

# **Simulatorische Bestimmung der Störeinkopplung durch leistungselektronische Komponenten in Kfz-Antennensysteme**

Dipl.-Ing. Johannes Hippeli, Audi AG, Ingolstadt

Dipl.-Ing. Ulf Hilger, Technische Universität Dortmund, Dortmund

Dipl.-Wirt.-Ing. Maja Diebig, Technische Universität Dortmund, Dortmund

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Technische Universität Dortmund, Dortmund

## **1 Einleitung**

EMV-Berechnungsverfahren bieten die Möglichkeit, in frühen Fahrzeugentwicklungsphasen Aussagen zur Einkopplung von Störungen elektronischer Komponenten in die Fahrzeugantenne zu treffen. Hierbei ist es wichtig, alle relevanten Koppelpfade zu berücksichtigen und in das Simulationsmodell zu integrieren. Bereits bei diesem Schritt können Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung der Störaussendung entwickelt und überprüft werden. Die gewonnenen Erkenntnisse und Berechnungen können auf Fahrzeuge der gleichen Plattform und ähnliche Baureihen übertragen werden, in welche die untersuchte elektrische Komponente zukünftig eingesetzt werden soll.

In den folgenden Untersuchungen wird eine Methodik beschrieben, um Störaussendungsrechnungen durchführen zu können. Zu Beginn wird auf die Modellierung der einzelnen Komponenten innerhalb des Gesamtsystems näher eingegangen. Das Antennensystem als Störsenke hat dabei einen großen Einfluss auf das gesamte Berechnungsergebnis. Daher wird diese Komponente besonders genau untersucht. Anschließend werden mit einer dreiphasigen Kraftstoffpumpe und einem elektrisch betriebenen Kühlerlüfter zwei typische leistungselektronische Komponenten für die Entwicklung und messtechnische Absicherung von Störquellenmodellen diskutiert. Diese beiden Systeme eignen sich ebenfalls, um direkte und indirekte Koppelpfade zu analysieren.

Die Berechnung der Verkopplung erfolgt mit dem Programm EMC Studio [1], welches auf der Momentenmethode (MoM) basiert, und für die EMV-Simulation komplexer Gesamtfahrzeugstrukturen geeignet ist. Die Untersuchungen sind auf den Frequenzbereich von 150 kHz bis 1,8 MHz (Lang- und Mittelwelle) beschränkt, da in diesem Bereich getaktete leistungselektronische Systeme die problematischsten Störungen verursachen können.

## **2 Modellierungsmethoden zur Gesamtsystems simulation**

Um die Störeinkopplung elektronischer Komponenten in Fahrzeugantennensysteme berechnen zu können, bedarf es einer möglichst realitätsnahen Modellierung der Störquelle, des Koppelpfades und der Störsenke. Im Folgenden wird beschrieben, welche Möglichkeiten der Modellerstellung zur Verfügung stehen.

## 2.1 Methodenauswahl für das Antennenmodell

In der vorliegenden Arbeit werden mögliche Störeinkopplungen von leistungselektronischen Komponenten in die AM-Antenne untersucht. Diese ist bei den untersuchten Fahrzeugen zusammen mit anderen Antennen (FM, TV, DAB) in die Heckscheibe integriert. Ein exaktes Modell der Antennenstruktur, der Eingangsimpedanz des verwendeten Antennenverstärkers, sowie des Verstärkungsfaktors sind für die Berechnung unbedingt notwendig. Es zeigt sich, dass der Empfang der elektrisch kurzen AM-Antenne, welche ein hauptsächlich kapazitives Verhalten aufweist, maßgeblich durch das Dielektrikum der Heckscheibe, umliegende Antennenstrukturen und besonders durch das großflächige Heizfeld beeinflusst werden kann. Daher muss auch die unmittelbare Umgebung der AM-Antenne so genau wie möglich modelliert werden. Niederimpedante Abschlüsse sind dabei genauer zu berücksichtigen als hohe Abschlussimpedanzen benachbarter Strukturen. Im Folgenden werden zwei ausgewählte Möglichkeiten zur Modellierung gegenübergestellt.

Zum einen ist es möglich, die Leiteranordnung einer Heckscheibenstruktur mit einem äquivalenten Drahtmodell nach Popovic [2] nachzubilden. Dieses Modell ist für quasistatische Anwendungsfälle konzipiert und bildet den Impedanzbelag der Eigenverkopplung nach. Für die Verkopplung zu benachbarten und weiter entfernten Leitern wären weitere Korrekturterme nötig, die aber für individuelle Geometrien nicht implementierbar sind.

Zum anderen existiert eine hybride Methode zur Berücksichtigung begrenzter, gebogener, dielektrischer Scheibenantennen für die MoM [3]. Im Vergleich zu einem Drahtmodell erfordert die hybride Methode mit angepassten Greenschen

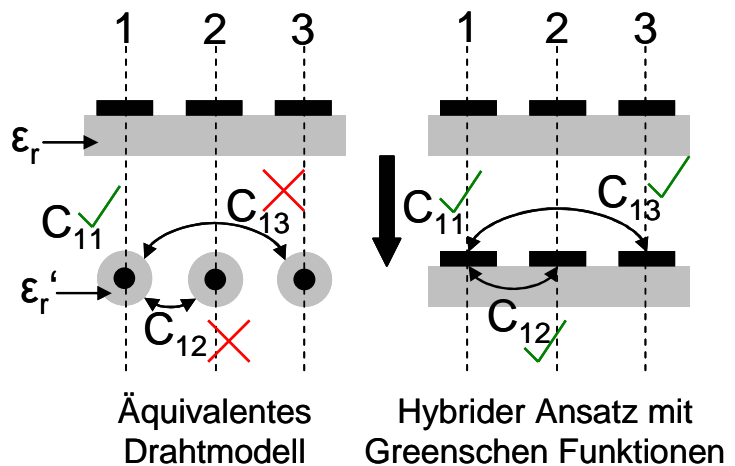


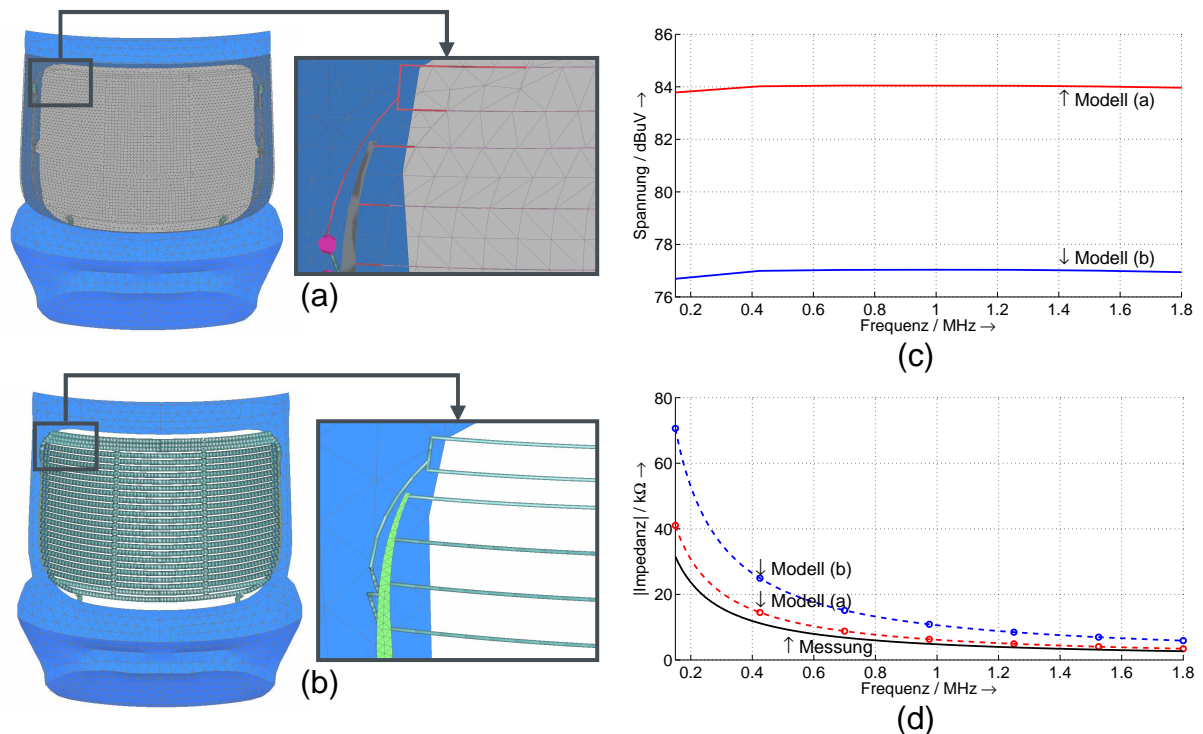
Abb. 1: Methodenvergleich zur Modellierung von Scheibenantennen

Funktionen einen höheren Modellierungsaufwand und längere Rechenzeiten.

Beide Ersatzmodelle sind in Abb.1 schematisch dargestellt. Vergleichsberechnungen mit einem Teilmodell einer Heckklappe in Abb.2 zeigen, dass der zusätzliche Modellierungsaufwand bessere Ergebnisse liefert. In diesem Beispiel beträgt der Unterschied des Empfangspegels 7 dB (siehe Abb.2c), obwohl die gleiche Geometrie und gleiche Abschlussimpedanzen verwendet werden. Der große Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass das gesamte Heizfeld ebenfalls als Antenne wirkt, und durch die Berücksichtigung der gesamten Scheibe im Modell die AM-Antenne wesentlich empfindlicher wird. Zur Validierung, welche der Methoden die Realität besser beschreibt, wurden die berechneten Antennenimpedanzen mit einer Fahrzeugmessung verglichen (siehe Abb.2d). Da die Impedanzmessung bei

geöffneter und geschlossener Heckklappe zu identischen Werten führt, ist die Reduktion auf das verwendete Teilemodell der Heckklappe zum Methodenvergleich zulässig.

Die hybride Methode stimmt besser mit der Realität überein, und wird im weiteren Verlauf für alle Gesamtsystemsimulationen verwendet.



**Abb. 2: Methodenvergleich zur Modellierung des Antennensystems:**

- (a) Hybrides Modell für finite, dielektrische Scheiben [3]
- (b) Äquivalentes Drahtmodell [2]
- (c) Vergleich des Antennenempfangs bei Anregung mit einer ebenen Welle (1 V/m)
- (d) Impedanzvergleich der Empfangsantenne

## 2.2 Methoden zur Beschreibung leistungselektronischer Systeme

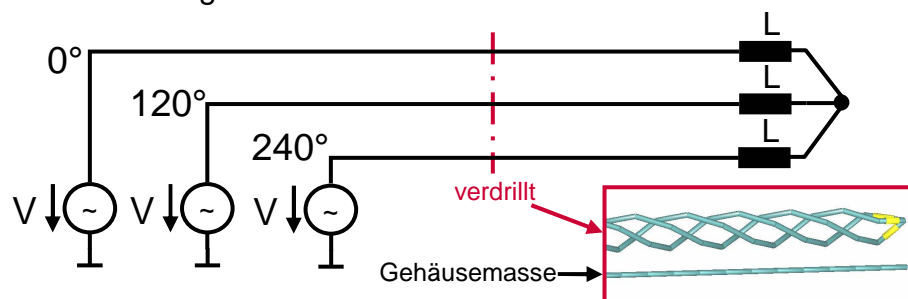
Elektrische Fahrzeugsysteme bestehen in der Regel aus einem Steuergerät, der Verkabelung, und aus diversen Sensoren und Aktuatoren. Die Schwierigkeit besteht generell darin, den richtigen Koppelpfad zur Antenne zu erschließen, und auch im Modell zu beschreiben. Dies können im betrachteten quasistatischen Fall induktive sowie kapazitive, und darunter direkte und indirekte Koppelpfade, sein.

Zur Beschreibung der Komponenten und Koppelpfade stehen hauptsächlich parametrisierbare Signalquellen, elektrische Netzwerkelemente, Impedanzen, Kabelsegmente und metallische Oberflächen zur Verfügung. Falls es erforderlich ist, eine Schaltungssimulation oder spezielle Leitungen (z.B. komplexe Leitungsgebündel, Koaxialleitungen, verdrehte Leitungen) zu modellieren, existieren hybride Methoden, die unter anderem SPICE-Schaltungen, VHDL-AMS Modelle oder Leitungsmodelle mit in die Gesamtsystemsimulation einbinden können.

## 2.2.1 Störaussendungsmodell einer EC-Kraftstoffpumpe

Eine höhere Lebensdauer, höhere Drehzahlen, eine kompaktere Bauweise und ein besserer Wirkungsgrad zeichnen elektrisch kommutierte (EC) Motoren gegenüber herkömmlichen DC-Motoren mit Schleifkontakten aus. Aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) wird durch den Einsatz von EC-Motoren zudem die Störaussendung hochfrequenter Spektren unterbunden, welche bei DC-Motoren mit Schleifkontakten durch das Bürstenfeuer erzeugt werden. Durch die elektrische Kommutierung mit teilweise sehr steilen Schaltflanken (je steiler die Flanke, desto geringer die Schaltverluste der Transistoren, aber desto breiter das Störspektrum) und einer getakteten Ansteuerung im kHz-Bereich existieren andere EMV-relevante Störquellen. Diese können über die Versorgungsleitungen zur Fahrzeugantenne oder zu anderen elektrischen Systemen koppeln.

Bei der untersuchten Komponente handelt es sich im Folgenden um eine EC-Kraftstoffpumpe, deren verdrehte Zuleitungen von einer Kraftstoffpumpenelektronik (KPE) beschaltet werden. Ein Prinzipschaltbild und ein Ausschnitt der modellierten Leitung ist in Abb. 3 dargestellt.



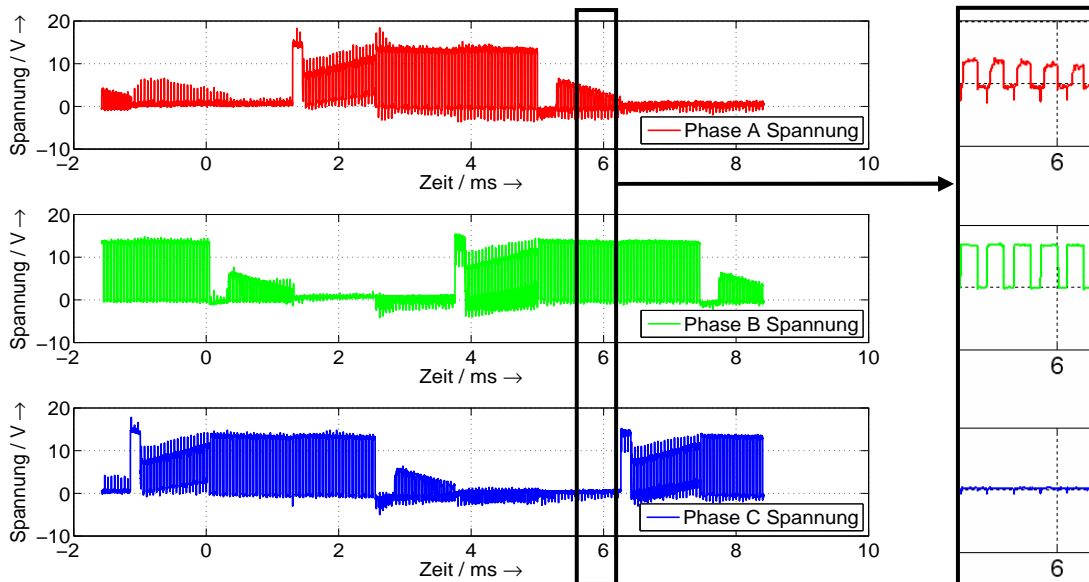
**Abb. 3: Zeitbereichsmodell der dreiphasigen Kraftstoffpumpe**

Durch die Funktionsweise der Antenne kann die induktive Kopplung vernachlässigt werden. Leitungsresonanzen und gestrahlte Kopplungen können wegen der Begrenzung des betrachteten Frequenzbereichs auf die Lang- und Mittelwelle ebenfalls unberücksichtigt bleiben. Der Hauptfokus richtet sich demnach auf die kapazitive Verkopplung der Leitungen zur Antenne.

Bei der kapazitiven Kopplung muss als Eingangsgröße der Berechnung die Spannung auf allen betrachteten Leitungen bekannt sein. Da die Berechnungen im Frequenzbereich stattfinden, müssen mehrere Untersuchungen zu den gemessenen Zeitsignalen und den berechneten Spektren durchgeführt werden. Die Umrechnung vom Zeit- in den Frequenzbereich wird mit Hilfe der FFT (Fast Fourier Transformation) durchgeführt. In Abb. 4 ist die gemessene Spannung auf den drei Versorgungsleitungen der Kraftstoffpumpe dargestellt. Eine genauere Erklärung des Signals, welches charakteristisch für einen sensorlosen Motor mit back-electromotive-force (EMF) Detektion ist, wird in [4] gegeben.

Die Phasenverschiebung um jeweils 120° bezieht sich auf die Grundperiode. Die spektralen Anteile im betrachteten Frequenzbereich werden zum größten Teil von den getakteten Rechteckspannungen generiert, deren Pulsweite zur Leistungsregulierung verändert werden kann (PWM). Der Takt der Rechtecksignale ist dabei auf allen Phasen synchronisiert, und beträgt in diesem Fall 20 kHz. Somit sind die Frequenzanteile des Störspektrums, die von der PWM generiert werden,

gleichphasig. Für die Modellierung im Frequenzbereich können daher drei synchrone Spannungsquellen verwendet werden, deren frequenzabhängigen Amplituden durch die Zeitbereichsmessungen und der anschließenden FFT charakterisiert werden. Aus diesen Analysen wird ersichtlich, dass im Falle eines zu hohen Störspektrums am Fußpunkt der Antenne nur ein gemeinsamer elektrischer Schirm über allen drei Versorgungsleitungen, oder eine Integration der Kommutierung in die Pumpe die dominante kapazitive Kopplung reduzieren kann.



**Abb. 4: Hochohmige Messung der Zeitsignale auf den drei Versorgungsleitungen mit einem digitalen Speicheroszilloskop. Eine Beschreibung der Signale ist in [4] gegeben.**

## 2.2.2 Störaussendungsmodell elektrisch betriebener Kühlerlüfter

Aktuelle Motoren elektrisch betriebener Kühlerlüfter sind entweder DC-Motoren mit Schleifkontakten oder elektrisch kommutiert. Neben dem Bürstenfeuer im ersten Fall kann auch hier die Leistungselektronik einen erheblichen Teil zur Störaussendung beitragen. Die Drehzahlregulierung erfolgt durch ein PWM-Signal mit variablem Tastverhältnis. Steile Pulsflanken in Kombination mit hohen Strömen können zu einem Störspektrum führen, welches über verschieden Wege in die Kfz-Antenne einkoppeln kann. Zum einen ist die Fortpflanzung der Störungen über den komplexen Kabelbaum möglich, zum anderen können sich auf den Metallgehäusen der Steuergeräte oder Motoren erhebliche Störpotentiale ausbilden. Da die induktive und kapazitive Kopplung über den weit verzweigten Kabelbaum schwer nachvollziehbar und sehr komplex ist, wird vorerst die kapazitive Kopplung über das Gehäuse intensiv analysiert. Als indirekte Verkopplung kommen in der Nähe befindliche Metallkörper, wie zum Beispiel der Wasserkühler in Frage. Abb. 5 zeigt das gemessene Störpotential am Kühler im Zeitbereich. Dieser ist von der Karosserie galvanisch entkoppelt. Das von der Leistungselektronik zur Drehzahlsteuerung generierte 17 kHz PWM-Signal koppelt kapazitiv über. Durch die große angeregte Fläche des metallischen Kühlers erhöht sich die Kopplung zur Antenne um ein Vielfaches. In Abb. 6 ist das Simulationsmodell mit Motorblock, Wasserkühler und

Lüftermotoren zu sehen. Die Anregung des Kühlers mit dem gemessenen Störpegel erweist sich bei der Berechnung als gutes Ersatzmodell, um die dominante Kopplung über das Lüftergehäuse nachzubilden.

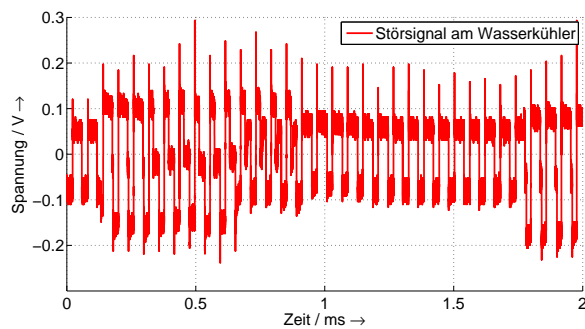


Abb. 5: Gemessenes Störpotential am Wasserkühler

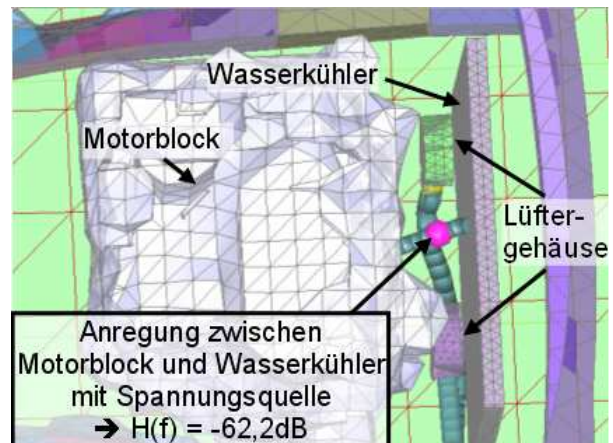


Abb. 6: Ausschnitt aus dem Simulationsmodell des Gesamtfahrzeugs

### 3 Verifikation der Simulationsergebnisse

#### 3.1 Kraftstoffpumpe

Das Spektrum des Empfangspegels konnte sehr genau berechnet werden. Der Vergleich des berechneten und gemessenen Spektrums ist generell schwierig, da die verschiedenen Detektoren des Messempfängers, wie Peak- (PK) oder Average-Detektor (AV) hier nicht nachgebildet werden. Ohne weitere Signalverarbeitung entspricht eine Messung mit einem AV-Detektor häufig einer FFT über mehrere Perioden eines Zeitsignals. Mit einer Grundfrequenz von 20 kHz des PWM-Signals und der Periodizität der Störung entspricht in diesem Fall der Peak-Wert weitestgehend dem Average-Wert.

In Abb. 7 ist das gemessene und berechnete Störpektrum einer Fahrzeugmessung und des äquivalenten Simulationsmodells dargestellt. In diesem Fall wird eine standardisierte Messung mit dem Peak-Detektor gezeigt, wie sie z.B. bei CISPR [5] beschrieben ist.

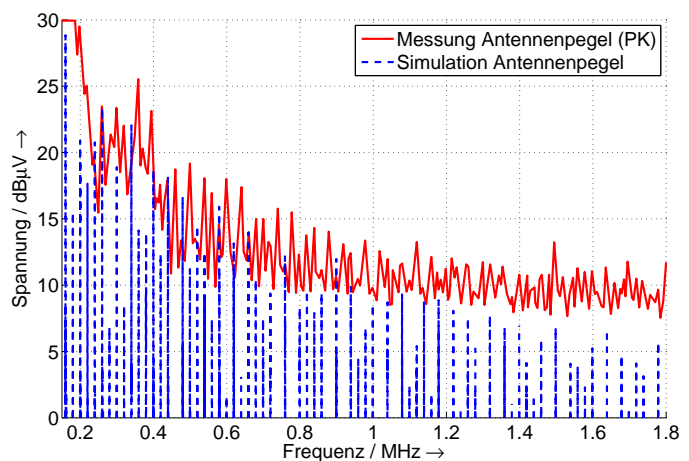


Abb. 7: Messung und Berechnung der Störaussendung der EC-Kraftstoffpumpe

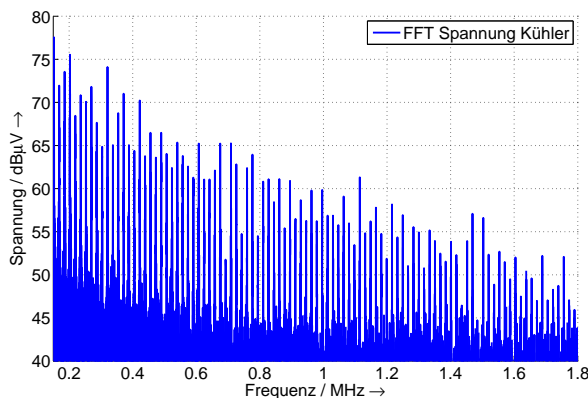
Mit dieser Berechnung und deren guter Übereinstimmung zur Messung wird gezeigt, dass die angewandten Methoden zur Modellierung des Antennensystems, und der



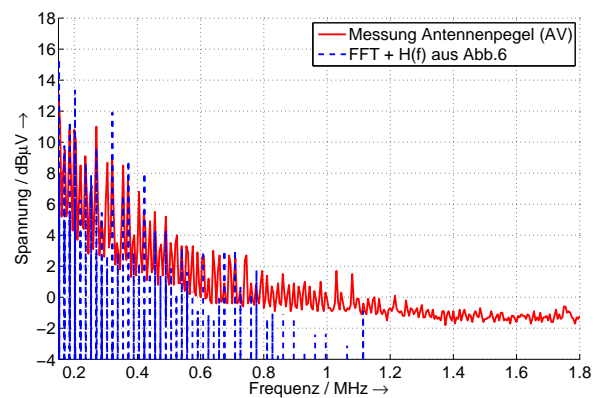
EC-Kraftstoffpumpe als Störquelle zu sehr realitätsnahen Ergebnissen führen kann. Das gewonnene Wissen über die vorliegenden Signaleigenschaften und deren dominante Kopplung zur Antenne kann auf andere Fahrzeugprojekte angewendet werden. Eine zukünftige Risikoabschätzung bezüglich der Störaussendung kann speziell bei dieser Komponente mit minimierter Unsicherheit virtuell durchgeführt werden.

### 3.2 Kühlerlüfter

Wird das gemessene Zeitbereichsignal am Wasserkühler aus Abb. 5 fouriertransformiert, kann das emittierte Störspektrum errechnet werden (Abb. 8). Mit den Daten werden Frequenzbereichsimulationen durchgeführt und das zu erwartende Störspektrum an der Antenne bestimmt. Abb. 9 zeigt einen Vergleich der frequenzabhängigen Antennenfußpunktspannung zwischen Simulation und Messung. Die berechneten Ergebnisse stimmen mit den Messungen sehr gut überein. Erkennbare Abweichungen sind im Rahmen der Messgenauigkeit.



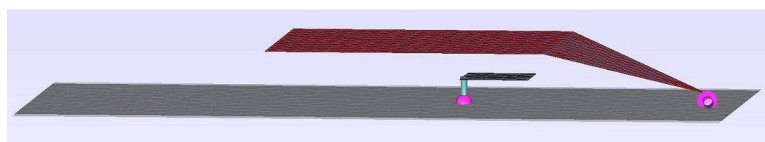
**Abb. 8: FFT des Störpotentials auf dem Wasserkühler**



**Abb. 9: Vergleich des simulierten und gemessenen Störpotentials am Fußpunkt der Antenne**

### 3.3 Hochohmige Streifenleitung

Durch kapazitive Kopplung können Metallgehäuse von Motoren oder Steuergeräten ein erhöhtes Störpotential aufweisen. Hierbei kommen die Motorwicklungen, einfache Platinenstrukturen, sowie Zuleitungen als verursachende Störquellen in Frage. Auf Laborebene können die Verkopplungen auf das Gehäuse und andere von der Karosseriemasse getrennte Metallkörper untersucht und bewertet werden. Das Abstrahlpotential von Gehäusestrukturen kann durch hochohmige Streifenleitungen gut charakterisiert werden. Da die kapazitive Kopplung zur Fahrzeugantenne bzw. zur Streifenleitung sehr schwach ist, können die Messungen nicht direkt mit einem  $50 \Omega$  Messsystem erfolgen. Um die Empfindlichkeit zu erhöhen, muss die Antenne/



**Abb. 10: Simulationsmodell einer hochohmigen Streifenleitung**

Streifenleitung hochohmig mit einem Impedanzwandler, wie dem EZ-12 von Rohde & Schwarz, abgeschlossen werden. Um mit den gewonnenen Messdaten Aussagen und Bewertungen zur Störaussendung im Fahrzeug treffen zu können, helfen wiederum Berechnungen von Koppeldämpfungen, wie sie mit dem Modell in Abb. 6 durchgeführt wurden. Abb. 10 zeigt das Simulationsmodell einer hochohmigen Streifenleitung mit äquivalenter abstrahlender Struktur.

#### 4 Zusammenfassung

Mit den entwickelten Simulationsmodellen ist es möglich, das Störspektrum am Antennenfußpunkt einer Heckscheibenantenne zu berechnen. Dabei hat die beschriebene, auf einer modifizierten Greenschen Funktion beruhende, Methode zur Modellierung dielektrischer Heckscheibenstrukturen mit integrierten Antennensystemen eine hohe Bedeutung und trägt erheblich zur Genauigkeit der Gesamtsystemsimulation bei. Mit zwei ausgewählten leistungselektronischen Systemen wurden Störquellenmodelle in Bezug auf deren dominante Kopplung zur Antenne erstellt. Durch die genaue Analyse der Signale und Koppelwege konnten für die Kraftstoffpumpe Entstörmaßnahmen abgeleitet werden. Aus den Untersuchungen zum Kühlerlüfter wurde ersichtlich, dass eine zusätzliche Komponentenmessung unter einer hochohmigen Streifenleitung notwendig ist, um Informationen über indirekte Koppelpfade zu erhalten.

Durch die Verbindung von Komponentenmessungen mit Modellierung in Gesamtfahrzeugsimulationen können Koppelwege verstanden und frühzeitig Entstörmaßnahmen entwickelt werden.

#### Literatur

- [1] EMCoS: EMC Studio, <http://www.emcos.com/>, Stand 2009
- [2] B. D. Popovic: *CAD of Wire Antennas and Related Radiating Structures*, Research Studies Press, Taunton, Somerset, England, 1991
- [3] F. Bogdanov, D. Karkashadze, R. Jobava, A. Gheonjian, E. Yavolovskaya N. Bondarenko: *Hybrid MoM Scheme with Incorporation of Equivalent Glass Antenna Model in Application to Automotive EMC Problems*, 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 217-220, Januar 2009
- [4] J. Shao, D. Nolan, M. Teissier, D. Swanson: *A Novel Microcontroller-based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pumps*, IEEE Transactions on Industry Applications, 39:1734-1740, Nov.-Dez. 2003
- [5] CISPR 25 Edition 3.0: *Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers*, März 2008