

Simulationsbasierte Bewertung der zulässigen Kopplung zwischen verschiedenen Spannungsebenen in Elektrofahrzeugen

Dipl.-Ing. Frank Kremer, M.Sc. Jin Jia, Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, AG Bordsysteme

1 Einleitung

Mit der Einführung elektrischer Antriebe in Fahrzeugen wird ein neues und besonders kritisches System integriert. Die pulsweitenmodulierte Ansteuerung des elektrischen Motors sowie das Zu- und Abschalten von Hochleistungsverbrauchern verursacht Störströme, die zurzeit durch geschirmte Kabel soweit reduziert werden, dass definierte Grenzwerte eingehalten werden können. DC/DC-Wandler und Trennelemente verschiedener Komponenten, wie zum Beispiel der Hochvoltbatterie, verbinden das Hochspannungs- mit dem Niederspannungsbordnetz (12 V-Bordnetz). Gerade bei höheren Frequenzen koppeln die erzeugten, transienten Störungen in die Komponenten auf die Niederspannungsseite (LV) über. Während die Kabel- und Steckerschirmung auf der Hochspannungsseite (HV) eine sehr wirksame Entstörmaßnahme darstellt, können auf der LV-Seite Störströme aufgrund der einfachen Kabel ungehindert abgestrahlt werden. Dies kann dazu führen, dass Grenzwerte für leitungsgebundene oder gestrahlte Störfelder überschritten werden [1], [2]. Die Kopplung zwischen den Ebenen muss bewertet werden. Hierzu sind geeignete EMV-Modelle sowohl der Komponenten als auch der geschirmten HV-Kabel und der ungeschirmten LV-Kabel nach Abbildung 1 notwendig.

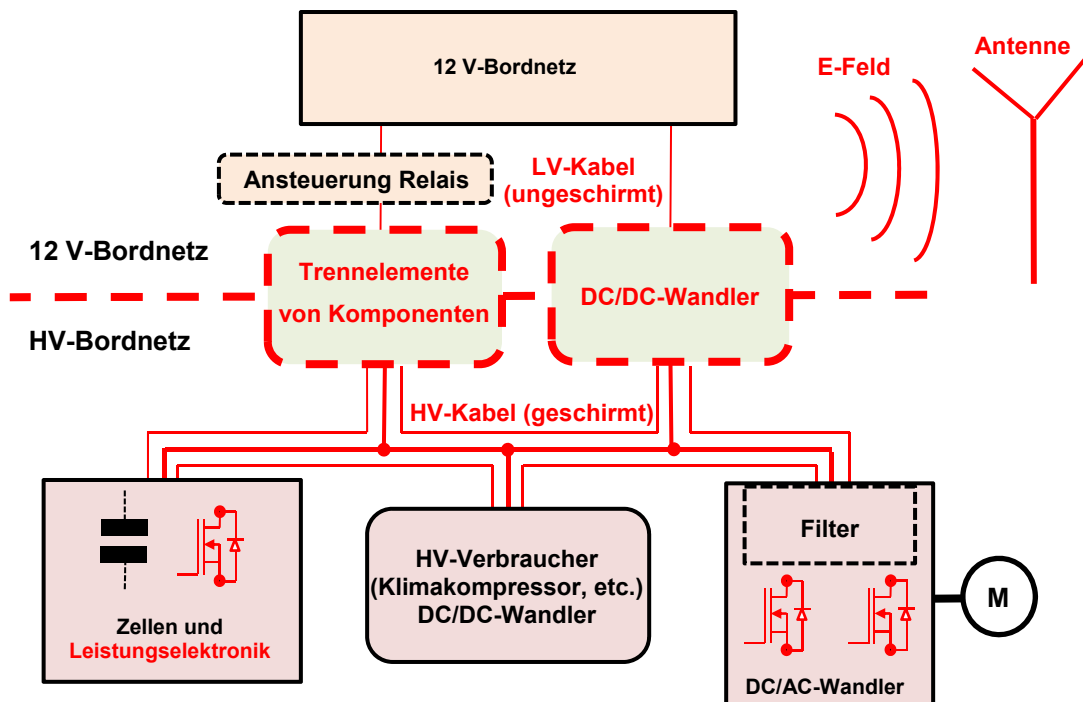


Abbildung 1: Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen

Schwachstellen von Schnittstellenkomponenten der Bordnetze können dadurch in frühen Planungsphasen rein simulatorisch erkannt werden. Ansätze für EMV-Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung der Verkopplung können auf Basis von Simulationen untersucht und dimensioniert werden. In diesem Beitrag werden Koppelmodelle für einen DC/DC-Wandler und ein HV-Relais als Trennelement vorgestellt und diskutiert.

2 Koppelmodelle

2.1 DC/DC-Wandler

Bei dem untersuchten DC/DC-Wandler sind beide Spannungsebenen, wie in Abbildung 2 dargestellt, über einen Übertrager, welcher die galvanische Entkopplung zwischen dem HV- und dem LV-Bordnetz gewährleistet, miteinander verbunden.

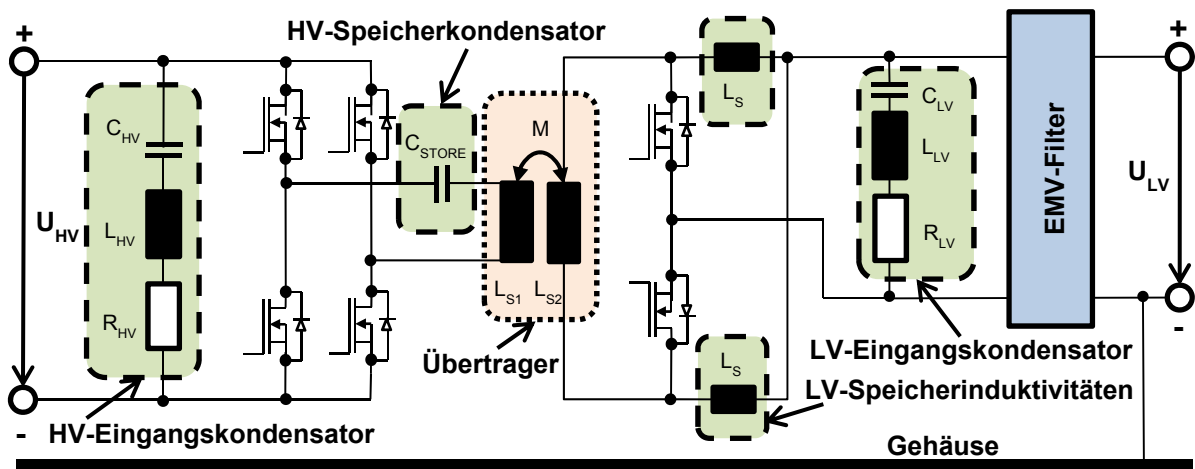


Abbildung 2: Ersatzschaltbild (ESB) eines DC/DC-Wandlers von Elektrofahrzeugen

Als Schnittstelle zwischen den Spannungsebenen bestimmt der Übertrager die Verkopplung. Durch die Gegeninduktivität M , welche durch die auftretenden magnetischen Flüsse Φ im Eisenkern entsteht, können Störungen bei niedrigen Frequenzen überkoppeln. Bei höheren Frequenzen dominiert die kapazitive Verkopplung $C_{S1, S2}$. Ein ESB des Übertragers ist in Abbildung 3 a zu sehen, dieses wurde anhand von S-Parameter-Messungen parametrisiert [3]. Der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Streuparametern S_{11} (Eingangs-Reflexionsfaktor) und S_{21} (Vorwärts-Transmission) ist in Abbildung 3 b dargestellt. Eine sehr gute Übereinstimmung bis etwa 30 MHz beider S-Parameter ist erkennbar.

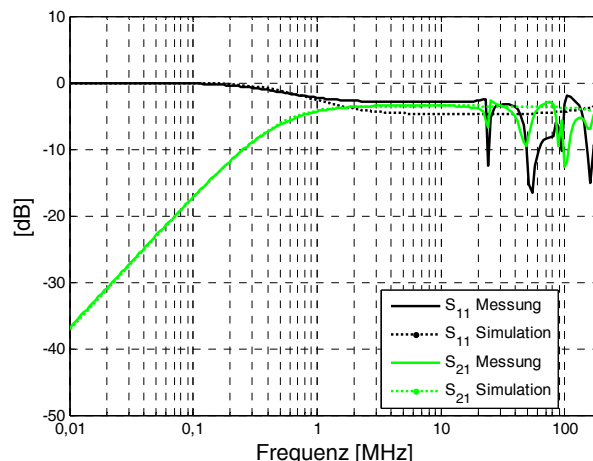
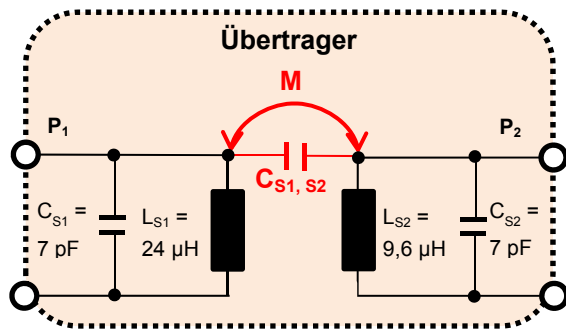


Abbildung 3: a) ESB des Übertragers, b) Gemessene und simulierte Parameter S₁₁ und S₂₁

Die Kondensatoren auf der HV- und LV-Seite des Wandlers, welche funktional zur Spannungsglättung und zur Energiespeicherung eingesetzt werden müssen mit ihren realen Eigenschaften betrachtet werden, d.h., der Einfluss parasitärer Komponenten wie der ESR (Equivalent Serial Resistor) und die Induktivitäten der Verbindungsdrähte (L_{HV}, L_{LV}) muss berücksichtigt werden. Sie sorgen für eine Erhöhung der Impedanz der Kondensatoren. Die Verkopplung der Spannungsebenen über den DC/DC-Wandler wird somit nicht ausschließlich durch den Übertrager, sondern auch durch die realen Kondensatoren auf der HV- und LV-Seite bestimmt.

In Abbildung 4 a ist das entworfene ESB des passiven DC/DC-Wandlers zur Modellierung der Verkopplung dargestellt. In Abbildung 4 b ist die gemessene und simulierte Vorwärts-Transmission dargestellt. Im niedrigen Frequenzbereich bis 1 MHz wird die Vorwärts-Transmission des DC/DC-Wandlers durch die ESR R_{HV} und R_{LV} und des induktiven Anteils der Verkopplung M beeinflusst. Im Frequenzbereich bis 10 MHz dominieren der induktive Koppelanteil M sowie die parasitären Induktivitäten L_{HV} und L_{LV} der Kondensatoren. Oberhalb von 10 MHz ist die kapazitive Verkopplung der Spannungsebenen über C_{S1, S2} sichtbar.

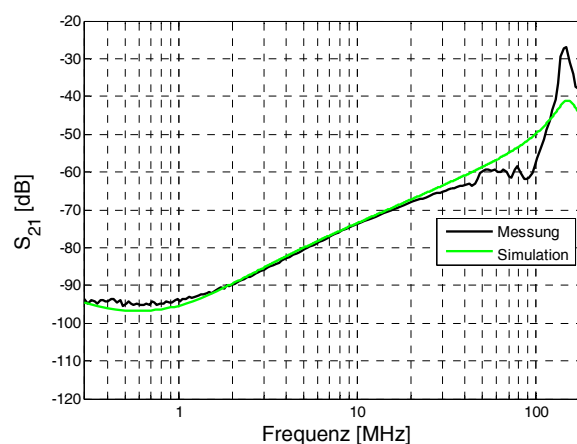
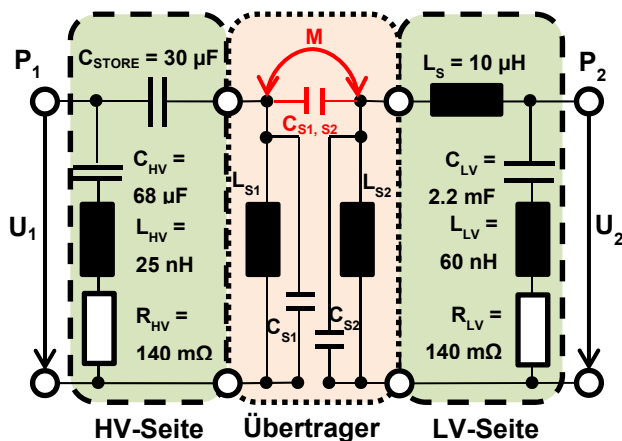


Abbildung 4: a) ESB des passiven DC/DC-Wandlers, b) S₂₁-Parameter

2.2 Trennelemente von Komponenten des HV-Bordnetzes

Trennelemente dienen zur Zu- und Abschaltung von Verbrauchern. Da im HV-Bordnetz in der Regel auch die Masse geschaltet wird, besteht ein Trennelement des HV-Bordnetzes somit oft aus zwei Schaltern. Somit lassen sich Trennelemente allgemein als Dreiport (Port 1: 12 V Bordnetz, Port 2: Hinleiter des HV-Bordnetz, Port 3: Rückleiter des HV-Bordnetz) darstellen. Basierend auf Streuparametermessungen ist ein allgemeines symmetrisches Modell eines Trennelements nach Abbildung 5 a erstellt und parametrisiert worden.

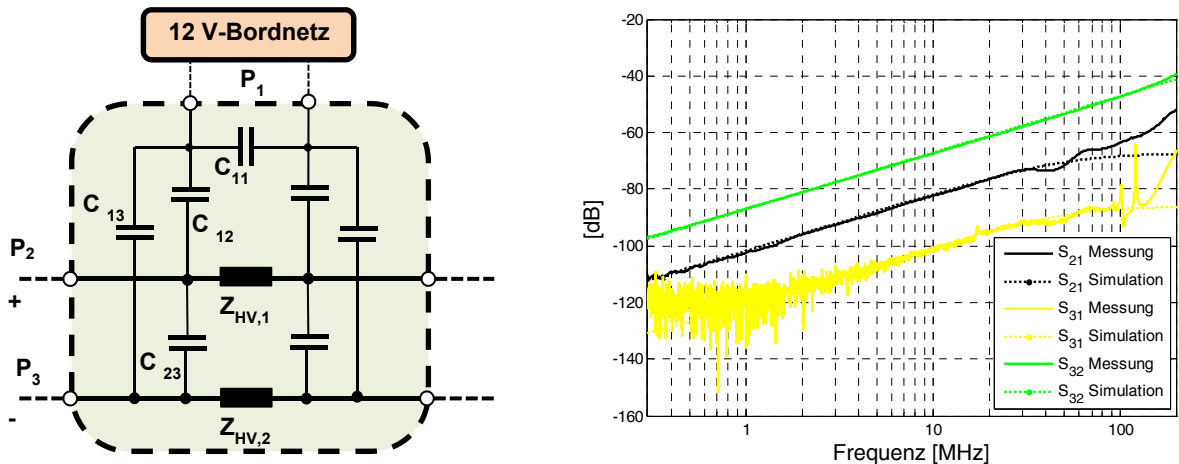


Abbildung 5: a) ESB des Trennelemente-Modells, b) Streuparameter S_{21} , S_{31} und S_{32}

Durch die rein kapazitive Verkopplung der Spannungsebenen nimmt die Vorwärts-Transmission und somit die Verkopplung, wie in Abbildung 5 b dargestellt, zu höheren Frequenzen mit 20 dB/Dekade zu. Die simulierten Parameter stimmen mit den Messdaten im Frequenzbereich bis etwa 50 MHz sehr gut überein.

3 Überkopplung transienter Störungen auf das 12 V-Bordnetz

In Abbildung 6 ist das zur Untersuchung der Überkopplung zwischen den Spannungsebenen in Elektrofahrzeugen aufgebaute reduzierte Antriebssystem dargestellt. Störungen werden über den Messeingang einer Bordnetznachbildung (BNN) kapazitiv von der HV-Quelle entkoppelt auf ein 2 m langes HV-Kabel eingespeist. Am Kabelende befinden sich entweder der DC/DC-Wandler oder ein Trennelement als Schnittstelle zwischen den Bordnetzen [2]. Auf der 12 V-Ebene werden die Komponenten nach CISPR-25 Spezifikation mit einem 1,5 m langen ungeschirmten LV-Kabel und einer weiteren BNN verbunden [1], [2]. Der übergekoppelte Anteil des Störsignals wird an dem Messabgriff dieser BNN kapazitiv von der LV-Quelle (12 V-Batterie) gemessen und ausgewertet.

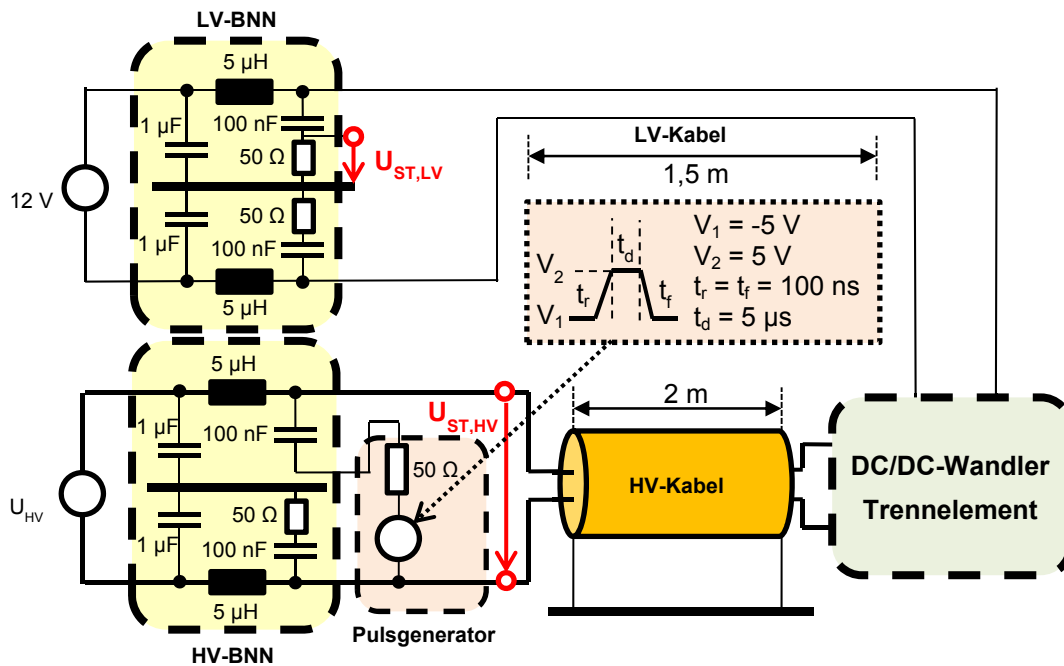


Abbildung 6: Untersuchung der Überkopplung transientser Störungen

Insbesondere das Schalten niederimpedanter Verbraucher erzeugt aufgrund der Induktivität des Bordnetzes hohe transiente Stromspitzen. In Abbildung 7 a ist der Spannungspuls auf dem HV-Bordnetz dargestellt, welcher durch das Zuschalten eines $5 \mu\text{s}$ langen Spannungspulses mit einer Flankensteilheit von 100 ns auf der HV-seitigen BNN über einen Funktionsgenerator mit 50Ω -Ausgang entsteht. Dargestellt ist nur die durch die Pegeländerung des Pulses hervorgerufene Spannungsänderung (Steigende Flanke). Durch entwickelte und parametrisierte Modelle der BNN sowie des HV-Kabels [4] kann der erzeugte Spannungspuls auf dem HV-Bordnetz gut modelliert werden.

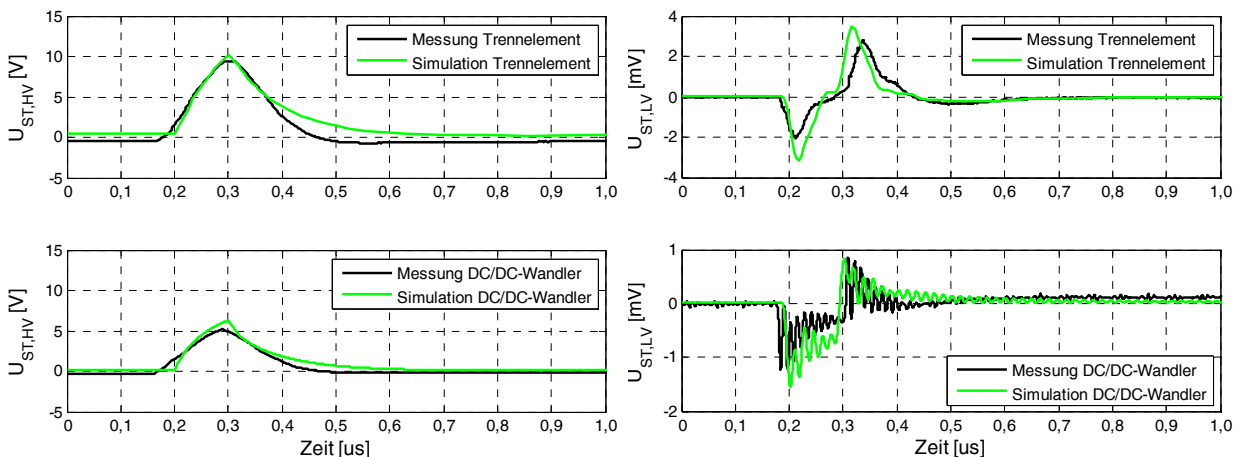


Abbildung 7: a) Einkoppelter transienter Spannungspuls auf dem HV-Bordnetz, b) Resultierende Störspannung auf dem 12 V-Bordnetz

In Abbildung 7 b sind der an der BNN der Niederspannungsseite an 50Ω gemessene und der simulierte Spannungsverlauf dargestellt. Durch die entwickelten Modelle lässt sich die Kopplung beider Komponenten für transiente Störungen ausreichend gut nachbilden.

4 Überkopplung im Frequenzbereich

Zur weiteren Bewertung der Überkopplung ist eine Betrachtung im Frequenzbereich notwendig. Hierzu wird nach Abbildung 6 eine sinusförmige Spannungsquelle ($P_{HV} = 0 \text{ dBm}$) an den Messanschluss der BNN des HV-Bordnetzes geschaltet. Die auf das 12 V-Bordnetz überkoppelnde Spannung wird am Messabgriff der BNN des 12 V-Bordnetzes gemessen. Zur Minimierung externer Störeinflüsse soll die Messung in einer Absorberkammer nach Abbildung 8 a durchgeführt werden. Die Kopplungsdämpfung eines passiven DC/DC-Wandlers und eines Trennelements ist untersucht worden.

4.1 Bewertung der Überkopplung zwischen den Bordnetzen

In der PAS [2], die als Anhang für die CISPR-25-Norm geplant ist [1], sind Vorgaben für die einzuhaltende Kopplungsdämpfung zwischen dem HV- und dem LV-Bordnetz spezifiziert worden, welche nicht unterschritten werden dürfen. Diese werden zur Bewertung der zulässigen Kopplungsdämpfung herangezogen. Die Referenzpegel der Klasse A1 und der Klasse A5 sowie die aus Mess- und Simulationsergebnissen berechnete Kopplungsdämpfung bis 30 MHz eines DC/DC-Wandlers und eines Trennelements sind in Abbildung 8 b dargestellt.

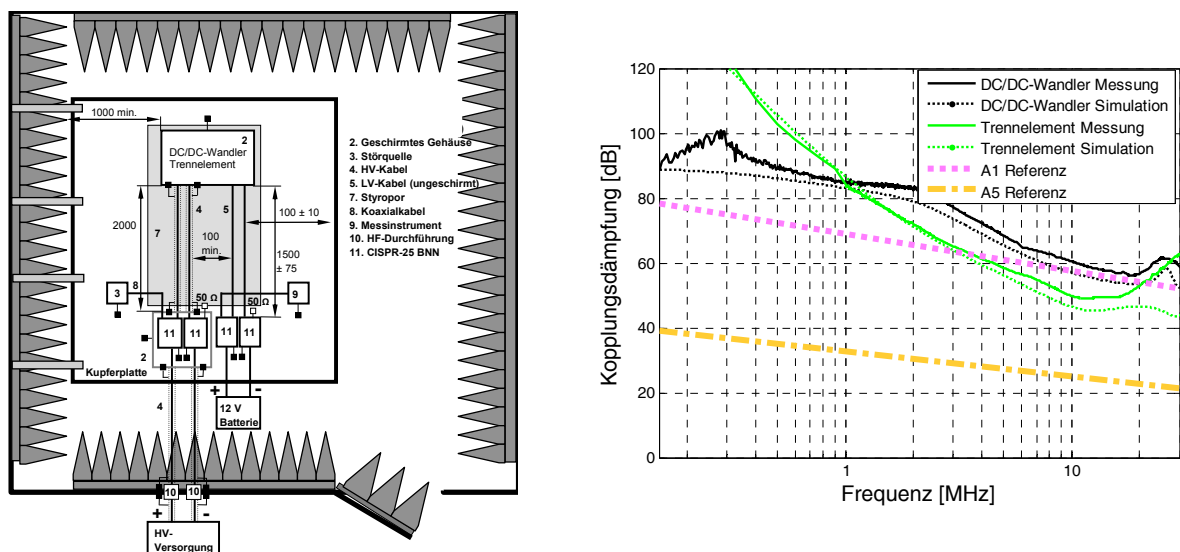


Abbildung 8: a) Messaufbau angelehnt an die CISPR-25, b) Kopplungsdämpfung eines DC/DC-Wandlers und eines Trennelements mit Referenzpegeln

Aus den Messergebnissen geht hervor, dass das Trennelement die für eine A1 Klassifizierung nach [2] definierten Voraussetzungen aufgrund der zu schwachen Kopplungsdämpfung im Bereich zwischen 4 MHz und 20 MHz nicht erfüllen würde. Die Voraussetzungen für eine A5 Klassifizierung nach [2] sind jedoch erfüllt. Der DC/DC-Wandler erfüllt sowohl die Bedingungen für eine A5 als auch die für eine A1

Klassifizierung im gesamten Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz. Der Bereich zwischen 10 MHz und 20 MHz ist jedoch als kritisch zu bewerten, da die Kopplungsdämpfung hier nur knapp überhalb der des geforderten Pegels liegt.

Die simulatorische Bewertung stimmt gut mit der Messung überein. Der gesamte Messaufbau kann bis ca. 30 MHz nachgebildet werden. Die Simulationsbasierte Vorhersage der Kopplung ist somit möglich.

4.2 Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung der Verkopplung

Durch Vergrößern der Eingangskapazität C_{11} des Trennelements oder durch Filterung auf dem Hochspannungsbordnetz [5], kann die Koppeldämpfung gezielt verringert werden. Zur Erhöhung der Kopplungsdämpfung im niederfrequenten Bereich können die Koppelkapazitäten C_{12} und C_{13} nach Abbildung 5 a durch geeignete Maßnahmen verkleinert werden. Zur Erhöhung der Koppeldämpfung des DC/DC-Wandlers können zur Verringerung des ESR der Kondensatoren C_{HV} und C_{LV} Tantal- und Keramikkondensatoren parallel verbaut werden. Zusätzlich kann ein Filter integriert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Kopplung zwischen den Spannungsebenen in Elektrofahrzeugen über einen DC/DC-Wandler und über ein Trennelement untersucht. Einfache Netzwerkmodelle zur Simulation des Koppelverhaltens wurden entwickelt und anhand von Messungen an Testobjekten verifiziert. Gerade im niederfrequenten Ansteuerbereich des Motors (100 kHz – 1 MHz), in dem ein hoher Störpegel auf den HV-Kabeln vorliegt, lässt sich die Kopplung durch die Komponenten sehr gut abbilden. Ab etwa 20 - 30 MHz nehmen die Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen zu. Für den Bereich oberhalb dieser Frequenz sind genauere Simulationsmodelle notwendig.

Bei niedrigen Frequenzen lassen sich mögliche Schwachstellen gezielt simulatorisch analysieren. Der Einfluss von beispielsweise Filtern auf die Verkopplung lässt sich durch die vorgestellte Simulationskette gut untersuchen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde zum Teil mit Unterstützung des AK-23 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) im VDA durchgeführt.

Literaturverzeichnis

- [1] CISPR 25 Ed.3, Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, 2007
- [2] VDE/DKE AK 767.13.18 electric mobility in cooperation with CISPRD/WG2/TF, Public Available Specification (PAS) for Electric Vehicle Component Test Methods, Procedures and Limit Lines, International Electrotechnical Commission (IEC), August 2011
- [3] Y. Lin, H. Liang, T. Wang, S. Lu, An Analysis of Perfect-Magnetic-Coupling Ultra-Low-Loss Micromachined SMIS RF Transformers for RFIC Applications, IEEE Radio and Wireless Symposium, 2006
- [4] F. Kremer, S. Frei, Modellierung von Komponenten des Hochspannungsbordnetzes zur simulationsbasierten Bestimmung der Störaussendung in Elektro- und Hybridfahrzeugen, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, 2010
- [5] V. Serrao, A. Lidozzi, A. Di Napoli, EMI Filters Architectures for Power Electronics in Hybrid Vehicles, IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC 2008, 2008