

Messung äquiv. Nahfeldquellen und Kombination mit Feldsimulationen am Beispiel eines DC-DC Wandlers

Dominik Schröder, Fraunhofer ENAS, Deutschland
Dr.-Ing. Christian Hedayat, Fraunhofer ENAS, Deutschland
Prof. Dr. Jens Förstner, Universität Paderborn, Deutschland
Prof. Dr. Harald Kuhn, Fraunhofer ENAS, Deutschland

1 Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung führt dazu, dass eine stetig wachsende Anzahl elektronischer Geräte sowohl in industriellen Anwendungen als auch im Alltag eingesetzt wird. Moderne Systeme verfügen zunehmend über drahtlose oder leitungsgebundene Kommunikationsschnittstellen sowie über intelligente Funktionalitäten. Elektrofahrzeuge sind mit einer hohen Dichte elektrischer und elektronischer Komponenten ausgestattet, während industrielle Maschinen verstärkt nachgerüstet werden, um Prozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu optimieren. Diese Entwicklung resultiert in einer zunehmend dichten elektromagnetischen Umgebung mit Emissionen über ein breites Frequenzspektrum. Folglich gewinnen Nahfeldwechselwirkungen zwischen elektronischen Geräten sowie deren Interaktionen mit benachbarten Systemen, Gehäusestrukturen oder dem Menschen zunehmend an Bedeutung für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und elektromagnetischer Störungen (EMI). [1]

Gegenwärtig erfolgt die Konformitätsbewertung der EMV von Geräten jedoch überwiegend auf Basis von Fernfeldmessungen. Hierbei wird der Prüfling (DUT) typischerweise in einer Absorberhalle in einem Abstand von 3 m zu einer Messempfangsantenne positioniert. Die gemessenen Emissionswerte müssen die in den einschlägigen Normen festgelegten Grenzwerte einhalten, um eine erfolgreiche EMV-Zertifizierung zu erreichen. Bei Nichtbestehen der Prüfung liefern Fernfeldmessungen jedoch lediglich eingeschränkte Informationen hinsichtlich der zugrunde liegenden Störquellen. [2]

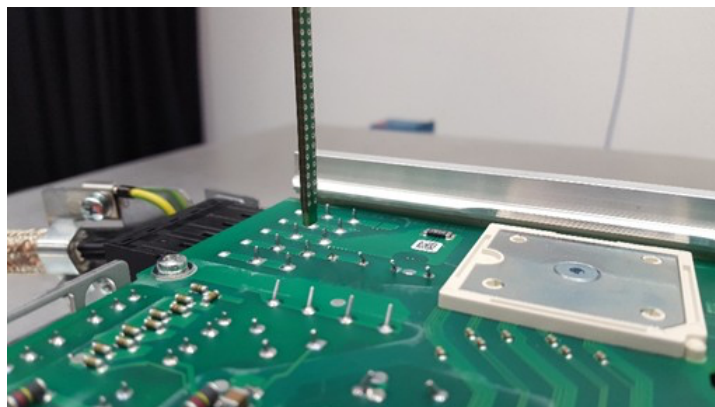


Abbildung 1. Beispielaufbau auf einem Nahfeldscanner mit Nahfeldsonde

Im Gegensatz dazu ermöglichen Nahfeldscans (NFS) eine hochauflösende Analyse der elektromagnetischen Eigenschaften des DUT. Dabei werden elektrische oder magnetische Nahfeldsonden in geringem Abstand zur Oberfläche des Prüflings positioniert, typischerweise im Bereich weniger Millimeter bis Zentimeter. Die so gewonnenen Messdaten erlauben die Lokalisierung von relevanten Störquellen, unerwünschten Kopplungspfaden sowie funktionalen Problemen.

Darüber hinaus können Nahfelddaten zur Ableitung einer äquivalenten Nahfeldquelle genutzt werden. Auf Grundlage des Oberflächenäquivalenzprinzips sind die tangentialen Nahfelder auf einer geschlossenen Oberfläche um den DUT ausreichend, um dessen elektromagnetisches Verhalten gegenüber der Umgebung vollständig zu beschreiben. [3] Die daraus abgeleitete

Nahfeldquelle kann unter anderem zur Extrapolation der Nahfelddaten ins Fernfeld genutzt werden, um EMV-Messungen in der Absorberhalle abzuschätzen [4]-[9].

In komplexeren Anwendungen lässt sich die Nahfeldquelle in elektromagnetische Feldsimulationswerkzeuge integrieren, um Wechselwirkungen mit der Umgebung zu untersuchen [9]-[12]. Beispielsweise kann die Anregung benachbarter elektronischer Systeme analysiert oder die räumliche Feldverteilung innerhalb eines Fahrzeugs oder einer Industriehalle berechnet werden. Ebenso ermöglicht dieser Ansatz die Simulation der spezifischen Absorptionsrate (SAR) in einem menschlichen Körper zur Bewertung der elektromagnetischen Exposition.

2 Äquivalente Nahfeldquellen aus Nahfeldmessungen

2.1 Oberflächen-Äquivalenzprinzip

Die grundlegende theoretische Basis zur Verwendung von Nahfelddaten als äquivalente Quelle für elektromagnetische Simulationen bildet das Oberflächen-Äquivalenzprinzip, auch bekannt als Huygens-Prinzip. Dieses besagt, dass zur Beschreibung der elektromagnetischen Abstrahlung einer elektrischen Quelle J nach außen ausschließlich die tangentialen Feldkomponenten auf einer geschlossenen Oberfläche S um die Quelle herum ausreichend sind. Durch Bildung des Kreuzprodukts der tangentialen Feldkomponenten mit dem Normalenvektor der Oberfläche lässt sich das elektrische und magnetische Feld durch eine äquivalente magnetische und elektrische Oberflächenstromdichte beschreiben, welche als

$$\vec{K} = \vec{n} \times \vec{H}|_{\vec{r} \in S}, \vec{M} = -\vec{n} \times \vec{E}|_{\vec{r} \in S} \quad (1)$$

bezeichnet werden. Diese äquivalenten Oberflächenstromdichten bilden die Grundlage des Oberflächenäquivalenzprinzips und werden zur Berechnung der elektromagnetischen Felder im äußeren Bereich D verwendet. Die elektrische Feldstärke an der Position r im Bereich D kann anschließend durch

$$\vec{E}(\vec{r}) = -jk_0 Z_0 \vec{A}_e(\vec{r}) - \nabla \Phi_e(\vec{r}) + \nabla \times \vec{A}_m(\vec{r}), \vec{r} \in D_- \quad (2)$$

berechnet werden und das H-Feld durch

$$\vec{H}(\vec{r}) = j \frac{k_0}{Z_0} \vec{A}_m(\vec{r}) - \nabla \Phi_m(\vec{r}) + \nabla \times \vec{A}_e(\vec{r}), \vec{r} \in D_-, \quad (3)$$

wobei für die skalaren und Vektorpotentiale

$$\vec{A}_e(\vec{r}) = \int_S G_0(\vec{r}, \vec{r}') \vec{K}(\vec{r}') dA(\vec{r}'), \quad (4)$$

$$\vec{A}_m(\vec{r}) = - \int_S G_0(\vec{r}, \vec{r}') \vec{M}(\vec{r}') dA(\vec{r}'), \quad (5)$$

$$\Phi_e(\vec{r}) = j \frac{k_0}{Z_0} \int_S G_0(\vec{r}, \vec{r}') \nabla_s \cdot \vec{K}(\vec{r}') dA(\vec{r}'), \quad (6)$$

$$\Phi_m(\vec{r}) = j \frac{1}{k_0 Z_0} \int_S G_0(\vec{r}, \vec{r}') \nabla_s \cdot \vec{M}(\vec{r}') dA(\vec{r}') \quad (7)$$

gilt und G_0 der Greens Funktion entspricht. [3][7]

2.2 Anwendung in Feldsimulationen

Diese Formeln können nun entweder numerisch mit einem eigenständigen Solver wie in [7] gelöst werden. Oder es werde kommerzielle Feldsimulationstools genutzt die mit den äquivalenten Nahfeldquellen umgehen können. In dieser Arbeit wird die Software CST Studio Suite für alle

simulativen Untersuchungen verwendet. Hierbei bieten äquivalente Nahfeldquellen eine leistungsstarke Abstraktion für die effiziente Analyse elektromagnetischer Emissionen und Wechselwirkungen sowohl in simulations- als auch in messbasierten Arbeitsabläufen. Dennoch, in einem rein simulativen Kontext können äquivalente Quellen aus detaillierten Vollwellensimulationen komplexer elektronischer Systeme extrahiert und anschließend in reduzierten Simulationsmodellen wiederverwendet werden. Dieser Ansatz ermöglicht die Analyse großer und rechenintensiver Umgebungen, ohne die interne Struktur des ursprünglichen Geräts explizit modellieren zu müssen. Dadurch wird die Komplexität der Simulation und der Rechenaufwand erheblich reduziert.

Die Verwendung von gemessenen Nahfeldquellen wird bislang vor allem für Nahfeld-zu-Fernfeld Transformationen genutzt. So wird dieses Verfahren unter anderem in [4]-[9] gezeigt. Viele Verfahren werden aber vor allem in der Antennentechnik eingesetzt oder verwenden Nahfelddaten aus dem strahlenden Nahfeld, während die Daten hier im reaktiven Nahfeld erfasst werden. Ein Beispiel welches für eine breitbandige, aber kontinuierliche Anregung über einen Kammgenerator am Ende auch mit Fernfeldmessungen verglichen wurde, ist in [4] dargestellt. Eine beispielhafte Nahfeldquelle und die Ergebnisse sind in Abbildung 2 zu sehen.

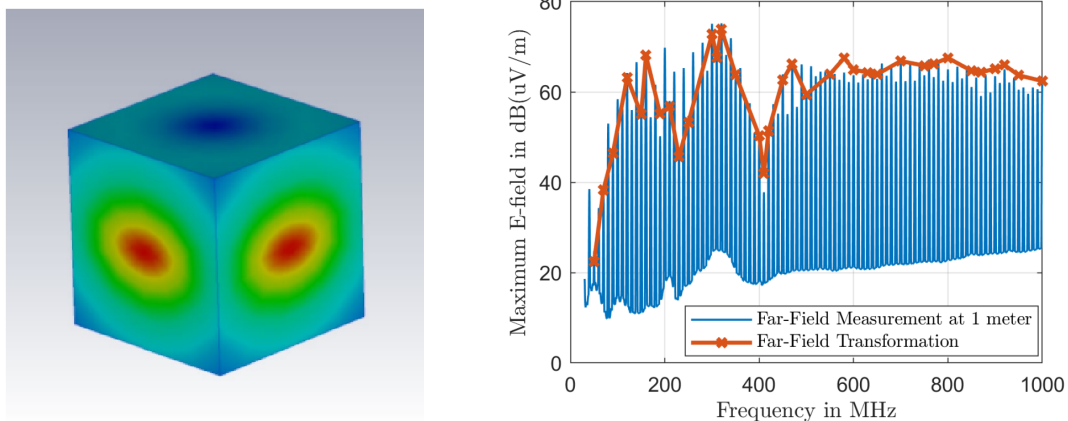


Abbildung 2. Nahfeldquelle und Ergebnis einer Nahfeld-zu-Fernfeld Transformation

Über die Fernfeldvorhersage hinaus ermöglichen äquivalente Nahfeldquellen auch die Untersuchung von nahfeldbezogenen Wechselwirkungen mit der Umgebung [6][10][12]. Dazu gehört die Analyse von Kopplungsmechanismen zu anderen elektronischen Systemen, Kabelbäumen oder leitfähigen Strukturen. Während solche Anwendungsfälle in der Literatur nicht über kleinere Studien hinausgehen, hat eine systematische und quantitative Bewertung von Nahfeldwechselwirkungen auf der Grundlage gemessener äquivalenter Quellen bisher nur begrenzte Beachtung gefunden. Insbesondere die Auswirkungen von messbedingten Unsicherheiten und Rauschen auf Wechselwirkungsanalysen in unmittelbarer Nähe der Quelle sind noch nicht ausreichend untersucht. Die Berücksichtigung dieser Aspekte ist unerlässlich, um die Anwendbarkeit äquivalenter Nahfeldquellen zu gewährleisten

2.3 Anforderungen an die Messtechnik

Die experimentelle Erfassung äquivalenter Nahfeldquellen stellt hohe Anforderungen an die Messinstrumente. Um eine Nahfeldquelle vollständig zu charakterisieren, müssen an jedem räumlichen Abtastpunkt sowohl die Amplituden- als auch die Phaseninformationen des elektromagnetischen Feldes bekannt sein. Die meisten handelsüblichen Nahfeld-Scanner-Systeme bieten diese Möglichkeit jedoch nicht. In der Praxis werden Nahfeldmessungen üblicherweise mit Spektrumanalysatoren durchgeführt, die nur amplitudenbasierte Messungen ermöglichen und daher keine Phasenkohärenz zwischen den räumlichen Abtastpunkten bieten. Vektornetzwerkanalysatoren (VNAs) sind zwar grundsätzlich in der Lage, zweikanalige Amplituden- und Phasenmessungen durchzuführen, ihre Anwendbarkeit für die Charakterisierung von Nahfeldquellen im EMV-Kontext ist jedoch begrenzt. VNAs erfordern eine explizite Anregung

des zu testenden Geräts über einen Anschluss, der für frei arbeitende, integrierte elektronische Systeme in der Regel nicht verfügbar ist. Daher eignen sich VNAs in erster Linie für die Charakterisierung einzelner Teilschaltungen oder Antennen, sind jedoch nicht für die Untersuchung von Strahlungsemissionen und EMV-bezogenen Problemen geeignet.

Als alternativer Ansatz können Phaseninformationen grundsätzlich aus mehrdimensionalen Messdaten unter Verwendung von Signalverarbeitungstechniken rekonstruiert werden. Dennoch haben solche Methoden noch keine ausreichende Robustheit und Zuverlässigkeit für allgemeine EMV-Anwendungen gezeigt.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, ist ein Vektorsignalanalysator (VSA) erforderlich, der kohärente Mehrkanalmessungen durchführen kann. Solche Geräte ermöglichen die gleichzeitige Erfassung von Amplituden- und Phaseninformationen, ohne dass ein direkter Kontakt zum Prüfling erforderlich ist. Messsysteme, die Nahfeldabtastung mit phasenkohärenter VSA-basierter Erfassung kombinieren, sind jedoch nicht verfügbar und in der Regel mit erheblichen Kosten und Komplexität verbunden. Diese begrenzte Verfügbarkeit ist einer der Hauptgründe dafür, dass äquivalente Nahfeldquellen bisher nur in begrenztem Umfang in praktischen EMV-Anwendungen eingesetzt werden.

Ein Messsystem, das diese Anforderungen erfüllt, ist am Fraunhofer ENAS in Paderborn verfügbar, siehe Abbildung 3. Dieses wurde für die in dieser Arbeit vorgestellten experimentellen Untersuchungen eingesetzt.

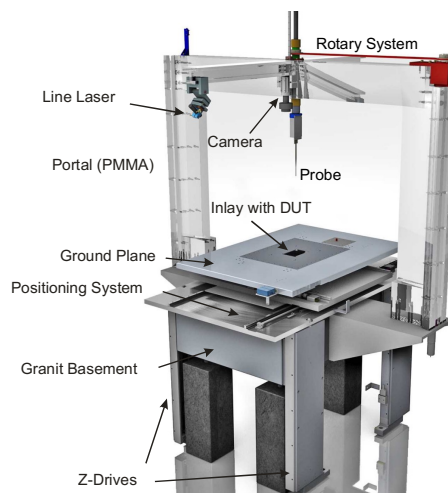


Abbildung 3. Nahfeldscanner, mit dem die Nahfeldmessungen durchgeführt worden sind

3 Simulation und Nahfeldmessung eines einfachen DC-DC-Wandlers

3.1 Beschreibung des Testobjektes

Das in dieser Arbeit verwendete DUT ist ein stark vereinfachter DC-DC-Abwärtswandler. Er stammt aus einem Studentenprojekt, dessen Ziel es war, einen kompakten und verständlichen Demonstrator für Nahfeld-Scan-Experimente zu entwickeln. Der Wandler wird mit einem festen Tastverhältnis von 50% betrieben und bietet ein klar definiertes und reproduzierbares Schaltverhalten. Das Schaltsignal wird von einer Standard-NE555-Timer-Schaltung erzeugt, der mit einer Schaltfrequenz von ca. 100 kHz arbeitet.

Die Topologie des Wandlers ist bewusst einfach gehalten und wird nur mit grundlegenden, Komponenten realisiert. Als Hauptelement wird ein einzelner Leistungs-MOSFET verwendet, der in einer Low-Side-Konfiguration betrieben wird. Dieser Ansatz vereinfacht die Gate-Ansteuerschaltung erheblich, da keine Pegelumsetzung oder isolierter Treiber erforderlich ist. Die übrigen passiven Komponenten, wie Induktivität, Freilaufdiode und Ausgangskondensator, sind so ausgewählt, dass ein stabiler Betrieb gewährleistet wird.

Gleichzeitig weist der Wandler typische Eigenschaften realer Schaltnetzteile auf, darunter steile Stromtransienten, lokalisierte Schaltschleifen und breitbandige elektromagnetische Emissionen.

Dieses Design ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. Einerseits kann das DUT experimentell mit einem Nahfeldscanner charakterisiert werden, um die Emissionsquellen und Kopplungsmechanismen zu identifizieren. Andererseits ermöglicht die einfache und klar definierte Schaltungstopologie eine realistische elektromagnetische Modellierung, wodurch ein quantitativer Vergleich zwischen gemessenen Nahfelddaten und simulierten Feldverteilungen erleichtert wird. Somit dient der Abwärtswandler als geeignetes Referenzobjekt für die Validierung von Nahfeldmessverfahren und die Bewertung ihrer Übereinstimmung mit numerischen Feldsimulationen.

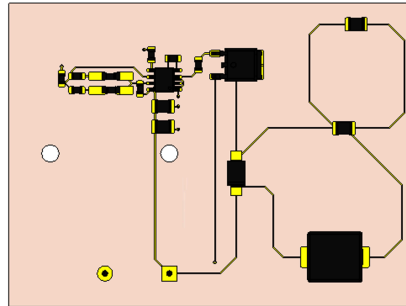


Abbildung 4. Aufbau des DC-DC Wandlers in CST Studio Suite

3.2 Co-Simulation

Im ersten Schritt wurde eine kombinierte Co-Simulation aus Feld- und Schaltungssimulation mit CST Studio Suite durchgeführt. Das Modell ist in Abbildung 4 so sehen. Soweit verfügbar, wurden die elektrischen Komponenten des DUTs durch SPICE-basierte Modelle dargestellt, darunter der NE555-Timer, der Leistungs-MOSFET, die Freilaufdiode und das induktive Element. Dieser Ansatz gewährleistet eine realistische Darstellung des Schaltverhaltens, der parasitären Effekte und der transienten Ströme innerhalb der Schaltung. Die Schaltungsbeschreibung wurde in der CST Schematic-Umgebung implementiert und eng mit einer feldtheoretischen Simulation des Wandlerlayouts gekoppelt.

Durch die Verknüpfung der Zeitbereichs-Schaltungssimulation mit dem 3D-Feldlöser wurden die vom DUT unter realistischen Betriebsbedingungen erzeugten elektromagnetischen Felder ermittelt. Dieser Co-Simulations-Workflow ermöglicht die direkte Berechnung sowohl der Nahfeld- als auch der Fernfeldstrahlung, die durch die Schaltaktivität des Wandlers entsteht. Als Ergebnis werden räumlich aufgelöste Nahfeldverteilungen in unmittelbarer Nähe des Prüflings sowie Fernfeldstrahlungsmuster in einer Entfernung von 3 m extrahiert.

Die Simulationsergebnisse für ein Nahfeld und einen Fernfeldpunkt sind in Abbildung 5 dargestellt. Das Nahfeld ist bei 100 MHz dargestellt und entspricht dem tangentialen H-Feld von oben nach unten. Der Fernfeldpunkt ist 3 Meter entfernt über dem PCB. Hierbei ist der Einfluss der künstlich erzeugten Loops deutlich sichtbar.

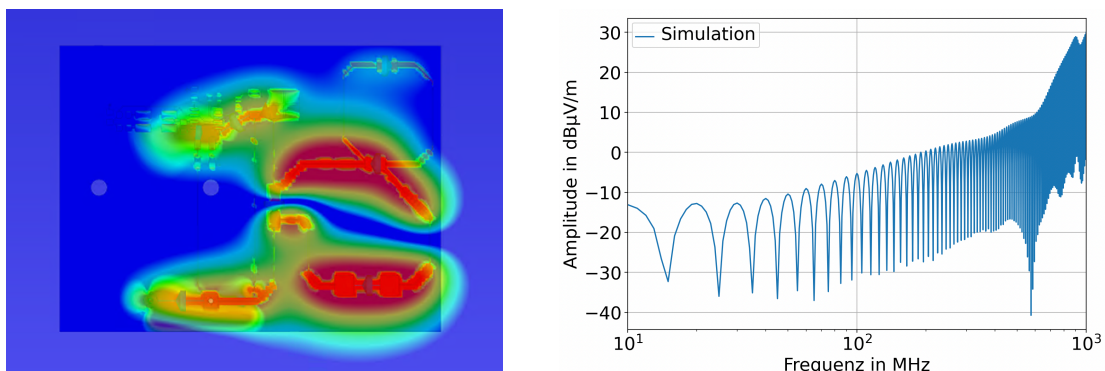


Abbildung 5. Nahfeld bei 100 MHz (links) und Fernfeld bei 3 Meter Entfernung (rechts)

3.3 Nahfeldmessung

Als nächstes wird der reale DC-DC Wandler aufgebaut und mit dem Nahfeldscanner an ausgewählten Frequenz-Stützstellen die Nahfeldquelle gemessen. Dazu werden die tangentialen E- und H-Felder mit den entsprechenden Nahfeldsonden erfasst. Da das DUT akkubetrieben ist gibt es keine Kabel, die miterfasst werden müssen und durch Drehung des DUT kann die Rückseite gemessen werden. Um den Einfluss der Metallfläche des Nahfeldscanners zu verringern, wird das DUT auf eine Styrodurplatte mit geringer relativer Permittivität gelegt. Dadurch wird etwas Abstand von ca. 10 cm zwischen Metall und Prüfling hinzugefügt.

Da in [12] simulative Untersuchungen zum SNR und der Qualität der Nahfeldquelle durchgeführt worden sind, wird der DC-DC Wandler mit zwei verschiedenen Messeinstellungen getestet. Zum einen wird die Sensitivität der Empfängereigenschaften sehr hoch eingestellt, um ein hohes SNR und damit eine rauscharme Nahfeldquelle zu bekommen. Zum anderen wird der Messempfänger so eingestellt, dass stärkeres Rauschen auftritt und damit ein SNR von ungefähr 10 dB entsteht. Damit soll vor allem die Nahfeld-zu-Fernfeld Berechnung und die Nahfelder um die Quelle herum untersucht werden.

Das Ergebnis für ein Nahfeld ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Frequenz, die Messpunkte und der Abstand zum DUT sind gleichgewählt wie in der Abbildung der Simulationsergebnisse, nur das hier verrauschte und nicht-verrauschte Messungen gegenübergestellt werden.

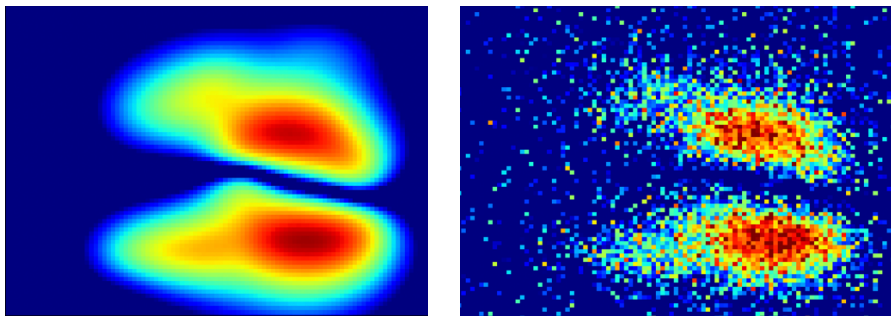


Abbildung 6. Nahfeldscan (100 MHz, 5 mm Abstand) mit gutem (l.) und schlechtem (r.) SNR

4 Kombination der Nahfeldmessung mit Feldsimulationen

Im Folgenden sollen die gemessenen, äquivalenten Nahfeldquellen zusammen mit Feldsimulationen kombiniert werden. Dazu werden zum einen einfache Nahfeld-zu-Fernfeld Transformationen durchgeführt. Zum anderen wird die Nahfeldinteraktion für zwei ausgewählte Fälle dargestellt.

Die großen Unterschiede zu anderen Veröffentlichungen sind, dass hier zunächst einmal ein komplexeres DUT verwendet wird welches keine monofrequente, zeitharmonische Anregung besitzt, dass eine 6-seitige Messung durch Drehen des DUTs gewährleistet wird und dass die Messung eine echte, unabhängige Phasenmessung verwendet. Somit wird eine vollständige Nahfeldquelle für ein realitätsnahes DUT erfasst.

4.1 Nahfeld-zu-Fernfeld Transformation

Als erste Untersuchung wird das Nahfeld in das Fernfeld extrapoliert. Die gemessene Nahfeldquelle mit gutem SNR ist in Abbildung 7 links dargestellt, das dazugehörige Fernfeld rechts daneben. Gleichzeitig wird das Fernfeld mit dem Simulationsergebnis, sowie mit der Extrapolation aus der Nahfeldquelle mit schlechtem SNR verglichen. Dort wird ersichtlich, dass durch die Nahfeldmessungen und die anschließende Fernfeldberechnung die Einhüllende der Fernfeldsimulation gut berechnet werden kann. Kommt jetzt signifikantes Rauschen durch grobe Messeinstellungen hinzu entstehen Abweichungen von bis zu 20 dB. Dadurch wird klar, dass geeignete Messeinstellungen wichtig sind für eine qualitativ gute Nahfeldquelle. Allerdings entsteht dabei eine Kompromissentscheidung zwischen Messgenauigkeit und Messgeschwindigkeit, da grobe Einstellungen eine schnellere Messung ermöglichen.

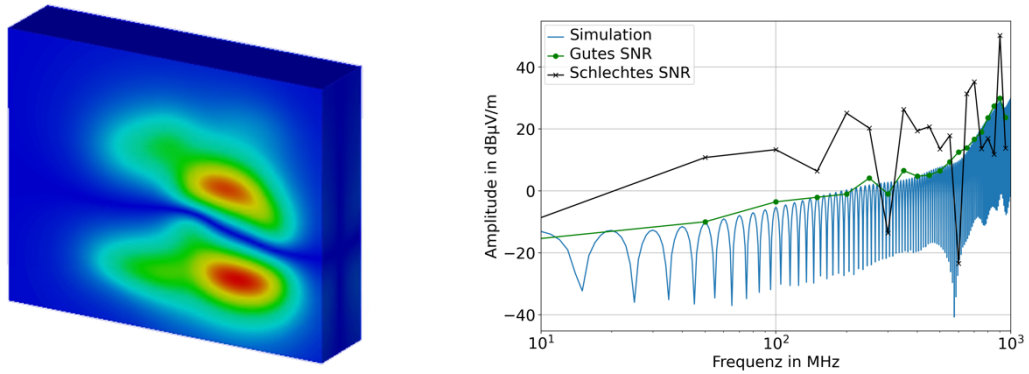


Abbildung 7. Gemessene Nahfeldquelle bei 100 MHz und Fernfeld bei 3 Metern

4.2 Beispiele für Nahfeldinteraktion

Neben der einfachen Nahfeld-zu-Fernfeld Transformation können die Nahfeldquellen, wie bereits angedeutet, auch für weitaus komplexere Simulationen verwendet werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 8 dargestellt. Hier wird ein vereinfachtes Modell eines IoT-Moduls in die Nähe der Nahfeldquelle gebracht. Der Aufbau ist links dargestellt, die Feldverteilung des elektrischen Feldes bei 120 MHz rechts. Neben der Feldverteilung kann auch die Spannung an Bauteilen simuliert werden. So wird an einen 50 Ω Widerstand an der 2,4 GHz Antenne eine Spannung von 5 mV bei 120 MHz eingekoppelt.

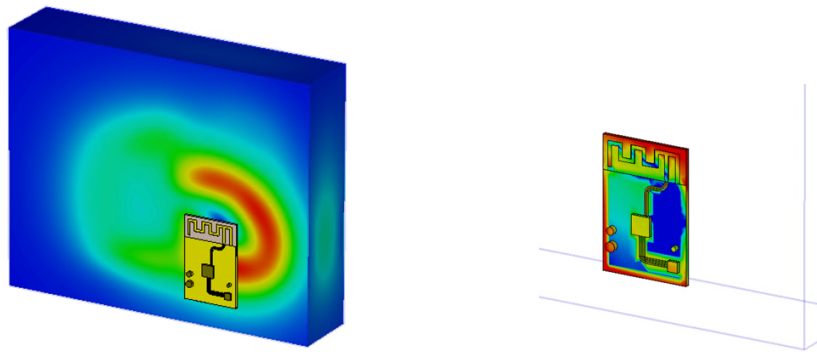


Abbildung 8. Nahfeldinteraktion des Wandlers mit einem IoT-Modul

Ein weiteres Beispiel ist in Abbildung 9 dargestellt. Die gemessene Nahfeldquelle wird in ein kleiner skaliertes Automodell importiert, um zu verdeutlichen, dass Nahfeldquellen größerer Objekte auch in größere Umgebungen eingebettet werden können. Hier ist die Nahfeldquelle im Boden des Autos platziert und die Abstrahlung in das Modell wird simuliert. Somit können Kopplungswege durch Nahfeldanalyse aufgedeckt und Design oder Positionierung optimiert werden.

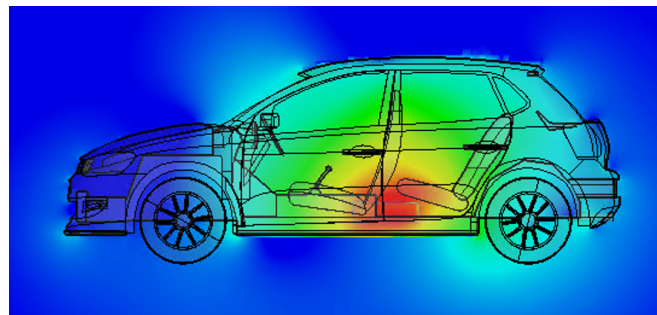


Abbildung 9. Simulation des DC-DC Wandlers in einem skalierten Auto

5 Zusammenfassung

In dieser Veröffentlichung wurde untersucht, wie aus phasengenauen Nahfeldmessungen äquivalente Nahfeldquellen gewonnen und mit Feldsimulationen kombiniert werden können. Basis ist das Oberflächenäquivalenzprinzip. Tangentiale E- und H-Felder auf einer geschlossenen Oberfläche werden in äquivalente Oberflächenströme überführt, die als Quelle in CST Studio Suite dienen. Als Demonstrator wurde ein einfacher DC-DC-Abwärtswandler mit analoger Signalerzeugung über einen NE555-Timer und MOSFET-Schalter genutzt. Zuerst erfolgte eine Co-Simulation aus SPICE-Schaltung und 3D-Feldmodell zur Bestimmung von Nah- und Fernfeldern. Anschließend wurde der reale Wandler mit einem Nahfeldscanner und Vektorsignalanalysator vermessen, der Amplitude und Phase erfassen kann. Es wurden zwei Messfälle mit hohem und niedrigem SNR betrachtet.

Die Nahfeld-zu-Fernfeld-Transformation zeigt, dass die simulierte Fernfeldhüllkurve gut nachgebildet werden kann, während schlechte SNR-Werte Abweichungen bis 20 dB und mehr verursachen können. Darüber hinaus wird die Einbettung der gemessenen Nahfeldquelle in komplexe Szenarien demonstriert, etwa Kopplung zu einem IoT-Modul oder in einem skalierten Automodell.

Literatur

- [1] M. Ramdani, et al., "The electromagnetic compatibility of integrated circuits - Past present and future," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 51, no. 1, pp. 78–100, Feb. 2009.
- [2] B. Deutschmann, H. Pitsch and G. Langer, "Near field measurements to predict the electromagnetic emission of integrated circuits," 5th Int. Workshop Electromagn. Compat. Integr. Circuits, 2005, Nov.
- [3] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1989, chapter 7.
- [4] D. Schroeder, C. Hedayat, F. Goelden and H. Kuhn, "Broadband Far-Field Estimation of a Spherical Dipole Using Near-Field Scanning Data Up to 1 GHz," 2023 Smart Systems Integration Conference and Exhibition (SSI), Brugge, Belgium, 2023
- [5] Baird, Newell, Stubenrauch, "A brief history of nearfield measurements of antennas at the National Bureau of Standards". In: IEEE Transactions on Antennas and Propagation 36, 1988
- [6] Foged, L "Using Measured Fields as Field Sources in Computational EMC". 37th International Symposium on Antenna Measurement Techniques (AMTA), 2015.
- [7] C. Marschall, "Far-field Calculation from magnetic Huygens Box Data using the Boundary Element Method," 2022 Smart Systems Integration (SSI), 2022.
- [8] J. Pan, X. Gao and J. Fan, "Far-Field Prediction by Only Magnetic Near Fields on a Simplified Huygens's Surface," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 4, pp. 693–701, Aug. 2015.
- [9] A. Radchenko, J. Zhang, K. Kam and D. Pommerenke, "Numerical evaluation of Near-Field to Far-Field transformation robustness for EMC," 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Pittsburgh, PA, USA, 2012, pp. 605–611.
- [10] O. Franek, M. Sørensen, H. Ebert and G. F. Pedersen, "Influence of nearby obstacles on the feasibility of a Huygens box as a field source," 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Pittsburgh, PA, USA, 2012, pp. 600–604.
- [11] M. Sørensen, I. Bonev, O. Franek, G. Petersen and H. Ebert, "How to handle a Huygens' box inside an enclosure," 2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, USA, 2013.
- [12] D. Schröder, U. Kiefner, C. Hedayat and J. Förstner, "Evaluation of Measurement Noise Effects in the Close Environment of Equivalent Near-Field Sources," 2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Brugge, Belgium, 2024