungsklassen sind in [9] zu finden.

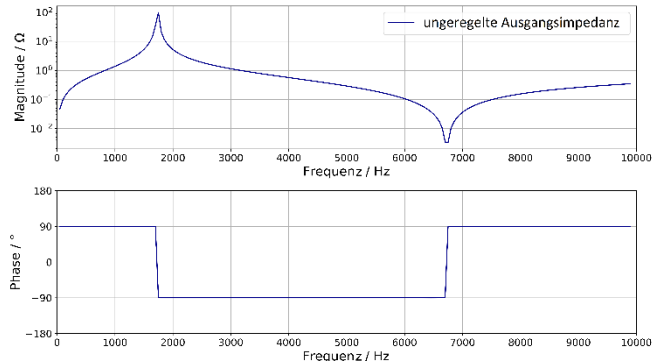


ABBILDUNG 1: BEISPIEL FÜR DIE IMPEDANZ EINES UNGEREGELTEN WECHSELRICHTERS [10].

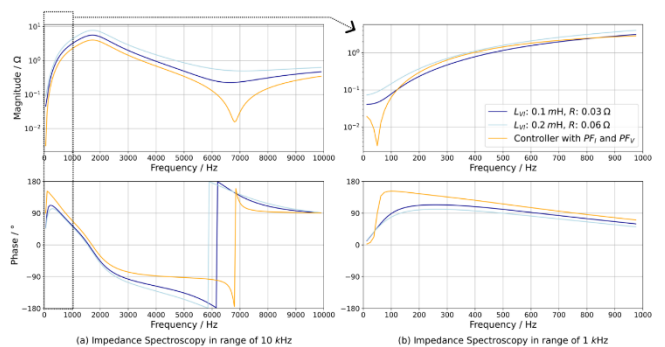


ABBILDUNG 2: BEISPIEL FÜR DEN EINFLUSS DER REGELUNG AUF DIE IMPEDANZ VON WECHSELRICHTERN [10].

### III. LABORMESSUNGEN AN WECHSELRICHTERN

Da es sich bei WR um aktive leistungselektronische Betriebsmittel handelt, deren Impedanzcharakteristik nicht nur von der Hardware, sondern auch der unterlagerten Regelung (Software) abhängig ist, wird vermutet, dass Faktoren, die auf diese Regelung Einfluss nehmen, auch die gemessene Impedanz beeinflussen. Um den Einfluss zu bewerten, wurden auf dem Megawatt-Prüfstand des Fraunhofer ISE Messungen an verschiedenen WR mit dem Verfahren der differentiellen Impedanzspektroskopie durchgeführt [8]. Im Folgenden werden verschiedene externe und interne Faktoren sowie betriebsunabhängige Einflüsse untersucht. Zu den äußeren Faktoren zählen die Höhe der DC-Eingangsspannung und vorhandene Verzerrungen der Netzspannung. Als interner Faktor wird der Arbeitspunkt des WR in Bezug auf dessen Wirk- und Blindleistungsausgabe betrachtet. Zusätzlich wurde der Einfluss der Anregung des Impedanzmessgeräts als betriebsunabhängiger Faktor analysiert.

#### A. Einfluss der Netz- und Anlagenspannung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss von harmonischen Verzerrungen der Netzspannung und der Einfluss der Höhe der DC-Eingangsspannung jeweils an einem WR untersucht.

Der Einfluss von Netzspannungsverzerrungen wurde an einem WR mit einer Nennleistung von 50 kVA betrachtet. Zunächst wurde der WR unter idealen Netzspannungsbedingungen geprüft. Bei einer anschließenden Messung wurde die Netzspannung mit einer zusätzlichen harmonischen

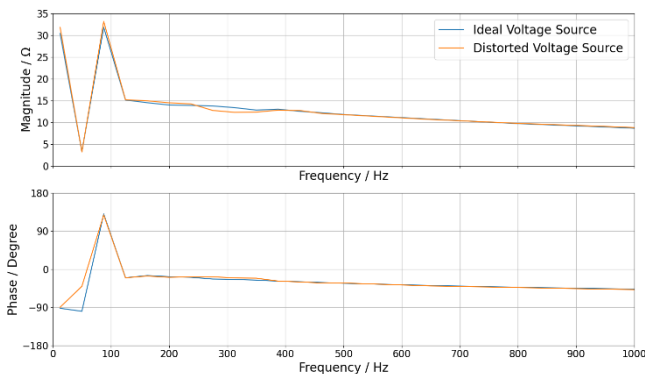


ABBILDUNG 3: EINFLUSS VON SPANNUNGSVERZERRUNGEN AUF DIE IMPEDANZ DES WECHSELRICHTERS.

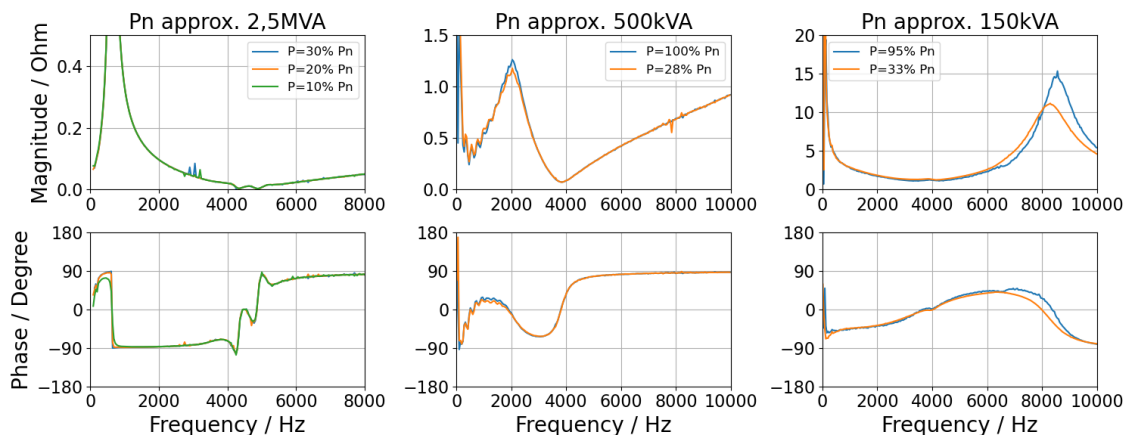


ABBILDUNG 5: EINFLUSS DER MOMENTANEN WIRKLEISTUNG DES WECHSELRICHTERS AUF DESSEN IMPEDANZCHARAKTERISTIK UNTERSUCHT AN WECHSELRICHTERN MIT EINER NENNLEISTUNG VON 2,5 MVA, 500 kVA UND 150 kVA.

Verzerrung moduliert. Die gemessenen Mitsystem-Impedanzen sind in ABBILDUNG 5 dargestellt. Die beiden Impedanzverläufe zeigen nur geringe Unterschiede, was darauf hindeutet, dass Spannungsverzerrungen keinen signifikanten Einfluss auf die Impedanzcharakteristik des WR haben.

Der Einfluss der DC-Eingangsspannung auf die Impedanzcharakteristik wurde ebenfalls an einem WR mit einer Nennleistung von 50 kVA untersucht. Die Eingangsspannung wurde in vier Stufen im Bereich der MPP Limits 580 und 900 V<sub>DC</sub> variiert. Die Regelparameter des WRs wurden nicht verändert. Die gemessenen Mitsystem-Impedanzen sind in ABBILDUNG 6 dargestellt. Es ist ein deutlicher Einfluss der DC-Spannung auf den Impedanzbetrag zu erkennen. Eine Proportionalität zwischen DC-Spannung und Impedanzbetrag besteht allerdings nicht.

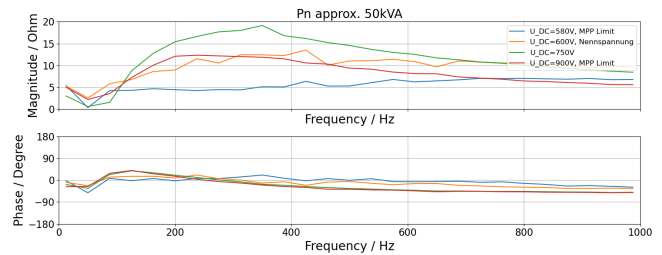


ABBILDUNG 4: EINFLUSS DER DC-EINGANGSSPANNUNG AUF DIE IMPEDANZ DES WECHSELRICHTERS.

#### B. Einfluss des Arbeitspunktes

Zur Untersuchung des Einflusses des Arbeitspunktes auf die Impedanz von WR wurden an sechs Testobjekten (DUT) Messungen bei variierender Wirkleistung und an drei DUT mit verschiedenen  $\cos \phi$  durchgeführt.

Die DUT zur Untersuchung des Einflusses der momentanen Wirkleistung von WR auf deren Impedanzcharakteristik haben eine Nennleistung zwischen 30 kVA und 2,5 MVA. Die Angabe der momentanen Wirkleistung erfolgt prozentual zur Nennleistung des jeweiligen WR. Aufgrund der Leistungsgrenzen des Prüfstands konnte der 2,5 MVA WR nur bis 30 % seiner Nennleistung betrachtet werden. Die gemessenen Mitsystem-Impedanzen der sechs DUT sind in ABBILDUNG 7 und ABBILDUNG 8 dargestellt. Der Einfluss der Wirkleistung der WR auf deren Impedanzen zeigt sich primär

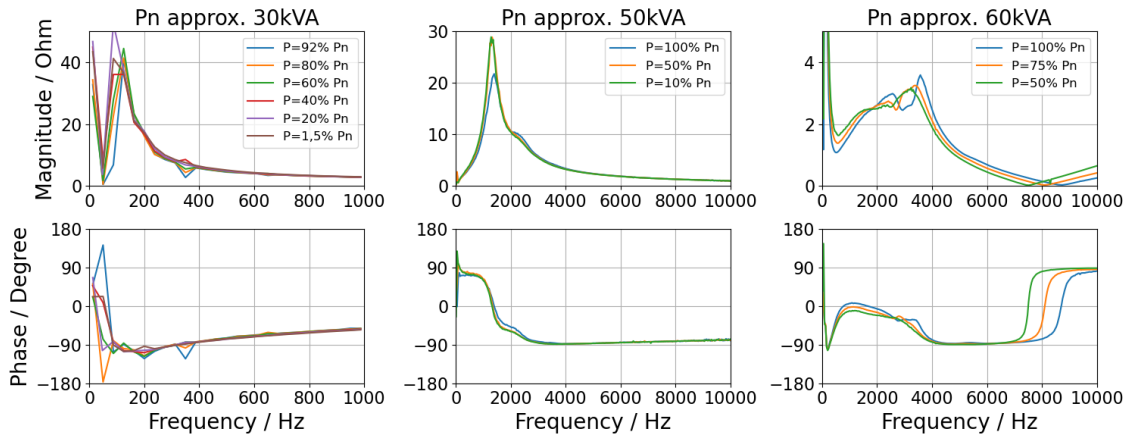


ABBILDUNG 6: EINFLUSS DER MOMENTANEN WIRKLEISTUNG DES WECHSELRICHTERS AUF DESSEN IMPEDANZCHARAKTERISTIK UNTERSUCHT AN WECHSELRICHTERN MIT EINER NENNLEISTUNG VON 30 kVA, 50 kVA UND 60 kVA.

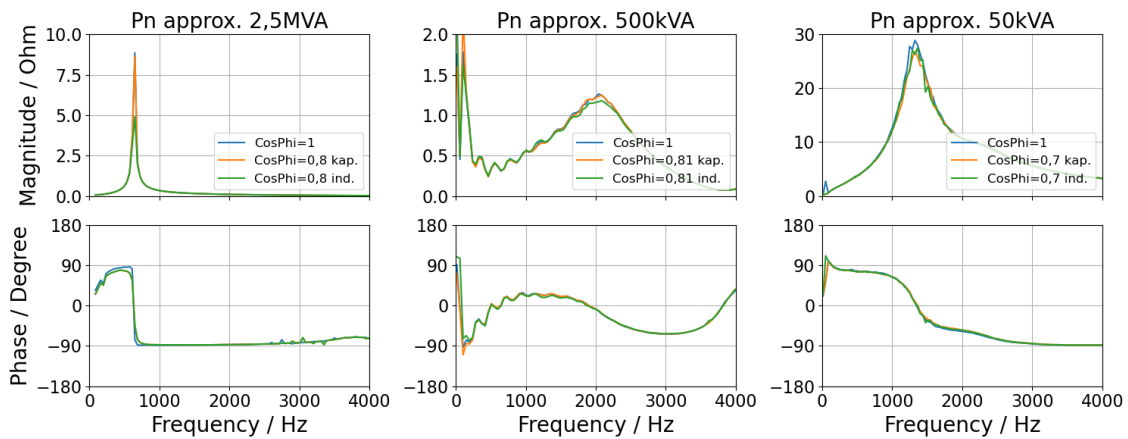


ABBILDUNG 7: EINFLUSS DER BLINDLEISTUNGSREGELUNG DES WECHSELRICHTERS AUF DESSEN IMPEDANZCHARAKTERISTIK UNTERSUCHT AN WECHSELRICHTERN MIT EINER NENNLEISTUNG VON 2,5 MVA, 500 kVA UND 50 kVA.

in den Resonanzstellen, wobei sich die Ausprägung bei den verschiedenen DUT unterscheidet. Bei dem 500 und 150 kVA WR führt eine niedrigere Wirkleistung zu einer Dämpfung der Parallelresonanz. Bei dem 50 kVA WR ist es umgekehrt. Besonders deutlich ist der Einfluss der Wirkleistung bei dem 60 kVA WR welcher ein proportionales Verhalten aufweist. Ebenfalls deutlich ist der Einfluss der Wirkleistung im unteren Frequenzbereich des 30 kVA WR zu sehen.

An drei DUT wurde der Einfluss der Blindleistungsregelung auf die Impedanzcharakteristik untersucht. Diese haben eine Nennleistung von 2,5 MVA, 500 kVA und 50 kVA. Untersucht wurden die WR bei Nennleistung, bzw. der 2,5 MVA WR bei 30 % der Nennleistung. Die gemessenen Mitsystem-Impedanzen sind in ABBILDUNG 9 dargestellt. Auch hier ist ein Einfluss des Arbeitspunktes in den Resonanzstellen der Impedanz zu erkennen. Deutlich ist dieser bei einem  $\cos \varphi$  von 0,8 induktiv bei dem WR mit 2,5 MVA zu erkennen. Die Änderung der Blindleistungseinspeisung führt zu einer Dämpfung der Parallelresonanz.

### C. Einfluss der Anregung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Messmethodik auf die erzielten Ergebnisse untersucht. Dazu wird zunächst die differentielle Impedanzspektroskopie bei verschiedenen Anregungsamplituden an zwei DUT betrachtet [8]. Darüber hinaus wird analysiert, ob dreiphasige WR auch durch asynchrone Messverfahren, wie sie beispielsweise bei der

Netzimpedanzmessung angewendet werden, charakterisiert werden können [7].

In der Versuchsreihe zur Untersuchung des Einflusses der Anregungshöhe auf die gemessene Impedanz von WR wurden zwei DUT evaluiert: ein WR mit einer Nennleistung von 2,5 MVA und ein WR mit einer Nennleistung von 50 kVA. Der Anregungssweep erfolgte mit Amplituden von 0,5 %, 0,75 % und 1 % der Netznennspannung. Die gemessenen Impedanzverläufe sind in ABBILDUNG 10 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen einen geringen Einfluss der Anregungshöhe auf die gemessene Impedanz der DUT, welcher bei dem leistungsschwächeren WR etwas höher ausfällt.

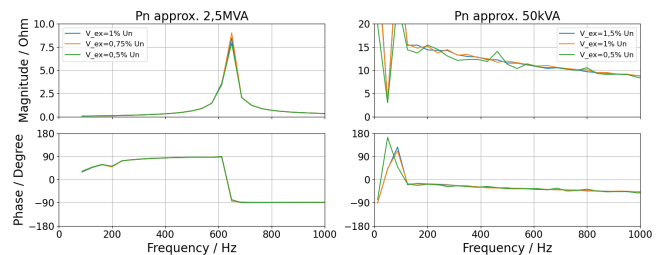


ABBILDUNG 8: EINFLUSS DER ANREGUNGSHÖHE DER DIFFERENTIELLEN IMPEDANZSPEKTROSKOPIE AUF DIE GEMESSENE IMPEDANZCHARAKTERISTIK UNTERSUCHT AN WECHSELRICHTERN MIT EINER NENNLEISTUNG VON 2,5 MVA UND 50 kVA.

Zur Analyse des Einflusses asynchroner Anregungsmethoden auf die gemessene Impedanzcharakteristik wurde ein Batteriumrichter mit einer Nennleistung von 50 kVA untersucht. Das Gerät wird eingangsseitig mit einer festen DC-Spannung von 720 V versorgt und es fand kein MPP-Tracking statt. Die AC-Nennspannung beträgt 400 V. TABELLE I zeigt die durchgeführten Messungen. Die Standardspektroskopie mit Anregung im Mitsystem dient als Referenz.

TABELLE I: DURCHFÜHRTE MESSREIHEN ZUM EINFLUSS DER ANREGUNG.

Nr.	Messung
1	Standardspektroskopie mit Anregung im Mitsystem
2	Einphasige Anregung der Phase A
3	Einphasige Anregung der Phase B
4	Einphasige Anregung der Phase C
5	Zweiphasige Anregung der Phasen A und B unter Beachtung der symmetrischen Komponenten
6	Zweiphasige Anregung der Phasen B und C unter Beachtung der symmetrischen Komponenten
7	Zweiphasige Anregung der Phasen C und A unter Beachtung der symmetrischen Komponenten

Die Impedanzen aus der einphasigen und zweiphasigen Anregung (Messung 2-7) entsprechen den Leiter- bzw. Schleifenimpedanzen der jeweiligen Phasen. Für die Vergleichbarkeit werden aus den Messungen 2-4 und 5-7 nach den Formeln (1) und (2) die Mitsystemimpedanz ermittelt [7]. Dabei ist zu beachten, dass zur Anwendung von Formel (3) die Annahme gilt, dass die Impedanz nur durch passive Elemente bestimmt wird. Diese Annahme ist für WR nicht zulässig und dient in dieser Messreihe lediglich der Vergleichbarkeit.

$$\begin{pmatrix} \underline{Z}_A \\ \underline{Z}_B \\ \underline{Z}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{Z}_{AB} \\ \underline{Z}_{BC} \\ \underline{Z}_{CA} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{Z}_{\text{mit}} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C) \quad (2)$$

Die Gegenüberstellung der gemessenen Impedanzen des WR mit unterschiedlichen Anregungsmethoden in ABBILDUNG 11 zeigt, dass insbesondere im unteren Frequenzbereich deutliche Abweichungen zu der Standard Impedanzspektroskopie entstehen.

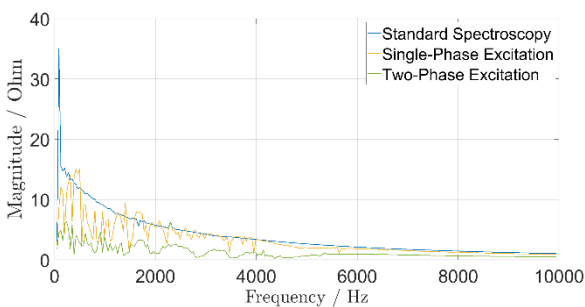


ABBILDUNG 9: EINFLUSS DER ASYNCHRONEN ANREGUNG AUF DIE ERGEBNISSE DER IMPEDANZSPEKTROSKOPIE VON EINEM WECHSELRICHTER.

#### IV. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Impedanz ist eine essentielle Charakteristik von Anlagen, welche für viele Anwendungen wie beispielsweise das impedanzbasierte Stabilitätskriterium relevant ist. Bisher existiert kein Standard der definiert, wie die Impedanz von aktiven Stromrichtern zu bestimmen ist. Durch die aktive Charakteristik entstehen besondere Anforderungen die beachtet werden müssen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Ziel dieses Beitrags war die Untersuchung, welche Faktoren sich auf die Impedanzermittlung von WR auswirken können. Hierzu wurden Messergebnisse des Megawatt-Prüfstandes des Fraunhofer ISE an verschiedenen WR präsentiert. Da diese Messungen nur mit einzelnen Geräten durchgeführt wurden, lassen sich nicht alle Aussagen verallgemeinern. Eine Übersicht über die Messreihen und die Ergebnisse der Messungen ist in TABELLE II dargestellt.

TABELLE II: ÜBERSICHT ÜBER DIE DURCHFÜHRTEN MESSREIHEN SOWIE ANZAHL DER UNTERSUCHTEN TESTOBJEKTE UND DER BEOBACHTETE EINFLUSS AUF DIE IMPEDANZCHARAKTERISTIK.

Nr.	Einflussfaktor	DUT	Einfluss
1	Netzspannungsverzerrung	1	Nein
2	DC-Eingangsspannung	1	Ja
3	Wirkleistung	6	Ja
4	Blindleistung	3	Ja
5	Anregungsamplitude	2	Minimal
6	Einphasige Anregung	1	Ja
7	Zweiphasige Anregung	1	Ja

Die Messergebnisse verdeutlichen, dass die aktive Regelung von WR maßgeblich zur Formung der Impedanzcharakteristik beiträgt, was sich in teilweise signifikanten Abweichungen zeigt. Dabei reagieren die Impedanzen verschiedener WR unterschiedlich stark auf Änderungen des Arbeitspunktes. Insbesondere für Anwendungen zur Stabilitätsbewertung ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer umfassenden Charakterisierung über den gesamten Arbeitsbereich. Es wurde zudem festgestellt, dass asynchrone Messmethoden nicht dieselben Ergebnisse liefern wie die synchrone Anregung aller Phasen bei der differentiellen Impedanzspektroskopie. Daher sollte bei Feldmessungen auf eine synchrone Anregung in allen Phasen geachtet werden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

#### DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Zuge des Projekts „ImaStabil – Impedanzanalyse von PV-Kraftwerken zur Sicherstellung eines stabilen und zuverlässigen Netzbetriebs“ und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter der Förderkennziffer 03EI4060C gefördert.

#### LITERATUR

- [1] BMWK, „Roadmap Systemstabilität, Fahrplan zur Erreichung eines sicheren und robusten Betriebs des zukünftigen Stromversorgungssystems mit 100 % erneuerbaren Energien,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin, 2023.
- [2] S. Rogalla, F. Ackermann, N. Bihler und O. Stalter, „Source-driven and Resonance-driven Harmonic Interaction between PV Inverters and the Grid.“ in *IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Portland, DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749844, 2016.

- [3] J. Sun, „Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, 2011.
- [4] J. Schröder, S. Kaiser, M. Jordan und D. Schulz, „Impedance-Based Method for Predictive Stability Assessment,“ in *Future Power Grids Conference 2024*, Berlin, 2024.
- [5] J. Schröder, S. Kaiser, M. Jordan und D. Schulz, „ImaStabil - Impedanzanalyse zur Sicherstellung eines Stablen und Zuverlässigen Betriebs am Netz,“ in *Hamburger Beiträge zum Technischen Klimaschutz 5*, Hamburg, 2023.
- [6] R. Stiegler, S. Schori, K. Scheida, J. Drapela und T. Hanzlik, „Survey of network impedance in the frequency range 2-9 kHz in public low voltage networks in AT/CH/CZ/GE,“ in *25th International Conference on Electricity Distribution, CIGRE 2019*, Madrid, 2019.
- [7] J. Schröder, M. Meyer, M. Jordan und D. Schulz, „Survey of Harmonic Grid Impedance Measurements on the Medium Voltage Level,“ *IEEE Access*, Vol. 12, Seiten 182763-182778, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3509273, 2024,.
- [8] S. Rogalla, S. Kaiser, B. Burger und B. Engel, „Determination of the Frequency Dependent Thevenin Equivalent of Inverters Using Differential Impedance Spectroscopy,“ in *IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Dubrovnik, 2020.
- [9] S. Rogalla, S. Kaiser, B. Burger und B. Engel, „Measured Impedance Characteristics of Solar Inverters up to 1 MW,“ in *10th Solar & Wind Integration Workshop*, 2020.
- [10] T. Jentsch, Shaping of the output impedance of a grid-forming converter using a frequency dependent virtual impedance, Darmstadt: Master Thesis TU Darmstadt, 2023.