

# Analyse von Kopplungseigenschaften verschiedener KFZ-Bordnetzspannungsebenen auf System- und Komponentenebene

Dipl.-Ing. Jens Hohloch, Dr.-Ing. Wolfgang Köhler, Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen,  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart  
Dr.-Ing. Martin Aidam, Dipl.-Ing. Andreas Ludwig,  
Daimler AG, Stuttgart

## 1 Kurzfassung

Bei Kraftfahrzeugen mit elektrischen Antrieben wird, neben den herkömmlichen 12 V-Bordnetz, ein Traktionsnetz mit höheren Spannungen verwendet. Dabei sind in der Regel alle Komponenten des Hochvolt-Bordnetzes ebenfalls mit dem Niedervolt-Bordnetz verbunden. Prinzipbedingt verursacht der Umrichter im Traktionsnetz große elektromagnetische Störungen, die sich im gesamten HV-Bordnetz ausbreiten. Über diverse Kopplungspfade innerhalb der HV-Komponenten besteht die Gefahr, dass diese Störgrößen ins LV-Bordnetz gelangen und sich dort weiter ausbreiten. Im Beitrag wird das Kopplungsverhalten an einem Fahrzeuggesamtsystem im Frequenzbereich untersucht und Messungen an einem Komponentenaufbau in Anlehnung an die Norm CISPR 25 durchgeführt.

## 2 Einleitung

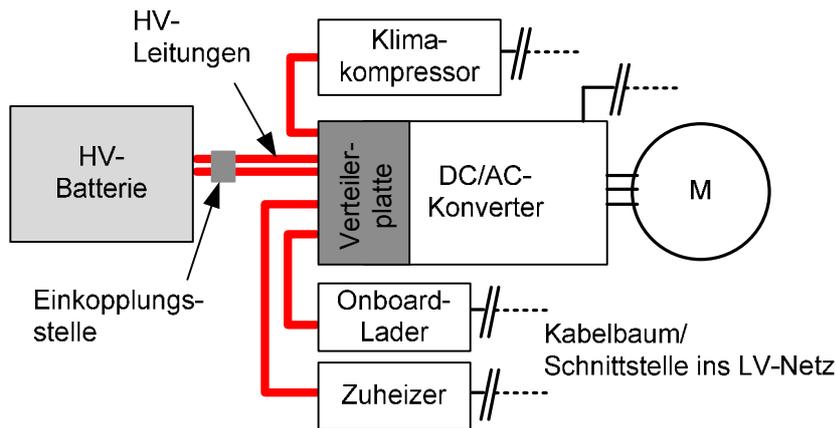
Die Verwendung von elektrischen Fahrtrieben in modernen Kraftfahrzeugen erfordert die Übertragung großer Leistungen im Fahrzeugbordnetz. Um die Verlustleistung gering zu halten, werden für das Traktionsnetz im Vergleich zum herkömmlichen Bordnetz höhere Spannungen (Hochvolt-Bordnetz) verwendet. Um die Verlustleistung zu minimieren, arbeiten die Leistungshalbleiter des Umrichters im Traktionsnetz mit sehr kurzen Anstiegszeiten. In Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit können diese schnellen Schaltvorgänge als die Hauptstörquelle betrachtet werden. Eine Charakterisierung solcher Störungen findet sich in [1], [2].

Aus diesem Grund ist eine Vielzahl von Entstörungsmaßnahmen erforderlich. Zu den gängigsten Maßnahmen gehört neben kurzen Leitungslängen zwischen Umrichter und Motor, die Herstellung eines durchgehenden, niederohmigen Schirmungskonzepts, in das alle Komponenten und Steckverbindungen des Hochvoltbordnetzes einbezogen sind [2], [3].

In der Regel besitzen alle Hochvolt-Komponenten wie z.B. Batterien, DC/DC-Konverter, elektrische Zuheizler oder Onboard-Ladesysteme elektronische Steuerungs- bzw. Kommunikationsschnittstellen und sind somit direkt an beide Bordnetzebenen angebunden. Der Onboard-Lader weist zudem eine Verbindung zum Niederspannungsnetz auf. Durch die enge räumliche Anordnung und die funktionale Verbindung existieren im Fahrzeug verschiedene Kopplungspfade zwischen der HV- und der LV-Ebene [5], [6]. Die Kopplung tritt vor allem innerhalb der Komponenten, was die Ausbreitung und Abstrahlung von Störungen über die nicht geschirmten Strukturen des LV-Bordnetzes zur Folge haben kann. Um unerwünschte gegenseitige Beeinflussungen zu verhindern und um die Einhaltung von Grenzwerten zu gewährleisten, muss daher auf eine hohe Entkopplung beider Bordnetzebenen geachtet werden.

### 3 Messaufbau an einem HV-Gesamtsystem

Den grundsätzlichen Messaufbau am Beispiel eines Systemaufbaus, der aus allen HV-Komponenten eines rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugs aufgebaut ist, zeigt Bild 1. Zum Aufbau gehören außerdem die LV-Leitungssätze und Steuergeräte die zum Betrieb bzw. zur Ansteuerung der HV-Komponenten erforderlich sind. Die Messungen am Systemaufbau bieten den Vorteil, dass reale Bedingungen bzgl. der Abschlussimpedanzen vorherrschen und dass Leitungen und Steckverbindungen zugänglich sind. Für die Inbetriebsetzung der Komponenten werden außerdem CAN Restbus-Simulationen benötigt. Um sicherzustellen, dass keine Beeinflussung der externen CAN-Komponenten stattfindet, wird eine optische Übertragungsstrecke verwendet.

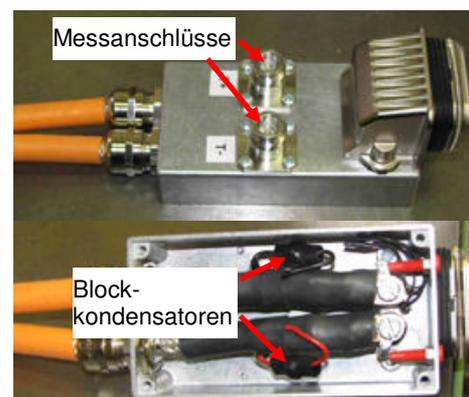


**Bild 1:** Vollständiger HV-Systemaufbau

Zur Durchführung der Messungen wird ein HF-Signal an einer Steckverbindung des HV-Systems nahe der Batterie eingespeist. Dafür wurde ein spezieller, geschirmter Einspeiseadapter (Bild 6) verwendet, der mit Steckverbindern einfach in den DC-Teil des HV-Netzes eingeschleift werden kann. Die DC-Blockkondensatoren sind im Adaptergehäuse integriert. Die Messanschlüsse sind als N-Buchsen ausgeführt. Die Schirme der HV-Leitungen sind auf das Gehäuse aufgelegt, um die Durchgängigkeit des Schirmkonzepts aufrechtzuerhalten.

Gleichzeitig kann das ins LV-Netz eingekoppelte Signal frequenzselektiv an einer Schnittstelle oder an einem Kabelbaum gemessen werden. Die Messungen werden mit Hilfe eines Vektor-Netzwerkanalysators durchgeführt. Um eine ausreichende Messdynamik zu erreichen, wird ein HF-Verstärker verwendet. Die ins HF-System effektiv eingekoppelte Leistung wird mit Hilfe eines Richtkopplers ermittelt. Um die Messungen auch bei aktiven Komponenten und Systemen durchführen zu können, müssen Blockkondensatoren verwendet werden, die die empfindlichen HF-Anschlüsse des Netzwerkanalysators vor Gleichspannungen schützen.

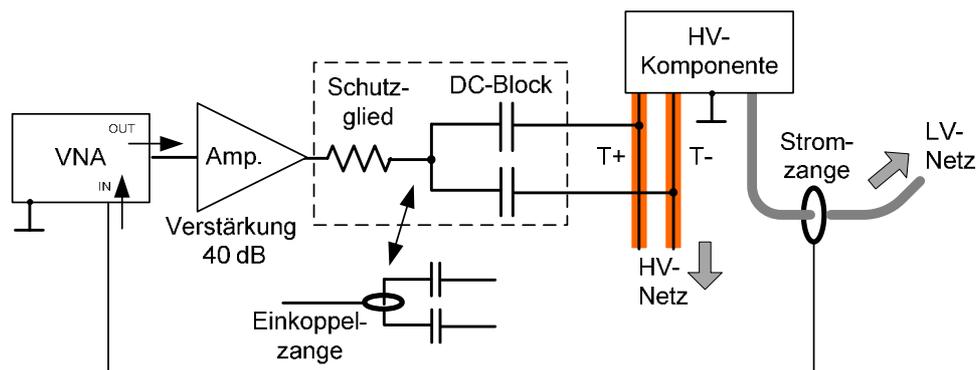
Die Einspeisung des HF-Signals kann im Common Mode (galvanische Einkopplung) oder im Differential Mode (induktive Einkopplung) vorgenommen werden.



**Bild 2:** Adapter zur HF-Signaleinkopplung mit HV- und Messanschlüssen im geschirmten Gehäuse

### 3.1 Störsignaleinkopplung im Common- bzw. Differential Mode

Am HV-Anschluss befinden sich zwei Blockkondensatoren mit einer Kapazität von jeweils 620 nF. Zusammen mit der Bezugsimpedanz von 50  $\Omega$  des vorgelagerten Messsystems ergibt sich daraus eine untere 3 dB-Eckfrequenz von 5 kHz. Für die Einspeisung im Common-Mode (CM) wird ein spezielles, geschirmtes T-Stück verwendet, das die Blockkondensatoren und die Kurzschlussbrücke enthält. Damit die eingekoppelte Störspannung an beiden Zweigen gleich groß ist, müssen die verwendeten Koppelkondensatoren möglichst identische Eigenschaften aufweisen. Das vom Netzwerkanalysator generierte HF-Signal wird zunächst um ca. 40 dB verstärkt. Die maximale Ausgangsleistung des Verstärkers liegt bei 40 dBm (10 W) an 50  $\Omega$ . Das zwischen Verstärker und den DC-Blocks geschaltete Schutzglied mit Dämpfungsglied wird aus zwei Gründen benötigt. Die aus Sicherheitsgründen vorhandene Isolationsüberwachung arbeitet mit periodischen Rechtecksignalen zwischen den HV-Anschlüssen und dem Massepotential. Das sich ändernde Prüfsignal führt zu Umladungsvorgängen an den Kondensatoren. Durch die Verwendung eines Dämpfungsglieds, das mit einem Pi-Ersatzschaltbild beschrieben werden kann, fließt der durch die Umladungsvorgänge hervorgerufene Strom zur Masse zu einem Großteil über das Widerstandsnetzwerk des Dämpfungsglieds und nicht über die Ausgangsimpedanz des Verstärkers. Das Dämpfungsglied schützt außerdem die HF-Geräte vor transienten Signalen, die vor allem beim Öffnen des HV-Schützes auftreten können. Dies kann beispielsweise vorkommen, wenn das Batterie-Management-System durch die HF-Einkopplung beeinflusst wird.



**Bild 3:** HV-seitige Störsignaleinkopplung mit Verstärker und DC-Blockkondensatoren, Einspeisung durch galvanische bzw. induktive Einkopplung im Common-Mode bzw. Differential Mode

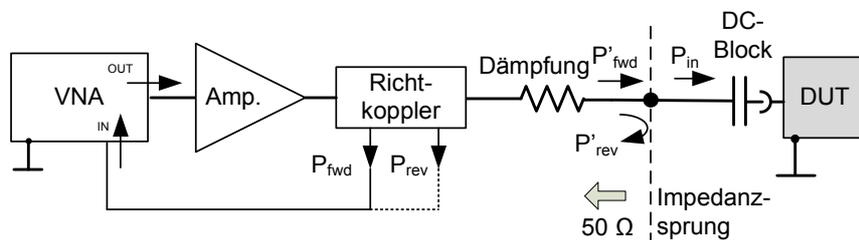
Die Art der Einkopplung kann einfach geändert werden, indem ein differentielles Störsignal mit Hilfe einer Koppelzange (injection probe) am kurzgeschlossenen HV-Eingang des DUT eingespeist wird.

### 3.2 Ermittlung der eingespeisten Leistung

Um die Kopplungseigenschaften möglichst genau bestimmen zu können, muss die tatsächliche Leistung, die in den Prüfling bzw. das HV-System eingespeist wird, bekannt sein. Diese entspricht nicht direkt der vom Netzwerkanalysator bzw. dem Verstärker abgegebenen Leistung, da an der Einkopplungsstelle Reflexionen auftreten. Diese resultieren aus der Änderung des Wellenwiderstands an der Stoßstelle, an der die unbekannte Impedanz des HV-Eingangs mit dem 50  $\Omega$ -System der Einspeiseseite aufeinandertreffen. Die Reflexion ist daher von der Art der Einkopplung und der Impedanz des HV-

Netzes abhängig. Die Impedanz des HV-Netzes setzt sich zusammen aus den Impedanzen der Leitungen und der angeschlossenen Komponenten. Da der Netzwerkanalysator über den Verstärker mit der Einkopplungsstelle verbunden ist, kann die reflektierte Leistung nicht vom internen Richtkoppler des Netzwerkanalysators erfasst werden. Aufgrund der unbekanntenen Impedanzverhältnisse, die insbesondere bei der Untersuchung von Fahrzeuggesamtsystemen auftreten, ist es praktisch unmöglich den Reflexionsfaktor zu berechnen. Der reflektierte Anteil muss daher über die Messung des S11-Parameters an der Einspeisestelle oder mit Hilfe eines externen Richtkopplers bestimmt werden. Die Verwendung eines zusätzlichen Richtkopplers bietet zudem den Vorteil, dass der Frequenzgang des Verstärkers und der Messkabel, die im Signalpfad vor dem Richtkoppler liegen, automatisch mitberücksichtigt werden.

Am Richtkoppler kann ein der hinlaufenden und ein der rücklaufenden Leistung proportionales Signal abgegriffen werden. Dazu müssen zwei separate S21-Messungen gemessen werden. Die tatsächlich eingespeiste Leistung ergibt sich dann aus der Differenz beider Signale. Der Auskopplungsfaktor des verwendeten Richtkopplers beträgt 40 dB (Faktor  $10^4$ ) und entspricht damit ungefähr dem Faktor, mit dem das Signal zuvor verstärkt wurde.



**Bild 4:** Ermittlung der eingespeisten Leistung mit Richtkoppler

Gewöhnlich sind die mit dem Netzwerkanalysator gemessenen S-Parameter logarithmische Größen (Darstellung in dB). Für die Differenzbildung müssen diese Werte in lineare Größen zurückgerechnet werden. Berücksichtigt werden muss auch die Dämpfung (a) der Leitung bzw. ein Dämpfungsglied zwischen dem Richtkopplerausgang und der Einkopplungsstelle, wobei die Korrektur entsprechend der Laufrichtung durchgeführt werden muss. Die Dämpfung des Messkabels zwischen den Messausgängen des Richtkopplers und dem Netzwerkanalysator muss ebenso beachtet werden. Die effektive Leistung, die in den Prüfling eingespeist wird kann mit den folgenden Formeln bestimmt werden:

Aufgrund der relativ niedrigen 3 dB-Eckfrequenz der DC-Blockkondensatoren im Vergleich zur kleinsten Messfrequenz kann bei den Betragsmessungen der Einfluss der Kondensatoren vernachlässigt werden.

### 3.3 Signalauskopplung

Die Signalauskopplung erfolgt an einem Steckverbinder bzw. einem Kabelbaum des LV-Bordnetzes. Analog zur Einkopplung kann die Auskopplung mit einem Koppelkondensator (galvanische Auskopplung) oder mit einer Stromzange (induktive Auskopplung) erfolgen. Bei Messung an einem Gesamtfahrzeug kann die Signalauskopplung außerdem an vorhandenen Fahrzeugantennen vorgenommen werden.

Dabei muss beachtet werden, dass durch die galvanische Ankopplung die Impedanz des LV-Netzes verändert wird. Mit der Stromzange kann die Auskopplung an einer oder mehreren Adern (Summenstrom-Messung) des Kabelbaums potentialfrei vorgenommen werden. Bei Verwendung einer Stromzange mit kleiner Transferimpedanz kann die

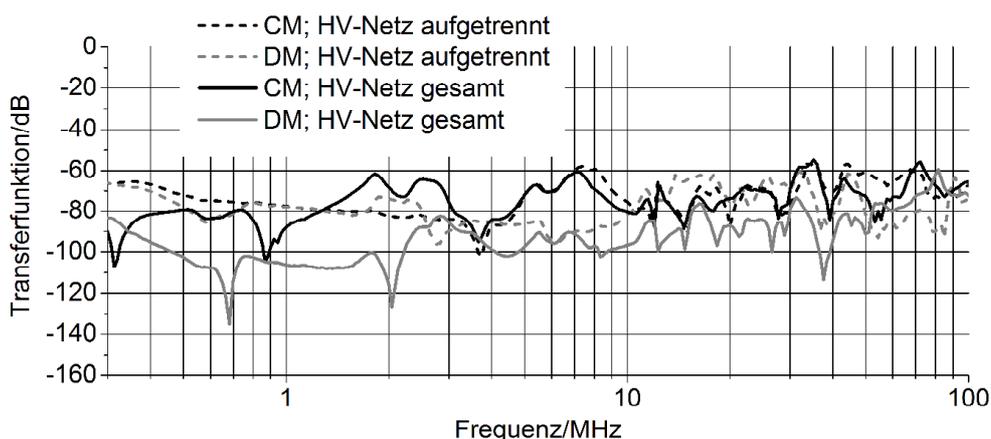
Rückwirkung der Stromzange vernachlässigt werden. Für die Bestimmung der Transferimpedanz der Stromzange wird ein Kalibrierjig verwendet. Die Transferimpedanz beschreibt den Zusammenhang der Spannung, die am Messanschluss der Stromzange anliegt und dem Strom der durch die Zange fließt [8]. Dabei ist der Messanschluss der Stromzange mit der Eingangsimpedanz des Netzwerkanalysator ( $50 \Omega$ ) abgeschlossen. Die Transferimpedanz kann über den mit dem Netzwerkanalysator gemessenen S21-Parameter (Spannungsverhältnis) unter Berücksichtigung des Abschlusswiderstandes ( $50 \Omega$ ) am Kalibrierjig berechnet werden.

Zu beachten ist, dass bei beiden Auskopplungsarten nicht die HF-Leistung im LV-System, sondern eine Störspannung bzw. ein Störstrom gemessen wird. Die für die Berechnung der Kopplungsübertragungsfunktionen verwendete Leistung entspricht derjenigen Leistung, die die Störspannung bzw. der Störstrom in einem  $50 \Omega$ -System umsetzt.

### 3.4 Gemessene Transferfunktionen an HV-Batterie und HV-Zuheizer

Die LV-seitige Auskopplung erfolgt zunächst am Kabelbaum der HV-Batterie. Die Auskopplung wird dabei mit der Stromzange als Summenstrommessung über alle Adern des Kabelbaums vorgenommen. In Bild 8 sind die zugehörigen Diagramme dargestellt. Bei der Einspeisung im Common-Mode sind die Transferfunktionen für das aufgetrennte und das gesamte HV-Netz bis ca. 3,5 MHz unterschiedlich. Mit zunehmender Frequenz gleichen sich beiden Kurven an. Offensichtlich spielt die Common-Mode Impedanz des HV-Netzes bei dieser Art der Einkopplung bei höheren Signalfrequenzen nur eine untergeordnete Rolle.

Betrachtet man die Messungen an der gleichen Auskopplungsstelle bei Einspeisung im Differential-Mode, ist zu erkennen, dass die Transferfunktion bei abgetrenntem Netz fast im gesamten Frequenzintervall über der anderen liegt. Bei angeschlossenem HV-Netz verteilt sich die ein-gespeiste HF-Leistung auf die Batterie und das restliche Bordnetz entsprechend der jeweiligen Impedanz. Resonanzen treten aufgrund der längeren HV-Leitungslängen schon bei Frequenzen unterhalb von 1 MHz auf. In beiden Fällen liegen die Maxima beider Kurven bei ungefähr -60 dB.

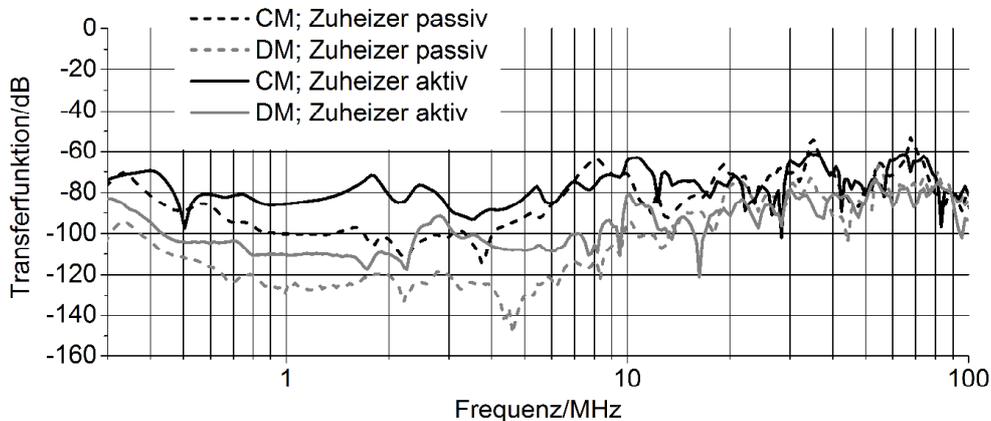


**Bild 5:** Transferfunktion bei induktiver Auskopplung am LV-Kabelbaum der HV-Batterie

Für die folgenden Untersuchungen befand sich die HV-Batterie des in Bild 3 dargestellten Prüfstandes in aktivem Zustand (HV-Schütz geschlossen). Der elektrische Zuheizer wurde wahlweise im passiven Betrieb oder mit 50%iger Heizleistung betrieben. Alle anderen Komponenten waren mit dem HV-Netz verbunden befanden sich aber in passi-

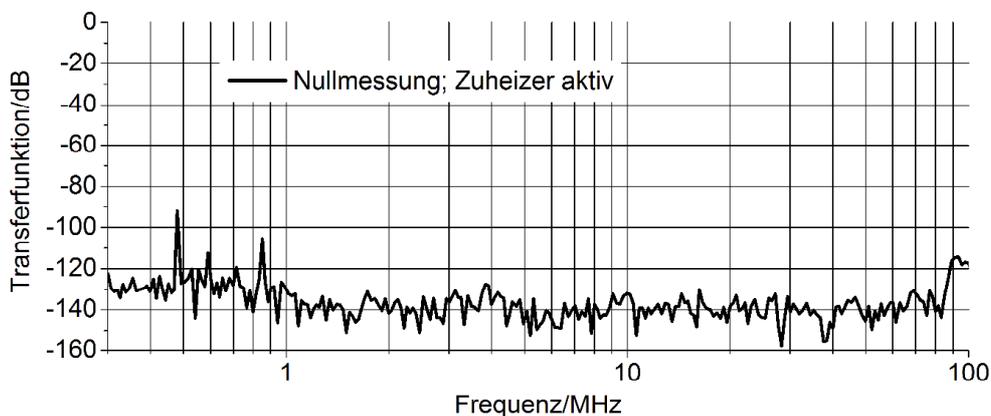
vem Zustand. Der untersuchte Frequenzbereich erstreckt sich bis zu einer Frequenz von 110 MHz, um neben anderen Funkdiensten insbesondere den Mittelwellen- und den UKW-Bereich abzudecken.

Die gemessenen Transferfunktionen zeigen die Abhängigkeit vom Betriebszustand der Komponente: Sowohl bei Einspeisung im Common-Mode als auch im Differential-Mode ist die Kopplung zwischen dem HV- und dem LV-Teil im eingeschalteten Zustand bis zu einer Frequenz von 10 MHz deutlich größer und somit kritischer zu bewerten ist.



**Bild 5:** Transferfunktion bei induktiver Auskopplung am LV-Kabelbaum des elektrischen Zuheizers

Der elektrische Zuheizer arbeitet mit einer Pulsweitenmodulation und kommt daher als Störquelle in Betracht. Bei Messungen im aktiven Zustand, ist es daher möglich, dass vom Zuheizer verursachte Störungen die Messungen beeinflussen. Das Diagramm in Bild 6 zeigt eine Nullmessung, bei der über den Verstärker direkt in einen 50  $\Omega$ -Abschlusswiderstand eingespeist wird. Bei Einkopplung ins HV-Netz geht etwas Messdynamik verloren, weil die eingespeiste Leistung aufgrund der Fehlanpassung geringer ausfällt. Eine Eigenstörung des Zuheizers ist bei ca. 300 kHz sichtbar.

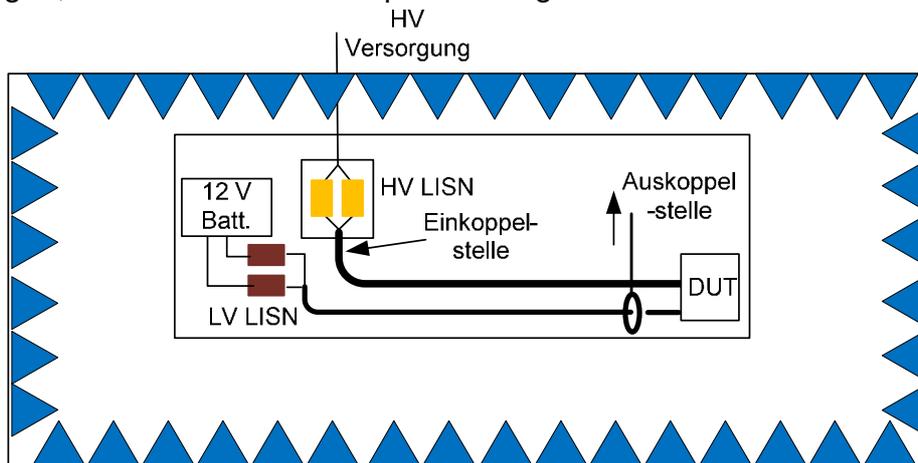


**Bild 6:** Nullmessung bei Einspeisung in einen 50  $\Omega$ -Abschluss

#### 4. Komponentenmessaufbau

Um die Vergleichbarkeit der am Gesamtfahrzeug bzw. am Prüfstand ermittelten Koppungseigenschaften mit Komponentenmessungen zu untersuchen, wird die beschriebene Messmethode zur Analyse einer einzelnen Komponente (HV-PTC) herangezogen. Bei der Prüfung herkömmlicher KFZ-Komponenten wird üblicherweise die Norm CISPR 25 [9] angewendet, in der die gängigen Messverfahren zur Ermittlung leitungs-

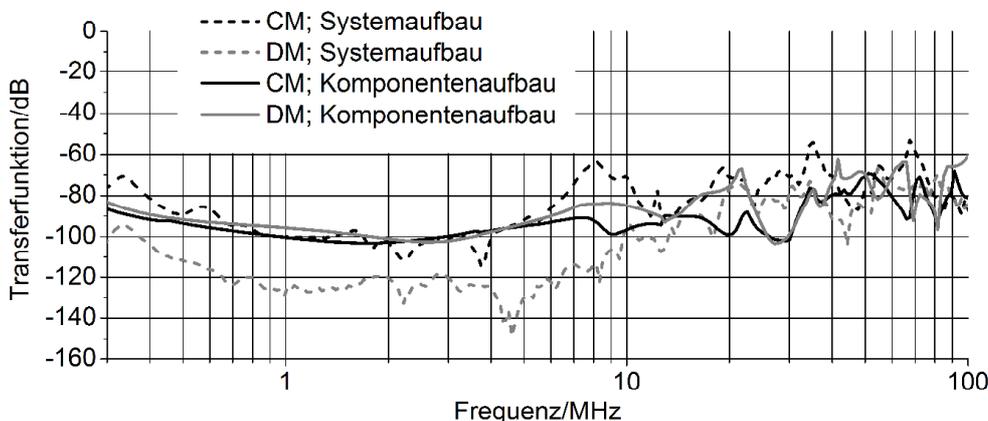
gebundener und gestrahlter Störemissionen beschrieben sind. Die CISPR 25 dient daher als Grundlage für den Messaufbau, dies betrifft insbesondere Abmessung, Anordnungspositionen, isolierende Unterlagen für Leitungen und DUT sowie die Masseanbindung des Tisches. HV-Kabel und LV-Versorgungskabel sind mit Netznachbildungen (LISN) abgeschlossen. Die HV-Netznachbildungen sind in einem geschirmten Gehäuse untergebracht, um das durchgehende Schirmsystem nicht zu unterbrechen. Für den Anschluss der HV-Leitungen werden die gleichen Stecksysteme wie am Systemprüfstand verwendet, was die Verwendung der speziellen Einkoppeladapter ermöglicht. Der LV-Kabelbaum der verwendeten Komponente besteht neben den Versorgungsleitungen aus CAN-Leitungen, die mit einer Ersatzimpedanz abgeschlossen sind.



**Bild 7:** HV-Komponentenmessung in Anlehnung an CISPR 25

#### 4.1 Transferfunktionen

Das Diagramm in Bild 8 zeigt die am Systemaufbau bzw. am Komponentenaufbau gemessenen Transferfunktionen, wobei die Signalauskopplung in beiden Fällen induktiv erfolgte. Bei den Messungen befand sich der Zuheizter in passivem Zustand. Zu erkennen ist der grundsätzlich ähnliche Verlauf der beiden Common-Mode-Messungen, wobei die im Systemaufbau gemessene Kurve verstärkt Resonanzen aufweist, die mit der verzweigten Topologie des HV-Netzes erklärt werden können. Außerdem kann die Messung durch Störsignale anderer Komponenten beeinflusst werden. Im Differential-Mode treten zwischen beiden Messungen größere Abweichungen ( $> 20$  dB) auf, die durch große Unterschiede der Differential-Mode Impedanzen (Impedanz zwischen HV+ und HV-) verursacht werden.



**Bild 8:** Vergleich der gemessenen Transferfunktion zwischen System und Komponentenaufbau

## 5 Zusammenfassung

Zur genaueren Untersuchung von Ausbreitungspfaden für elektromagnetische Störungen wurde eine Messmethode vorgestellt, mit der das Kopplungsverhalten zwischen der HV- und der LV-Ebene charakterisiert werden kann. Dazu wird HV-seitig ein HF-Störsignal im Common- bzw. Differential-Mode eingespeist und die Überkopplung in den LV-Teil gemessen. Die Signalauskopplung kann dabei kapazitiv, induktiv oder mit fahrzeugeigenen Antennen vorgenommen werden.

Das Verfahren wurde für die Untersuchung eines Gesamtfahrzeugs angewendet, im Beitrag wird die Untersuchung eines Systemaufbaus vorgestellt, der alle HV-Komponenten eines rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuges enthält.

Mit Hilfe der gemessenen Transferfunktionen können kritische Komponenten und Betriebszustände ermittelt werden und entsprechende Entstörungsmaßnahmen ergriffen bzw. bewertet werden. Bei der Untersuchung von Fahrzeugesamtsystemen ist sichergestellt, dass reale Bedingungen betrachtet werden. Dazu zählen vor allem die Verlegung der Kabelsätze und reale Eingangsimpedanzen der Komponenten. Außerdem kann das HF-Kopplungsverhalten verschiedener Fahrzeuge miteinander verglichen werden.

Für die Prüfung von Komponenten müssen außerdem die bestehenden CISPR 25 Messverfahren erweitert bzw. angepasst werden. Dabei muss beachtet werden, dass durch den Wechsel der Untersuchungsebene die Betriebsbedingungen entscheidend geändert werden. Die durchgeführte Analyse der HV-/LV-Kopplungseigenschaften an verschiedenen Untersuchungsebenen ist ein Beitrag zur Festlegung neuer Komponentenmessverfahren.

## Literatur

- [1] Youn Hee Lee, Adel Nasiri, "Conductive CM and DM Noise Analysis of Power Electronic Converters in Electric and Hybrid Electric Vehicles", IEEE 2007, pp. 392-398
- [2] G. Busatto, C. Abbate, F. Iannuzzo, L. Fratelli, B. Cascone, G. Giannini, "EMI Characterisation of High Power IGBT Modules for Traction Application", Power Electronics Specialists Conference, IEEE 2005, pp. 2180-2186
- [3] J. Nelson, M. Aidam, „HEV System EMC Investigation during Transient Operations“, Electromagnetic Compatibility EMC Zurich 2007, IEEE 2007, pp. 205-208
- [4] J. Hohloch, W. Köhler, S. Tenbohlen, M. Aidam, T. Krauß, „Charakterisierung und Vergleich leitungsgebundener Störungen an KFZ-Hochvoltbordnetzen“, EMV Düsseldorf, 2012, pp. 477 – 484
- [5] F. Kremer, J. Jia, S. Frei, "Simulationsbasierte Bewertung der zulässigen Kopplung zwischen verschiedenen Spannungsebenen in Elektrofahrzeugen, EMV Düsseldorf, 2012, pp. 375 – 382
- [6] R. Vick, T. Rinkleff, S. Krause, "Bestimmung der Entkopplung von Komponentenports mittels Stromzangenmessung", EMV 2012, pp. 383 – 390
- [7] M. Zerrer, M. Aidam, W. Koehler, S. Tenbohlen, "The benefit of characteristic transfer Functions in Automotive EMC", Antenna, Propagation & EM Theory (IS-APE), IEEE 2008, pp. 933-936
- [8] C. R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons, Inc. 2006
- [9] CISPR 25 Edition 3, Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, 2007