

# Erstellung einer IEC 62578 konformen Netznachbildung und Erfahrung in der Auslegung und Anwendung

B.Sc. Artur Mambetow, Labor für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo

Prof. Dr.-Ing. Holger Borchering, Labor für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo

## 1 Einleitung

Netzstromrichter, die im Pulsbetrieb arbeiten, werden zwischen dem Drehstromnetz und einem Gleichspannungs- oder Gleichstromkreis eingesetzt. Sie kommen in einer Vielzahl von Anwendungen vor, u.a. in Frequenzumrichtern der elektrischen Antriebstechnik, bei unterbrechungsfreien Stromversorgungen, aktiven Netzfiltern, Solarwechselrichtern und Windenergieanlagen. In der IEC62578 [2] werden diese Schaltungsarten als Active-Infeed-Converter (AIC) klassifiziert. Neben den verschiedenen Typen von AIC werden dort auch die physikalischen Ursachen der Netzurückwirkung beschrieben [4]. Durch den Pulsbetrieb treten im Bereich der Pulsfrequenz und höher deutliche Netzurückwirkungen auf. Während für Niederspannungsgeräte oberhalb von 9 kHz die Messverfahren der leitungsgeführten Störaussendung normativ festgelegt sind, besteht zwischen 2 und 9 kHz eine Lücke, insbesondere für dreiphasige Geräte und Geräte oberhalb 16 A Bemessungsstrom [3]. Hierin beruht die Motivation zur Entwicklung einer Netznachbildung für den Frequenzbereich von 2 bis 9 kHz, die in diesem Beitrag beschrieben wird.

Die handelsüblichen Netznachbildungen nach CISPR 16 für den Frequenzbereich oberhalb 9 kHz sind für AIC nicht geeignet, um die Netzurückwirkung unterhalb von 9 kHz zu bewerten. Ihr Impedanz-Frequenzgang zeigt eine Resonanz um 3 kHz, die im Betrieb von AIC sowohl die Regelgüte beeinflusst als auch zu praxisuntauglicher Auslegung von Netzfiltern führt. Neuere Untersuchungen [1,3] belegen, dass der Netzimpedanz-Frequenzgang zwischen 2 bis 9 kHz viel geringere Werte aufzeigt als bisher angenommen, insbesondere für dreiphasige AIC und für Kabel- und Industrienetze.

Die in der IEC 61000-4-7 angegebene Netznachbildung für Geräte mit einem Bemessungsstrom kleiner 16 A ist für einphasige Geräte konzipiert. Sie wurde aus einphasigen Messungen in ländlichen, wenig besiedelten Wohngebieten abgeleitet, die über Freileitungen versorgt werden. Dortige Netze besitzen die Eigenschaften, dass sie zum Teil lange Freileitungen zum nächsten Mittelspannungstransformator besitzen. Somit wird die Impedanz durch den hohen Kupferanteil und die höhere Induktivität der Freileitungen geprägt. IEC 61000-4-7 benutzt eine Netzimpedanz, die einen 90% Fall darstellt: 90% der im Vorfeld gemessenen Netze hatten eine geringere Netzimpedanz als die normative Netznachbildung, 10% eine höhere. Weiterhin wurden sämtliche Messungen zwischen Phase und Neutralleiter durchgeführt. Mangels passender Messgeräte wurden keine dreiphasigen Netzimpedanzen ermittelt. Für dreiphasige Geräte ohne Neutralleiter ist nur die Impedanz der einzelnen Phase relevant. Ein Maß dafür sind die Impedanzen im Mitsystem, welche nach [3] um 50% kleiner ausfallen als die Impedanzen zwischen Phase und Neutralleiter.

AIC werden in Industriebetrieben sowie größeren Wohngebieten mit Gewerbebereichen eingesetzt. Hier herrschen Kabelnetze vor, deren Netzimpedanz deutlich geringer ist und für die Abbildung 1 eine statistische Verteilung der Netzimpedanz zeigt.

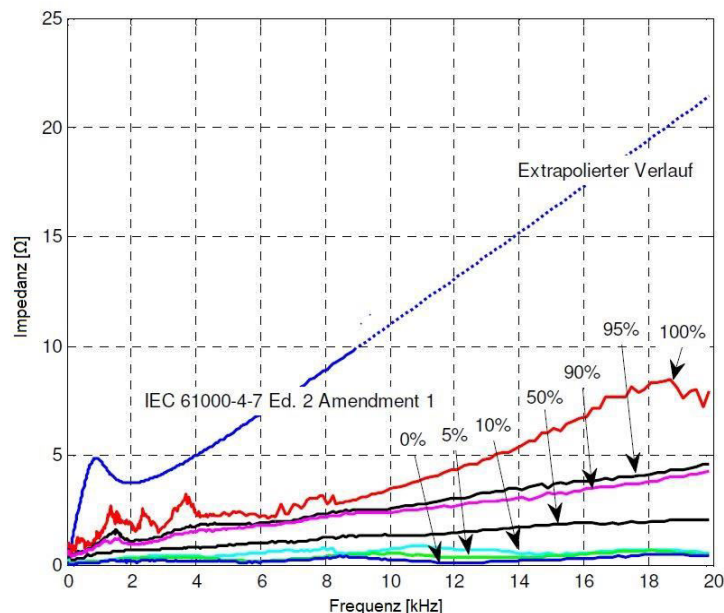
In der IEC62578 ed. 2, die in 2014 erscheinen soll, wird die konkrete Schaltung für eine Netznachbildung für ein- und dreiphasige Active-Infeed-Converter (AIC) angegeben, die zur Bewertung der leitungsgeführten Störaussendung zwischen 2 und 9 kHz herangezogen werden soll. Sie beruht auf den Ergebnissen von [3], die in Abschnitt 2.1 vorgestellt werden.

In diesem Beitrag wird die Konstruktion einer IEC62578 ed. 2 konformen Netznachbildung [5] mit einem Bemessungsstrom von 32A beschrieben, die in der Bachelorarbeit des Hauptautors entwickelt und aufgebaut wurde. Abschnitt 2.2 beschreibt den Einfluss von Bauteiltoleranzen, Abschnitt 2.3 den Einfluss des Versorgungsnetzes. In Abschnitt 3 werden der mechanische Aufbau und Messergebnisse gezeigt.

## 2 Theoretische Ausarbeitung der Netznachbildung

### 2.1 Untersuchung der Netzimpedanz von Kabelnetzen

Für das Forschungsprojekt NENEP [3] wurden an 25 verschiedenen Standorten in Nord-, Mittel- und Süddeutschland sowie Nordfrankreich innerhalb von drei Jahren Langzeitmessungen durchgeführt. Als Messgerät wurde ein EWS 120 der Firma Haag eingesetzt, das die komplexen Netzimpedanzen von Niederspannungsnetzen von 0 bis 20 kHz ermitteln kann. Daher werden im Folgenden auch alle Frequenzgänge bis 20 kHz dargestellt, obwohl normativ nur der Bereich von 2 bis 9 kHz betrachtet werden muss. Es werden zeitgleich die Netzimpedanzen zwischen allen Außenleitern und N, Leiter-Leiter sowie die Impedanzen des Mit-, Gegen- und Nullsystems ermittelt.



**Abbildung 1: Statistische Verteilung der Netzimpedanz (Mitsystem) in Niederspannungsnetzen im Vergleich zum Frequenzgang der Netzimpedanz IEC 61000-4-7 ed. 2**

Angeschlossen wurde an einem zugänglichen Netzanschlusspunkt. Gemessen wurde jeweils über mindestens 24 Stunden, damit der Einfluss von zu- und abgeschalteten Verbrauchern sichtbar wurde. Es wurde gemischt sowohl in Industriebetrieben und öffentlichen Einrichtungen, als auch in privaten Haushalten gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 zu sehen. Die 100%- Kurve stellt für jede Frequenzstützstelle den Maximalwert aller Einzelmessungen dar, während die 0%-Kurve den Minimalwert angibt. Zur Erstellung des Impedanz-Frequenzgangs in der IEC62578 ed. 2 wurde die 90%-Kurve gewählt, ein gängiger Kompromiss, der Extremwerte ausschließt und dennoch die meisten aufgetretenen Impedanzwerte abdeckt. Aus demselben Grund wurde auch in der IEC 61000-4-7 dieses Kriterium bei der Wahl des Impedanz-Frequenzgangs verwendet. Quantitative Vergleiche zwischen beiden Impedanz-Frequenzgängen sind somit ebenfalls möglich.

## 2.2 Ableitung der Netznachbildung und Einfluss von Bauteiltoleranzen

Nachdem der charakteristische Netzimpedanz-Frequenzgang definiert wurde, erfolgt im nächsten Schritt die Modellierung dessen mit einer geeigneten Topologie und den erforderlichen elektrischen Bauteilen. In Abbildung 2 wird die vorgeschlagene Topologie gezeigt, die Parameter der einzelnen Bauteile sind in Tabelle 1 zu finden. Alle Daten sind aus [3] entnommen. Die Impedanz  $Z_1$  wurde empirisch ermittelt. Für  $Z_3$  werden die Werte aus der IEC61000-4-7 übernommen. Die Parameter für  $Z_2$  folgen aus der Bedingung, dass der quadratische Fehler aus Mess- und Simulationswerten minimal werden soll. Die daraus resultierende Gleichung wird mittels Gradientenverfahren so angepasst, dass die Gesamtimpedanz aus Sicht des EUT(Equipment Under Test) der 90%- Kurve der Mitimpedanz entspricht. Sie imitiert den eigentlichen Netzimpedanz-Frequenzgang, während  $Z_1$  und  $Z_3$  die Entkopplung vom Netz gewährleisten sollen.

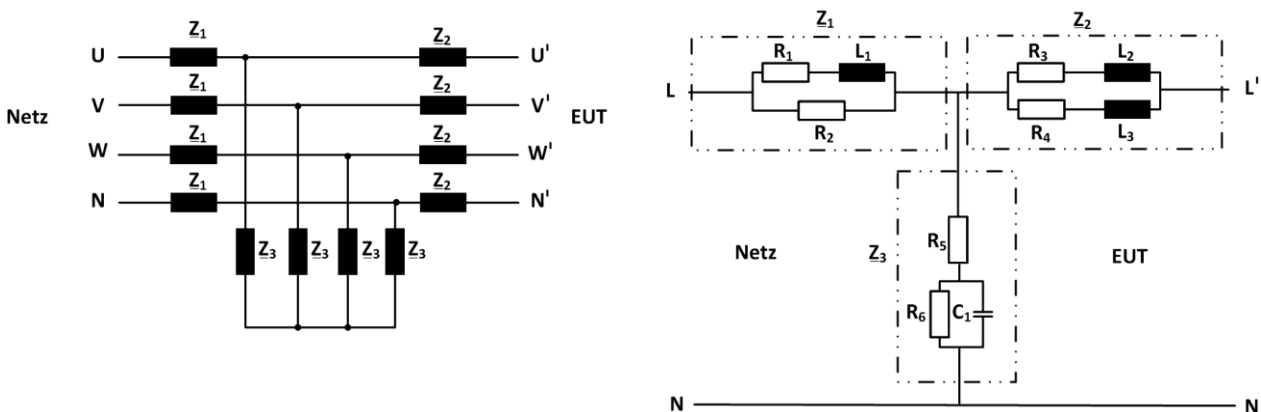


Abbildung 2: Verwendete Topologie für die Netznachbildung der IEC62578 ed.2

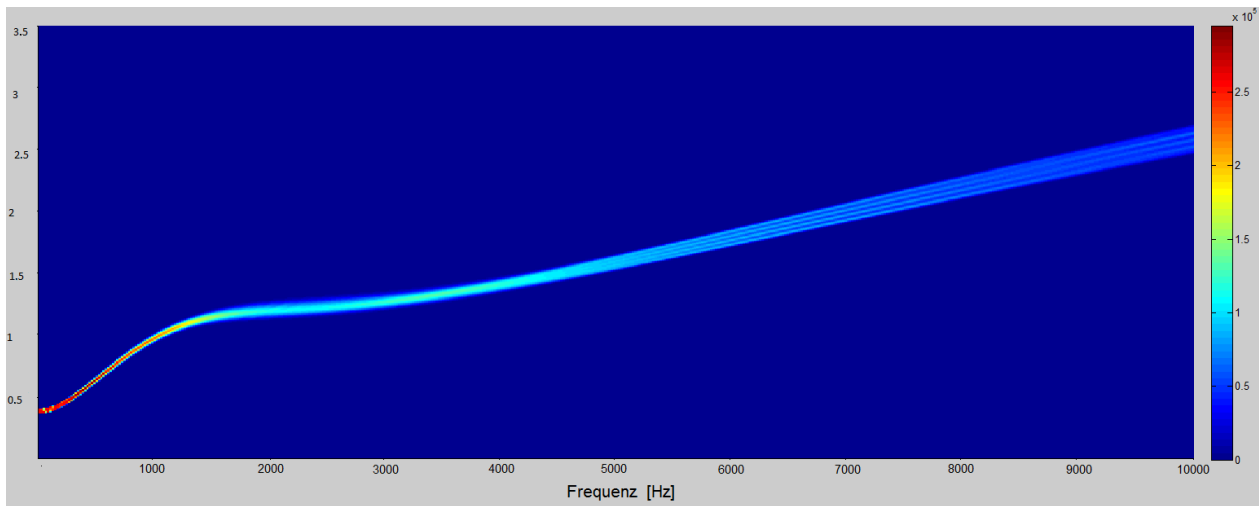
Tabelle 1: Parameter der Netznachbildung der IEC62578 ed. 2

$R_1 /$ [ $\Omega$ ]	$R_2 /$ [ $\Omega$ ]	$R_3 /$ [ $\Omega$ ]	$R_4 /$ [ $\Omega$ ]	$R_5 /$ [ $\Omega$ ]	$R_6 /$ [k $\Omega$ ]	$L_1 /$ [ $\mu$ H]	$L_2 /$ [ $\mu$ H]	$L_3 /$ [ $\mu$ H]	$C_1 /$ [ $\mu$ F]
0,02	0,8	0,38	7,03	1	10	100	44,2	22,1	50

Im weiteren Verlauf wurden die Auswirkungen auf den Frequenzgang untersucht, welche bei Parameterveränderungen innerhalb der zulässigen Bauteiltoleranzen entstehen können. Besonders bewertet werden sollten Resonanzerscheinungen, parasitäre Einflüsse durch den mechanische Aufbau sowie die Verdrahtung.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Analyse wurden Parametervarianzen durch Simulation ermittelt. Die Parameter wurden so verändert, dass sie zufällig, aber innerhalb ihrer typischen Bauteiltoleranzgrenzen lagen. Es wurde eine Gleichverteilung der Streuung angenommen. Pro Simulationsdurchgang wurde immer nur ein Wert verändert und der resultierende Kurvenverlauf aufgezeichnet. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurden pro Simulation vier zufällige Werte für jeden Parameter angenommen, so dass nicht alle möglichen Kombinationen berechnet wurden, sich aber eine aussagefähige statistische Verteilung ergab.

Die Toleranzen wurden wie folgt angenommen: C  $\pm 20\%$ , L  $\pm 4\%$  und R  $\pm 2\%$ . Die Ergebnisse sind in Form eines Intensitätsdiagramms in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3: Intensitätsdiagramm des Impedanz-Frequenzgangs mit Variation der Bauteilparameter**

Aus dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass bis ca. 2 kHz kaum Unterschiede im Verlauf festzustellen sind. Erst mit zunehmender Frequenz werden die Abweichungen immer deutlicher. Die Toleranzen unterscheiden sich insgesamt nicht mehr als  $\pm 10\%$  von den Mittelwerten. Auch die im Vorfeld nicht ausschließbaren Resonanzen sind nicht eingetreten. Zur Ermittlung der maximalen Abweichungsgrenze wurde ein zusätzliches Worst-Case-Szenario betrachtet. Die daraus resultierenden Ergebnisse liegen ebenfalls im Toleranzbereich von  $\pm 10\%$ . Dieser anzunehmende Fehler kann als ausreichend gering angesetzt werden, wenn für eine normative Messung der Störaussendung maximal 3 dB Gesamtfehler incl. aller Messgeräte-Fehler angenommen werden.

### 2.3 Einfluss von Netzimpedanzen

Um reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, muss die Impedanz des örtlichen Versorgungsnetzes durch die Netznachbildung soweit gefiltert werden, dass bei typischen Netzverhältnissen eine noch zulässige Toleranz, gesehen vom EUT, erreicht wird. Aus [3] ist bekannt, dass die Impedanzen im Netz sowohl orts- als auch zeitabhängig sind. Die Netzimpedanz der IEC62578 ed.2 setzt voraus, dass das Versorgungsnetz vernachlässigbar ist. Dieses ist z.B. bei aktiven Spannungsversorgungen, wie sie einige EMV-Prüfzentren verwenden, gegeben. An Versorgungsnetzen, die der Verteilung aus Abbildung 1 entsprechen, ergeben sich für die resultierende Netzimpedanz am EUT höhere Werte. Ziel der Parameteranpassung war, mit geringen Änderungen der Bauteilwerte einen Impedanz-Frequenzgang zwischen 2 und 9 kHz zu erreichen, dessen Toleranz

sich weniger als 10% vom charakteristischen Verlauf unterscheidet, wenn die Netzimpedanz an einem typischen Versorgungsnetz angeschlossen ist, wie es in Prüflaboren und Industriebetrieben anzutreffen ist. Ausgehend von den Ergebnissen aus [3] wurden zwei Versorgungsnetzimpedanzen mit ohmsch-induktiven Innenwiderstand  $\underline{Z}_n$  hierfür angenommen: a)  $0,3 \Omega$ ,  $80\mu\text{H}$ ; b)  $0,2 \Omega$ ,  $100\mu\text{H}$ .

Die ersten Simulationsergebnisse zeigten Abweichungen mit mehr als 10 % vom Mittelwert aus Abbildung 1, wodurch die geforderte Bedingung nicht erfüllt wird. Somit wäre die Reproduzierbarkeit nicht gewährleistet. Zur Verbesserung wurden zum einen eine zusätzliche Entkopplung betrachtet, zum anderen wurden Änderungen der Bauteilwerte aus Tabelle 1 untersucht.

### 2.3.1 Entkopplung des Netzes durch einen Saugkreis

Eine in der Praxis gängige Methode zur Entkopplung vom Versorgungsnetz ist ein Saugkreis, bestehend aus einer Reihenschaltung aus Kondensator und Drossel, der versorgungsnetzseitig der Netznachbildung parallel geschaltet wird, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Die Entkopplung vom Netz erfolgt im Bereich der Resonanzfrequenz des Saugkreises, die zwischen 2 und 9 kHz liegen sollte. Weiterhin ist eine ausreichende Bandbreite notwendig. Einige exemplarische Auslegungen zeigten, dass die notwendige Kapazität  $C_{SK}$  um Faktoren höher sein muss als  $C_1$  aus Tabelle 1. Damit stiegen der Bauteilaufwand und das Volumen der Netznachbildung insgesamt, weshalb ein Saugkreis ungeeignet erschien.

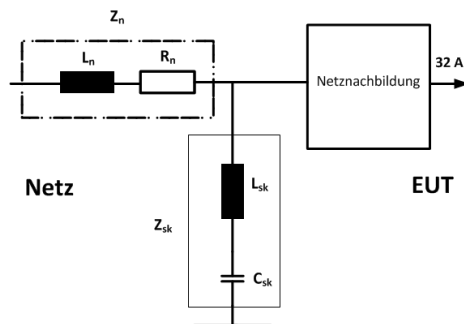


Abbildung 4: Saugkreis zur Entkopplung vom örtlichen Versorgungsnetz

### 2.3.2 Anpassung der Parameter für ausreichende Entkopplung

Für die Analyse wurde zuerst der Einfluss von  $\underline{Z}_1$ ,  $\underline{Z}_2$  und  $\underline{Z}_3$  separat betrachtet. Deren Impedanz-Frequenzgänge sind in Abbildung 5 zu sehen.

Aus Sicht des EUT verhalten sich  $\underline{Z}_1$  und  $\underline{Z}_3$  als Parallelschaltung, deren Gesamtimpedanz kleiner ist als die kleinste Einzelimpedanz. In der verwendeten Topologie sollte  $\underline{Z}_3$  die niedrigste Einzelimpedanz darstellen, um eine Entkopplung vom Netz zu gewährleisten. Bei den verwendeten Parametern aus [3] ist dies nicht der Fall, wie aus der Grafik in Abbildung 5 zu entnehmen ist. Die Berücksichtigung der Netzimpedanz  $\underline{Z}_n$  ergibt den Impedanz-Frequenzgang der Netznachbildung. Das heißt, eine Entkopplung vom Netz tritt erst ein, wenn die Summe aus  $\underline{Z}_1$  und  $\underline{Z}_n$  größer ist als  $\underline{Z}_3$ . Dies führte zu der Entscheidung,  $\underline{Z}_3$  zu verringern, während alle anderen Parameter unverändert blieben. Bei zunehmender Frequenz bestimmt nun maßgeblich  $R_5$  den betragsmäßigen Impedanz-Frequenzgang von  $\underline{Z}_3$ . Durch Verringerung von  $R_5$  wird die Entkopplung insgesamt verbessert, die Erhöhung von  $C_1$  sorgt für die Verschiebung des entkoppelten Be-

reichs zu niedrigeren Frequenzen. Somit kann durch geeignete Dimensionierung dieser beiden Bauteile die Entkopplung im Bereich von 2 - 9 kHz unter Berücksichtigung der geforderten Toleranzgrenzen von  $\pm 10\%$  stattfinden. Für  $R_5$  wurde  $0,6\ \Omega$  und für  $C_1$   $150\ \mu\text{F}$  gewählt.

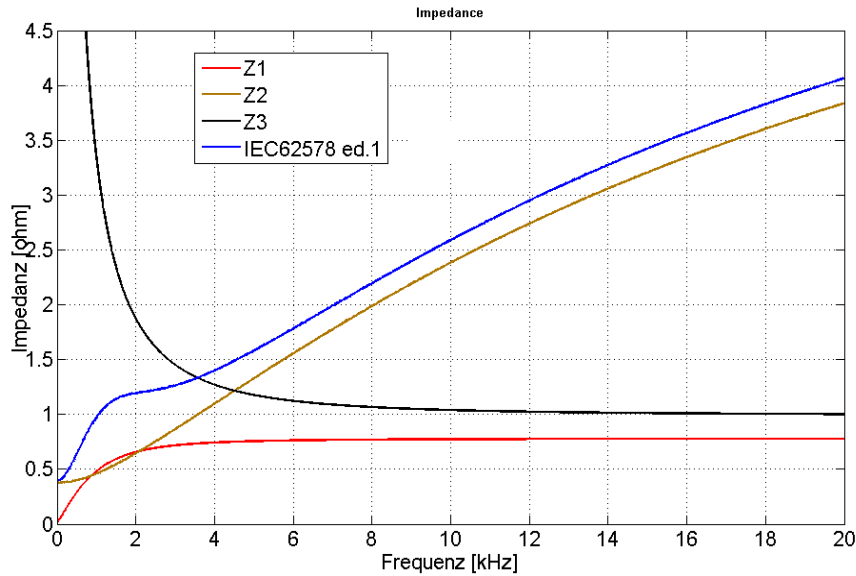


Abbildung 5: Darstellung der Impedanz-Frequenzgänge von Z1, Z2 und Z3

Nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Impedanz-Frequenzgänge mit ursprünglichen (Referenz) und geänderten Parametern (optimiert). Ziel ist der obere Verlauf von c), der die Impedanz aus IEC62578 ed.2 darstellt. Die Verläufe zeigen den Einfluss der exemplarisch angenommenen, typischen Netzimpedanzen. Deutlich zu erkennen ist die verbesserte Übereinstimmung im Frequenzbereich ab 2 kHz. Bei typischen Versorgungsnetzen liegen die Abweichungen vom Ziel unter 3 %.

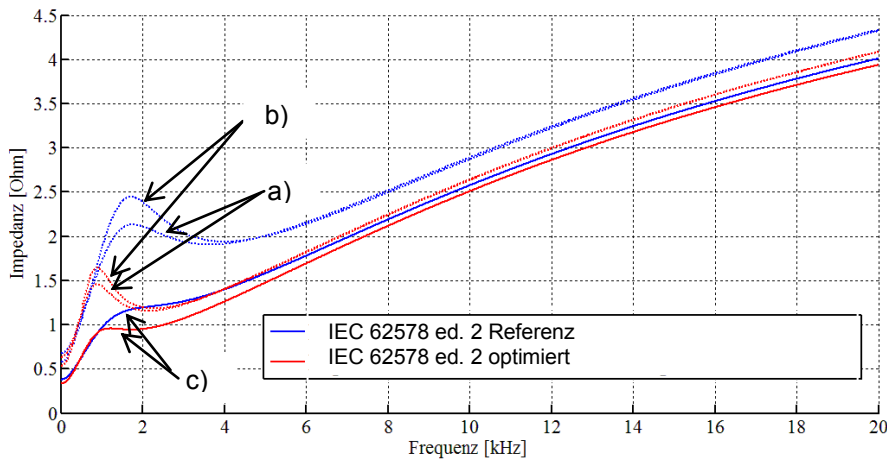


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Impedanz-Frequenzgänge unter Berücksichtigung der Versorgungs-Netzimpedanzen a)  $0,3\ \Omega$ ,  $80\ \mu\text{H}$  (---); b)  $0,2\ \Omega$ ,  $100\ \mu\text{H}$  (---), c)  $0\ \Omega$ ,  $0\ \mu\text{H}$ ,

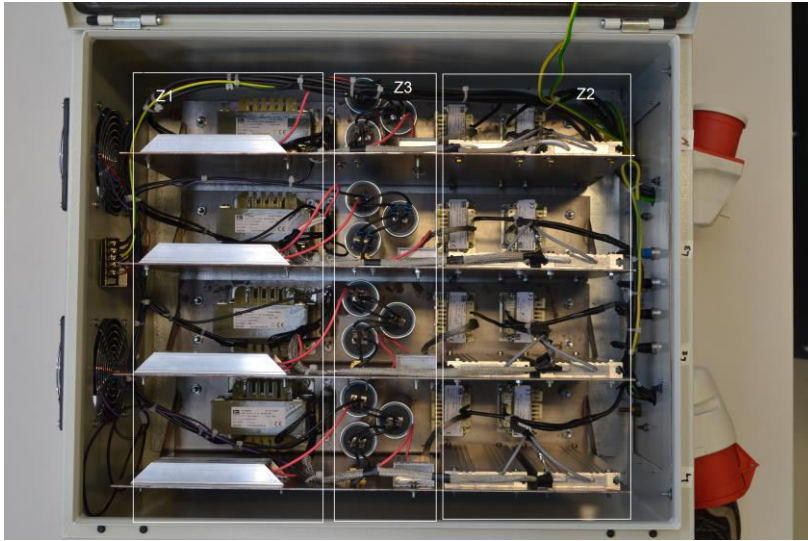
In Tabelle 2 werden die Parameter für die verwendeten Bauteile aufgeführt.  $R_1$  kann unter Berücksichtigung der vorhandenen Leitungsresistenzen entfallen.

Tabelle 2: Parameter für die Netznachbildung mit geänderten Werten

$R_1' /$ [ $\Omega$ ]	$R_2 /$ [ $\Omega$ ]	$R_3 /$ [ $\Omega$ ]	$R_4 /$ [ $\Omega$ ]	$R_5' /$ [ $\Omega$ ]	$R_6 /$ [k $\Omega$ ]	$L_1 /$ [ $\mu\text{H}$ ]	$L_2 /$ [ $\mu\text{H}$ ]	$L_3 /$ [ $\mu\text{H}$ ]	$C_1' /$ [ $\mu\text{F}$ ]
0	0,76	0,35	7,0	0,6	10	100	44	22	150

### 3 Mechanische Ausführung der Netznachbildung

Um die Baubarkeit der IEC62578 konformen Netznachbildung zu untersuchen, wurde ein mechanischer Aufbau erstellt.



**Abbildung 7: Mechanischer Aufbau der Netznachbildung**

Die Technischen Daten sind:

$$U_N = 3 \times 400 \text{ V}$$

$$I_N = 32 \text{ A}$$

$$\text{BxHxT} : 600 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$$

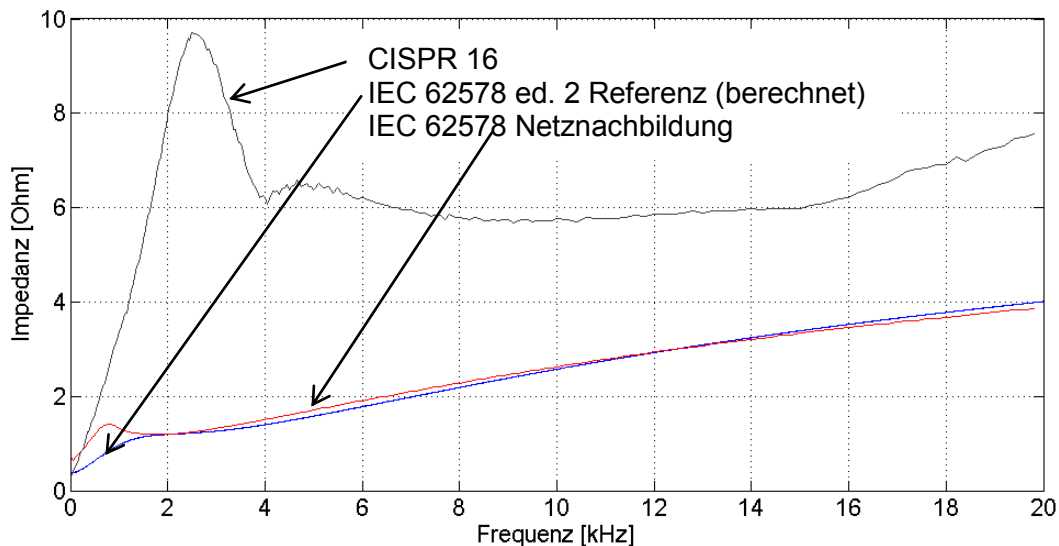
$$\text{Gewicht: ca. } 45 \text{ kg}$$

$$\text{Verlustleistung: } 1,2 \text{ KW}$$

Abbildung 7 zeigt den mechanischen Aufbau der Netznachbildung bei geöffnetem Gehäusedeckel. Jedem Leiter (L1-L3, N) ist eine identisch aufgebaute Baugruppe zugeordnet, oben befindet sich die Baugruppe für den N-Leiter, darunter L3, L2 und L1. Der Anschluss des EUT's und des Versorgungsnetzes erfolgt über CE-Steckverbinder. Für die Störspannungsmessung sind seitlich Anschlussbuchsen angebracht. Beim mechanischen Aufbau wurden Kopplungen der Leitungen untereinander durch Schirmung weitgehend unterbunden.

Nach dem Aufbau folgte die Überprüfung des Impedanz-Frequenzgangs mit dem EWS120 am Versorgungsnetz des Labors Leistungselektronik anhand des Mitsystems. In Abbildung 8 ist der gemessene Gesamt-Impedanz-Frequenzgang dem berechneten Verlauf gegenübergestellt. Die verbesserte Entkopplung vom lokalen Netz ist deutlich zu erkennen. Die Abweichungen sind abhängig von der tatsächlichen lokalen Netzimpedanz und liegen innerhalb von  $\pm 5\%$ . Zum Vergleich ist der gemessene Impedanz-Frequenzgang einer Netznachbildung nach CISPR 16 des Herstellers Rohde & Schwarz abgebildet.





**Abbildung 8: Gemessene Impedanz-Frequenzgänge des Mitsystems bei Netznachbildungen CISPR 16 und IEC62578 an einem Versorgungsnetz im Vergleich zur**

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Konstruktion einer IEC62578 ed. 2 konformen Netznachbildung für die Messung der leitungsgeführten Störaussendung von Active Infeed Convertern zwischen 2 und 9 kHz beschrieben. Die Auswirkungen durch Streuung von Bauteilwerten konnte durch Simulationen als unkritisch beurteilt werden. Durch gezielte Anpassung von Parametern konnte die Entkopplung von der lokalen Netzimpedanz verbessert und der zu betrachtende Frequenzbereich an die geforderten Grenzen angepasst werden. Nach der Montage der Netznachbildung belegten Messungen am realen Netz die Funktion. Um Erfahrung mit der Netznachbildung zu gewinnen, sollen im Lauf des Jahres 2014 in Kooperation mit Industriefirmen verschiedene AIC vermessen werden, um weitere Erfahrung zu gewinnen.

#### Literatur

- [1] Balzer, E., Borchering, H., Garbe, H.: Messung der Netzimpedanz im Frequenzbereich bis 20 kHz und Analyse der Oberschwingungen, Kongressband, EMV 2010, Seiten 511–518, Stuttgart, September 2010.
- [2] IEC62578: Service Conditions and Characteristics of Active Infeed Converter, Norm, 2012.
- [3] Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Netzurückwirkungen von Netzpulsstromrichtern im Einzel- und Parallelbetrieb in industriellen und öffentlichen Netzen“, Kurztitel NENEP, BMBF Förderlinie Ingenieurwachstum, 2011
- [4] Borchering, H.: Über den Inhalt der IEC 62578 DTS: Technical Specification: Operations and Characteristics of active infeed converter applications, internationaler ETG Kongress, Düsseldorf, 2009
- [5] IEC62578 ed 2. (Draft): Service Conditions and Characteristics of Active Infeed Converter Applications including recommendations for Emission limits below 150 kHz, Normentwurf, 2013.