

Validierung einer standardisierten Netzimpedanznachbildung zur Bewertung nichtlinearer Verbraucher

Maximilian Schifferdecker*, Marc Florian Meyer, Florian Grumm, Marvin Erhardt, Detlef Schulz

Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr
Hamburg, Deutschland

*maximilian.schifferdecker@hsu.hamburg

Kurzfassung – Diese Veröffentlichung beschreibt den Aufbau, die Vermessung und die Bewertung von Netzimpedanznachbildungen zur Analyse von Störaussendungen von elektrischen Verbrauchern der Niederspannungsebene. Grundlage für den Amplituden- und Phasengang der Netzimpedanz ist die Norm DIN IEC/TS 62578, die für Frequenzen bis 9 kHz gültig ist. Da die Impedanznachbildung aus einem Netzwerk aus passiven Bauteilen besteht, wird der Einfluss von Bauteiltoleranzen auf den Amplituden- und Phasengang der Impedanz untersucht. Dafür werden mittels Parametervariation alle Kombinationen der Toleranzen simuliert, um die maximalen Abweichungen vom definierten Verlauf zu bestimmen. Aus dem Vergleich der Vermessung mit den Simulationen der Bauteiltoleranzen sind Optimierungspotentiale für die Netznachbildung ableitbar.

Stichworte – Netzimpedanznachbildung, DIN EN 61000-4-7, Störaussendung, Niederspannung

NOMENKLATUR

NIN	Netzimpedanznachbildung
f in Hz	Frequenz
\underline{Z} in Ω	Komplexe Impedanz
R in Ω	Ohmscher Widerstand
L in H	Induktivität
C in F	Kapazität
ω in 1/s	Kreisfrequenz

I. EINLEITUNG

Durch die stetig steigende Anzahl von leistungselektronischen Komponenten, Verbrauchern sowie Erzeugern in öffentlichen und industriellen elektrischen Netzen, nehmen die leitungsgebundenen Störaussendungen zu, die an das Netz angeschlossene Verbraucher und Erzeuger beeinflussen. Hierzu zählen vor allem LED-Vorschaltgeräte, (klein) PV-Anlagen, Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen [1].

Ebenfalls steigt der Einsatz von leistungselektronischen Komponenten im industriellen Umfeld, wie z. B. durch Frequenzumrichter geregelte Antriebe und DC-Schnellladesysteme für Elektrofahrzeuge. Diese Verbraucher weisen ein nichtlineares Verhalten auf [2] und erzeugen so Störaussendungen.

Um die auftretenden Störaussendungen von Verbrauchern standardisiert vermessen und bewerten zu können, gibt die Norm „DIN IEC/TS 62578 VDE V 0558-578:2018-09“ einen aus realen Messdaten abgeleiteten Verlauf für eine Netzimpedanznachbildung (NIN) an [3], die zwischen eine Wechselspannungsquelle und das zu vermessende Gerät geschaltet ist; siehe ABBILDUNG 1.

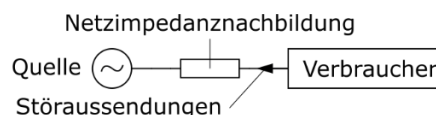


ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHER MESSAUFBAU FÜR DIE MESSUNG VON STÖRAUSSENDUNGEN VON VERBRAUCHERN.

Zur qualifizierten Bewertung von Störaussendungen durch Elektrofahrzeuge wird im Folgenden eine Netzimpedanznachbildung nach Vorgabe der Norm gefertigt, vermessen und mit einer Simulation des optimalen Verlaufs verglichen.

II. NETZIMPEDANZNACHBILDUNG NACH UNTERSCHIEDLICHEN NORMEN

Netzimpedanznachbildungen (NIN) oder auch Line Impedance Stabilisation Network (LISN) oder Artificial Mains Network (AMN) sind elektrische Impedanznetzwerke aus passiven Bauelemente. Sie dienen der standardisierten Vermessung von Störaussendungen elektrischer Verbraucher, um deren Netzzrückwirkungen zu bewerten [3, 4]. Eine erste Empfehlung für die Auslegung der Bauelemente gibt die Norm „DIN EN 61000-4-7 VDE 0847-4-7:2009-12“ [5]. In [3] wurden die Werte der Bauteile überarbeitet, da der Einfluss von aktiven Netzstromrichtern (AIC) und anderen leistungselektronischen Komponenten, welche die Netzimpedanz stark beeinflussen, in der Empfehlung aus [5] unberücksichtigt sind. Auswertungen von zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanzverläufen mehrerer Messkampagnen führen zu angepassten Werten für die Bauteile des Impedanznetzwerkes.

A. Verlauf der resultierenden Netzimpedanz

Zur Bestimmung eines aussagekräftigen Verlaufs der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz wurden über einen Zeitraum von drei Jahren an mehreren Standorten in Nord-, Mittel- und Süddeutschland sowie Nordfrankreich im Rahmen eines Forschungsprojektes Messkampagnen durchgeführt [3].

Der Verlauf der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz für verschiedene Belastungssituationen der Netzanschlusspunkte ist [3] zu entnehmen. Aus den jeweiligen Minimal- bzw. Maximalwerten zu den einzelnen Frequenzpunkten sind verschiedene Hüllkurven (0 % – 100 %) abgeleitet. Hierbei beschreiben beispielsweise die 50%-Hüllkurven, dass 50 % aller vermessen Punkte über bzw. unter dieser liegen. Beim Vergleich der Kurvenverläufe mit dem empfohlenen Impedanzverlauf aus [5], welcher im Bereich von 0 – 9 kHz gültig ist, fällt auf, dass selbst die 100%-Hüllkurve deutlich unter dem empfohlenen Verlauf liegt. Die Gesamtverläufe nach [3] und [5] sind der ABBILDUNG 2 zu entnehmen.

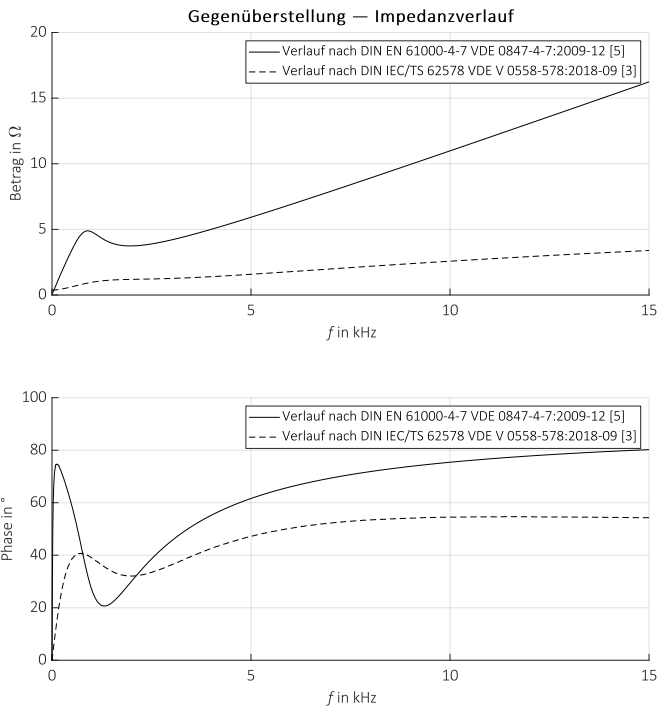


ABBILDUNG 2: GEGENÜBERSTELLUNG DER IMPEDANZVERLÄUFE, ENTNOMMEN UND ANGEPAST AUS [3] UND [5].

Mathematisch lässt sich der Amplitudenverlauf aus [5] ab 3 kHz, wie folgt annähern:

$$|Z|(f) = \sqrt{8,819 + 1,23 \cdot 10^{-7} \cdot f^2 \ln(f)} \quad (1)$$

Es ist den Graphen zu entnehmen, dass der Verlauf aus [5] eine deutlich ausgeprägtere Resonanzstelle im unteren Frequenzbereich aufweist. Der Betrag aus [3] weist zusätzlich einen über den gesamten Frequenzbereich deutlich kleineren Amplitudenwert auf. Die Phasengänge beider Verläufe haben einen ähnlichen Verlauf, jedoch tritt auch hier die Resonanzstelle deutlicher auf.

B. Parameter und Aufbau der NIN

Aus den Verläufen der ABBILDUNG 2 werden die Bauteile für eine Verschaltung nach ABBILDUNG 3 abgeleitet. Es ergeben sich die in TABELLE I aufgeführten Bauteilwerte, welche für den Bereich von 0 – 9 kHz gültig sind [3, 5]. Für den Bereich 9 – 150 kHz wird eine NIN aus der Norm „CISPR 16-1-1“ empfohlen [3]. Diese deckt einen Frequenzbereich von 9 kHz – 18 GHz ab [6].

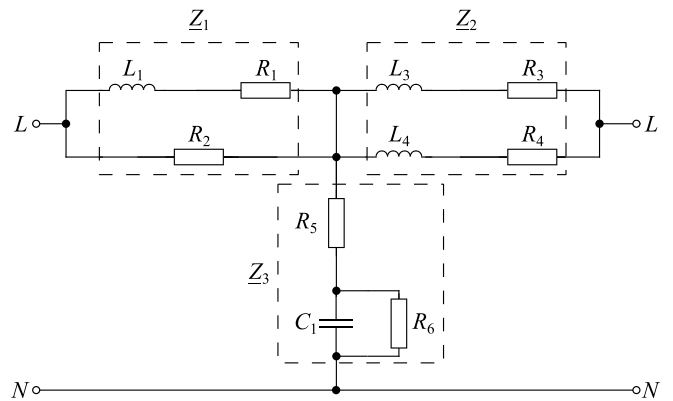


ABBILDUNG 3: IMPEDANZNETZWERK DER EINPHASIGEN NIN, ENTNOMMEN UND ANGEPAST AUS [3].

TABELLE I: BAUTEILWERTE AUS [3].

Bauteil	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
Wert	0,02 Ω	0,8 Ω	0,38 Ω	7,03 Ω	1 Ω	10 kΩ
Bauteil	L ₁	L ₃	L ₄	C ₁		
Wert	100 μH	44,2 μH	22,1 μH	50 μF		

1) Aufbau der NIN für Simulationsprogramme

Da der Aufbau aus ABBILDUNG 3 gerade für numerische Simulationsprogramme zu hohen Rechen- und Simulationszeiten führen kann, wird eine vereinfachte Bauweise des Netzwerks in [3] vorgeschlagen. ABBILDUNG 4 zeigt den einphasigen und drephasigen Aufbau. Für Vermessungen und Bewertungen realer Versuchsaufbauten ist der Aufbau nach ABBILDUNG 3 vorgeschrieben.

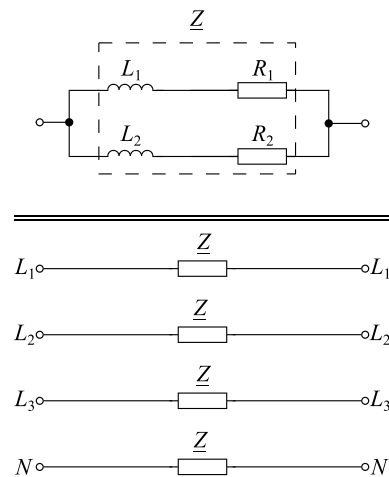


ABBILDUNG 4: VEREINFACHTE NIN FÜR SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN, ENTNOMMEN UND ANGEPAST AUS [3].

Der resultierende Impedanzverlauf lässt sich mit Gleichung (2) beschreiben.

$$Z(\omega, R_1, R_2, L_1, L_2) = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + j\omega L_1} + \frac{1}{R_2 + j\omega L_2}} \quad (2)$$

Die Bauteilwerte für die Hüllkurven 10 %, 50 % und 90 % sind in TABELLE II aufgeführt.

TABELLE II: BAUTEILWERTE FÜR VERSCHIEDEN HÜLLKURVEN DER NIN FÜR DEN VEREINFACHTEN AUFBAU [3].

Hüllkurve	R_1	R_2	L_1	L_2
10 %	0,1 Ω	0,55 Ω	12,0 μH	0,5 μH
50 %	0,49 Ω	2,55 Ω	30,9 μH	13,0 μH
90 %	1,07 Ω	7,07 Ω	51,0 μH	21,1 μH

Grafisch werden die Verläufe nach (2) dem Verlauf nach [3] in ABBILDUNG 5 gegenübergestellt.

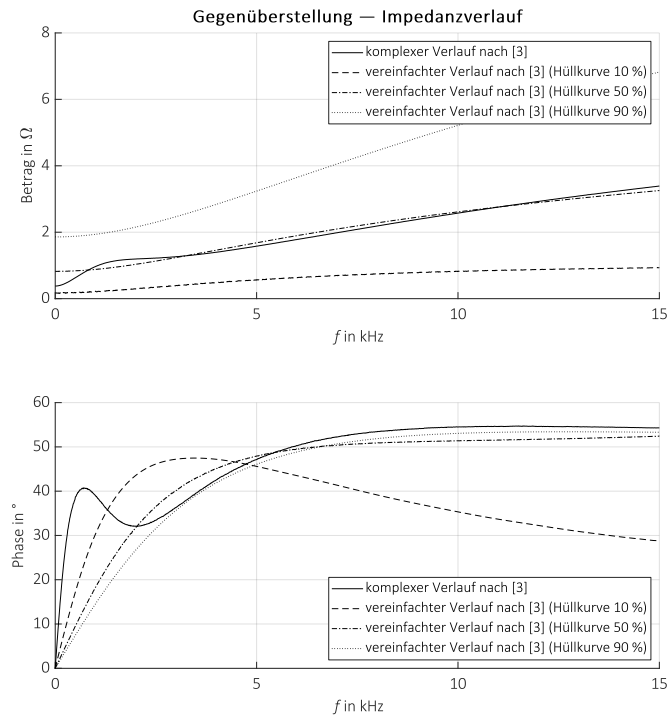


ABBILDUNG 5: GEGENÜBERSTELLUNG DER VEREINFACHTEN HÜLLKURVEN ZU DEM KOMPLEXEN IMPEDANZVERLAUF, ENTNOMMEN UND ANGEPAßT AUS [3].

Durch die Vereinfachung des Impedanznetzwerks ist die Resonanzstelle im unteren Frequenzbereich nicht mehr vorhanden und es entsteht ein kontinuierlich steigender Verlauf für den Amplituden- und den Phasengang. Grundsätzlich kann der komplexe Verlauf gut durch die Vereinfachung angenähert werden. Die 50%-Hüllkurve approximiert sowohl im Amplituden- als auch Phasengang den Verlauf der komplexen Vereinfachung am besten.

2) Aufbau einer NIN

Die in TABELLE I aufgeführten Bauteile eignen sich für einen Nennstrombereich der Prüflinge bis 100 A. Grundsätzlich lässt sich der Aufbau (siehe ABBILDUNG 3) in zwei Hauptbestandteile aufteilen:

- Z_2 bildet hierbei den maßgeblichen Impedanzverlauf ab.
- Z_1 und Z_3 dienen zur Filterung von bereits vorhandenen Verzerrungen am NAP der NIN und zur Ein- bzw. Auskopplung des Prüflings [3]. Hier wird die Funktionsweise einer passiven Filterschaltung genutzt. Da möglichst nur die 50-Hz-Komponente der Spannung, ausgehend vom NAP übertragen werden soll, kommt ein Tiefpass zweiter Ordnung bestehend aus den Bauteilen R_1 , L_1 und C_1 zum Einsatz [7].

Die gezeigte Verschaltung ist für einphasige Anwendungen vorgesehen. Aus [3, 5] lässt sich eine dreiphasige Verschaltung ableiten, welche in ABBILDUNG 6 dargestellt ist. Hierbei finden die Impedanzen $Z_1 - Z_3$ mit den jeweiligen Bauteilwerten Anwendung.

Für Nennströme über 100 A gibt [3] einen Korrekturfaktor an, welcher auf die Bauteile L_1 , R_1 , L_3 , R_3 , L_4 und R_4 aus ABBILDUNG 3 angewendet werden soll; das Netzwerk Z_3 bleibt unverändert. Die Bauteilwerte sollen mit dem Faktor $\frac{I_N}{100}$ reduziert werden.

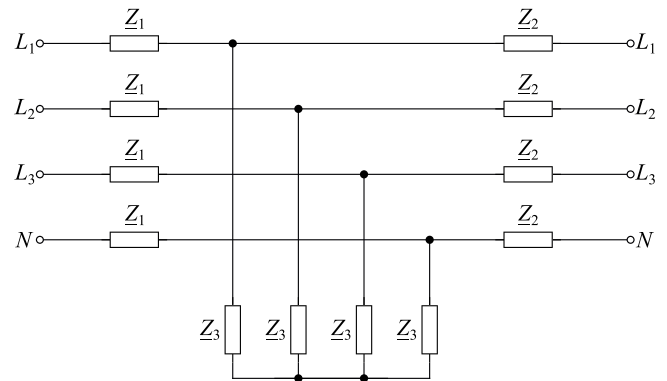


ABBILDUNG 6: VORGESCHLAGENES IMPEDANZNETZWERK DER DREIPHASIGEN NIN, ENTNOMMEN UND ANGEPAßT AUS [3].

III. UNTERSUCHUNG EINER NETZIMPEDANZNACHBILDUNG MIT EINEM NENNSTROM VON 32 A

Zur praktischen Validierung und Vermessungen der Störaussendung verschiedener nicht linearer aktiver und passiver Bauteile wird eine einphasige NIN nach [3] gefertigt. Diese ist für einen Nennstrom von 32 A ausgelegt. An der aufgebauten Impedanz wird zusätzlich der Einfluss der Bauteiltoleranzen auf den vorgegebenen Impedanzverlauf untersucht. Verwendet werden die Bauteilwerte aus Tabelle I. In [3] ist für Widerstände eine typische Toleranz von $\pm 1\%$ angegeben; für Induktivitäten und Kapazitäten sind Toleranzen im Bereich von $\pm 5 - 10\%$ empfohlen. Die Toleranzen für passive Bauelemente wie Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren sind in der Norm „DIN EN 60063:2015-11“ in E-Reihen definiert [8]. Daraus kann abgeleitet werden, dass für die Widerstände die E96-Reihe oder besser und für die Induktivitäten und Kondensatoren Bauteile der E24-Reihe genutzt werden sollten. Aus der Annahme der Toleranz für Widerstände von $\pm 1\%$, sowie 10 % bzw. 5 % für die Induktivitäten und Kondensatoren ergibt sich eine Abweichung vom vorgeschriebenen Verlauf von ca. 0,6 dB bzw. 0,3 dB [3].

A. Vermessung der NIN

Durch die Vermessung der NIN soll der erreichte Impedanzverlauf im Bereich von 0 – 15 kHz nachgewiesen werden. Für die Vermessung wird ein eigens entwickelter Prüfstand genutzt, welcher hauptsächlich zur Ermittlung von Amplituden- und Phasengängen von Strommessequipment (Nullflusswandler, Rogowski-Spulen, Hallsensoren etc.) eingesetzt wird. Der Prüfstand besteht aus einer computergestützten Signalgenerierung und -vermessungen sowie aus einem hochpräzisen Leistungsverstärker.

Durch die Ansteuerungs- und Auswertesoftware ist es möglich, über den Signalgenerator ein beliebiges Signal vorzugeben und über den Leistungsverstärker in den gewünschten Spannungs- bzw. Strombereich zu verstärken.

Zur Aufnahme der Spannungs- bzw. Stromsignale der Prüflinge kommen ein Präzisions-Isolationsmessverstärker für die Spannungsmessung zum Einsatz und verschiedene Präzisions-Messshunts sind für die Stromaufnahme vorgesehen, welche für verschiedenen Stromgrößen ausgelegt sind.

Die Vermessung der NIN bei 5 A und 15 A ergibt den gezeigten realen Impedanzverlauf aus ABBILDUNG 7, welcher der Vorgabe aus [3] gegenübergestellt ist.

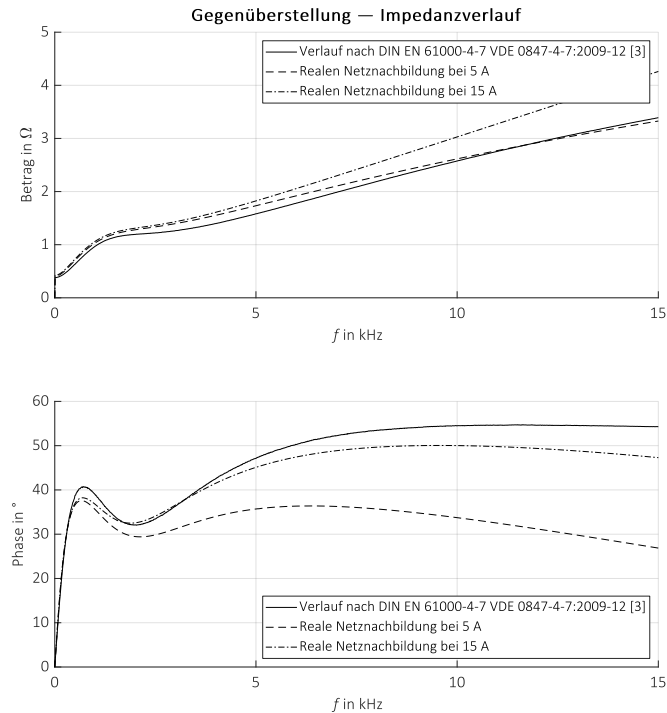


ABBILDUNG 7: GEGENÜBERSTELLUNG DES VERLAUFS AUS [3] UND DER VERMESSUNG DER REALEN NIN BEI 5 A UND 15 A.

Die Vermessung wird bei ca. 20 °C im Labor durchgeführt. Der Verlauf wird mit einer Schrittweite von 10 Hz bestimmt. Die Abweichungen der gemessenen Verläufe vom Referenzverlauf zeigen eine Frequenz- und Stromabhängigkeit; die relative Abweichung ist in ABBILDUNG 8 dargestellt.

B. Simulation des Einflusses der Bauteiltoleranzen auf den Amplituden und Phasengang

Um eine Abschätzung der Ursache der deutlichen Abweichung im höheren Frequenzbereich zu geben, wird der Einfluss von Bauteiltoleranzen auf den Amplituden- und Phasengang simuliert. Hierbei wird der Einfluss der jeweiligen Bauteilgruppen (Widerstand, Induktivität und Kondensator) mittels Parametervariation untersucht. Daraus lässt sich das Potential der jeweiligen Bauteile zur Verbesserung des Impedanzverlaufs ableiten.

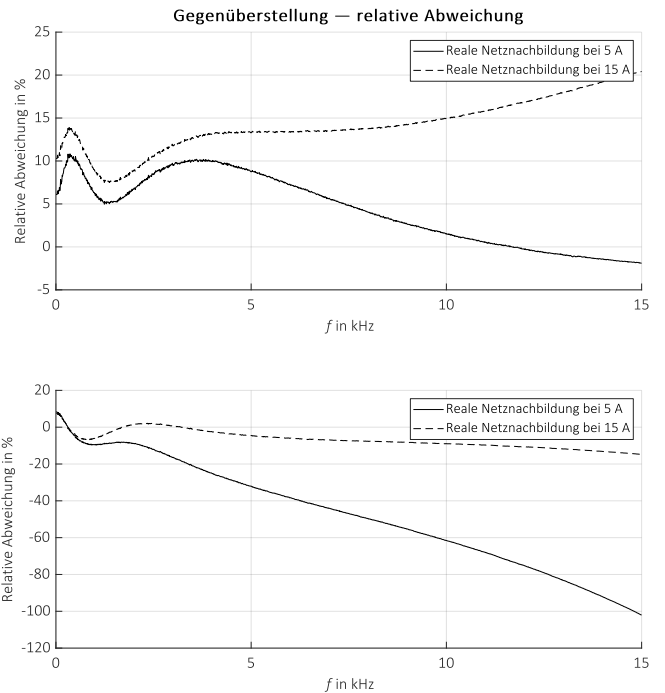


ABBILDUNG 8: RELATIVE ABWEICHUNG (BETRAG OBEN, PHASE UNTEN) DER IMPEDANZVERLÄUFE DER REALEN NIN ZUM VERLAUF AUS [3] BEI 5 A UND 15 A.

C. Parametervariation der Bauteiltoleranzen

Für die Simulation der NIN werden sechs Fälle unterschiedlicher Toleranzen definiert, die in TABELLE III angegeben sind.

TABELLE III: BETRACHTUNGSFÄLLE DER PARAMETERVARIATIONS-SIMULATION.

Fall	Toleranz		
	Widerstände	Induktivitäten	Kapazitäten
1)	±1 %	±2 %	±2 %
2)	±1 %	±5 %	±5 %
3)	±1 %	±5 %	±10 %
4)	±1 %	±7,5 %	±7,5 %
5)	±1 %	±10 %	±5 %
6)	±1 %	±10 %	±10 %

Das in ABBILDUNG 2 gezeigte Impedanznetzwerk aus passiven Bauteilen wird in MATLAB/Simulink erstellt. Durch die Kombinations-Toolbox ist es möglich verschiedene Bauteiltoleranzen anzugeben und die Kombination aus allen Toleranzen zu simulieren. Für jede Kombination wird der Impedanzverlauf bestimmt. Eine anschließende Auswertung an jedem Punkt der Simulation auf einen Minimal- bzw. Maximalwert ergibt so den jeweiligen Worst-Case-Verlauf.

D. Ergebnisse der Simulation und Vergleich zur Vermessung

ABBILDUNG 9 zeigt die Verläufe der Amplituden- und Phasengänge der Kombinationen.

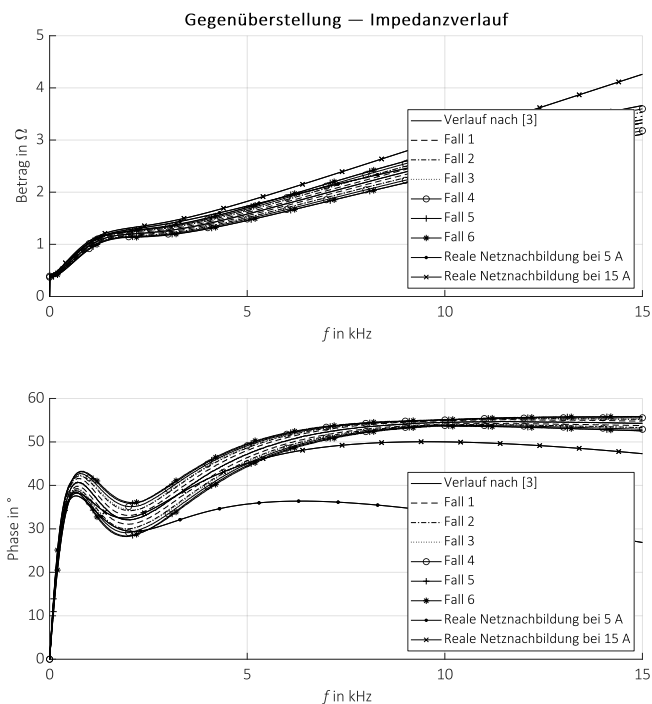


ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER BAUTEILVARIATION MIT DEM VERLAUF AUS [3] UND DER REALEN NIN.

Den Verläufen ist zu entnehmen, dass die angegebene Genauigkeit aus der Norm nicht durch die reale NIN eingehalten wird. Die Bauteiltoleranzen bzw. die Bauteilwerte werden ungenügend erreicht. Diese Schlussfolgerung ist bereits aus der relativen Abweichung aus ABBILDUNG 8 ableitbar.

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zur standardisierten Vermessung von Störaussendungen elektrischer Verbraucher werden Netzimpedanznachbildungen genutzt, denn dies ermöglicht die Bewertung unterschiedlicher Verbraucher.

In den Normen DIN EN 61000-4-7 und DIN IEC/TS 62578 sind Amplituden- und Phasengang für eine Netzimpedanznachbildung angegeben. Ebenfalls ist ein aus Widerständen, Kondensatoren und Spulen bestehendes Impedanznetzwerk vorgegeben, das den empfohlenen Amplituden- und Phasengang nachbildet.

Entsprechend der Normvorgaben wurde eine reale Netzimpedanznachbildung für einen Nennstrom von 32 A aufgebaut. Jedoch hat die Vermessung der realen Impedanznachbildung gezeigt, dass der empfohlene Impedanzverlauf nur unzureichend nachgebildet wird. Die Simulation des Einflusses der Bauteiltoleranzen hat gezeigt, dass die vorgegebenen Bauteiltoleranzen für den Aufbau noch enger gefasst werden müssen. Für weitere Untersuchungen und zum normgerechten Vermessen von Störaussendungen verschiedener nichtlinearer Verbraucher bzw. Erzeuger, wird die vorgestellte reale Netzimpedanznachbildung optimiert.

Zusätzlich soll die vorgestellte dreiphasige Variante für den Strombereich von 32 A auf einen Nennstrom von 250 A erweitert werden. Damit wird es in Zukunft möglich sein, Störaussendungen von DC-Schnellladesäulen mit Leistungen im Bereich mehrerer 100 kW zu vermessen. Damit können Netzrückwirkungen dieser Schnellladesysteme besser beschrieben und vorhergesagt werden.

LITERATUR

- [1] H. Sharma, M. Rylander und D. Dorr, "Grid Impacts Due to Increased Penetration of Newer Harmonic Sources," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Jg. 52, Nr. 1, S. 99–104, 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2464175.
- [2] V. Sharma und V. K. Chandrakar, "Power Quality Enhancement of Grid Connected Non Linear Industrial Load Using Distributed Static Synchronous Compensator," in *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, 2022, S. 271–277, doi: 10.1109/ICEARS53579.2022.9752050.
- [3] *DIN IEC/TS 62578 VDE V 0558-578:2018-09, Leistungselektronische Systeme und Einrichtungen: Betriebsbedingungen und Eigenschaften aktiver Netzstromrichter (AIC) inklusive Auslegungsempfehlungen für ihre Störaussendungswerte unter 150 kHz*, VDE, 2018.
- [4] F. Ziade et al., "Improvement of LISN Measurement Accuracy Based on Calculable Adapters," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Jg. 65, Nr. 2, S. 365–377, 2016, doi: 10.1109/TIM.2015.2479107.
- [5] *DIN EN 61000-4-7 VDE 0847-4-7:2009-12, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)*, VDE, 2009.
- [6] *CISPR 16-1-1:2019, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus*, VDE, 2019.
- [7] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg und C. L. Bak, "A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Jg. 4, Nr. 1, S. 54–69, 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2507203.
- [8] *DIN EN 60063:2015-11, Vorzugsreihen für die Nennwerte von Widerständen und Kondensatoren (IEC 60063:2015); Deutsche Fassung EN 60063:2015*, VDE, 2015.