

# Korrekturverfahren für Feld-Scan-Daten zur Bestimmung des elektromagnetischen Feldes in einer realen Messumgebung

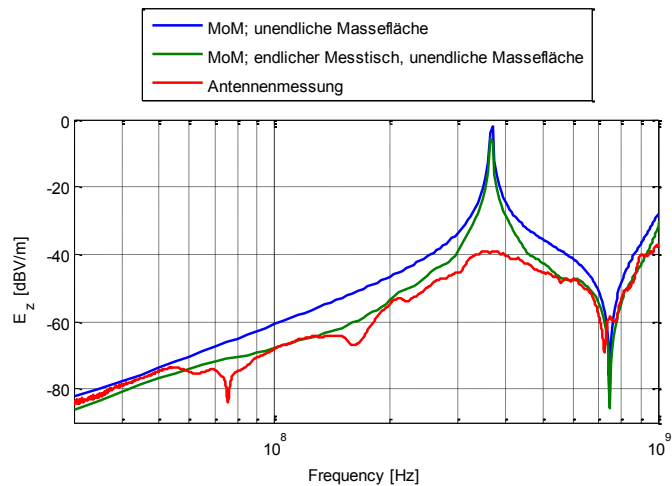
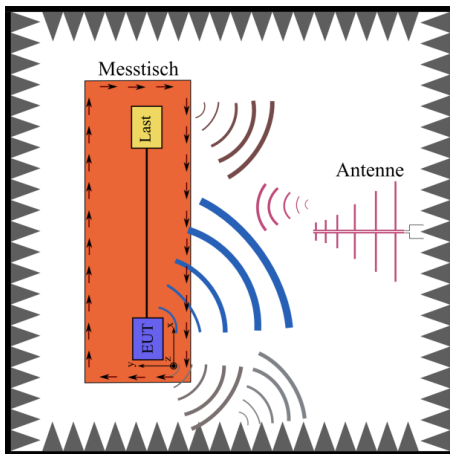
Dipl.-Ing. Denis Rinas, TU Dortmund, AG Bordsysteme  
M. Sc. Alexander Zeichner, TU Dortmund, AG Bordsysteme  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund, AG Bordsysteme

## 1. Einleitung

Um das EMV-Verhalten elektronischer Systeme beschreiben zu können, sind genaue Kenntnisse des abgestrahlten elektromagnetischen Feldes erforderlich. Die standardisierten Antennenmessverfahren [11] liefern oft keine aussagekräftigen Feldinformationen [1]. Mit sogenannten Kabel- und Feld-Scan-Verfahren kann die Störaussendung eines Systems detaillierter bestimmt werden [2]. Neben der Eingrenzung der Störquellen erlauben die durch die Messungen gesammelten Daten die Erstellung von elektromagnetischen Verhaltensmodellen. Auf Basis dieser Modelle kann eine Berechnung des abgestrahlten EM-Feldes im Nah- und im Fernbereich durchgeführt werden [3][4][5][6]. Die Modellerstellung erfolgt mit Lösung eines inversen Problems. Die approximierenden Quellen (in der Regel Dipole) werden aus dem gemessenen Nahfeld rekonstruiert. Zur Lösung des inversen Problems werden in der Literatur verschiedene Ansätze verfolgt. Lösungsmethoden, welche die physikalischen Eigenschaften des Objektes und die Abhängigkeiten der Quellen untereinander beachten, liefern vielversprechende Ergebnisse. Damit kann ein abstrahlendes System mit Kenntnis der Strompfade und Berücksichtigung physikalischer Zusammenhänge zwischen den anregenden Dipole in ein äquivalentes Abstrahlmodell bestehend aus elektrischen Dipolen überführt werden [4][7].

Bei der Berechnung von Feldern aus den erstellten Abstrahlmodellen werden oft vereinfachende Annahmen verwendet. So werden meist eine unendlich ausgedehnte Massefläche als Referenz und eine ideale Freiraumausbreitung vorausgesetzt. Entgegen der vereinfachten Annahmen für die Abstrahlmodelle werden die Antennenmessungen in einer realen Messumgebung durchgeführt. Hierbei kommt es zu komplexen Störeinflüssen, wie Wechselwirkungen mit der Antenne, Restreflexionen von den Absorberwänden, Kanteneffekte im Messtisch oder durch die Messkabel erzeugte Interferenzen (Bild 1). Eine Vorhersage der Antennenspannungen kann nur unter Beachtung dieser Störungen erfolgen, d.h., Einflüsse der Antennenmessumgebung müssen bei der Umrechnung von Nahfelddaten berücksichtigt werden. Bild 1 zeigt die Ergebnisse einer MoM- (Method of Moments) Berechnung [10] der vertikalen elektrischen Feldkomponente einer einfachen Struktur in verschiedenen Messumgebungen im Vergleich zu einer realen Antennenmessung mit derselben Struktur. Der Einfluss der realen Messumgebung führt zu einer Abweichung der Ergebnisse im gesamten aufgenommenen Frequenzbereich.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, welches ein auf Nahfeld-Scandaten basierendes elektromagnetisches Verhaltensmodell um den Einfluss einer beliebigen Messumgebung erweitert. Hierzu werden Transfer- bzw. Korrekturfunktionen aus speziellen Messungen gewonnen.



**Bild 1:** Störeinflüsse bei der Antennenmessungen (**links**);  $E_z$  aus MoM-Simulation einer einfachen Struktur mit verschiedenen Messumgebungen im Vergleich einer Antennenmessung an einem Beobachtungspunkt in 1,5 m Entfernung (**rechts**)

## 2. Methode zur Ermittlung von Korrekturfunktionen in einer realen Messumgebung und Anwendung bei Nahfeld-Scan-Verfahren

In den nachfolgenden Kapiteln wird ein Verfahren zur Korrektur von Scandaten vorgestellt. Es wird gezeigt, wie die Korrekturdaten zu bestimmen sind und die Anwendung auf Scandaten erläutert.

### 2.1 Definition von Korrekturfunktionen

Das von einer Platine abgestrahlte elektrische und magnetische Feld steht in direktem Zusammenhang mit der Stromverteilung auf der Platine. Bei der Antennenmessung wird das elektrische Feld mittels Antenne in einer Absorberkabine erfasst und eine entsprechende Antennenspannung gemessen. Dabei beeinflussen Interferenzen mit der Messumgebung das Ergebnis.

Sind für einen diskreten Punkt in einer definierten Ebene (z.B. eine Ebene oberhalb von einem Messtisch) unabhängige Ströme in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung bekannt, kann eine Übertragungsfunktion zwischen einem Stromsegment in diesem Punkt und der resultierenden Antennenspannung ermittelt werden. Die resultierende Funktion ist abhängig von dem Messort und der jeweiligen Frequenz.

$$T^x_{nm} = \frac{V^x_{ant,nm}}{\tilde{I}^x_{nm}}$$

(1)

$$T^y_{nm} = \frac{V^y_{ant,nm}}{\tilde{I}^y_{nm}}$$

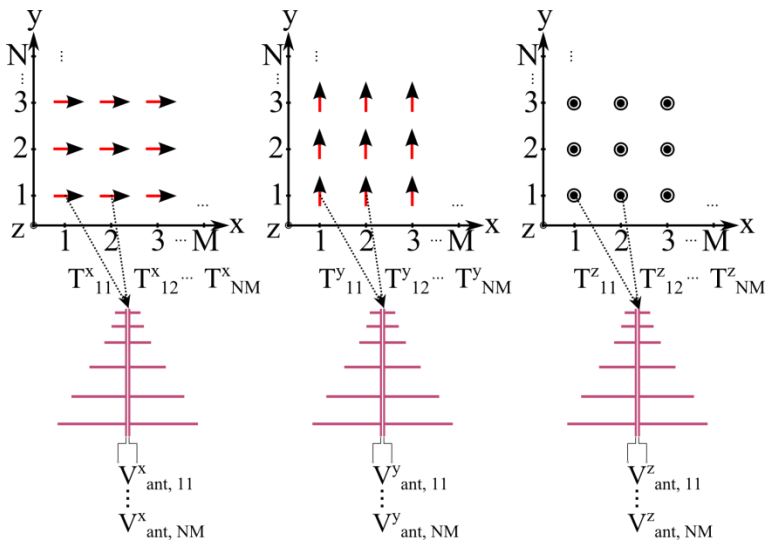
(2)

$$T^z_{nm} = \frac{V^z_{ant,nm}}{\tilde{I}^z_{nm}}$$

(3)

Hier beschreibt  $T^{x,y,z}_{nm}$  die Transferfunktion für den Punkt  $nm$  innerhalb der Ebene,  $V^{x,y,z}_{ant,nm}$  steht für die resultierenden Antennenspannungen und  $\tilde{I}^{x,y,z}_{nm}$  für die anregenden Ströme. Alle Variablen sind in Amplitude und Phase gegeben.

Es wird angenommen, dass die Einzelströme in jedem Punkt mit Hertzschen Dipolen approximiert werden können (Bild 2).

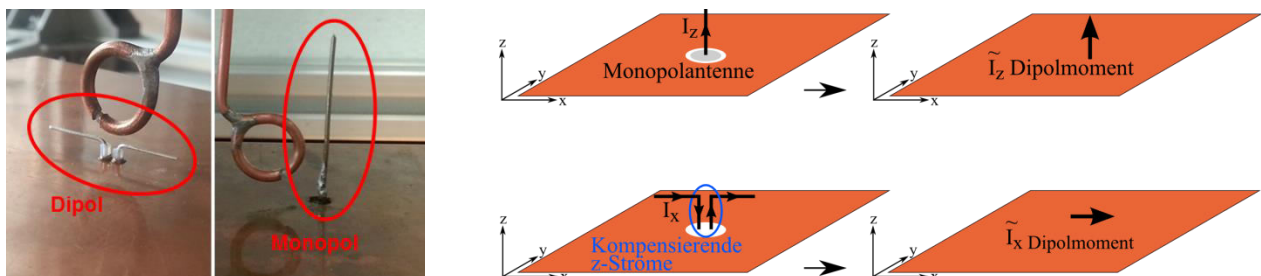


**Bild 2:** Berechnung der Übertragungsfunktion zwischen Antennenspannung und Strömen von Hertzischen Dipolen

Die so ermittelten Übertragungsfunktionen beschreiben sowohl die Verkopplung der Stromelemente mit der der Antenne als auch die Störeinflüsse der Messumgebung. Um die Anzahl der notwendigen Quellen zu reduzieren, ist eine örtliche Interpolation oder sogar die Ermittlung einer einzelnen Transferfunktion möglich.

### 2.2 Praktische Vorgehensweise

Für die messtechnische Bestimmung der Korrekturfaktoren sind spezielle, elektrisch kleine Quellen notwendig, welche ausschließlich horizontale oder vertikale Ströme innerhalb der Korrektorebene erzeugen. Um die Ermittlung einer korrekten Übertragungsfunktion zu gewährleisten, müssen alle diskreten Stromsegmente in jeder Orientierung unabhängig gespeist werden können. Es ist sinnvoll, möglichst kleine Strukturen zu verwenden, welche sich mit einzelnen Hertzischen Dipolen approximieren lassen und somit die weiterführenden Berechnungen vereinfachen. Als Quellen wurden eine Monopolantenne für Ströme in vertikaler Orientierung und eine Dipolantenne für Ströme in horizontaler Orientierung ausgewählt (Bild 3). Bild 3 zeigt außerdem die Approximation des Monopols mit einem Dipol in z-Richtung und die Approximation einer Dipolantenne mit einem Hertzischen Dipol in x-Richtung.

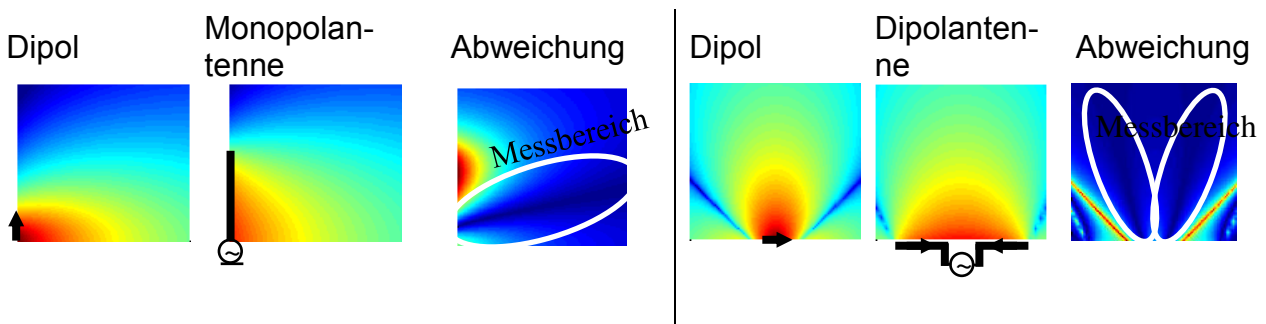


**Bild 3:** Quellen für horizontale und vertikale Ströme (**links**); Approximation der Quellen mit Hertzischen Dipolen (**rechts**)

Während sich die Speisung der Monopolantenne als unproblematisch erweist, muss die Dipolantenne mit zwei vertikalen Leitern gespeist werden. Diese erzeugen unerwünschte vertikale Feldkomponenten. Jedoch kann im Fall von ausreichend geringem Abstand der vertikalen Elemente zueinander und einer symmetrischen Einspeisung von einer Kompensation der vertikal polarisierten Felder im Beobachtungspunkt ausgegangen werden. Um eine symmetrische Einspeisung zu erreichen, kann ein Symmetrierglied (Balun, balanced-unbalanced) verwendet werden. Da die Untersuchungen aber über einen großen Frequenzbereich erfolgen sollen, wird hier eine „single-ended to mixed-mode“ S-Parameter Messung mit einem 4-Kanal Netzwerkanalysator eingesetzt, um die symmetrische Speisung nachzubilden [8].

$$s_{1d} = \frac{1}{\sqrt{2}}(s_{12} - s_{13}) \quad (4)$$

Unter Beachtung der Spiegeltheorie können die äquivalenten Dipolmomente der Antennen durch Messung an einem einzelnen Beobachtungspunkt im elektromagnetischen Nahfeld gewonnen werden. Da die Quellen über eine örtliche Ausdehnung verfügen, ist die Approximation im Fernfeld zwar präzise, die Approximation im Nahfeld ist jedoch fehlerbehaftet. Um das Dipolmoment möglichst genau zu ermitteln wird ein Feldbereich nah an der Quelle gewählt, in dem eine minimale Abweichung zwischen Antennenfeld und Dipolfeld besteht (Bild 4).



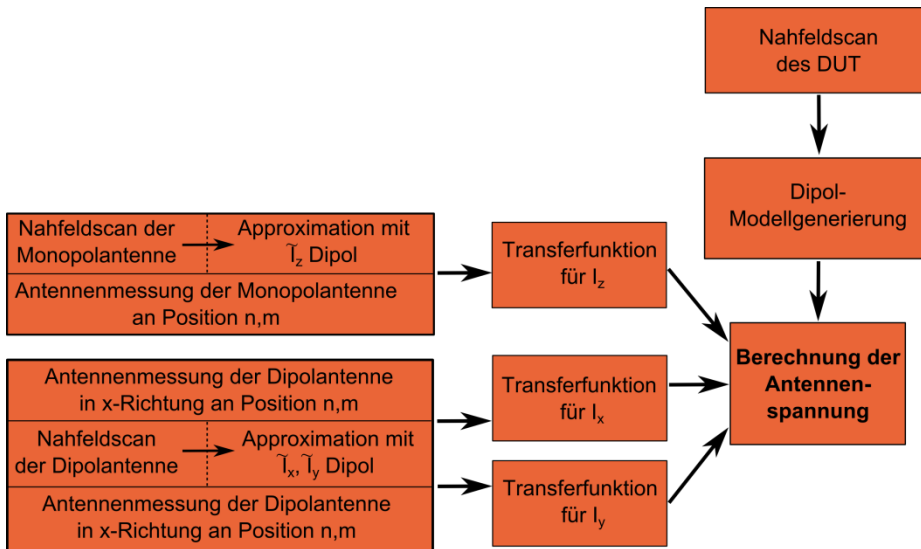
**Bild 4:** Bestimmung des Messbereiches zur Approximation der Quellen mit Hertzschen Dipolen, Monopol (**links**), Dipol (**rechts**)

### 2.3 Bestimmung von elektromagnetischen Verhaltensmodellen mit Korrekturfaktoren

Sind die Korrekturfunktionen für eine beliebige Stromverteilung innerhalb eines definierten Bereichs bekannt, können diese auf eine willkürliche Platine angewendet werden. Im nächsten Schritt wird ein Nahfeld-Scan von der Platine durchgeführt und ein Multi-Dipol Modell aus den gewonnenen Felddaten erzeugt [3][4][7][9]. Die berechneten Dipolströme werden in ihre x- y- und z-Komponenten zerlegt und mit den entsprechenden Übertragungsfunktionen in Antennenspannungen transformiert. Die Superposition der Spannungen beschreibt schließlich die gesamte Antennenspannung des PCBs.

$$V_{ant} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M T^{x_{nm}} I^{x_{nm}} + T^{y_{nm}} I^{y_{nm}} + T^{z_{nm}} I^{z_{nm}} \quad (5)$$

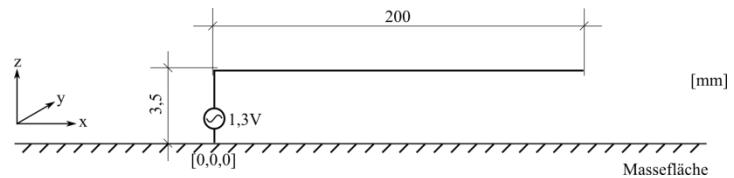
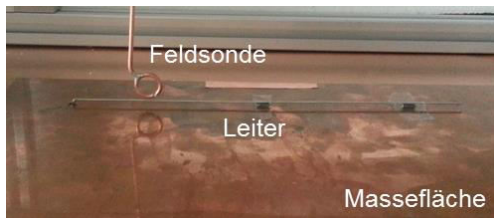
Hier beschreibt  $V_{ant}$  die Gesamtspannung der Antenne,  $T^{x,y,z}$  die Übertragungsfunktionen und  $I^{x,y,z}$  die durch das Scanning ermittelten Ströme. Bild 5 zeigt den Prozess der Modellerstellung bzw. Vorhersage von ALSE Antennenmesswerten.



**Bild 5:** Ablauf des vorgestellten Korrekturverfahrens

### 3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden auf Messdaten basierende Ergebnisse zur Verifikation des vorgestellten Verfahrens gezeigt. Ziel ist es, die Antennenspannungen einer vertikal und horizontal polarisierten LPDA (logarithmisch-periodische Antenne) in einer Absorberkabine, im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz, mittels Nahfeld-Scan vorherzusagen. Als Messobjekt wird eine einfache Struktur verwendet (Bild 6). Diese besteht aus einem Draht, 3,5 mm über der Massefläche, einer Länge von 200 mm und einem offenen Ende. Die Struktur kann als Annäherung an die Leiterbahn einer Platine aufgefasst werden und beinhaltet sowohl horizontale als auch vertikale Stromkomponenten.



**Bild 6:** Bild Teststruktur (**links**); Skizze Teststruktur (**rechts**)

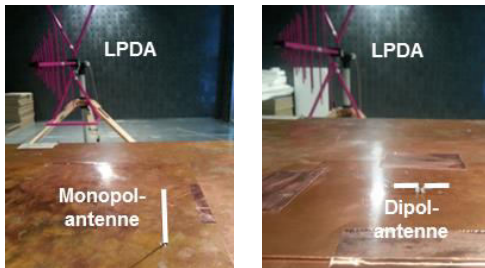
Alle Messungen werden mit einem 4-Kanal Netzwerkanalysator durchgeführt.

#### 3.1 Ermittlung der Korrekturfunktionen

Die Korrekturfunktionen werden nach den beschriebenen Messverfahren und Berechnungen ermittelt (Bild 5). Zuerst wird das magnetische Feld im Nahbereich der Drahtstrukturen aufgenommen und ein äquivalentes Dipolmoment berechnet. Danach werden Antennenmessungen mit der LPDA durchgeführt und das von den Drahtstrukturen abgestrahlte Feld, innerhalb des Korrekturbereichs, mit dem Störeinfluss der Messumgebung aufgenommen (Bild 7). Hierbei wird sowohl die vertikale als auch die horizontale Polarisation beachtet.

Um die Korrekturfunktionen für die vertikalen Ströme  $I_z$  zu gewinnen, wird ein senkrecht auf der Metallplatte stehender Draht mit einer Länge von 30 mm verwendet. Die Korrektur-

turfunktionen der horizontalen Ströme werden mit Hilfe einer 30 mm langen, 3 mm hohen, Dipolantenne gewonnen. Wie schon erwähnt wird eine single-ended to mixed-mode S-Parametermessung und Symmetrierung nach (4) durchgeführt. Zuerst wird das äquivalente Dipolmoment aus den Nahfeldmessung an der Quelle bestimmt. Anschließend erfolgt eine Antennenmessung in der realen Messumgebung (Bild 7).

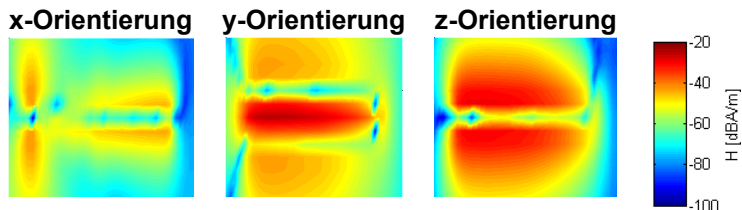


**Bild 7:** Antennenmessung in realer Messumgebung; Monopol (**links**), Dipol (**rechts**)

### 3.2 Nahfeldscan der Teststruktur und Korrektur der Felddaten

Nach Bild 5 wird ein Nahfeldscan der Leiterplatte und die Identifizierung einer äquivalenten Stromverteilung für das Multi-Dipol Modell durchgeführt.

Die Scandaten werden in einer 250 mm x 60 mm ausgedehnten Ebene 11 mm oberhalb der Leiterstruktur (Bild 6) aufgenommen. Dabei werden insgesamt 520 diskrete Feldpunkte, in x-, y- und z-Orientierung gemessen (Bild 8). Die Quellen werden entlang des Strompfades verteilt und miteinander korreliert [4]. Aus den gemessenen Nahfeld-Scandaten und den korrelierten Quellen werden schließlich die Dipolströme bestimmt.



**Bild 8:** Nahfeld-Scan des magnetischen Feldes oberhalb der Leiterplatte mit Teststruktur (hier bei 420 MHz)

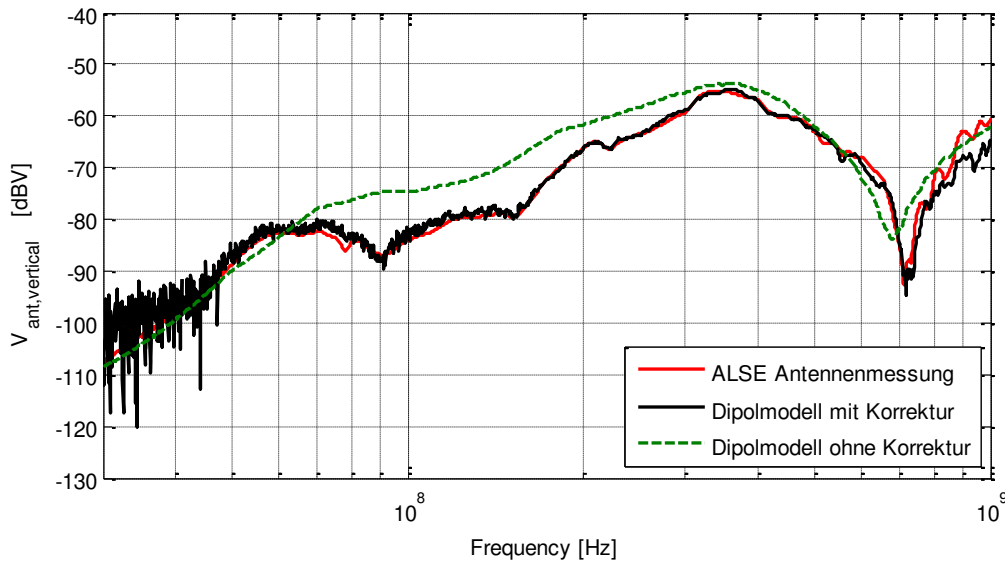
Anschließend können die ermittelten Dipolströme vektoriell zerlegt und mit den zugehörigen Übertragungsfunktionen in Antennenspannungen transformiert werden. Die Summe der Antennenspannungen führt nach (5) zu der von der Platine erzeugten Gesamtspannung am Antennenfußpunkt.

Bild 9 und Bild 10 zeigen das Ergebnis des Korrekturverfahrens an einem Beobachtungspunkt entsprechend der Antennenposition, der 2 m entfernt ist von der Teststruktur. Für den Vergleich und zur Verifikation des Verfahrens wird zum einen eine Antennenmessung der Teststruktur innerhalb der beeinflussenden Messumgebung durchgeführt. Zum anderen wird die Feldberechnung am Beobachtungspunkt eines mittels Nahfeld-Scan ermittelten, aber nicht korrigierten Dipolmodells gezeigt.

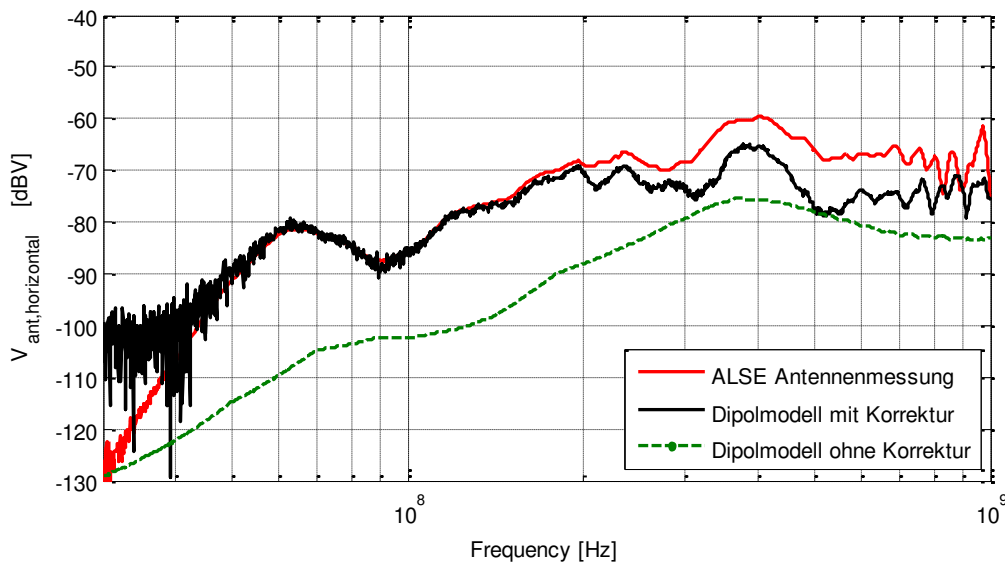
Die Ergebnisse in vertikaler Feldpolarisation sind sehr gut bis zu einer Frequenz von 900 MHz. Zwischen 900 MHz und 1000 MHz kommt es zu einer Abweichung von max. 6 dB zwischen korrigiertem Verhaltensmodell und den ALSE Antennenmessungen. Die Ergebnisse bei horizontaler Feldpolarisation stimmen bis zu einer Frequenz von 280 MHz mit einer max. Abweichung von 3 dB überein. Oberhalb dieser Frequenz kommt es zu einem Fehler von bis zu 10 dB. Allerdings ist bei beiden Polarisationen



eine deutliche Verbesserung der Vorhersagequalität mittels Korrekturverfahren erkennbar.



**Bild 9:** Vergleich der resultierenden Antennenspannungen (vertikale Feldpolarisation)



**Bild 10:** Vergleich der resultierenden Antennenspannungen (horizont. Feldpolarisation)

#### 4. Zusammenfassung

Als Alternative für ALSE Antennenmessungen können sogenannte Feld-Scan-Verfahren zum Einsatz kommen. Diese erlauben eine genauere und reproduzierbare Bestimmung des abgestrahlten elektromagnetischen Feldes, z.B. einer Platine, und sind weit weniger kosten- und platzintensiv.

Hierbei werden ortsabhängig Nahfeld-Daten aufgenommen. Auf Basis dieser Daten können elektromagnetische Verhaltensmodelle erstellt werden und Nah- und Fernfeldberechnungen durchgeführt werden.

Da mit den so ermittelten Modellen gewöhnlich für vereinfachte Bedingungen das Fernfeld bestimmt wird und Antennenmessungen in einer komplexen Messumgebung durchgeführt werden, ist eine Vorhersage der Antennenmesswerte aus den Scan-Daten mit

Fehlern verbunden. Es gilt, Korrekturfunktionen zu ermitteln, welche die Störeinflüsse der Umgebung in die Modellberechnungen integrieren.

In diesem Beitrag wurde ein Korrekturverfahren vorgestellt, welches die Bestimmung von elektromagnetischen Felddaten in einer realen Messumgebung auf der Basis von Feld-Scan-Daten erlaubt. Dabei wurden auf Messdaten basierende Übertragungsfunktionen, innerhalb eines definierten Korrekturbereichs, zwischen kleinen Stromsegmenten in x-, y- und z-Orientierung und der Messantenne erstellt. Die zuvor ermittelte Stromverteilung auf einer Platine wurde mit diesen Segmenten örtlich korreliert. Die Summe aller Ströme mit ihren zugehörigen Korrekturfunktionen beschreibt die Gesamtantennenspannung.

Zur Verifikation der Methode wurden zu erwartende Antennenspannungen in einer realen Messumgebung vorhergesagt und mit Antennenmessungen verglichen. Hierbei wurde sowohl die vertikale als auch die horizontale Feldpolarisation mit Hilfe einer einfachen Teststruktur untersucht. Für beide Polarisierungen zeigte sich eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse im Vergleich zu einem nicht korrigierten Verhaltensmodell.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des CATRENE-Projekts CA310 EM4EM (Electromagnetic Reliability and Electronic Systems for Electro Mobility) durchgeführt. Diese individuelle Forschung wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der Nummer 16 M3092 I gefördert. Die Autoren sind allein für den Inhalt verantwortlich.

## Literatur

- [1] T. Burghart, H. Rossmanith and G. Schubert, "Evaluating the RF-Emissions of Automotive Cable Harness", IEEE International Symposium on EMC, 2004
- [2] D. Deschrijver, F. Vanhee, D. Pissort, T. Dhaene, "Automated Near-Field Scanning Algorithm for the EMC Analysis of Electronic Devices", IEEE Trans. EMC, vol. 54, pp. 502-510, June 2012
- [3] J. Jia, D. Rinas and S. Frei, "Prediction of Radiated Fields from Cable Bundles based on Current Distribution Measurements", EMC Europe, Rome, 2012
- [4] D. Rinas and S. Frei, „Methoden zur Optimierung von Störaussendungsmodellen für Platinenstrukturen auf Basis von Nahfeldmessdaten. EMV Düsseldorf“, Germany, 2012
- [5] X. Tong, D. W. P. Thomas, A. Nothofer, P. Sewell, C. Christopoulos, "Modeling Electromagnetic Emissions From Printed Circuit Boards in Closed Environments Using Equivalent Dipoles", IEEE Trans. EMC, vol. 52, pp. 462-470, May 2010
- [6] H. Weng, D. G. Beetner, R. E. DuBroff, "Prediction of Radiated Emissions Using Near-Field Measurements", IEEE Trans. EMC, vol. 53, pp. 891-899, November 2011
- [7] D. W. P. Thomas, C. Obiekezie, S. Greedy, A. Nothofer, P. Sewell "Characterisation of Noisy Electromagnetic Fields from Circuits using the Correlation of Equivalent Sources", EMC Europe, Rome, 2012
- [8] Anritsu, „Three and Four Port S-parameter Measurements - Calibrations and Mixed-Mode Parameters Application Note“
- [9] A.J. Lozano-Guerro, J. Monzó-Cabrera, F.J. Clemente-Fernández, J. Fayos-Fernández, J.L. Pedreno-Molina and A. Diaz-Morcillo, "Electromagnetic Equivalent Models for Printed Circuit Boards Inside a Metallic Enclosure Using a Coaxial-to-Waveguide Transition Calibration", IEEE Trans. EMC, vol. 54, pp. 931-939, August 2012
- [10] Institut für Theoretische Elektrotechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, „Concept-II“, [www.tet.tuhh.de/concept/](http://www.tet.tuhh.de/concept/) (03.11.2013)
- [11] 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", IEC, 2007