

Modellierung von Komponenten des Hochspannungsbordnetzes zur simulationsbasierten Bestimmung der Störaussendung in Elektro- und Hybridfahrzeugen

Dipl.-Ing. Frank Kremer, Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei,
Technische Universität Dortmund, Dortmund

1 Einleitung

In der Zukunft wird sich die Antriebstechnologie in Kraftfahrzeugen immer häufiger nicht mehr ausschließlich auf den Verbrennungsmotor als Antriebsquelle konzentrieren. Elektromotoren werden einen immer höheren Stellenwert bekommen. Die Zwischenlösung bei dem Übergang vom reinen Verbrennungsmotor auf den Elektromotor stellt der Hybrid-Antrieb dar. Er besitzt einen Hochspannungs-Energiespeicher und einen Elektromotor, der meist auch als Generator für den elektrischen Antrieb arbeitet. Die Energie in einem solchen Konzept wird über Hochspannungsversorgungsleitungen und Wandler dem Elektromotor, beziehungsweise dem konventionellen 14 V Bordnetz zur Verfügung gestellt. Das Hochspannungsbordnetz kann zu kritischen Störungen im Fahrzeug führen. Ziel des hier beschriebenen Projekts ist es, wichtige Komponenten des Bordnetzes zu modellieren, so dass problematische Konfigurationen hinsichtlich der EMV rein simulatorisch erkannt werden können. Auf Basis der Simulationsergebnisse können Maßnahmen zur Verbesserung der EMV durchgeführt werden. Der Schwerpunkt der hier gezeigten Untersuchungen liegt auf dem Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz. Die bei diesen niedrigen Frequenzen entstehenden Störungen durch Leistungselektronik sind besonders schwer zu reduzieren. Deshalb ist im Entwicklungsprozess eine möglichst frühe Aussage zu dem Störpotential außerordentlich wichtig.

In der Automobilindustrie beginnt sich VHDL-AMS als Modellierungssprache für Funktionssimulationen zu etablieren. Für die Integration der EMV-Simulation in den Fahrzeugentwicklungsprozess bietet VHDL-AMS somit Vorteile. VHDL-AMS kombiniert Möglichkeiten zur Beschreibung von digitalen und analogen Verhaltensweisen sowie zur kombinierten Modellierung elektrischer und nicht elektrischer Eigenschaften eines Systems („Multi-domain simulator“). Das analoge Verhalten wird auf Basis von DAE (Differential Algebraic Equations) beschrieben. Das heißt, es wird von einer Zeitabhängigkeit der Systeme ausgegangen. Ortsabhängigkeiten von physikalischen Größen können nur durch Einbindung weiterer Berechnungsmethoden zur Lösung partieller Differentialgleichungen berücksichtigt werden. Verfahren zur Makromodellbildung müssen angewendet werden, um die verschiedenen Simulationsmethoden miteinander verbinden zu können. Ein praxistauglicher Weg, der aus Koppelmatrizen simulierbare VHDL-AMS-Modelle generiert, wird hier vorgestellt.

2 Modellierung von Komponenten für den elektrischen Antrieb in VHDL-AMS

Im folgenden Kapitel werden Strategien zur Erstellung von Modellen wichtiger Komponenten des Hochspannungsbordnetzes in VHDL-AMS für EMV Simulationen vorgestellt. Komponenten, deren räumliche Ausdehnung vernachlässigt werden können, werden direkt in VHDL-AMS modelliert. Ist die räumliche Ausdehnung relevant, müssen Methoden zur Berechnung von räumlichen Stromverteilungen integriert werden. Die Verbindung zu VHDL-AMS erfolgt dann durch äquivalente Netzwerkbeschreibungen, die aus dem berechneten Koppelverhalten zwischen den relevanten Klemmen oder Zweipolen gebildet werden können. Um aus den in diskreten Frequenzschritten gewonnenen Koppeldaten ein dynamisches Modell für den Zeitbereich zu erzeugen, werden Methoden zur Approximation eingesetzt.

2.1 Modellierung einer Li-Ionen Akku-Zelle

Modelliert wurde zunächst ein Li-Ionen Akkumulator für Notebook-Anwendungen. Mehrere zusammengeschaltete Notebook-Akku-Zellen werden zurzeit oft als Energiespeicher für Fahrzeugantriebe verwendet [1]. Der untersuchte Akku besitzt eine Leerlauf-Gleichspannung von 14,4 V. Die einzelnen Li-Ionen Zellen weisen eine Leerlauf-Zellspannung von 3,6 V auf [2]. Eine Zelle kann über den Ansatz der impedanzbasierten Modellierung [3,4] als Netzwerk aus statischen, passiven Bauteilen modelliert werden.

Das entwickelte Modell für eine Einzelzelle besteht aus mehreren Teilnetzwerken. Das Netzwerk für den NF-Bereich setzt sich, basierend auf den Untersuchungen aus [3], aus zwei in Reihe geschalteten RC-Gliedern zusammen. Die Bauteile werden gemäß den aus der Literatur verfügbaren Ortskurven für Li-Ionen-Batterien parametrisiert. Das reine Quellverhalten wird durch eine nichtlineare, stromgesteuerte Spannungsquelle nachgebildet. Der Verlauf der Ladespannung über die Zeit bei langsamen Entladevorgängen wird als Formel [2] in dem VHDL-AMS-Modell implementiert. Im HF-Bereich wird die Zelle als RLC-Glied modelliert. Durch Kombination der einzelnen Teilnetzwerke ergibt sich das in Abbildung 1 dargestellte Gesamtersatzschaltbild der Li-Ionen Zelle.

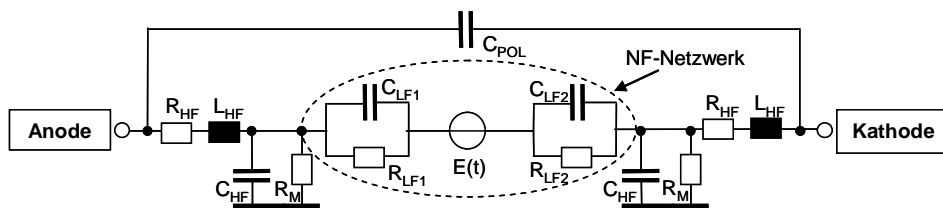


Abbildung 1: Ersatzschaltbild der VHDL-AMS Li-Ionen Zelle

Die RLC-Parameter der Zelle, die das EMV-relevante Verhalten repräsentieren, werden aus Messwerten des Akkus berechnet. Die statischen Werte des RLC Netzwerks der Einzelzelle und des untersuchten Zellenpakets sind in Tabelle 1 dargestellt. Das direkt in VHDL-AMS entwickelte, neue Modell deckt das Verhalten des Akkus im Frequenzbereich von 300 kHz bis 30 MHz ab. Auch im NF-Bereich (1 mHz-300 kHz) liefert das Modell ein realitätsnahes Verhalten.

2.2 Modellierung eines 130 V Li-Ionen Akku-Zellenpakets

Mit dem Li-Ionen-Zellenmodell wurde ein Zellenpaketmodell für Kfz-Anwendungen mit einer Ladespannung von 130 V und einem DC-Widerstand von 53 mΩ gebildet. Zur Realisierung müssen 36 Li-Ionen Zellen seriell zur Bereitstellung der Ladespannung und 161 Zellen parallel zur Abbildung des DC-Widerstands geschaltet werden. Eine 36x161 Zellenmatrix bildet somit das Batteriepaket. Die berechneten statischen RLC-Parameter der Batterie im HF-Bereich, die sich durch Verknüpfung der Zellen ergeben, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Parameter	3,6 V Li-Ionen Zelle	14,4 V Li-Ionen Zellenpaket (4x1 Zellenmatrix)	130 V Li-Ionen Zellenpaket für Kraftfahrzeuge (36x161 Zellenmatrix)
	Berechneter Wert	Gemessener Wert	Berechneter Wert
R_{HF} [mΩ]	237,5	950	53,11
L_{HF} [pH]	725	2900	162,11
C_{HF} [pF]	100	25	447,22
R_M [kΩ]	10	10	10
V_{DC} [V]	3,6	14,4	129,6

Tabelle 1: RLC-Parameter der einzelnen Li-Ionen Zelle, des 14,4 V Li-Ionen Zellenpakets und des 130 V Li-Ionen Zellenpakets

Die Kaskadierung der Zellen in VHDL-AMS wird über den „GENERATE“ Befehl umgesetzt. Interne Knoten vom Typ „ELECTRICAL_VECTOR“ dienen als Verknüpfungspunkte der einzelnen Zellmodule.

2.3 Kfz-Hochspannungs-Versorgungsleitungen

Ansätze, bei denen die Einkopplung elektromagnetischer Felder in Mehrleitersysteme in VHDL-AMS durch äquivalente Quellen nachgebildet wird, sind beispielsweise in [5] beschrieben. Hier wird ein Ansatz vorgestellt, in dem, basierend auf Berechnungen mit dem kommerziellen EMV-Berechnungsprogramm EMC Studio, das Störaussendungsverhalten in ein VHDL-AMS-Modell überführt wird.

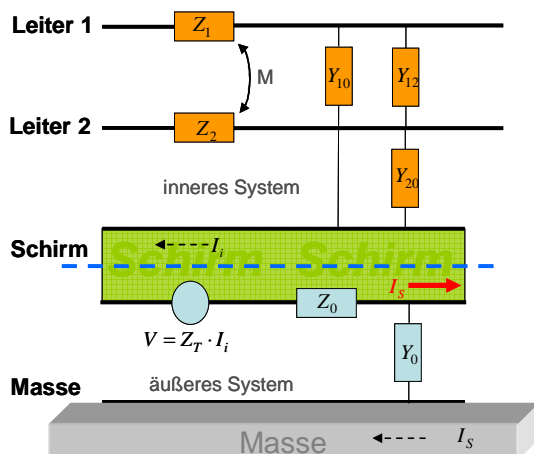


Abbildung 2: Allgemeines Ersatzschaltbild eines geschirmten Doppelleiters

Der Einfluss von Steckverbindungen in der Leitung wird durch erhöhte Übergangswiderstände modelliert.

Es werden häufig zwei Arten von Kfz-Hochspannungs-Versorgungsleitungen eingesetzt; zum einen geschirmte Doppelleiter als Verbindung von HV-Batterie und Wandler, zum anderen geschirmte Dreifachleiter als Verbindung von DC/AC-Wandler und Motor. Die Schirmung ist dabei als Geflechschirm ausgeführt. Ein allgemeines Ersatzschaltbild eines geschirmten Doppelleiters ist in Abbildung 2 dargestellt. Bei höheren Frequenzen sind die Ströme auf der Innenseite und Außenseite des Schirms voneinander entkoppelt. Der äußere Schirmstrom ist für die Störaussendung verantwortlich und muss durch eine geeignete Methode bestimmt werden.

Die Verkoppelung zwischen dem inneren und dem äußeren System wird durch die Transferimpedanz Z_T beschrieben. Demoulin hat in [6] einen detaillierten analytischen Ansatz zur Beschreibung von $Z_T(f)$ aufgestellt. Da die Berechnung von Kopplungsproblemen geschirmter Leitungen sehr komplex ist, wird das Programm EMC Studio verwendet. $Z_T(f)$ wird hierbei nach dem analytischen Algorithmus von Demoulin berechnet. Die Übertragungseigenschaften sowie I_s und Z_T werden anhand von Geometriedaten der geschirmten Leitung berechnet. Nach Modellierung der Leitung wird ein Modell der Gesamtkonfiguration im Programm implementiert. Dieses beinhaltet zusätzlich ein einfaches Modell für eine Antennenstruktur als Störsenke. Die Übertragungseigenschaften sowie die lineare Störaussendung der geschirmten Leitung im Frequenzbereich werden im Programm über Streuparameter berechnet. Da die Rückwirkung der Antenne im Vergleich zur Leitung vernachlässigbar ist, kann diese vernachlässigt werden. Für einen geschirmten Doppelleiter ergibt sich somit der in Abbildung 3 dargestellte Aufbau der Streuparametermatrix. Die Störeinkopplung in die Antennenstruktur wird über die Parameter s_{5n} dargestellt.

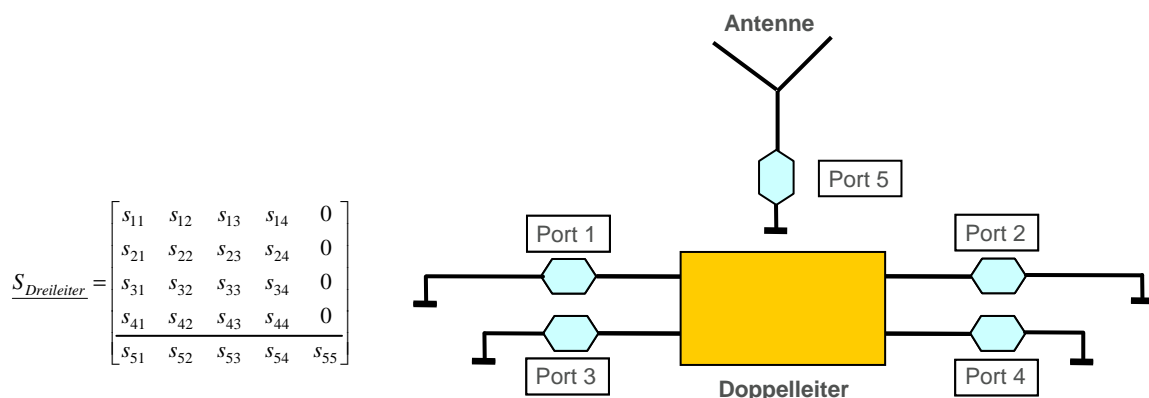


Abbildung 3: Aufbau der Streuparametermatrix eines geschirmten Doppelleiters zur Charakterisierung der Störaussendung von geschirmten Leitungen

Mit Hilfe einer erweiterten Variante des Programms Vectfit wird aus der Streuparameterdarstellung eine ordnungsreduzierte, lineare Zustandsraumdarstellung der Anordnung nach (1) approximiert. Sie wird anschließend in ein äquivalentes VHDL-AMS Modell umgewandelt.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bv} \\ \mathbf{i} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Dv} \end{aligned} \tag{1}$$

3 Simulations- und Messergebnisse

Die erstellten Modelle werden zunächst separat mit Hilfe von Messungen parametrisiert und verifiziert. Anschließend wird das Gesamtsystem bestehend aus Kfz-Batterie, Leitungen, Antenne, DC/AC-Wandler und Motornachbildung simuliert.

3.1 Li-Ionen Akkumulatormodelle

Das 14,4 V Li-Ionen Akkumodell wird im HF-Bereich parametrisiert und verifiziert. Herangezogen werden die RLC-Parameter aus Kapitel 2.1. Dargestellt ist die Dämpfung am Eingang eines Messempfängers im Frequenzbereich (Abbildung 4). Die Übereinstimmung zwischen den Kurven ist gut. Das simulierte Verhalten des 130 V Akkumodells ist ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt.

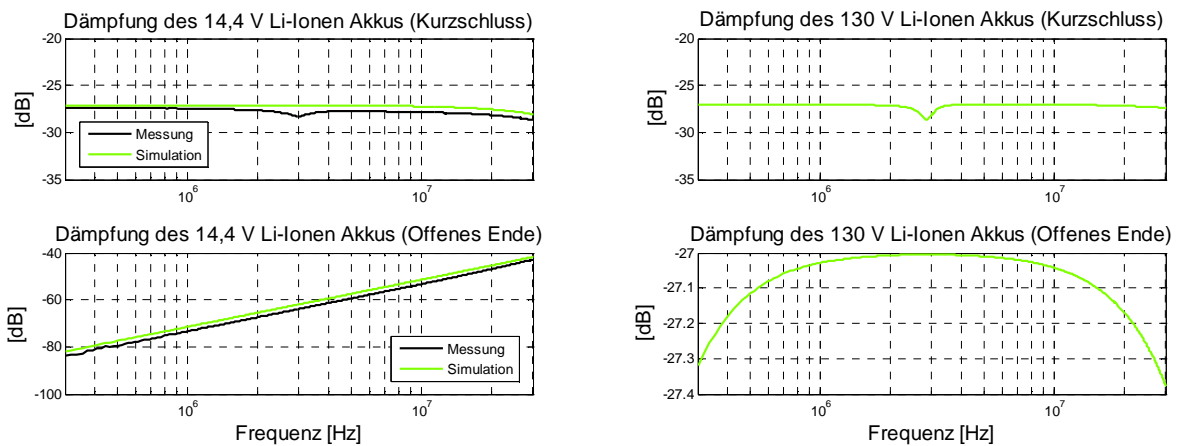


Abbildung 4: Verifikation des 14,4 V Li-Ionen Akkumulatormodells und Simulationsergebnisse zum 130 V Li-Ionen Modell

3.2 Leitungs- und Koppelmodelle

Untersucht wurde zunächst eine geschirmte Koaxialleitung ohne Steckverbindungen in einem Laboraufbau nach Abbildung 5, welcher eine typische Kfz-Konfiguration äquivalent abbildet. Der Laboraufbau reduziert im Vergleich zum Fahrzeug den Aufwand für die Vergleichsmessungen.

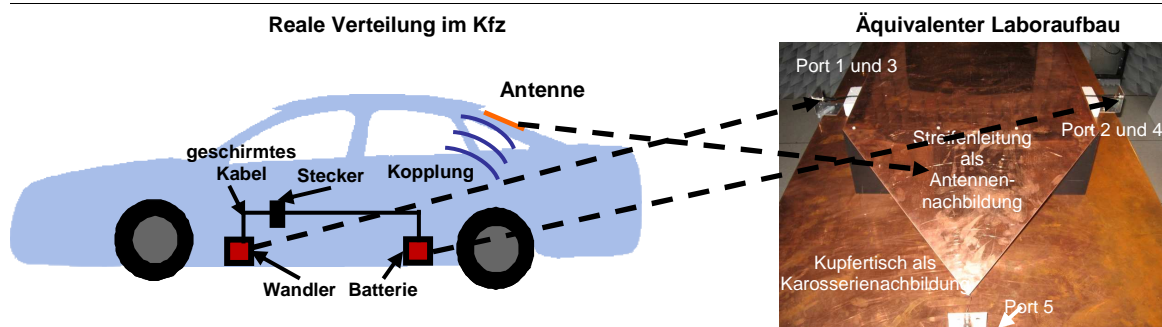


Abbildung 5: Äquivalenter Laboraufbau zur Untersuchung von Kfz-Hochspannungs-Versorgungsleitungen

Gemessen wird in einer Streifenleitung, die auf der einen Seite offen ist, der eingekoppelte Spannungspegel im Frequenzbereich von 300 kHz - 30 MHz. Der Abschlusswiderstand der Streifenleitung beträgt 50Ω . Abbildung 6 zeigt, dass im Laboraufbau eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Störspannungspegel erzielbar ist. Die Abweichungen betragen maximal $3 \text{ dB}\mu\text{V}$.

3.3 Steckverbindungen

Durch Nachbildung der Steckverbindungen als Widerstand werden Einflüsse der Kontaktwiderstände erfasst. Messungen an originalen Leitern mit Steckverbindungen ergaben einen Übergangswiderstand von $100 \text{ m}\Omega$. Um den Einfluss besser darstellen zu können, wird hier ein 1Ω Widerstand verwendet. Die durch die Unsymmetrie hervorgerufene Veränderung der Störaussendung ist in Abbildung 6 dargestellt. Der in die Streifenleitung eingekoppelte Störpegel erhöht sich - im Vergleich zur Modellierung ohne erhöhten Übergangswiderstand - um $10 - 20 \text{ dB}$. Eine ebenfalls sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Störpegel ist in der Abbildung zu erkennen. Die maximalen Abweichungen betragen ebenfalls maximal $3 \text{ dB}\mu\text{V}$.

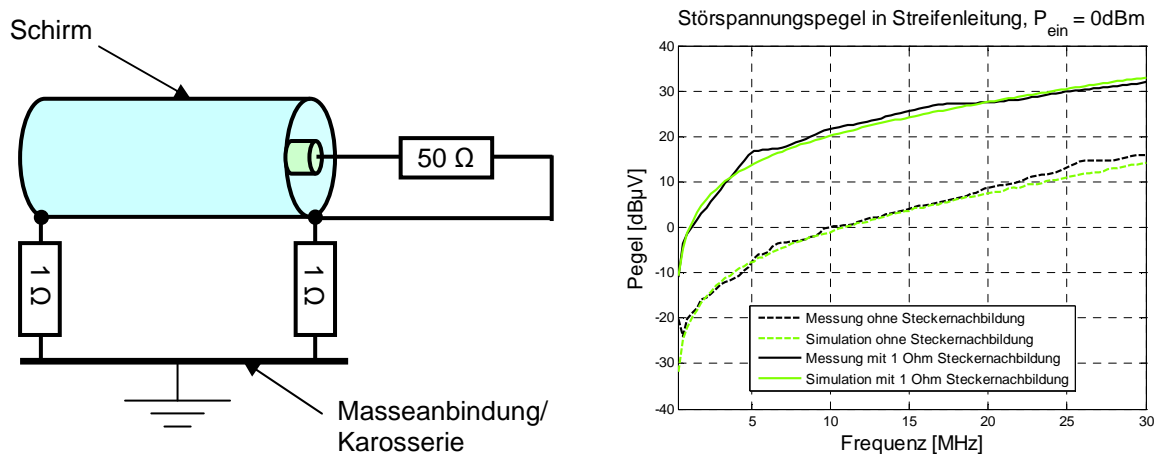


Abbildung 6: Vergleich des Einflusses eines 1Ω Übergangswiderstands als Steckernachbildung auf die Störaussendung geschirmter Leitungen

3.4 Gesamtsystemsimulationen

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens wurde eine Störaussendungssimulation mit einem Gesamtsystemmodell in einem Karosseriemodell durchgeführt. Das Koppelverhalten der modellierten Leitung mit Steckernachbildung in eine AM-Heckscheibenantenne wurde untersucht (Abbildung 7 links). Die Steckverbindungen der Leitung wurden hierbei - entsprechend der Messungen - als $100 \text{ m}\Omega$ Widerstände modelliert. Die simulierte Dämpfung der Spannung an der AM-Heckscheibenantenne ist in Abbildung 7 rechts zu sehen. Zu erkennen ist - ähnlich wie bei den Untersuchungen an dem äquivalenten Laboraufbau - eine geringere Dämpfung eingekoppelter Störungen zu höheren Frequenzen hin.

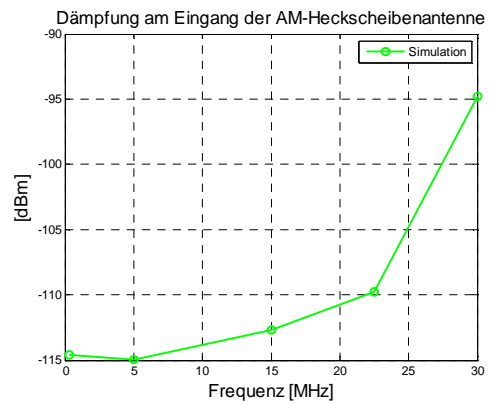
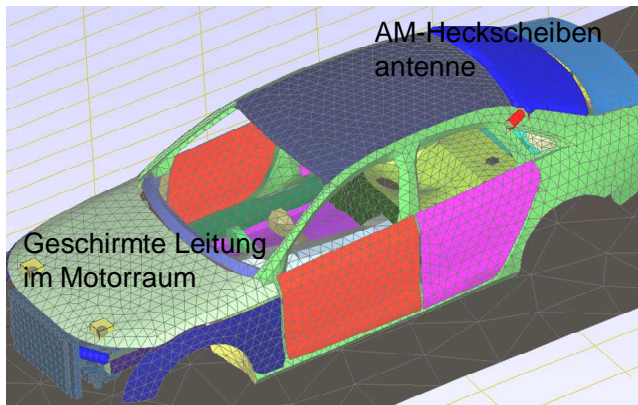


Abbildung 7: Simulation der Störeinkopplung in die AM-Heckscheibenantenne

Des Weiteren wurde eine VHDL-AMS Gesamtsystemsimulation durchgeführt. Das DC/AC-Wandlermodell besteht aus einer dreiphasigen IGBT-Brückenschaltung (B6-Schaltung) und einem Steuergerät zur Ansteuerung der Ventile. Die Taktfrequenz beträgt 10 kHz. Das dreiphasige Ausgangsströmsignal zur Motormodellansteuerung wird über Pulsweitenmodulation (PWM) im Steuergerät des Wandlers erzeugt. Das Motormodell besteht aus mehreren parallel geschalteten RL-Gliedern, einer seriellen Hauptinduktivität, einer Gleichtaktkapazität und Gleichtaktinduktivität sowie einem Widerstand zur Resonanzdämpfung. Das Modell ist für den Gleichtakt- und Gegentaktbetrieb im Frequenzbereich bis 30 MHz ausgelegt. Als Batteriemodell wurde das 130 V Li-Ionen Akkumodell verwendet. Die Antenne wurde über ein paralleles RC-Glied mit $R = 20 \text{ k}\Omega$ und $C = 25 \text{ pF}$ realisiert. Die Steckverbindungen der Leitungen wurden als $500 \text{ m}\Omega$ Widerstände modelliert. Messungen ergaben einen Übergangswiderstand von $100 \text{ m}\Omega$, der im Laufe der Zeit aber voraussichtlich deutlich ansteigen wird. Dieser Wert wurde durch Messungen an realen Komponenten ermittelt. Die Modelle des Wandlers und des Motors sind aus der Bibliothek „HYBRID EMC_VDA“ der Arbeitskreise 23 und 30 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) entnommen worden.

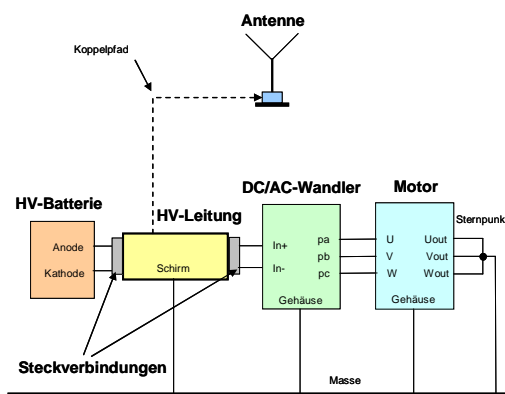


Abbildung 8: Strukturschaltbild für das VHDL-AMS Gesamtsystemmodell

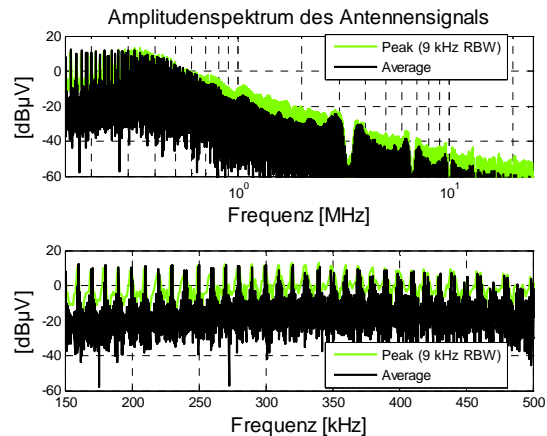


Abbildung 9: Simulierte Störspannung an der Antenne

Simulationen im Zeitbereich wurden durchgeführt und mittels FFT (Fast Fourier Transformation) in den Frequenzbereich transformiert. Der Motor befindet sich bei einer gewählten Drehfrequenz von 100 Hz und einer Stromamplitude von 100 A im stationären Zustand. Abbildung 9 zeigt die Störspannung an der Antenne.

4 Zusammenfassung

VHDL-AMS-Simulationen können bei der Untersuchung der Störaussendung von Elektroantriebskomponenten unterstützen. Für EMV-Untersuchungen geeignete Modelle für Batterien, Leitungen und Steckverbinder wurden vorgestellt.

Das Li-Ionen Akkumodell für Kfz-Anwendungen besteht aus durch Messungen parametrisierten Li-Ionen Zellenmodellen. Durch eine entsprechende Verschaltung wurde eine niederohmige 130 V-Quelle realisiert. Leitungsmodelle für geschirmte Kfz-Hochspannungsleitungen wurden erstellt und die Parameter durch Messungen bestimmt. Der Einfluss von Steckverbindungen auf die Störaussendung wurde untersucht. Durch Approximationsverfahren konnten die Feldsimulationen in die VHDL-AMS-Simulation eingebunden werden.

Die erstellten VHDL-AMS Simulationsmodelle bilden das Verhalten der untersuchten Komponenten im Frequenzbereich von 150 kHz – 30 MHz gut nach, wie durch Labormessungen nachgewiesen werden konnte. Gesamtfahrzeugsimulationen sind mit den entwickelten Modellen durchführbar.

Mit der gezeigten Methodik kann das Störaussendungspotential der Komponenten eines elektrischen Fahrzeugantriebs abgeschätzt werden. Eine gezielte simulationsbasierte Optimierung ist möglich.

Danksagung

Diese Arbeit wurde mit Unterstützung der Arbeitskreise 23 und 30 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) durchgeführt. Unser Dank gilt auch der Continental AG und der Daimler AG für die zur Verfügung gestellte Hardware.

Literatur

- [1] A. Goubeau, Der MINI E – Ein Beispiel für CO₂ freies Autofahren, 4. Dortmunder Autotag, 2009
- [2] O. Tremblay, L. Dessaint, A. Dekkiche, A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE
- [3] J. Schiffer, M. Thele, D. Sauer, Methodik der impedanzbasierten Modellierung für Batterien, ASIM Fachgruppentreffen, München 20./21.2.2006
- [4] M. Keddam, Z. Stoyanov, H. Takenouti, Impedance Measurement on Pb/H₂ SO₄ Batteries, Journal of Applied Electrochemistry 7, 1977
- [5] K. Siebert, H. Zhang, S. Frei, Modellierung der Einstrahlung elektromagnetischer Felder in Mehrleitersysteme mit VHDL-AMS, EMV 2007
- [6] F. Tesche, M. Ianoz, T. Karlsson, EMC analysis methods and computational models, John Wiley & Sons, INC., 1997