

Messung leitungsgebundener Störgrößen von Komponenten für Hochvoltanwendungen

Dipl.-Ing. Martin Reuter, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,
Dr.-Ing. Wolfgang Köhler

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47
70569 Stuttgart
martin.reuter@ieh.uni-stuttgart.de

Abstract: Um die Abstrahlung von Funkstörgrößen durch Leistungselektronik im elektrischen Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen zu reduzieren, ist das gesamte Hochvolt (HV) Bordnetz geschirmt ausgeführt. Derzeit wird die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von Automobilkomponenten mit einem in der CISPR 25 genormten Prüfaufbau gemessen. Dieser Messaufbau simuliert die elektrische Situation einer Komponente im herkömmlichen Niedervolt (NV – 12 V) Kabelbaum mit Bordnetznachbildungen (BNN). Im Gegensatz zum NV-Bordnetz verhalten sich die geschirmten Koaxialkabel des HV-Kabelbaums ab etwa 10 MHz wie Wellenleiter, die bei Fehlanpassung scharfe Leitungsresonanzen ausbilden können.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, welchen Einfluss die Eingangsimpedanz von HV-Bordnetzen auf leitungsgebundene EMV-Störgrößen hat.

1 Einleitung

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei elektrischen Kfz-Antrieben stellt eine besondere Herausforderung dar: Schnelle Taktflanken in der Leistungselektronik werden für eine möglichst hohe Effizienz benötigt. Im sperrenden bzw. leitenden Zustand sind die Verluste in den Leistungshalbleitern gering, aber während der Zustandsänderung erreicht die Verlustleistung kurzzeitig bis zu 1 kW. Um die Verluste, und damit auch die Erwärmung gering zu halten, wird versucht, mit steilen Taktflanken den Schaltvorgang möglichst schnell ablaufen zu lassen. Durch steile Taktflanken entstehen allerdings hochfrequente Spektralanteile, die bis in den UKW-Bereich reichen können. In empfindliche Elektronik, wie etwa Antennenverstärker, können diese Störungen einkoppeln und die Funktionalität des gesamten Audiosystems beeinträchtigen.

Ein Lösungsansatz zur Verringerung der abgestrahlten Funkstörungen besteht in der vollständigen Schirmung des Hochvolt-Bordnetzes (HV-BN). Dieser Schirm verändert den heute üblichen Kabelbaum aus ungeschirmten Einzeladern zu einer geschirmten Koaxialanordnung, und damit auch die Eingangsimpedanz des Leistungsbordnetzes. Diese Änderung des Kabelbaums ist im Testaufbau zur Messung der EMV auf Komponentenebene nach CISPR 25 nicht berücksichtigt. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie die Eingangsimpedanz von HV-Leitungen EMV-Messergebnisse eines Pulswechselrichters für Hybridantriebe beeinflussen.

2 Messung leitungsgebundener Störgrößen auf Komponentenebene

Um die EMV eines komplexen Systems optimieren zu können, müssen Störfestigkeit und Emission für jede einzelne Komponente bekannt sein. Gerade die leitungsgebundenen Störgrößen können ein reibungsloses Zusammenspiel verschiedener Komponenten eines Systems beeinträchtigen. Die auf Leitungen eingekoppelten Störströme und -spannungen einer Komponente, wie z.B. einer Motorsteuerung, hängen stark von der Impedanz ab, mit der die Störquellen innerhalb der untersuchten Komponente belastet werden [1]. Damit sich die EMV-Störquellen während der Komponentenmessung möglichst ähnlich verhalten wie im Systemverbund, muss während der Komponentenmessung das Bordnetz so getreu wie möglich nachgebildet werden. Dazu werden Bordnetznachbildungen (BNN) eingesetzt, deren Eingangsimpedanz den Bedingungen im Fahrzeug angenähert ist. Für Komponenten im Traktionsnetz elektrisch angetriebener Kfz muss die BNN demnach an die Eingangsimpedanz des HV-BN angepasst sein.

2.1 Messaufbau nach CISPR 25 zur Messung leitungsgebundener Funkstörgrößen

Derzeit wird die EMV auf Komponentenebene mit dem in Abb. 1a gezeigten Messaufbau gemäß der Norm CISPR 25 gemessen [2]. Die Eingangsimpedanz der BNN, welche die Lastimpedanz des Niedervolt (NV – 12 V) Bordnetzes in einem konventionell betriebenen Fahrzeug nachbildet, ist in dieser Norm definiert. In Abb. 1b ist der Frequenzverlauf dieser Eingangsimpedanz Z_{BNN} über der Frequenz dargestellt. Diese beträgt bei 100 kHz etwa 3 Ω . Mit steigender Frequenz nähert sich die Impedanz ab 10 MHz 50 Ω an und bleibt bis 110 MHz konstant. Die BNN sind über einen Kabelbaum mit dem Prüfling (DUT - device under test) verbunden. Sie versorgen das DUT mit elektrischer Leistung und bilden einen Tiefpass zweiter Ordnung, sodass die Störungen des Prüflings nicht auf die Versorgungsleitungen einkoppeln können. Zudem besitzen die BNN einen Messanschluss (als MP in Abb. 1 gekennzeichnet), an dem eine Messeinrichtung die Störspannungen auf dem Kabelbaum aufzeichnen kann [2].

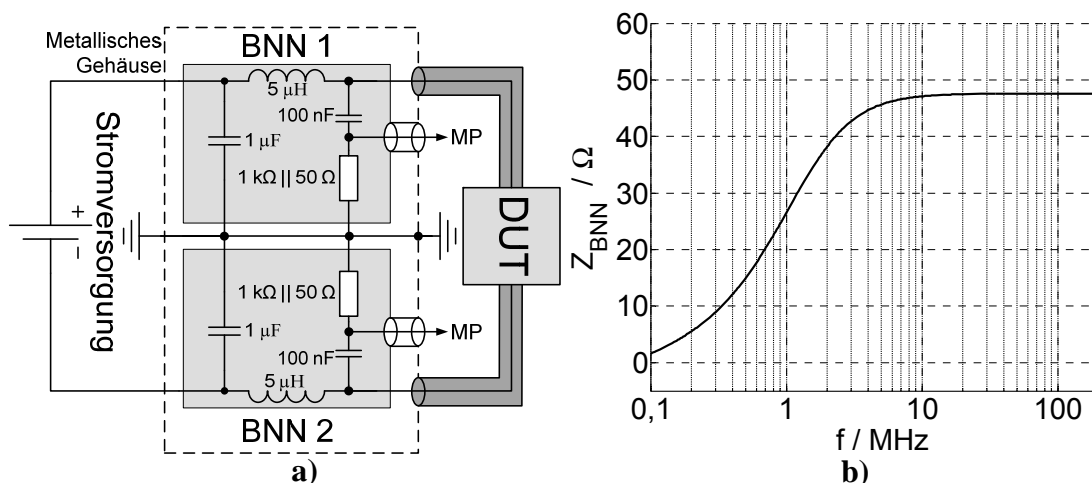


Abb. 1 Elektrisches Schaltbild des Aufbaus zur Messung der EMV auf Komponentenebene (a) und Eingangsimpedanz einer CISPR 25 konformen Bordnetznachbildung (b)

Für die Messung von geschirmten Komponenten lässt sich dieser Messaufbau leicht anpassen. Dazu werden die Schirme der Koaxialkabel auf eine gemeinsame Gehäusemasse mit den BNN gelegt, wie in Abb. 1a mit gestrichelter Linie angedeutet. Allerdings hat dieser Aufbau an der Übergangsstelle von Kabel zur BNN eine Eingangsimpedanz von 50Ω ($f > \sim 10 \text{ MHz}$), wie in Abb. 1b dargestellt.

2.2 Vergleich der Netztopologien und Eingangsimpedanzen von NV- und HV-Bordnetzen

Die vorgestellten BNN wurden aufgrund von Messungen an realen Fahrzeug-Kabelbäumen entwickelt, und bilden die Charakteristik in der Eingangsimpedanz von Niedervolt-Bordnetzen nach [3]. Damit dieselben BNN für Komponententests von HV-Systemen eingesetzt werden können, müssen die BNN eine zumindest ähnliche Eingangsimpedanz wie ein typisches Hochvoltbordnetz besitzen.

Die herkömmlichen NV-Bordnetze heutiger Kraftfahrzeuge verteilen sich über das gesamte Fahrzeug. Jede elektrische Komponente ist daran angebunden. Diese Kabelbäume sind stark verästelt und die Netztopologie quasi stochastisch. Die einzelnen Leiter sind ungeschirmt ausgeführt und sämtliche Adern in einem Gesamtkabelbaum gebündelt. Somit ist der Querschnitt durch solch einen Kabelbaum nicht konstant über seiner Ausdehnung und auch nicht der Abstand zu der nächstgelegenen geerdeten Struktur. Diese Kabel haben deswegen keinen konstanten Wellenwiderstand über ihrer Ausdehnung und eine Anpassung an den Leiterenden ist demnach nicht möglich.

Durch die ungeschirmte Ausführung der NV-Kabel ist die elektromagnetische Kopplung der Einzelleiter sehr stark, sodass Signale einer Ader leicht auf benachbarte Leitungen übersprechen können. Wenn bei einer Leitung des Kabelbaums Leiterresonanzen auftreten, koppelt das Signal auch auf dicht daneben liegende Leiter ein, und durch die übertragene Leistung ist diese Resonanz stark bedämpft.

Hochvoltbordnetze bestehen dagegen aus koaxial geschirmten Einzelleitern. Diese Kabel haben einen konstanten, geometrischen Aufbau und damit einen konstanten Wellenwiderstand, den es so im Niedervoltbordnetz nicht gibt [1,4]. Je nach Länge verhalten sie sich ab einigen Megahertz wie Wellenleiter. Bei Fehlanpassung treten scharfe Resonanzen und stehende Wellen auf, welche die Störwirkung bestehender elektromagnetischer Emissionen verstärken können. Diesen Unterschied in der Eingangsimpedanz zeigt der Vergleich von Abb. 2 und Abb. 3: Während in Abb. 2 die Eingangsimpedanz verschiedener Zweige eines realen Fahrzeugkabelbaums (12 V - NV) dargestellt sind, ist in Abb. 3 die Eingangsimpedanz eines typischen Hochvoltkabels bei verschiedenen Abschlussimpedanzen abgetragen.

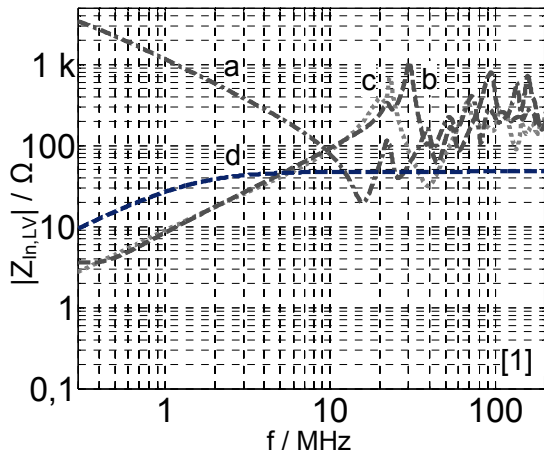


Abb. 2 Eingangsimpedanzen NV-BN
 a.) Leitung zu Wischermotor, LL
 b.) Leitung zu Wischermotor, KS
 c.) Leitung zum Stoßdämpfer, KS
 d.) Eingangsimpedanz NV-BNN

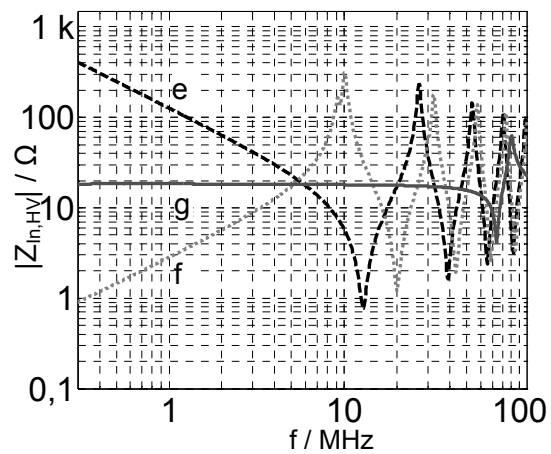


Abb. 3 Eingangsimpedanzen HV-BN
 e.) Hochvoltkabel mit offenem Ende
 f.) Kurz geschlossenes HV-Kabel
 g.) Wellenwiderstand HV-Kabel
 (LL = Leerlauf, KS = Kurzschluss am Leitungsende)

Die Messkurven a-c der Abb. 2 zeigen die Eingangsimpedanz verschiedener Zweige des NV-Kabelbaums eines Sportwagens [1]. Die Leitungen, die an ihrem Ende kurz geschlossen sind (b/c) zeigen im tiefen Frequenzbereich induktives Verhalten, während sich die Leitung mit offenem Ende (a) kapazitiv verhält. Ab etwa 10 MHz sind erste Resonanzen sichtbar. Im höheren Frequenzbereich folgen unregelmäßig multiple Resonanzstellen, die auch auf benachbarte Leitungen überkoppeln (z.B. von a auf c). Diese Resonanzstellen haben allerdings eine relativ niedrige Güte, sind also stark bedämpft durch das Übersprechen auf benachbarte Leitungen [1]. Die Kurven e und f der Abb. 3 hingegen zeigen regelmäßige Leitungsresonanzen bei Fehlanpassung mit sehr hohen Resonanzgüten. Der Wellenwiderstand dieser Leitung (Kurve g) ist konstant und hat einen Wert von $Z_L = 18,5 \Omega$ [4].

Typische HV-Kabel, die derzeit in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen eingesetzt werden, besitzen einen Wellenwiderstand von $6 - 20 \Omega$, abhängig von Querschnitt und eingesetztem Dielektrikum [4]. Demnach sind diese Kabel, mit denen der Prüfling (DUT) an das Messsystem angeschlossen ist, an der Stoßstelle zur BNN fehlangepasst und ein Teil der Funkstörungen wird dort reflektiert. Dies ergibt nicht nur verfälschte Pegel, sondern bei Resonanzfrequenzen des Hochvoltkabels ließen sich die Emissionen nicht einmal abschätzen: Bei diesen Frequenzen können sich stehende Wellen ausbilden, deren Amplituden nur noch durch den Ohm'schen Widerstand des Kabels begrenzt werden.

2.3 Anpassung der Bordnetznachbildung an den Wellenwiderstand von HV-Kabeln

Zur Vermeidung von Stoßstellen im Messaufbau müssen die verwendeten BNN an den Wellenwiderstand des HV-Kabels angepasst werden. Die BNN finden weiterhin Verwendung als Versorgungsfilter und Messanschluss. Ein Anpassfilter, bestehend aus einem RC-Glied zur Masse (siehe Abb. 5a), kann die Eingangsimpedanz einer herkömmlichen BNN an den Wellenwiderstand des Kabels anpassen, ohne den Verlauf der Eingangsimpedanz zu verändern [5]. Dies ermöglicht einen Messaufbau, in dem diese Fehlanpassung am Ende der HV-Leitung nicht auftritt. Somit sind die Messergebnisse nicht von der Länge der Traktionsleitungen abhängig.

3 Einfluss der Abschlussimpedanz von HV-Kabeln auf leitungsgebundene Störgrößen eines Pulswechselrichters

Um die Auswirkung dieser Stoßstelle auf die leitungsgebundenen Störgrößen zu untersuchen, wird der in Abb. 4 gezeigte Testaufbau vermessen. Dieser besteht aus einer Synchronmaschine, welche von einem Pulswechselrichter (PWR) angesteuert wird. Dieser PWR stellt dabei den Prüfling (DUT) dar, dessen leitungsgebundene Störgrößen auf dem Traktionsnetz ermittelt werden sollen. Die Maschine wird mit einem Drehmoment von $N = 25 \text{ Nm}$ bei einer Drehzahl von 1000 rpm mechanisch belastet.

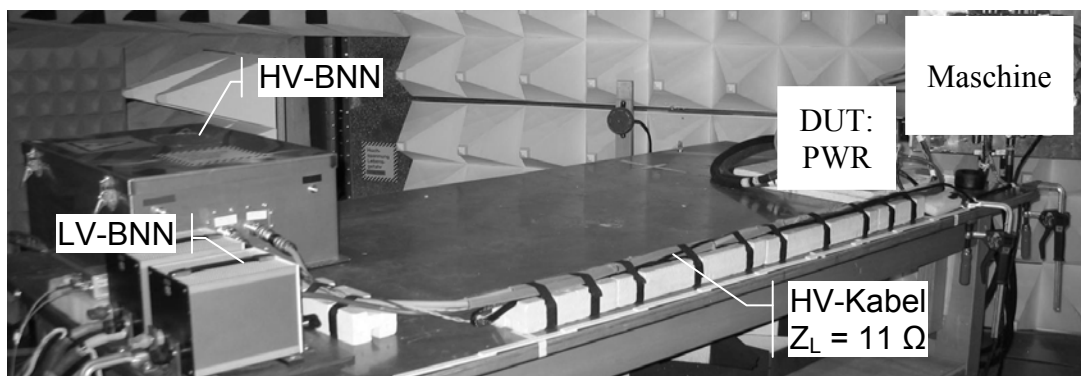


Abb. 4 Photo des Messaufbaus aus BNN, PWR und Maschine

Die Versorgung des PWR mit Gleichspannung ist über zwei BNN (in Abb. 4 als HV-BNN gekennzeichnet) gewährleistet, an die ein typischer HV-Kabelbaum der Länge $\ell = 3,7$ m angeschlossen ist.

In Abb. 5 ist die Eingangsimpedanz des Hochvoltbordnetzes für diesen Messaufbau bei unterschiedlichen Abschlussimpedanzen abgetragen. Diese ist am PWR mit einem Netzwerkanalysator in die beiden HV-Kabel hinein gemessen.

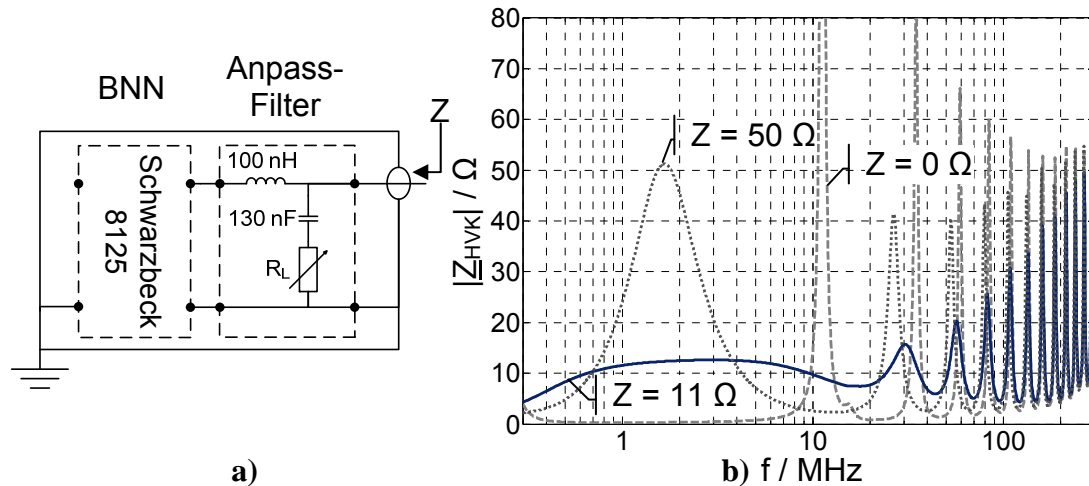


Abb. 5 Anpassfilter zur Variation der BNN-Eingangsimpedanz (a) und Eingangsimpedanz des Hochvoltkabelbaums bei unterschiedlichen Abschlussimpedanzen (b), Leitungsresonanzen bei Fehlanpassung sichtbar

Die Messkurven aus Abb. 5b zeigen die Eingangsimpedanz der HV-Kabel bei verschiedenen Abschlussimpedanzen: Die mit $Z = 50 \Omega$ gekennzeichnete Kurve stellt den normgerechten Aufbau mit BNN dar, deren Eingangsimpedanz den Verlauf aus Abb. 1b besitzt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Eingangsimpedanz des HV-Kabels bis etwa 2 MHz dem Impedanzverlauf der BNN folgt. Darüber sind regelmäßige scharfe Leitungsresonanzen zu erkennen, die aus der Fehlanpassung am Leitungsende herrühren. Auch bei einer Abschlussimpedanz von $Z = 0 \Omega$ können solche Resonanzen beobachtet werden. Diese Resonanzen sind deutlich gedämpft, wenn die Leitung am Ende mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen ist ($Z = 11 \Omega$). Ab etwa 90 MHz treten in ihrer Amplitude ansteigende Leitungsresonanzen auf. Oberhalb dieser Frequenz ist die eingesetzte Filterplatine nicht mehr in der Lage, die HV-Kabel mit dem Wellenwiderstand abzuschließen [5].

Demnach können die Leitungsresonanzen, die wegen der Fehlanpassung im Messaufbau auftreten, mit einer Anpassung der Eingangsimpedanz der BNN an den Wellenwiderstand des HV-Kabels über einen weiten Frequenzbereich stark reduziert werden.

Die Abbildungen Abb. 6 und Abb. 7 zeigen die dabei vom PWR auf das Traktionsnetz eingekoppelten Störspannungen, respektive Störströme. Die Spannung, die in Abb. 6 abgetragen ist, wurde mit einem Messempfänger an der HV-BNN gemessen (IFBW 120 kHz, Peak-Detektor).

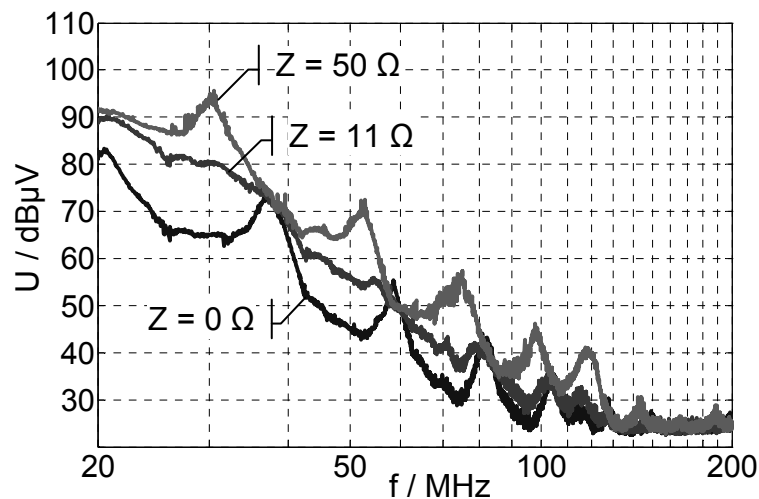


Abb. 6 Störspannung in Abhängigkeit der Abschlussimpedanz, gemessen an BNN

Die Messkurven der Störspannung aus Abb. 6 zeigen, dass die Leitungsresonanzen auch in den Messergebnissen sichtbar sind: Während die Kurve bei Anpassung ($Z = 11 \Omega$) kaum Resonanzen aufweist, führt Fehlanpassung ($Z = 0 \Omega$ & 50Ω) zu regelmäßigen Resonanzüberhöhungen von 15 – 20 dB in den Messergebnissen. Diese Resonanzen sind die Folge von stehenden Wellen auf dem HV-Kabel durch die Fehlanpassung am Leitungsende, welche der Prüfling anregt. Sie sind nicht Teil der Emissionen des PWR, sondern Folge der Fehlanpassung im Messaufbau. Die Messergebnisse einer Strommessung sind in Abb. 7 dargestellt. Dabei wurde der vom DUT auf das HV-Kabel eingekoppelte Störstrom mit einer Stromzange an der BNN aufgezeichnet.

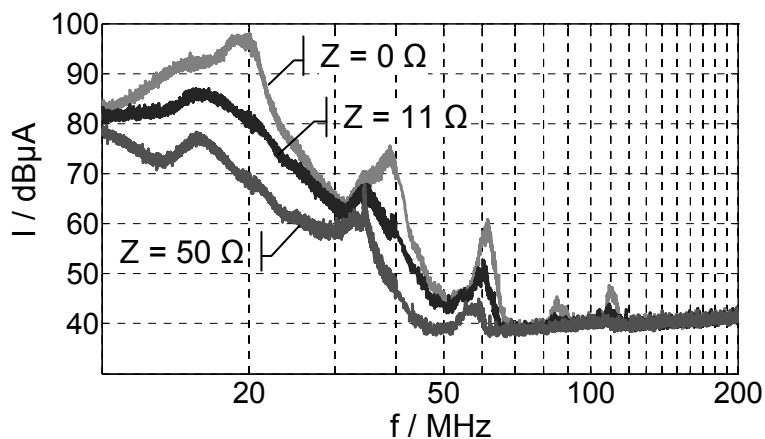


Abb. 7 Störstrom in Abhängigkeit der Abschlussimpedanz gemessen mit einer Stromzange vor BNN

Die Messung der Störstromes in Abhängigkeit der Abschlussimpedanz zeigt, dass wiederum bei Fehlanpassung ($Z = 0 \Omega$ & 50Ω) Resonanzüberhöhungen gemessen werden. Bei der Anpassung der BNN an den Wellenwiderstand ($Z = 11 \Omega$) können diese zwar nicht vollständig unterdrückt werden, aber sie sind deutlich schwächer ausgeprägt als bei Fehlanpassung.

Die Messergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Abschlussimpedanz zu verringerten Spannungswerten, aber höheren Störströmen führt. Wenn die Traktionsleitung an ihrem Ende fehlangepasst ist, treten Resonanzüberhöhungen in den Messergebnissen auf. Die Frequenzstellen dieser Resonanzüberhöhungen hängen dabei nur von der Länge des Traktionsnetzes ab. Dies führt dazu, dass Filtermaßnahmen, die zur Unterdrückung solcher Resonanzen entwickelt wurden, wirkungslos werden, falls die Länge der Hochvoltkabel verändert wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Eingangsimpedanz von Hochvoltbordnetzen unterscheidet sich grundsätzlich von denen herkömmlicher NV-Bordnetze. Der Unterschied ist im Standard-Messaufbau zur Bestimmung der EMV auf Komponentenebene nicht berücksichtigt. Dies führt zu einer Stoßstelle im Messaufbau und zu reflektierten Störungen. Zusammen mit der Wellenleitereigenschaft der koaxial geschirmten HV-Kabel entstehen Überbewertungen der leitungsgebundenen Störgrößen durch stehende Wellen. Eine Anpassung der Eingangsimpedanz herkömmlicher BNN unterdrückt effektiv solche Leitungsresonanzen. Dabei führt dies zu reduzierten Störspannungen und leicht erhöhten Störströmen. Allerdings sind die Messergebnisse nicht mehr von der Länge der Traktionsleitungen abhängig, was einen erheblichen Vorteil im Entwurf von EMV-Entstörkonzepten und Filtermaßnahmen bietet.

Zusätzlich sollte untersucht werden, welche Auswirkung der Abschluss der Hochvoltkabel mit einer Traktionsbatterie auf leitungsgebundene Störgrößen hat. Dies ermöglicht die Optimierung der EMV von Komponenten als Teil eines Gesamtsystems und die Bewertung der Effektivität einzelner EMV-Maßnahmen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] H. Rebholz, *Modellierung leitungsgebundener Störgrößen in der Komponenten- und Fahrzeugmessung*, 1st ed. Stuttgart: Sierke Verlag, 2010.
- [2] CISPR 25. (2003) Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats and on devices – Limits and methods of measurement. IEC/CISPR 25:2002 / DIN-EN 55025:2003.
- [3] S. Yamamoto and O. Ozeki, "RF Conducted Noise Measurements of Automotive Electrical and Electronic Devices Using Artificial Network," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-32, no. 4., 1983, pp. 247 -253.
- [4] M. Reuter, S. Tenbohlen, W. Köhler, Ludwig, and A. Ludwig, "Impedance Analysis of Automotive High Voltage Networks for EMC Measurements," in *EMC Europe 2011*, York, UK, 2011, p. 8.
- [5] M. Reuter, M. Waible, S. Tenbohlen, and W. Köhler, "Einfluss der Abschlussimpedanz von Hochvoltkabeln auf Funkstörgrößen in elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen," in *EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, Düsseldorf, 2012, p. 6.