

# Modellierung des Störaussendungsverhaltens von Kfz-Hochspannungsbordnetzen in VHDL-AMS

Frank Kremer, TU Dortmund  
frank.kremer@tu-dortmund.de  
Stephan Frei, TU Dortmund  
stephan.frei@tu-dortmund.de

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Modellierung und Simulation von Elektrofahrzeugkomponenten in VHDL-AMS zur Bestimmung des EMV-Störaussendungsverhaltens.

Ein elektrisches Antriebssystem besteht im Wesentlichen aus der Hochspannungsbatterie, den notwendigen Wandlern, der Verkabelung und einem Elektromotor, der meist auch als Generator für den elektrischen Antrieb arbeitet. Die Hochspannungsversorgungsleitungen (HV-Leitungen) bilden die kritischen Koppelstrukturen. Diese strahlen Störungen ab, welche hauptsächlich durch Schaltvorgänge der Wandler hervorgerufen werden.

Zur Nachbildung des Störaussendungsverhaltens des elektrischen Systems sind Modelle aller Einzelkomponenten, die das EMV-Verhalten genau abbilden, notwendig. Die Modellbildung der notwendigen Komponenten, wie zum Beispiel der HV-Batterie, der HV-Leitung der Batterie sowie des DC/AC-Wandlers werden hier beschrieben, und die zur Verifikation notwendigen Messungen an den Komponenten werden gezeigt. Anwendungen der Methodik werden diskutiert.

## 1 Einleitung

Zur Modellierung des EMV-relevanten Verhaltens der HV-Batterie werden zum einen einfache Netzwerkmodelle, zum anderen geeignet dimensionierte und parametrisierte Makromodelle untersucht. Das Koppelverhalten der HV-Leitung wird als Zustandsraummodell in VHDL-AMS umgesetzt. Die angewandte Methode zur Erzeugung von Zustandsraummodellen aus Streuparameterdaten sowie die Umsetzung in VHDL-AMS Quellcode werden hier beschrieben. Ein einfaches DC/AC-Wandlermodell, welches das Schaltverhalten der B6-IGBT-Schaltung modelliert, wird vorgestellt. Anschließend wird das leitungsgebundene Störaussendungsverhalten des DC/AC-Wandlermodells über die HV-Leitung der Batterie untersucht und anhand von Messungen an einem geeigneten Laboraufbau bewertet.

## 2 Komponentenmodellierung aus EMV Gesichtspunkten

### 2.1 Kfz-Hochspannungsbatterie

Zur Charakterisierung einer HV-Batteriezelle wurde das in Abbildung 1 dargestellte Impedanzmodell entwickelt [2]. Das EMV-relevante Verhalten im Frequenzbereich bis 30 MHz wird durch ein RLC-Netzwerk realisiert [3]. Zwei seriell gekoppelte, parallele RC-Glieder bilden das Verhalten im NF-Bereich bis zu einigen Kilohertz ab [4]. Langzeitentladungsvorgänge werden durch eine stromgesteuerte Spannungsquelle [5] abgebildet.

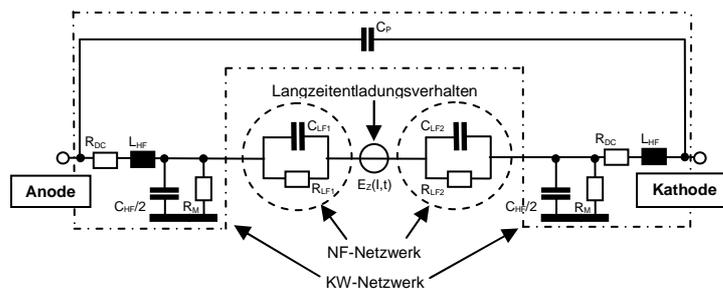


Abbildung 1: VHDL-AMS Modell der Kfz-Hochspannungsbatteriezelle

$R_{DC}$  und  $L_{HF}$  stellen die Batterieimpedanz dar. Die Kapazität  $C_{HF}$  beschreibt die Kopplung der Batteriezelle zur Fahrzeugkarosserie.  $C_P$  stellt die Plattenkapazität der Batteriezelle dar. Ein Batteriemodul-Modell wird durch eine serielle Verknüpfung einzelner Zellen erstellt.

Das durch Messungen an einem Kfz-Li-Ionen Batteriemodul parametrisierte Netzwerkmodell sowie das äquivalente Makromodell wurden im Frequenzbereich bis 30 MHz mit Messungen verifiziert. In Abbildung 2 ist der an dem Modul gemessene Streuparameter  $S_{21}$  mit den durch die Modelle approximierten gegenübergestellt. Beide Modelle bilden den Frequenzgang im gezeigten Bereich gut ab.

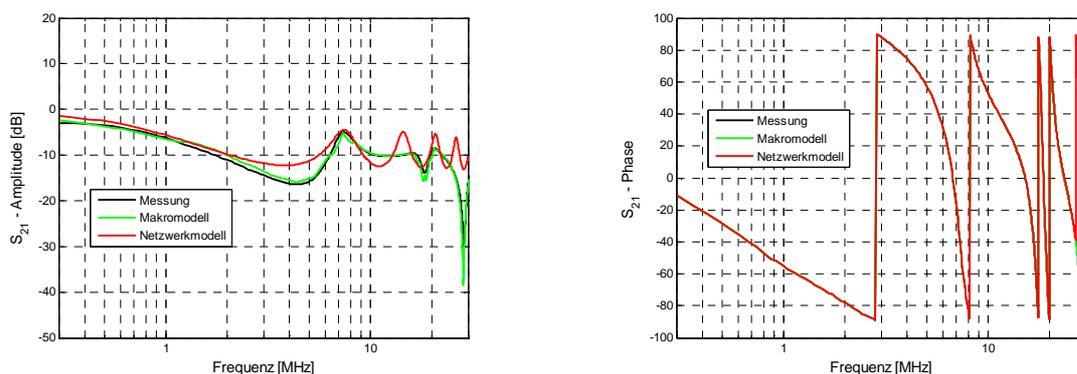


Abbildung 2: Vergleich zwischen gemessenen und approximierten  $S_{21}$  Parametern

### 2.2 Batterieseitige HV-Leitung und kapazitive Antennenkopplung

Hier wird basierend auf Berechnungen mit dem EMV-Berechnungsprogramm EMC Studio, das Verhalten der HV-Leitung in ein VHDL-AMS-Modell überführt [1]. Die

Übertragungseigenschaften sowie die lineare Störaussendung der geschirmten Leitung im Frequenzbereich werden über Streuparameter berechnet. Diese können mithilfe einer erweiterten Variante des Programmes Vectfit [8] in ein Zustandsraummodell vorgegebener Ordnung transferiert werden. Aus diesen Zustandsraummodellen können wiederum äquivalente VHDL-AMS Modelle erstellt werden. Die angewandte Prozesskette ist in Abbildung 3 dargestellt.

Durch Messung der Streuparameter der HV-Leitung kann das Übertragungsverhalten des Leitungsmodells direkt untersucht werden. Exemplarisch sind in Abbildung 4 die Reflexionsparameter  $S_{11}$  sowie der Übertragungsparameter  $S_{21}$  dargestellt. Untersucht wurde eine zweiadrige HV-Leitung der Firma Kromberg & Schubert (Sortiment „KROCAR“) mit Geflechtsschirm.

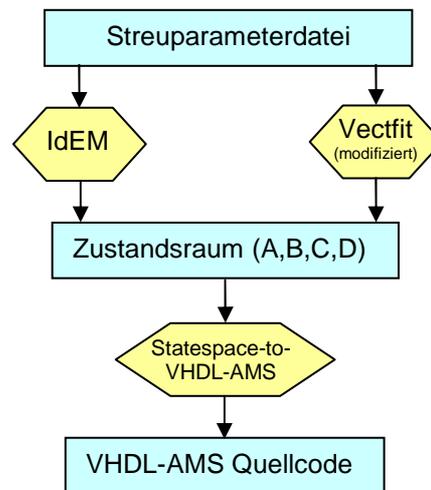


Abbildung 3: Prozesskette zur Erstellung von VHDL-AMS Quellcode

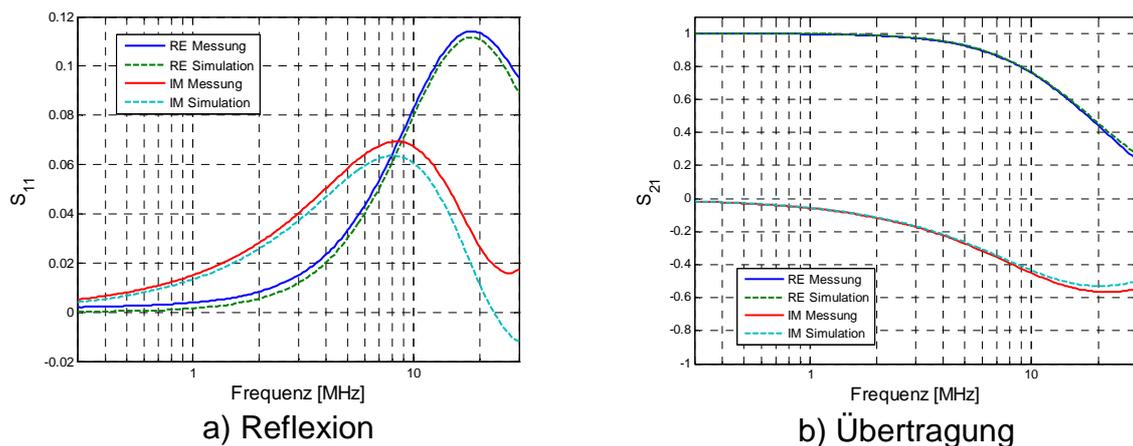


Abbildung 4: Vergleich von gemessenen zu berechneten Streuparametern

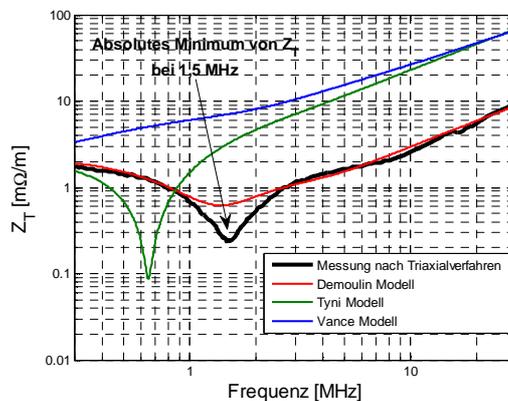
Über die Transferimpedanz des Kabelschirms ( $Z_T$ ) nach Gleichung (1) kann das Störaussendungsverhalten geschirmter Leitungen charakterisiert werden [9].

$$Z_T = \frac{1}{I_i} \cdot \left. \frac{dU_s}{dz} \right|_{I=0} \left[ \frac{\Omega}{m} \right] \quad (1)$$

Zur analytischen Bestimmung von  $Z_T$  der HV-Leitung wurden die Ansätze von Vance, Tyni und Demoulin [9] untersucht. Zur Verifikation der Ansätze ist eine Messung von  $Z_T$  nach dem Triaxialverfahren gemäß DIN EN 50289-1-6 [10] in einem Messingrohr durchgeführt worden. Aus den in Abbildung 5b) dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass  $Z_T$  für die untersuchte HV-Leitung nach dem Ansatz von Demoulin gut nachgebildet werden kann. Dieser Ansatz wird zur Modellbildung verwendet.



a)



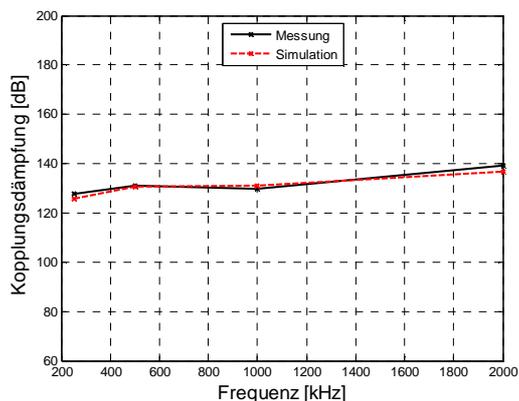
b)

Abbildung 5: a) Messaufbau, b) Gemessene und modellierte Transferimpedanzen

Zur Modellverifizierung des Antennenkoppelverhaltens ist eine Messung nach CISPR-25 (Abbildung 6a) in einer Absorberkabine (ALSE) durchgeführt worden [7]. Als Signalquelle ist ein rauscharmer Sinusgenerator mit einer oberen Grenzfrequenz von 2 MHz verwendet worden. Der über den in der Norm vorgeschriebenen hochohmigen Impedanzwandler gemessene Antennenpegel ist in Abbildung 6b) dargestellt. Im Frequenzbereich bis 2 MHz kann die Antennenkopplung gut modelliert werden.



a)



b)

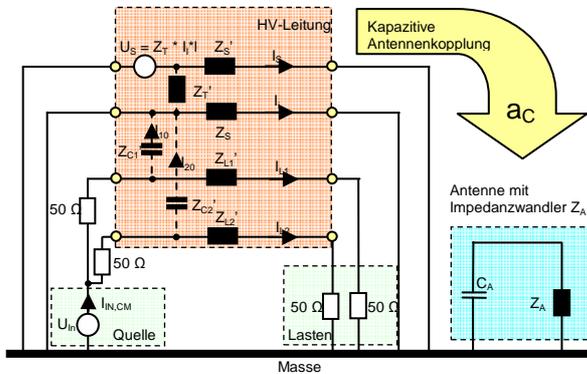
Abbildung 6: a) Messaufbau, b) Gemessene und simulierte Kopplungsdämpfung

Für höhere Frequenzen ist das Modell anhand eines analytisch berechneten Antennenpegels verifiziert worden. Wird lediglich die kapazitive Antennenkopplung

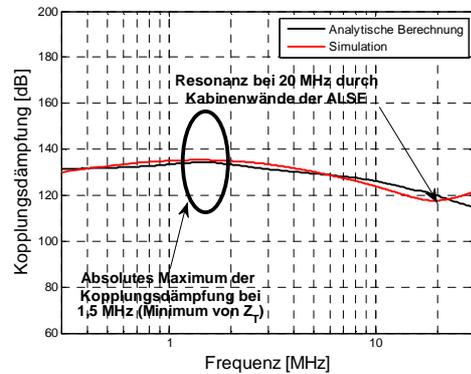
betrachtet und der Einfluss der ALSE-Wände vernachlässigt, ergibt sich die Antennendämpfung nach der in Abbildung 7a) dargestellten Konfiguration zu:

$$|a_S(f)| = U_{IN,eff} [dB\mu V] - 20 \cdot \log_{10} \left( U_{IN,eff} \cdot \frac{Z_T' + Z_S'}{Z_L + 50\Omega} \cdot l \right) - a_c(f) \quad (2)$$

Auch für höhere Frequenzen bis 30 MHz kann die Antennenkopplung des HV-Leitungsmodells gut modelliert werden.



a) HV-Leitung mit Antennenkopplung

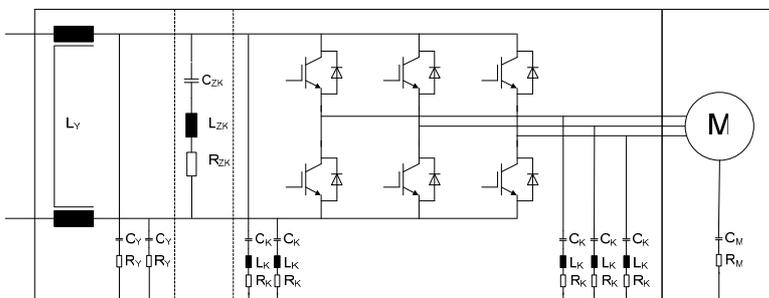


b) Kopplungsdämpfung

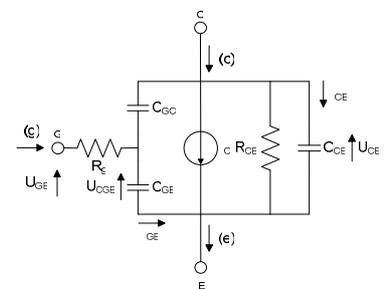
Abbildung 7: a) ESB b) Vergleich der Kopplungsdämpfung (Berechnung zu Modell)

### 2.3 DC/AC-Wandler

Ausgehend von dem in Abbildung 8a) dargestellten Ersatzschaltbild ist das Schaltungsmodul des DC/AC-Wandlers modelliert worden. Die B6-Schaltung zur Erzeugung des dreiphasigen Motorstroms ist dabei nach dem in Abbildung 8b) dargestellten ESB direkt in VHDL-AMS umgesetzt worden. Neben den parasitären Kapazitäten der IGBTs sind weitere Kapazitäten in dem Wandlermodell implementiert worden, wie zum Beispiel die Anbindung des Rückleiters an das Gehäuse. Sie beeinflussen maßgeblich die Ausbreitung von Gleichtaktstörungen auf den jeweiligen Zuleitungen des Wandlers [11]. Durch Messungen an dem DC/AC-Wandler mit einem Netzwerkanalysator sind die entsprechenden Parameter für das Modell bei einer Betriebsspannung von 0 V bestimmt worden.



a) ESB des Schaltungsmoduls des DC/AC-Wandlers



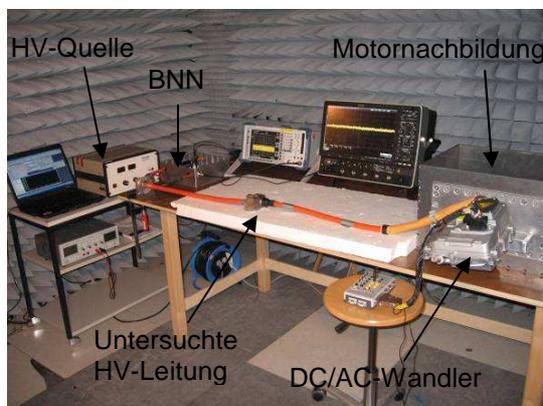
b) ESB der IGBTs

Abbildung 8: Als VHDL-AMS Modell umgesetztes ESB des DC/AC-Wandlers

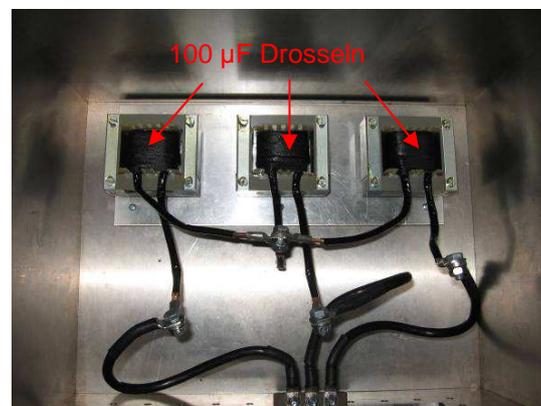
### 3 Modellierung der Störaussendung eines Kfz-Hochspannungsbordnetzes

#### 3.1 Versuchsaufbau

Als Hochfrequenz-Motornachbildung sind hier nach Abbildung 9b) drei Drosseln in Sternschaltung in einem Metallgehäuse verbaut worden. Die Motornachbildung ist hier ohne Motorkabel direkt mit dem DC/AC-Wandler verbunden. Als Abschluss sind CISPR-25 Bordnetznachbildungen (BNN) verwendet worden. Leitungsgebundene Gleichtaktstörungen, welche sich von dem DC/AC-Wandler über die HV-Leitung der Batterie in Richtung der BNN ausbreiten, können dort über zwei Messabgriffe kapazitiv entkoppelt erfasst werden. Als 100 V Spannungsversorgung ist hier ein linear geregeltes Netzteil verwendet worden. Bei den durchgeführten Untersuchungen ist die Motornachbildung mit einer virtuellen Umdrehungszahl von 3000 U/min und einem Spitzenstrom von 10 A im Motorbetrieb betrieben worden.



a) Gesamter Aufbau des Systems



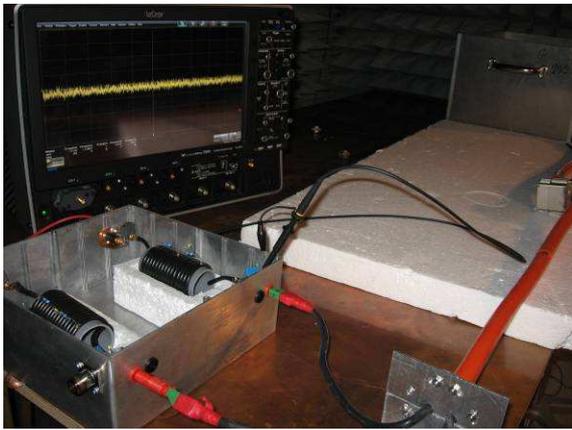
b) Aufbau der Motornachbildung

Abbildung 9: Untersuchtes Kfz-Hochspannungsbordnetz

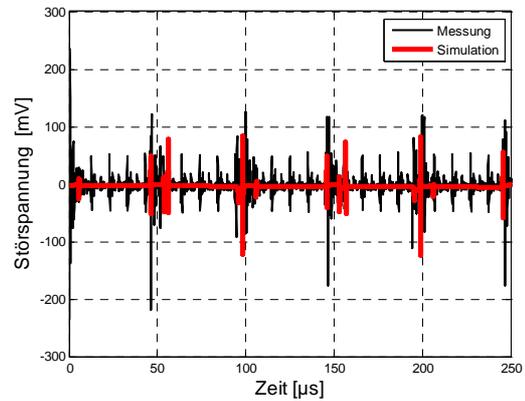
#### 3.2 Störspannung auf der HV-Leitung zur Batterie

Zunächst ist die leitungsgebundene Störaussendung an der BNN nach Abbildung 10a) im Zeitbereich untersucht worden. Der erkennbare, dominante Störimpuls mit einer Periode von 20 kHz wird durch die B6-Schaltung erzeugt und durch das Modell abgebildet. Ein weiterer Störimpuls mit einer geringeren Amplitude und einer Periode von etwa 100 kHz wird durch einen im Wandler integrierten, nicht modellierten DC/DC-Wandler zur Erzeugung der Versorgungsspannung der Steuerelektronik erzeugt.

Zur normenkonformen Untersuchung des Wandlers ist der Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz an der BNN mit einer Bandbreite von 9 kHz aufgenommen worden (Abbildung 11b). Simulationsergebnisse sind über eine Motorstromperiode mittels Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich umgewandelt worden.

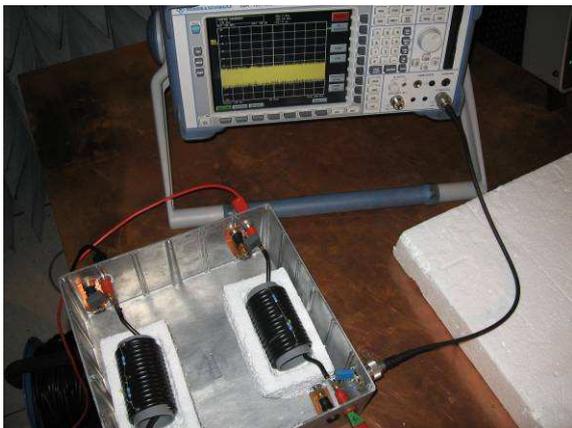


a) Messabgriff an der BNN

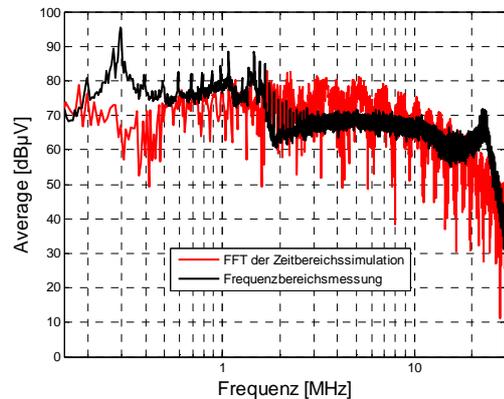


b) Störspannung im Zeitbereich

Abbildung 10: Störspannung an der BNN im Zeitbereich



a) Messabgriff an der BNN



b) Störspannungsspektrum

Abbildung 11 Breitbandstörpektrum an der BNN bis 30 MHz

Die leitungsgebundene Störausbreitung lässt sich im Frequenzbereich bis 1 MHz ausreichend gut modellieren. Lediglich bei der Grundwelle sowie der 2. Oberwelle des IGBT-Störpektrums sind Abweichungen vorhanden. Die Einflüsse des Nebenzerstörers sowie weitere Störquellen werden ab etwa 1,5 MHz sichtbar. Aufgrund der nicht modellierten Nebenzerstörer ergeben sich hier ab etwa 1,5 MHz größere Abweichungen der Störspektren.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Methoden zur Modellierung von Komponenten des Kfz-Hochspannungsbordnetzes in VHDL-AMS wurden vorgestellt und anhand von Messungen im Frequenzbereich bis 30 MHz verifiziert. Die Batteriemodelle bilden das EMV-relevante Verhalten hinreichend genau ab. Das Leitungsmodell bildet neben dem Übertragungsverhalten auch das Störaussendungs- und Koppelverhalten mit hoher Genauigkeit ab. Das leitungsgebundene Störaussendungsverhalten eines mit den Komponenten aufgebauten Kfz-Hochspannungsbordnetzes kann durch die präsentierten Modelle jedoch nur näherungsweise abgebildet werden. Zur exakteren Bestimmung ist noch eine bessere Modellierung der durch den DC/AC-Wandler auf der batterieseitigen

HV-Leitung erzeugten Störungen erforderlich. Methoden zur Isolierung einzelner Störquellen wie dem durch den DC/DC-Wandler hervorgerufenen Nebenstörer sind notwendig.

## Literatur

- [1] 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
- [2] F. Kremer, S. Frei: *Simulation of Emissions of Power Electronic Devices in Electrical and Hybrid Electrical Vehicles*, 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12 - 16, 2010, Beijing
- [3] E. Hoene, S. Guttowski, R. Saikly, W. John, H. Reichl: *Rf-Properties of Automotive Traction Batteries*, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2003, Mai 2003
- [4] J. Schiffer, M. Thele, D. Sauer: *Methodik der impedanzbasierten Modellierung für Batterien*, ASIM Fachgruppentreffen, München, 20./21.2.2006
- [5] O. Tremblay, L. Dessaint, A. Dekkiche: *A generic battery model for the dynamic simulation of Hybrid Electric vehicles*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007
- [6] Y. Lee, M. Cheng: *Intelligent Control Battery Equalization for Series Connected Lithium-Ion Battery Strings*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 5, October 2005
- [7] 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
- [8] B. Gustavsen, A. Semlyen: *Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999
- [9] F. Tesche, M. Ianoz, T. Karlsson: *EMC analysis methods and computational models*, John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [10] DIN EN 50289-1-6: *Kommunikationskabel, Spezifikationen für Prüfverfahren, Teil 1-6: Elektrische Prüfverfahren – Elektromagnetisches Verhalten*, Deutsche Fassung EN 50289-1-6, 2002
- [11] H. Rakouth, L. Comstock, C. Cammin: *Characteristics of AC grounding in automotive ECU*, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Montreal (Canada), 2001