

Netzimpedanzmessungen zur Bewertung der Oberschwingungs-Emission Erneuerbarer Energieanlagen in Mittelspannungsnetzen

Marc Florian Meyer*, Florian Grumm, Gesa Kaatz, Maik Plenz und Detlef Schulz
Elektrische Energiesysteme
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
 D-22043 Hamburg, Holstenhofweg 85
 *E-Mail: marc.meyer@hsu-hh.de

Kurzfassung—Die Bewertung der Oberschwingungsemissionen von leistungselektronisch gekoppelten Erzeugungsanlagen beruht auf der Annahme, dass die Netzfrequenz einen ohmsch-induktiven Frequenzgang aufweist. Resonanzerscheinungen finden nur in Ausnahmefällen Berücksichtigung. Mit Hilfe realitätsnaher Betriebsmittelmodelle, lassen sich bereits in der Planungsphase von Erzeugungsanlagen und dessen Netzanschluss genauere Vorhersagen über die Netzzrückwirkungen treffen. Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, wie sich einzelne Betriebsmittel einer Erzeugungsanlage auf den Frequenzgang der Netzimpedanz auswirken können.

Stichworte—Netzimpedanzmessung, Mittelspannungsebene, Netzzrückwirkungen, Modellierung

I. EINLEITUNG

Vor der Integration leistungselektronisch gekoppelter Erzeugungsanlagen in das elektrische Energieversorgungsnetz muss zunächst im Rahmen eines Zertifizierungsprozesses nach [1] geprüft werden, ob die Erzeugungseinheiten und -anlagen die Grenzwerte für Oberschwingungsströme einhalten (für Mittelspannungsanlagen in [2] festgelegt). Die in den geltenden Richtlinien festgelegten Grenzwerte basieren auf der Annahme, dass der Frequenzgang der Netzimpedanz ausgehend von der 50-Hz-Kurzschlussimpedanz, einen ohmsch-induktives Verhalten aufweist. Netzimpedanzmessungen in der Mittelspannungsebene des elektrischen Energieversorgungsnetzes haben jedoch gezeigt, dass der Frequenzgang der Netzimpedanz in der Realität mehrere Parallel- und Serienresonanzstellen aufweisen kann. Ein Vergleich der real gemessenen Frequenzgänge der Netzimpedanz mit den für die Bestimmung von Oberschwingungsgrenzwerten angenommenen Frequenzgängen hat gezeigt, dass in einigen Frequenzbereichen die realen Impedanzwerte deutlich unterhalb oder oberhalb der angenommenen Impedanzwerte liegen. Durch eine Unterschätzung der Impedanzwerte kann es am Anschlusspunkt zu einer zu hohen Beeinträchtigung der Spannungsqualität in Form von Verletzungen der Grenzwerte für Oberschwingungsspannungen kommen. Dies tritt dann auf, wenn durch die Unterschätzung der Impedanzwerte die Rückwirkungen der Stromharmonischen auf die Spannungsqualität so stark unterschätzt wird, dass im Rahmen der Modellierung (Teil des Zertifizierungsprozesses) keine unzulässigen Netzzrückwirkungen erkannt werden. Dieser Fall würde bei späteren Problemen an errichteten Anlagen zu einer Nachvermessung und einer Durchführung von Gegenmaßnahmen führen, die meist mit hohen Kosten verbunden sind. Im Falle einer Überschätzung der Impedanzwerte werden unter Umständen

vorhandene Anschlusskapazitäten nicht zur Gänze ausgenutzt. Dies ist dann der Fall, wenn durch die Überschätzung der Impedanzwerte in der Planungs- und Modellierungsphase Grenzwertüberschreitung festgestellt werden, die in der Realität aufgrund der geringeren Impedanzwerte nicht auftreten. Aufgrund ungenauer Betriebsmittelmodell für den höheren Frequenzbereich lassen sich die realen Frequenzgänge nur schwer nachbilden.

In dieser Veröffentlichung werden Netzimpedanzmessungen analysiert, welche im Rahmen des Verbundprojektes NetzHarmonie – Optimierte Effizienz und Netzverträglichkeit bei der Integration von Erzeugungsanlagen aus Oberschwingungssicht (FKZ 0325757G) umgesetzt wurden. Hierbei handelt es sich um Netzimpedanzmessungen in einem Windpark, welcher in der Mittelspannungsebene an das elektrische Energieversorgungsnetz angeschlossen ist. Analysiert werden soll speziell der Einfluss verschiedener Betriebsmittel auf den Frequenzgang der Netzimpedanz, sowie die Modellierung dieses Einflusses. Ziel ist ein Beitrag zur Verbesserung von Betriebsmittelmodellen. Eine genauere Modellierung der Netz- und Betriebsmittelimpedanzen kann im Rahmen eines verbesserten Zertifizierungsprozesses zur Vermeidung der oben beschriebenen negativen Effekte bei der Vernachlässigung von Resonanzerscheinungen beitragen.

II. UNTERSUCHUNGSgegenstand

Im Rahmen des Verbundprojektes NetzHarmonie konnte eine Netzimpedanzmesskampagne in dem in Abb. 1 dargestellten Windpark durchgeführt werden.

Der in Abb. 1 dargestellte Windpark besteht aus 4 Windenergieanlagen mit Nennwirkleistungen von jeweils 2 MW. Angeschlossen ist der Windpark über ein ca. 8 km langes Kabel an die Unterspannungssammelschiene des nahegelegenen 110/20-kV-Umspannwerkes. Wie in Abb. 1 dargestellt, wurde das Messgerät zur Bestimmung der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz an der letzten Windenergieanlage des Windparkstrangnetzes angeschlossen (Messpunkt M). Das Messgerät ist in der Lage den Frequenzgang der Netzimpedanz von 0 bis 9 kHz zu bestimmen. Das verwendete Messverfahren ist in [3], [4] und [5] beschrieben. Im Rahmen der Messkampagne konnten einzelne Betriebsmittel des Windparks bzw. der Windenergieanlagen ab- und zu geschaltet werden. Speziell soll hier die Zu- bzw. Abschaltung der Transformatoren und Filter der Windenergieanlagen untersucht werden. Durch die Zu- bzw. Abschaltung der Transformatoren und Filter konnte die Netzimpedanz am Messpunkt M bei

verschiedenen Zuständen des Windparks vermessen und der Einfluss einzelner Betriebsmittel auf den Frequenzgang der Netzimpedanz messtechnisch bestimmt werden. Mittels der Erweiterung des in [6] aus diesen Messungen abgeleiteten Modells wird die Zuschaltung der Transformatoren und Filter im Modell nachgebildet und der im Frequenzgang des Modells beobachtbare Einfluss der Betriebsmittel mit dem gemessenen Einfluss verglichen.

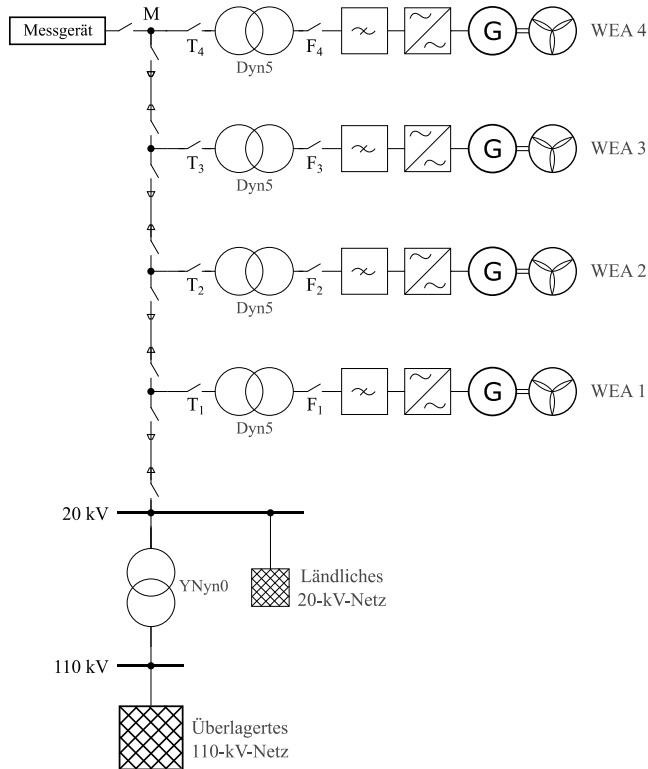


Abbildung 1: Übersichtsschaltbild des Windparks.

III. MESSERGEBNISSE

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Messergebnisse vorgestellt, die bereits in [6] als Grundlage für die Modellbildung dienten. Im Rahmen einer Messreihe wurden zunächst alle Transformatoren und Filter der Windenergieanlagen durch Öffnen der Schalter T_1 bis T_4 und F_1 bis F_4 abgeschaltet. In diesem Zustand wurde eine Netzimpedanzmessung durchgeführt, wodurch der Frequenzgang der Netzimpedanz ohne Windenergieanlagen bestimmt werden konnte. Anschließend wurden zunächst die Transformatoren sukzessive zugeschaltet. Für jeden Zustand der Gesamtanlage, also nach Zuschaltung jedes einzelnen weiteren Transformators, wurde die Netzimpedanz vermessen. Die sukzessive Zuschaltung der Transformatoren erfolgte derart, dass zunächst die in Abb. 1 dargestellten Schalter T_1 bis T_4 nacheinander geschlossen wurden, wobei die Schalter F_1 bis F_4 geöffnet blieben. Hierdurch werden ausschließlich die Transformatoren im Leerlaufbetrieb zugeschaltet. Nach der Zuschaltung aller Transformatoren wurden die einzelnen Filter mit Hilfe der Schalter F_1 bis F_4 zugeschaltet. Um ausschließlich die Filter zuzuschalten, wurden die dahinterliegenden Halbleiterschalter der Umrichter mit Hilfe der Vorgabe $P_{\text{Soll}} = 0 \text{ kW}$ geöffnet gehalten. Durch die Zuschaltung der Filter werden die Transformatoren mit den Filterströmen belastet und befinden sich anschließend nicht mehr im Leerlaufbetrieb.

Wie bereits in [6] gezeigt hat die Zuschaltung der Transformatoren und Filter einen geringen, aber messbaren Einfluss

auf den Frequenzgang der am Messpunkt gemessenen Netzimpedanz. Die zugehörigen Messergebnisse sind in Abb. 2 und Abb. 3 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass das Messgerät stets die Parallelschaltung der am Messpunkt angeschlossenen Netze bzw. Anlagen bestimmt, da das Messgerät das Netz durch die Belastung mit einem pulsformigen Strom anregt und anhand dieses Stromes die Netzimpedanz berechnet.

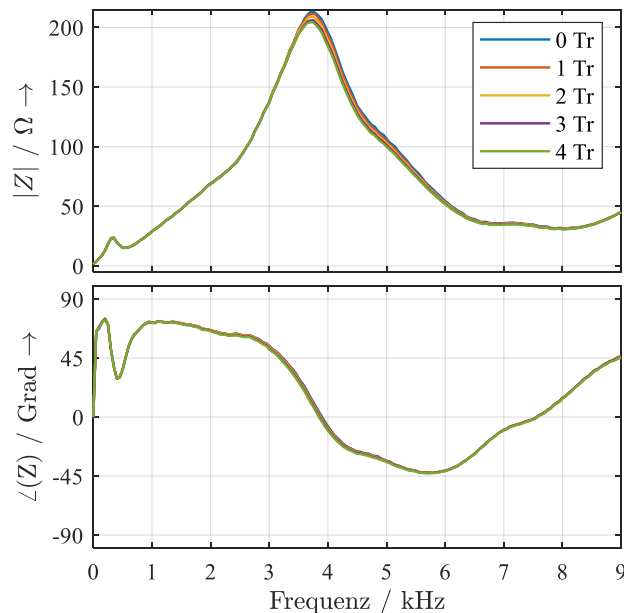


Abbildung 2: Messergebnisse bei sukzessiver Zuschaltung der Transformatoren nach [6]. Die Legende gibt die Anzahl der bei der Messung zugeschalteten Transformatoren an.

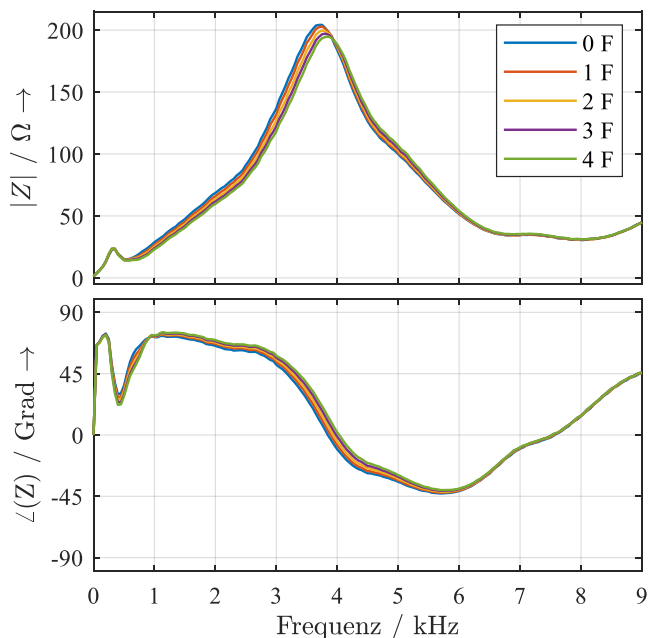


Abbildung 3: Messergebnisse bei sukzessiver Zuschaltung der Filter nach [6]. Die Legende gibt die Anzahl der bei der Messung zugeschalteten Filter an.

IV. MODELLBILDUNG

In [7] wurde gezeigt, wie aus den Messungen ein Modell für den unteren Frequenzbereich von bis zu 2 kHz erstellt werden kann. Im Rahmen der Untersuchungen in [6] wurde das in

Abb. 4 dargestellte Modell (ohne Z_{Korr}) mit Hilfe von Netzdaten parametrisiert, um den Frequenzgang der Netzimpedanz (bei vom Netz getrennten Filtern und Transformatoren) im Modell nachzubilden. Hierbei wurden alle Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten des Modells zunächst als frequenzunabhängig angenommen. Aufgrund der unzureichenden Ergebnisse im Frequenzbereich oberhalb von ca. 1 kHz wurde für den Kabelwiderstand und die Kabelinduktivität eine Frequenzabhängigkeit aus den Messdaten abgeleitet, siehe [6]. Durch die frequenzabhängige Kabelimpedanz konnte der Frequenzgang des Modells deutlich an den gemessenen Frequenzgang angenähert werden.

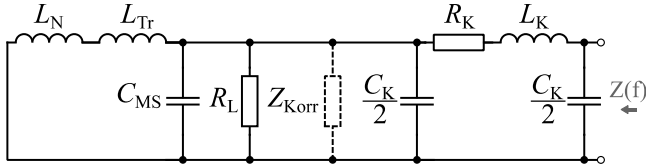


Abbildung 4: Netzimpedanzmodell nach [6] mit zusätzlicher Korrekturimpedanz Z_{Korr} .

Der daraus resultierende Frequenzgang des Modells ist in Abb. 5 dargestellt und dem gemessenen Frequenzgang gegenübergestellt. Z_{Messung} entspricht dem ohne Transformatoren und Filter gemessenen Frequenzgang der Netzimpedanz und Z_{Approx} dem Frequenzgang des Modells mit frequenzabhängigem Kabelwiderstand und frequenzabhängiger Kabelinduktivität. Hier ist zu erkennen, dass der Frequenzgang des Modells im unteren Frequenzbereich gut und im oberen Frequenzbereich unzureichend mit dem gemessenen Frequenzgang der Netzimpedanz übereinstimmt.

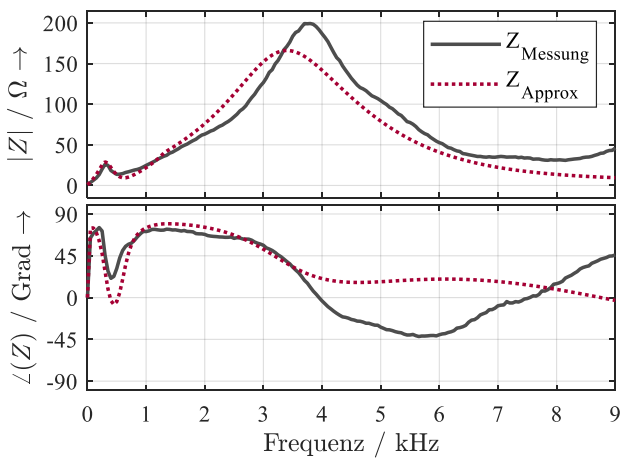


Abbildung 5: Frequenzgang des Modells aus Abb. 2 mit frequenzabhängigen Kabelimpedanzen nach [6].

Um die Zuschaltung der Filter und Transformatoren im Modell abzubilden und mit den Messdaten vergleichen zu können, wird eine zusätzliche Impedanz Z_{Korr} eingeführt (siehe Abb. 4). Diese Impedanz dient dem Ausgleich der Differenz zwischen dem Frequenzgang des Modells und dem gemessenen Frequenzgang der Netzimpedanz, sodass mit Z_{Korr} gilt:

$$Z_{\text{Modell}} = Z_{\text{Messung}} \quad (1)$$

Für die Berechnung der Korrekturimpedanz wird zunächst die Netzinduktivität, die Trafoinduktivität, die Kapazität C_{MS} und

der Lastwiderstand R_L zu Z_{Netz} zusammengefasst. Anschließend lässt sich die Gleichung (2) für die Impedanz des Modells umstellen und nach Z_{Korr} auflösen.

$$Z_{\text{Modell}} = \left[\left(Z_{\text{Netz}} \parallel Z_{\text{Korr}} \parallel \frac{1}{j\omega \frac{C_K}{2}} \right) + R_K + j\omega L_K \right] \parallel \left[\frac{1}{j\omega \frac{C_K}{2}} \right] \quad (2)$$

Nach Bestimmung von Z_{Korr} gilt, dass der Frequenzgang des Modells dem der realen Netzimpedanz ohne Filter und Transformatoren gleicht. Im Folgenden kann die Zuschaltung der Filter und Transformatoren modelliert werden. Hierzu wurden Ersatzschaltbilder bzw. Ersatzimpedanzen aus den Betriebsmitteldaten der Transformatoren und Filter bestimmt. Für die Transformatoren wurde das gängige T-Ersatzschaltbild parametrisiert und für die Filter eine Ersatzimpedanz, welche sich wiederum aus dem Filteraufbau und den realen Filterdaten ergibt, berechnet. In beiden Fällen wurden für die Parametrierung 50-Hz-Parameter verwendet. Abb. 6 zeigt den Aufbau des Modells inklusive Schalter, Transformatoren und Filter, wobei hier der Übersichtlichkeit halber nur zwei der insgesamt vier Transformatoren und Filter dargestellt sind. Wie Abb. 6 zeigt, wurden bei diesem Modell die Kabelstrecken vernachlässigt, über die die einzelnen Anlagen miteinander verbunden sind (einige hundert Meter). Im Modell werden die Anlagen bzw. deren Transformatoren und Filter direkt am Messpunkt parallel angeschlossen. Diese Vereinfachung wurde angewendet, da sich ein frequenzabhängiges Modell für die Kabel zwischen den einzelnen Anlagen aus den Messdaten nicht direkt herleiten lässt.

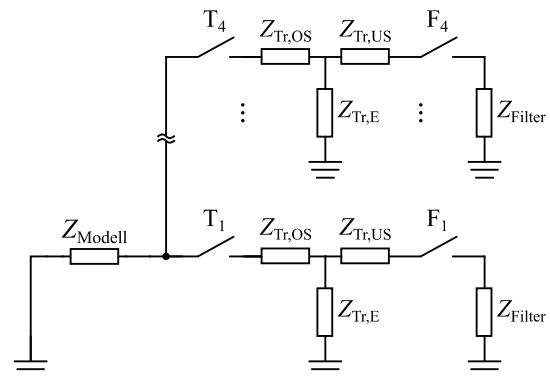


Abbildung 6: Modell der sukzessiven Zuschaltung der Transformatoren. Z_{Modell} entspricht der Gesamtimpedanz des Modells aus Abb. 4. Der Übersichtlichkeit halber sind nur zwei der vier Anlagen dargestellt.

V. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der modellierten Transformator- und Filterzuschaltung vorgestellt. Mit Hilfe des Modells aus Abb. 6 werden die im Rahmen der sukzessiven Betriebsmittelzuschaltung hergestellten Anlagenzustände im Modell nachgebildet. Abb. 7 zeigt die Frequenzgänge des Modells bei sukzessiver Zuschaltung der Transformatorimpedanzen.

Hier ist deutlich zu erkennen, dass der Einfluss der Transformatorimpedanzen auf den Frequenzgang der Netzimpedanz im Modell nachstellbar ist.

Während sich die Transformatorzuschaltung mit dem oben vorgestellten Modell nicht nachbilden lässt, zeigen die Ergebnisse der modellierten Filterzuschaltung deutlich bessere Ergebnisse. Die einzelnen Frequenzgänge bei sukzessiver Zuschaltung der Filterimpedanzen im Modell sind in Abb. 8 dargestellt. Die Ergebnisse weisen im Frequenzbereich von

ca. 1,5 bis 4 kHz eine große Ähnlichkeit zu den gemessenen Frequenzgängen auf.

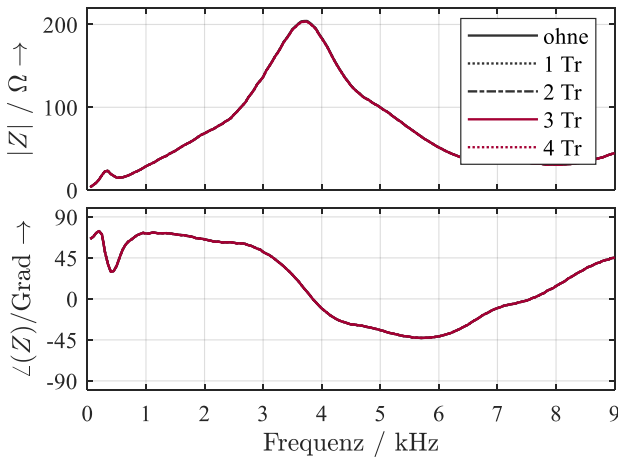


Abbildung 7: Frequenzgänge des Modells aus Abb. 6 bei sukzessiver Zuschaltung der Transformatorimpedanzen.

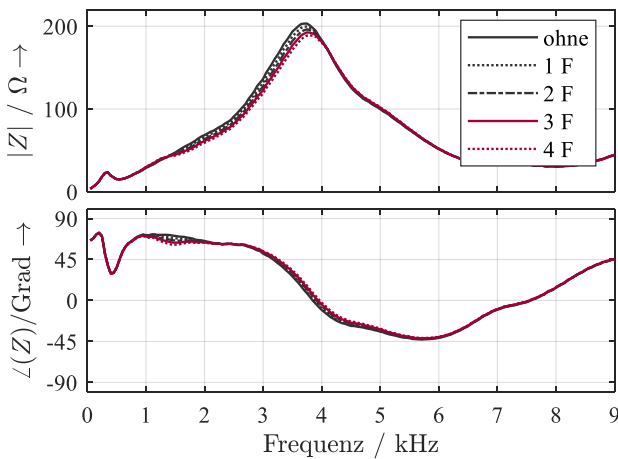


Abbildung 8: Frequenzgänge des Modells aus Abb. 6 bei sukzessiver Zuschaltung der Filterimpedanzen.

Die in Abb. 8 dargestellten Ergebnisse der Modellierung der Filterzuschaltung sind in Abb. 9 den gemessenen Frequenzgängen gegenübergestellt.

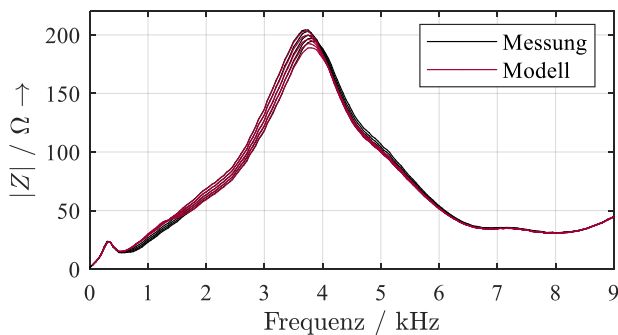


Abbildung 9: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Frequenzgänge bei sukzessiver Zuschaltung der Filter.

Hier ist zu erkennen, dass die Frequenzgänge des Modells im oben genannten Bereich von ca. 1,5 bis 4 kHz ähnliche Ergebnisse aufweisen, wie die vermessene Filterzuschaltung. Für eine detailliertere Betrachtung ist dieser Frequenzabschnitt in Abb. 10 vergrößert dargestellt. Hier ist noch deutli-

cher zu erkennen, dass die modellierten Frequenzgänge, abgesehen von Abweichungen in den Randbereichen, sehr gut mit den gemessenen Frequenzgängen übereinstimmen. Um noch genauer die Abweichung zwischen der gemessenen und der modellierten Filterzuschaltung erkennen zu können, zeigt Abb. 11 die relative Abweichung der modellierten Frequenzgänge von den gemessenen Frequenzgängen, welche nach Gleichung (3) berechnet wurde.

$$\Delta Z_{Fi} = \frac{Z_{Fi,Modell} - Z_{Fi,Messung}}{Z_{Fi,Messung}} \quad (3)$$

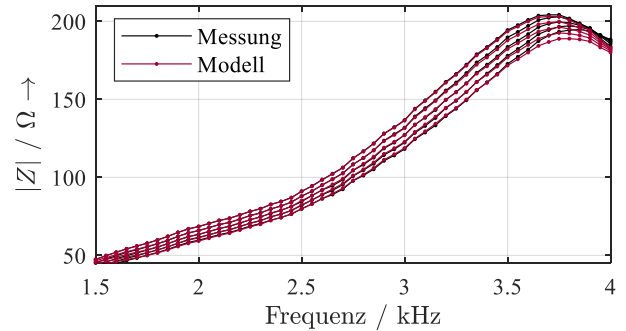


Abbildung 10: Vergrößerte Darstellung der Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Frequenzgänge bei sukzessiver Zuschaltung der Filter.

Mit Hilfe dieser Darstellungsweise können Bereiche identifiziert werden, in denen die größten Abweichungen relativ zu den gemessenen Impedanzwerten auftreten. Dies ist im unteren Frequenzbereich von ca. 0,5 bis 1,5 kHz der Fall. Bei Frequenzen über 4 kHz treten ebenfalls Abweichungen auf, die jedoch geringer ausfallen. Für den oben genannten Frequenzbereich von 1,5 bis 4 kHz sind die Abweichungen nahe null.

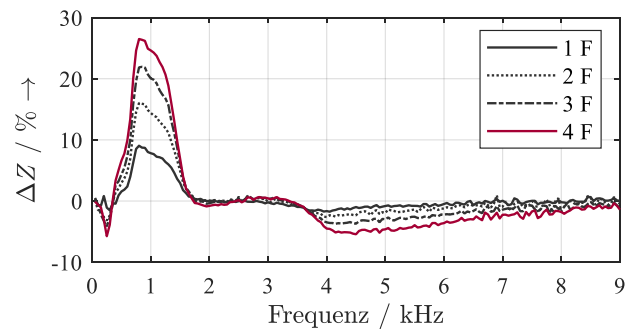


Abbildung 11: Differenz der gemessenen und modellierten Frequenzgänge bei sukzessiver Zuschaltung der Filter.

VI. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass für diesen speziellen Messpunkt in einem bestimmten Frequenzbereich der Einfluss der Filter auf den Frequenzgang der Netzimpedanz mit Hilfe von auf 50-Hz-Parameter beruhenden Filtermodellen nachgebildet werden kann. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollen aus diesen und weiteren Messungen verbesserte Betriebsmittelmodelle abgeleitet werden, welche eine Gültigkeit in einem weiteren Frequenzbereich besitzen. Derartige frequenzabhängige Betriebsmittelmodelle können dazu beitragen die Modellierung der Netzurückwirkungen von leistungselektronisch gekoppelten Erzeugungsanlagen zu verbessern.

Sofern der Frequenzgang der Netzimpedanz mit Hilfe genauer Betriebsmittelmodelle besser nachgebildet werden kann, können dadurch die aus Oberschwingungssicht gegebenen Anschlusskapazität besser ausgenutzt werden, da die Resonanzstellen besser nachgebildet werden. Dadurch kann zudem genauer vorhergesagt werden, welche Stromharmonischen in welcher Höhe zu Problemen bei der Einhaltung der Grenzwerte für Spannungsharmonische am Anschlusspunkt führen. Hierdurch ließen sich Nachvermessungen vermeiden, da bereits in der Planungsphase die Frequenzgänge der Betriebsmittelimpedanzen in Kombination mit der Netzimpedanz berücksichtigt werden können.

Die bereits in [6] vorgestellten Ergebnisse ließen zudem vermuten, dass für eine realitätsnähere Nachbildung der Frequenzgänge von Netzimpedanzen in erster Linie die frequenzabhängigen Modelle von Kabeln verbessert werden müssen. Aus diesem Grund sollen neben der weiteren Untersuchung der Transformator- und Filtermodelle auch zu den Kabelmodellen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

DANKSAGUNG

Teile dieser Arbeit wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Verbundprojektes NetzHarmonie (FKZ 0325757G) gefördert.

LITERATUR

- [1] FGW e.V., „Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten, -anlagen und Speicher sowie für deren Komponenten – Teil 8“, Revision 09, Berlin, 2019.
- [2] VDE-AR-N 4110, „Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)“, Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), VDE Verlag GmbH, November 2018, Berlin
- [3] Do Thanh, T.: „Messeinrichtung zur mobilen Netzimpedanzbestimmung auf der Mittelspannungsebene“, Dissertation, VDE-Verlag, Berlin Offenbach, 2014.
- [4] Langkowski, H.: „Netzimpedanzmessung in Nieder- und Mittelspannungsnetzen zur verbesserten Netzintegration Erneuerbarer Energieanlagen“, Dissertation, VDE-Verlag, Berlin Offenbach, 2015
- [5] Jordan, M.: „Untersuchung von Methoden zur Identifikation der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz“, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, 2016.
- [6] Kaatz, G; Meyer, M. F.; Grumm, F; Schulz, D; Safargholi, F.; Hoven, M; Adloff, S., “Impedance Frequency Modelling based on Grid Data for the Prediction of Harmonic Voltages,” NEIS Konferenz 2018, , Sep. 20-21, Hamburg, Deutschland.
- [7] Jordan, M.; Meyer, M. F.; Kaatz, G.; Schulz, D., “Harmonic Network Impedance Measurement and Modelling on the Medium Voltage Level”, ETG Congress 2017, Bonn.