

Einfluss von Hochvoltleitungen auf leitungsgebundene EMV-Störungen in elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen

Achim Vedde, Martin Neuburger, Konstantin Spanos, Hans-Christian Reuss

Hochschule Esslingen
Robert-Bosch-Straße 1
73037 Göppingen
Achim.Vedde@hs-esslingen.de
Martin.Neuburger@hs-esslingen.de
Konstantin.Spanos@de.bosch.com
Hans-Christian.Reuss@ifs.uni-stuttgart.de

Abstract: Das Hochvoltnetzwerk von Elektrofahrzeugen mit dessen langen Leitungen bildet ein großes Abstrahlungspotential für hochfrequente Emissionen. Um dem entgegenzuwirken werden die Leitungen im Hochvoltbordnetz geschirmt. Dadurch verhalten sich die Hochvoltleitungen wie Koaxialleiter und weisen bei unpassenden Abschlussimpedanzen im hochfrequenten Bereich starke Leitungsresonanzen auf. Diese Eigenschaften verfälschen je nach Leitung die Emissionsmessungen. Somit kann es bei der Vermessung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von Prüflingen zu unerwarteten Abweichungen kommen. In diesem Beitrag wird deshalb der Leitungseinfluss auf die Messungen von Gleichtakt- und Gegentaktemissionen analysiert.

1 Einführung

Aufgrund des begrenzten Platzes und der Fokussierung auf kostengünstige und effektive Leistungselektronik in Kraftfahrzeugen steigt die Nachfrage nach schnell schaltenden Schaltnetzteilen drastisch. Solche schnellschaltenden Geräte erzeugen hochfrequente elektromagnetische Störungen. Die entstehenden Emissionen können über Verbindungsleitungen abgestrahlt und eingefangen werden und dadurch zu einem unsicheren Betrieb der Schaltnetzteile sowie der in der Umgebung befindlichen Geräte führen. Um den Einfluss zu minimieren werden Hochvoltleitungen (HV-Leitungen) geschirmt. Mit der Schirmung entsteht eine Koaxialanordnung. Durch diese Koaxialanordnung verhalten sich die HV-Leitungen wie Wellenleiter und erzeugen bei Fehlanpassung an den Enden starke Leitungsresonanzen. Bei EMV-Komponentenmessungen von

Fahrzeugkomponenten ist der Messabschluss bereits durch die Norm CISPR 25 fest vorgegeben [1]. Dabei ist zwischen dem zu prüfenden Gerät und der EMV-Messvorrichtung eine lange Leitung vorgeschrieben. In dieser Arbeit wird gezeigt wie diese Leitung das Messergebnis beeinflusst. Bei der EMV-Messung wird zwischen Gleichtakt-, in Englisch Common Mode (CM), und Gegentakt-, in Englisch Differential Mode (DM), Störungen unterschieden. Es wird aufgezeigt wie sich die HV-Leitungen auf die jeweilige Störungsart auswirken. Dafür wird auf die Wellenimpedanz von HV-Leitungen eingegangen und diese mit Messungen ermittelt. Es wird aufgezeigt in wie weit die Messergebnisse mit Leitungen im Vergleich zu ohne Leitungen verfälscht werden.

2 Messaufbau zur EMV-Komponentenmessung

Bei der EMV-Prüfung von Fahrzeugkomponenten gibt es einen vorgegebenen Aufbau mit dem unterschiedliche Tests absolviert werden. Dieser Messaufbau ist in der Norm CISPR 25 definiert und in Abbildung 1 dargestellt. Dabei ist zwischen dem Prüfling und der Bordnetznachbildung (BNN), an der die Emissionen gemessen werden, eine Leitung mit der Länge von 200^{+200}_0 mm zwischengeschaltet. Der Kabelbaum entspricht hierbei einer geschirmten Leitung. Der Schirm der Leitung wird auf die Masse der BNN und des Prüflings gelegt [1].

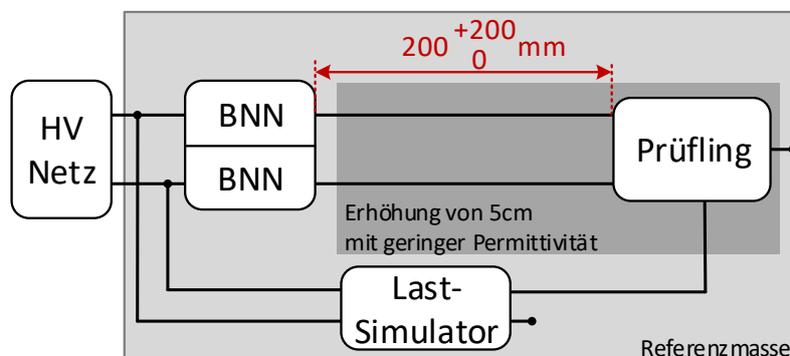


Abbildung 1: EMV-Messaufbau nach CISPR 25.

Um die EMV-Messungen der Komponenten an die Bedingungen am Fahrzeug anzunähern wird das Bordnetz durch eine Bordnetznachbildung abgebildet. Die BNN soll die Impedanz des Bordnetzes abbilden und es stellt eine Abschlussimpedanz für die Messung der Emissionen bereit. Durch das Zusammenschalten von zwei BNN können die Emissionsmessungen in CM und DM separiert werden. Ein elektrisches Schaltbild der BNN ist in Abbildung 2 a) zu sehen. In Abbildung 2 b) sind die Eingangsimpedanzen für DM und CM der Bordnetzverschaltungen dargestellt. Diese Impedanzen können für hohe Frequenzen zu $Z_{DM_{BNN}} = 100 \Omega$ für DM und zu

$Z_{CM_{BNN}} = 25 \Omega$ für CM vereinfacht werden. Im Folgenden werden die Abschlussimpedanzen der BNN zu 100Ω bzw. 25Ω vereinfacht.

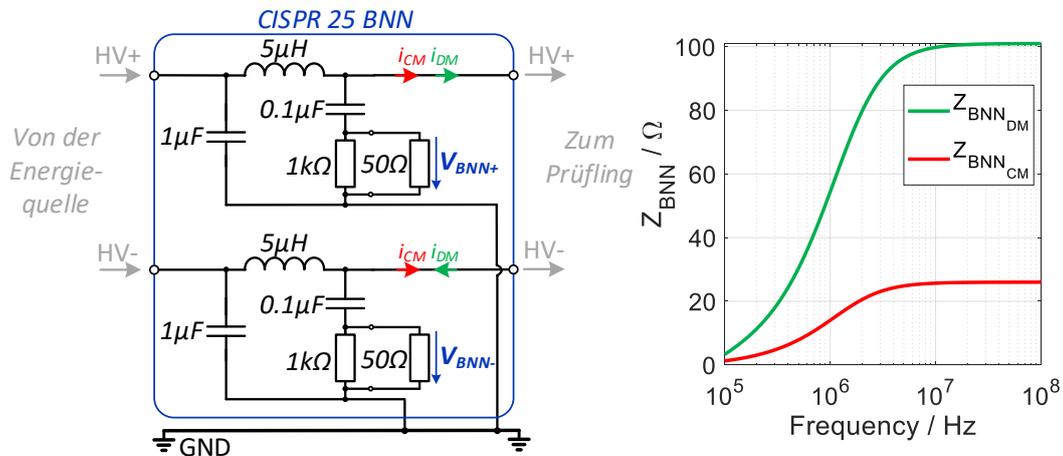


Abbildung 2: a) Elektrisches Schaltbild einer BNN; b) Eingangsimpedanzen der BNN für DM und CM.

3 Modellierung und Vermessung der HV-Leitung

Für die Leitungsuntersuchung bei hohen Frequenzen werden geschirmte HV-Leitung mit einem Leitungsquerschnitt von 35 mm^2 und einer Länge von $l = 3,5 \text{ m}$ untersucht. Es handelt sich dabei um zwei Versorgungsleitungen für HV+ und HV-, die parallel zueinander verlegt sind. Die Schirme der Leitungen sind an beiden Enden mit der Massefläche verbunden. Der schematische Prüfaufbau ist in Abbildung 3 zu erkennen.

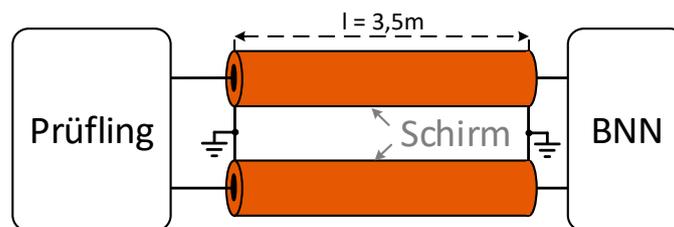


Abbildung 3: Schematischer Prüfaufbau mit geschirmten HV-Leitungen.

Zur Erklärung des Leitungseinflusses auf Emissionsmessungen müssen die Parameter der Leitung bestimmt werden. Dafür wird im Folgenden zuerst ein Modell der HV-Leitung vorgestellt.

Modell der HV-Leitung

Auf die geschirmten HV-Leitungen wird die Berechnungsmethode für eine Koaxialleitung angewendet. Dadurch lässt sich die HV-Leitung vereinfacht, wie in Abbildung 4 gezeigt, beschreiben. Diese vereinfachte

Leitungsdarstellung wird sowohl für den DM als auch für den CM verwendet. Die Leitungsabschnitte können durch Induktivitätsbelag L' mit einem Widerstandsbelag R' , der durch die ohmschen Verluste hervorgerufen wird und einem Kapazitätsbelag C' mit Leitwertbelag G' , der durch die Verluste im Dielektrikum entsteht, beschrieben werden [2, 3].

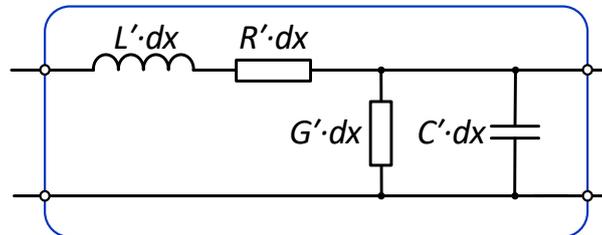


Abbildung 4: Ersatzschaltbild eines HV-Leitungsabschnitts dx .

Die Differentialgleichung der Leitung wird als Telegraphengleichung bezeichnet. Aus dieser kann die Wellenimpedanz Z_W berechnet werden. Der Parameter ergibt sich bei einer verlustbehafteten Leitung wie in Gleichung (1) dargestellt.

$$Z_W = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (1)$$

Bei der Übertragung von hochfrequenten Signalen kann es an den Leitungsenden zu Reflexionen kommen. Reflexionen sind besonders bei hohen Frequenzen, wenn die Wellenlänge vergleichbar zur Leitungslänge ist, kritisch. Mit der Wellenimpedanz und der Abschlussimpedanz Z_S kann die Reflexion an den jeweiligen Leitungsenden mit Gleichung (2) bestimmt werden [4].

$$r = \frac{u_{rück}}{u_{hin}} = \frac{Z_S - Z_W}{Z_S + Z_W} \quad (2)$$

Vermessung des Wellenwiderstands der HV-Leitung

Die HV-Leitungen werden zur Bestimmung des Wellenwiderstandes mit einem Netzwerkanalysator (NWA) vermessen. In einer Messung werden die Leitungsimpedanzen für den Leerlauf, offenes Ende, und Kurzschluss, kurzgeschlossenes Ende, erfasst um daraus die kapazitiven und induktiven Eigenschaften der Leitung zu bestimmen. Die Abbildung 5 zeigt die gemessenen Leitungsimpedanzen für den Gleich- und Gegentaktfall. Bei den Leerlaufimpedanzen Z_{LL} fällt die Impedanz in den unteren Frequenzen um 20 dB pro Dekade. Dies ist durch die Kapazität zwischen den Leitern und Isolierung bestimmt und kann in die Leitungskapazität umgerechnet werden. Beim Kurzschluss kann die Induktivität in dem Bereich, in dem die Impedanz um 20 dB pro Dekade steigt, berechnet werden. Im niederfrequenten Bereich verhält sich die Leitung ohmsch-induktiv.

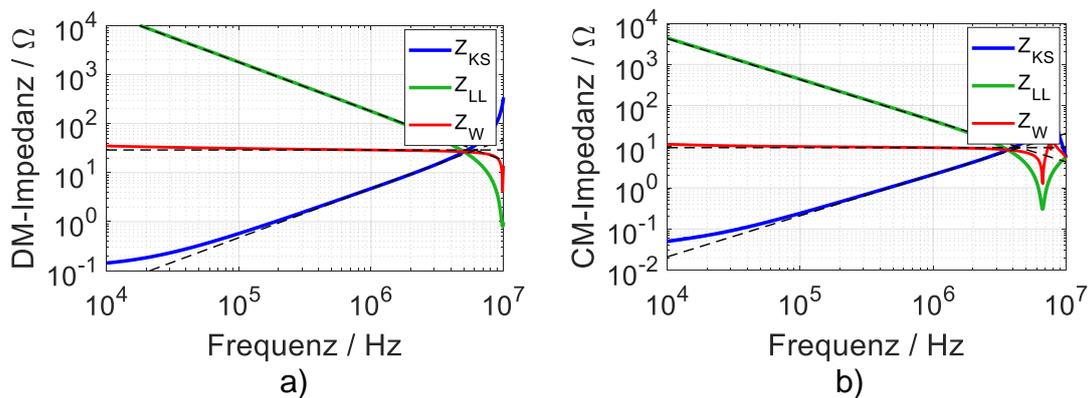


Abbildung 5: Ergebnis der Wellenimpedanz-Messung in a) für DM und in b) für CM.

Die berechneten Parameter aus den Messungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Aus den kapazitiven und induktiven Werten wird mithilfe von Gleichung (1) der Wellenwiderstand berechnet. Dabei wird von einer verlustfreien Leitung ausgegangen und somit der Widerstand R und Leitwert G vernachlässigt. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten Wellenimpedanzen Z_W .

Tabelle 1: Berechnete Wellenimpedanz bei der Frequenz $f = 1\text{MHz}$

Beschreibung	L	C	Z_W
Einleiter-Wellenimpedanz	361 nH	1845 pF	14,0 Ω
DM-Wellenimpedanz	788 nH	900 pF	29,6 Ω
CM-Wellenimpedanz	342 nH	3716 pF	9,6 Ω

Nachdem die Wellenimpedanzen bekannt sind, wird im folgenden Kapiteln auf den Einfluss der Fehlanpassung der Wellenleiter eingegangen.

4 Einfluss der Abschlussimpedanz auf die Eingangsimpedanz der isolierten HV-Leitung

Die Eingangsimpedanz in die BNN aus Sicht des Prüflings wird durch das Wellenverhalten der Leitung verzerrt. Dieser Einfluss der HV-Leitung auf die Eingangsimpedanz wird in diesem Kapitel untersucht. Dazu wird die Eingangsimpedanz der HV-Leitung bei unterschiedlichen Abschlussimpedanzen gemessen. Es wird an der Seite der Störquelle in die Hochvoltleitung gemessen. Die Seite, an der die Hochvoltbatterie bzw. die BNN sitzt, wird mit verschiedenen Impedanzen abgeschlossen. Es wird mit einem NWA die Eingangsimpedanz der HV-Leitung aufgenommen. Dies ist anhand des in der Abbildung 6 gezeigten schematischen Messaufbau für die

Messung der DM-Eingangsimpedanz dargestellt. Bei der Messung der CM-Eingangsimpedanz werden die Eingänge und Ausgänge der Leitungen kurzgeschlossen und zwischen den kurzgeschlossenen Leitungen und der Masse gemessen sowie die Abschlussimpedanz angebracht.

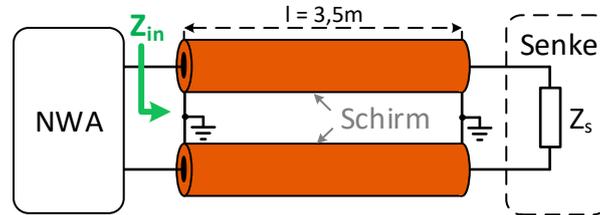


Abbildung 6: Messaufbau zur Messung der DM-Eingangsimpedanz in die HV-Leitung.

Durch den Einsatz des NWA ist die Abschlussimpedanz an der Eingangsseite mit 50Ω fest vorgegeben. An der Ausgangsseite kann die Abschlussimpedanz variiert werden. Die Abbildung 7 zeigt die Eingangsimpedanz in die Leitung Z_{in} bei unterschiedlichen Abschlussimpedanzen Z_s .

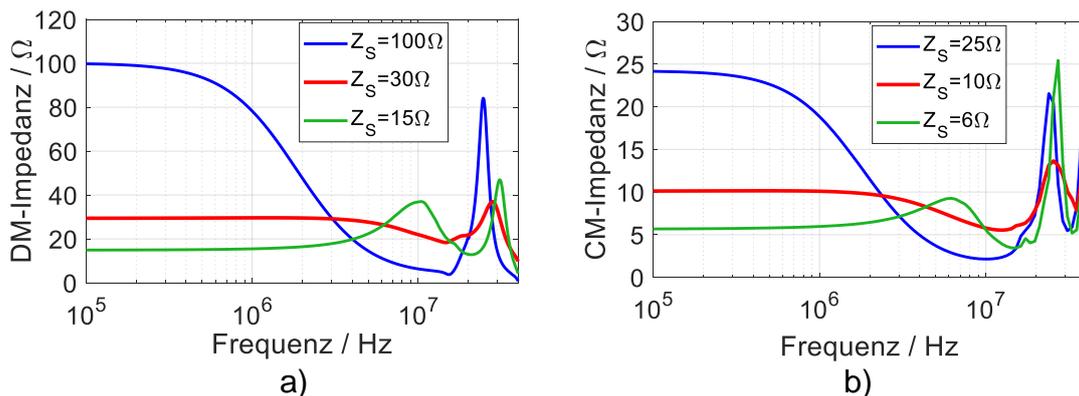


Abbildung 7: Eingangsimpedanz der HV Leitung bei unterschiedlichen Abschlussimpedanzen für DM in a) und für CM in b).

Anhand der Messung ist zu erkennen, dass im niederfrequenten Bereich bei $f < 1\text{MHz}$ die Impedanz ungefähr gleich der Abschlussimpedanz entspricht. Im hochfrequenten Frequenzbereich kommt es durch Fehlanpassungen zu starken Resonanzüberhöhungen. Die Messung zeigt, dass sich mit Anpassung der Abschlussimpedanzen die Leitungsresonanzen verringern lassen und somit das Messergebnis weniger beeinflusst wird. Bei sehr hohen Frequenzen steigt die Fehlanpassung und somit die Welligkeit durch die parasitären Leitungsinduktivitäten am Abschluss wieder an.

Es ist ersichtlich, dass die Wellenimpedanzen stark von der Impedanz der BNN abweichen und somit das Verhalten der HV-Leitungen einen großen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Bei der Entwicklung von EMV-Filtern wird üblich mit einer Abschlussimpedanz von 25Ω für CM und 100Ω für DM

ohne Einbezug einer Leitung gerechnet [5]. Die Messungen zeigen, dass diese Annahmen bei dem Aufbau nach CISPR 25 mit langen Leitungen bei hohen Frequenzen nicht mehr zutrifft.

5 Einfluss auf leitungsgebundene EMV-Messung

Um die Auswirkungen der HV-Leitung auf leitungsgebundene EMV-Messungen zu zeigen wird eine DM-Störungsmessung mit und ohne HV-Leitungen verglichen. Der Messaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wird mit einem Frequenzgenerator eine Störung in die HV-Leitung eingepreßt und die übertragenen Emissionen am anderen Ende der Leitung an der Abschlussimpedanz gemessen.

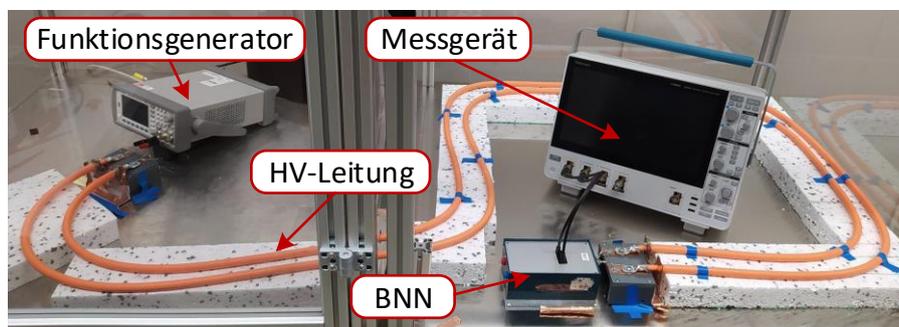


Abbildung 8: Prüfstands-aufbau mit zwei HV-Leitungen zur Messung leitungsgebundener EMV-Störungen.

In Abbildung 9 ist eine vereinfachte Darstellung des in Abbildung 8 gezeigten Prüfaufbaus, bestehend aus der Quellimpedanz Z_q , der Wellenleiterimpedanz Z_w und der Senkimpedanz Z_s , dargestellt. Durch die Reflexionseigenschaften an den Leitungsenden haben alle drei Impedanzen einen Einfluss auf die hochfrequente Signalübertragung.

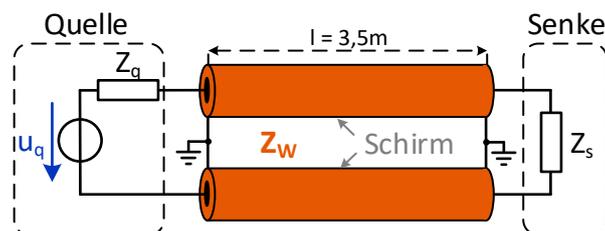


Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung des Testaufbaus mit zwei HV-Leitungen zur Emissionsmessung des Gegendaktes.

In der in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellten Messung ist der Eingangswiderstand zu $Z_q = 450 \Omega$ gewählt um einen unpassenden Fall mit viel Reflexion am Eingang zu schaffen. Als Ausgang wird für die Gegendaktmessung eine Impedanz von $Z_s = 100 \Omega$ gewählt. Als Störsignal

wird durch den Funktionsgenerator ein Rechtecksignal vorgegeben. Dadurch ergibt sich der in Abbildung 10 dargestellte Zeitverlauf.

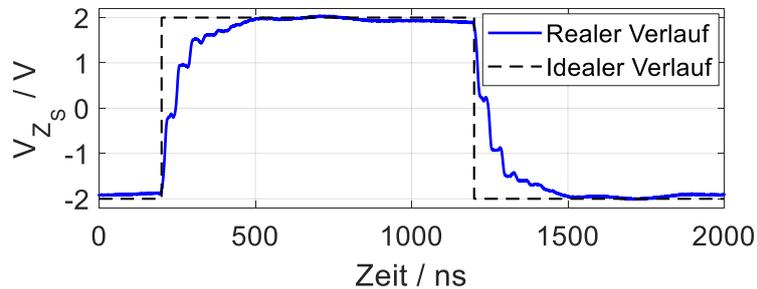


Abbildung 10: DM-Reflexionsmessung an Z_S bei $Z_q = 450 \Omega$ und $Z_S = 100 \Omega$.

Ein großer Anteil der Spannung wird reflektiert. Dadurch ergibt sich eine treppenförmige Ausgangsspannung. Der Frequenzverlauf des Signals ist in Abbildung 11 zu sehen. Dabei wird das Ergebnis mit zwischengeschalteter HV-Leitungen zwischen dem Frequenzgenerator und dem Abschluss im Vergleich zu ohne zwischengeschalteten HV-Leitungen verglichen. Die Messung veranschaulicht die Auswirkung der HV-Leitungen auf die EMV-Emissionsmessung.

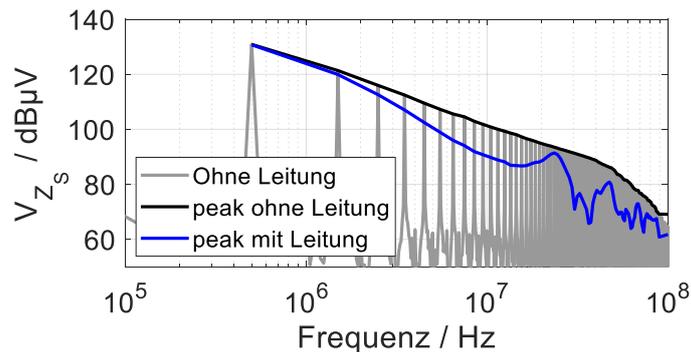


Abbildung 11: Vergleich von Gegentakt-Emissionsmessungen mit und ohne HV-Leitungen. Dabei ist $Z_q = 450 \Omega$ und $Z_S = 100 \Omega$.

Die Messung spiegelt starke Abweichung der Emissionen wieder und lässt die Auswirkungen der HV-Leitungen auf Emissionsmessungen erkennen. Dabei kann nicht von einer pauschalen Abweichung ausgegangen werden, da diese je nach Leitungseigenschaften, Leitungslänge und Abschlussimpedanzen variiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der EMV-Prüfung von Fahrzeugkomponenten ist eine Messung nach der Norm CISPR 25 erforderlich. Dabei werden zwischen dem Prüfling und der

Messvorrichtung Leitungen eingefügt. Um Abstrahlung bei HV-Leitungen zu vermindern werden diese mit einer Schirmung versehen und verhalten sich somit bei hohen Frequenzen wie Wellenleiter. Bei einer abweichenden Abschlussimpedanz zur Wellenimpedanz der Leitungen kommt es zu Stoßstellen an den Leitungsenden und somit zu Reflektionen. Durch die entstehenden Wellen bilden sich Resonanzüberhöhungen und somit kommt es zu Abweichungen im Messergebnis im Vergleich zu ohne eine Verwendung von langen Leitungen. Bei den verwendeten HV-Leitungen weichen die Wellenimpedanzen des Gleich- und Gegentakts von der BNN ab und es ist anhand der Messergebnisse eine starke Abweichung der Störung zu erkennen. Bei der Entwicklung von EMV-Filter für Schaltnetzteile wird in der Regel als Abschlussimpedanz die Impedanz der BNN angenommen. Durch die Messergebnisse wird jedoch gezeigt, dass bei Verwendung von HV-Leitungen eine starke Abweichung entsteht. Das bedeutet, dass eine Einbindung der Leitungseigenschaften in den Entwicklungsprozess von Schaltnetzteilen von Vorteil ist. Dazu sollte eine genauere mathematische Beschreibung der Leitungseigenschaften durchgeführt werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR). IEC CISPR 25:2016 Fourth Edition / DIN EN 55025 (VDE 0879-2):2018-03. International/european/german standard, International Electrotechnical Commission (IEC), 2016
- [2] P. Mlynek, J. Misurec, M. Koutny, P. Silhavy, "Two-port Network Transfer Function for Power Line Topology Modeling", Radioengineering, 2012
- [3] S. Khan, A. Salami, W. Lawal, Z. Alam, S. Hameed, M. Salami, "Characterization of Indoor Power lines As Data Communication Channels Experimental Details and Results", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2008
- [4] A. Cataliotti, A. Daidone, G. Tinè, "A Medium-Voltage Cables Model for Power-Line Communication", IEEE Transactions on Power Delivery, 2018
- [5] S. Ye, W. Eberle, Y. Liu, "A Novel EMI Filter Design Method for Switching Power Supplies", IEEE Transactions on Power Electronics, 2004