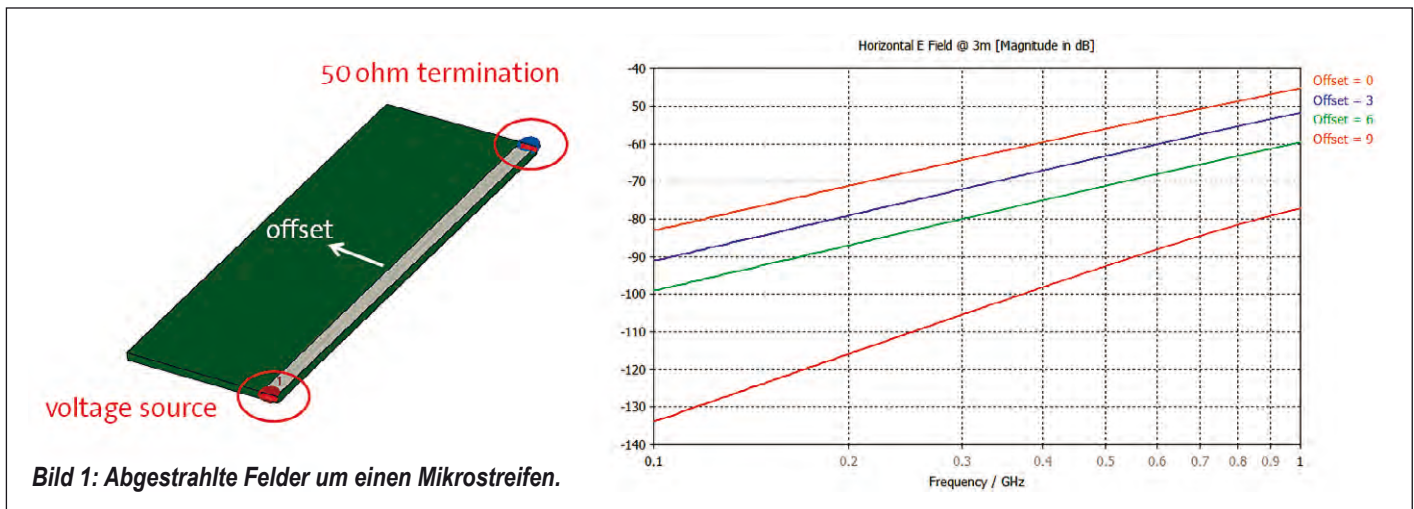


# EMV Simulation von Unterhaltungselektronik



**Zur Gewährleistung eines sicheren und verlässlichen Betriebes müssen alle elektronischen Bauelemente den EMV Standards (Elektromagnetische Verträglichkeit) entsprechen. Durch die Berücksichtigung eines EMV konformen Designs in einem frühen Stadium, können zusätzliche kostspielige Designiterationen im späteren Entwicklungsprozess vermieden werden.**

Dieser Artikel beschreibt den Arbeitsablauf bei einer EMV-Simulation eines Wireless-Routers. Dabei werden Techniken eingesetzt, die bei vielen Unterhaltungselektronikgeräten angewendet werden können. Im Rahmen dieses Artikels werden eine Reihe von EMC-relevanten Gesichtspunkten aufgezeigt und beschrieben, darunter die Analyse von Leiterplatten, der Einfluss des Gehäuses, die Störanfälligkeit der Kabeleinführung und die Segmentierung der Modellbildung zur Untersuchung des Einflusses einer einzelnen Komponente auf das System.

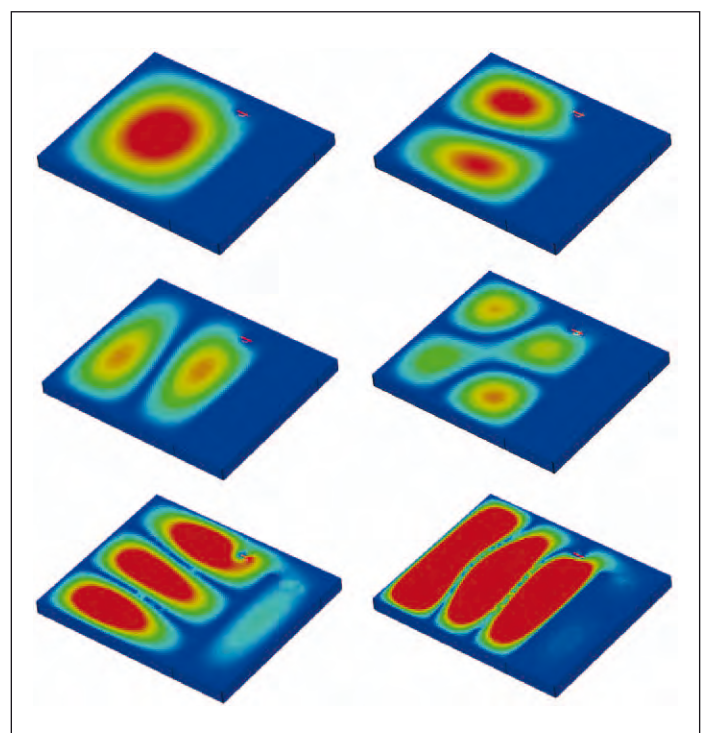
## Einleitung

Der Stromfluss in elektronischen Bauelementen erzeugt elektromagnetische Felder. Werden mehrere Bauelemente innerhalb derselben Umgebung betrieben, beeinflussen sich diese Felder gegenseitig. Dies kann die Bauteilleistung beeinträchtigen oder gar zu seinem Versagen führen.

Um das Risiko von Problemen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) zu reduzieren, schränken gesetzliche Grenzwerte die Ausstrahlung, die von Geräten ausgehen darf, ein. Der Designprozess muss diese Spezifikationen in der Entwicklung entsprechend berücksichtigen. Die Effekte, die EMV Probleme, wie z. B. Resonanzen, Kopplungen und Streufelder, zur

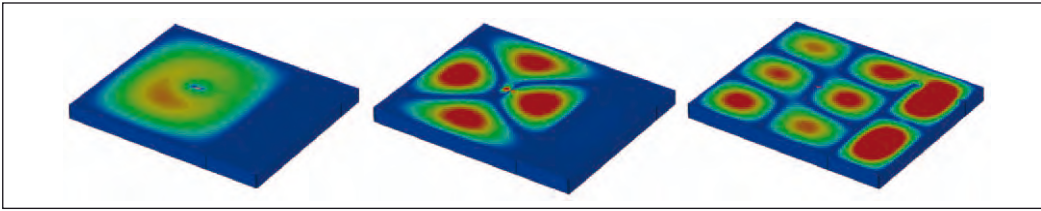
Folge haben, sind jedoch sehr kompliziert und oft schwierig zu berechnen. Daher wurden EMC-Fragestellungen traditionell mit Hilfe von Messungen untersucht. Dies bedeutete, dass der Test der elektromagnetischen Verträglichkeit erst sehr spät im Designprozess, nach dem Bau eines Prototypen, durchgeführt werden konnte. Der Bau eines Prototypen stellt in der Entwicklung hinsichtlich Zeit,

Arbeitsaufwand und Kosten eine beträchtliche Investition dar und die Beseitigung von EMC-Problemen in diesem späten Entwicklungsstadium kann einen erheblichen Aufwand erfordern. In einem komplexen elektronischen System war es zudem oft enorm schwierig, die Ursache eines EMC-Problems zu lokalisieren, und der Ingenieur konnte daher meist nur die Symptome bekämpfen.



**Bild 2: Resonanzen bei einer in der Ecke des Gehäuses platzierten Quelle.**

Andreas Barchanski  
CST AG



**Bild 3: Resonanzen bei einer in der Mitte platzierten Quelle.**

Durch Simulation können die EMC Eigenschaften eines Designs zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungszyklus untersucht werden. Mit Hilfe der Simulation können grundlegende Änderungen am Design sehr einfach untersucht werden. So kann mittels Simulation z.B. die Ausrichtung einer Platine oder die Position einer Komponente, schnell und kostengünstig getestet und verglichen werden.

Das in diesem Artikel verwendete Beispiel ist ein Wireless Router, der freundlicherweise von Cisco zur Verfügung gestellt wurde. Dieser Router enthält eine Reihe von Komponenten, die, hinsichtlich ihrer elektromagnetischen Verträglichkeit, während des Designprozesses analysiert werden können. Eine komplette Analyse erfordert den Einsatz verschiedener Simulationsmethoden.

**PCB-Designregeln – Überprüfung und Simulation**

Ein einfacher und weit verbreiteter Ansatz zur Identifikation möglicher EMC-Probleme ist die Anwendung von Designregeln beim Layout von Leiterplatten. Diese Regeln basieren auf der jahrelangen Erfahrung von EMC Experten, die sie durch bewährte Vorgehensweisen bei ihrer Arbeit in diesem Gebiet erworben haben. Die Regeln helfen den Ingenieuren zu vermeiden, dass die designten Leiterplatten zu sehr abstrahlen oder zu Rauschquellen werden. Einige Beispiele dieser Regeln sind:

\* Critical Net Near Edge of Reference Plane – Diese Regel bestimmt, wie nahe Signalleitungen am Platinenrand oder am Rand der Bezugsebene liegen dürfen. Linien, die zu nahe am

Rand liegen, können eine größere Abstrahlung verursachen und Kopplungen mit anderen Komponenten hervorrufen.

\* Critical Differential Net Length Matching and Spacing – Diese Regel stellt sicher, dass ein Leitungspaar mit Gegentaktsignalen ähnliche Längen aufweist. Ein zu großer Unterschied zwischen den beiden Leitungslängen verursacht Gleichtaktstörungen, was sowohl zu Problemen bei EMC als auch bei der Signalintegrität (SI) führen würde.

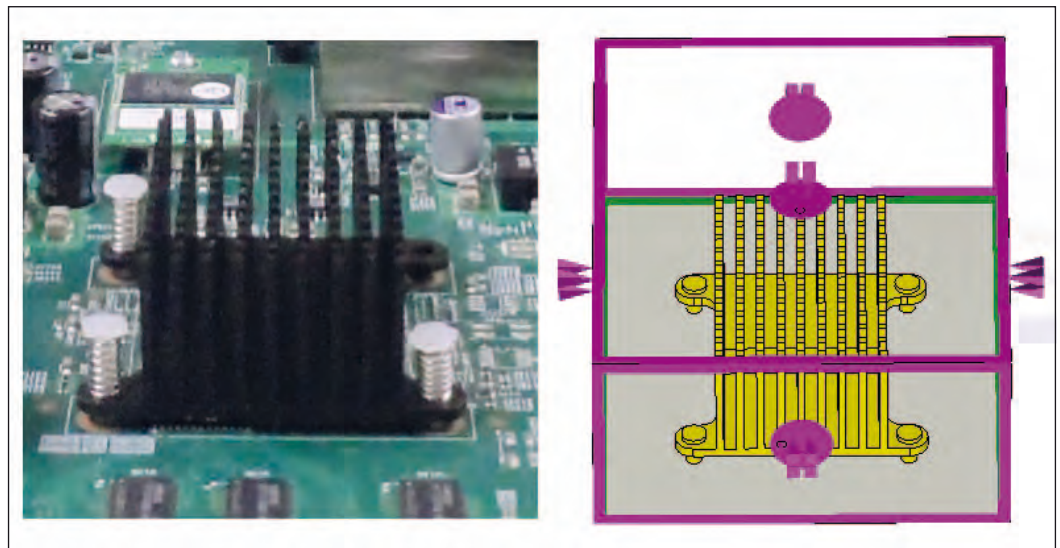
\* Critical Net Near I/O Net – Hochgeschwindigkeitssignale können Kopplungen zu Eingangs- und Ausgangsnetzen, wie z.B. zu USB-Netzen, hervorrufen. Da diese Netze die Leiterplatte verlassen und oft durch lange Kabel verlaufen, stellen sie ein signifikantes Risiko dar.

Zur Verdeutlichung, wie wichtig eine sorgfältige Platzierung des Netzes ist, wurde eine 5 cm lange Mikrostreifenleitung auf der Kante eines FR4-Substrates mit einer relativen Permittiv-

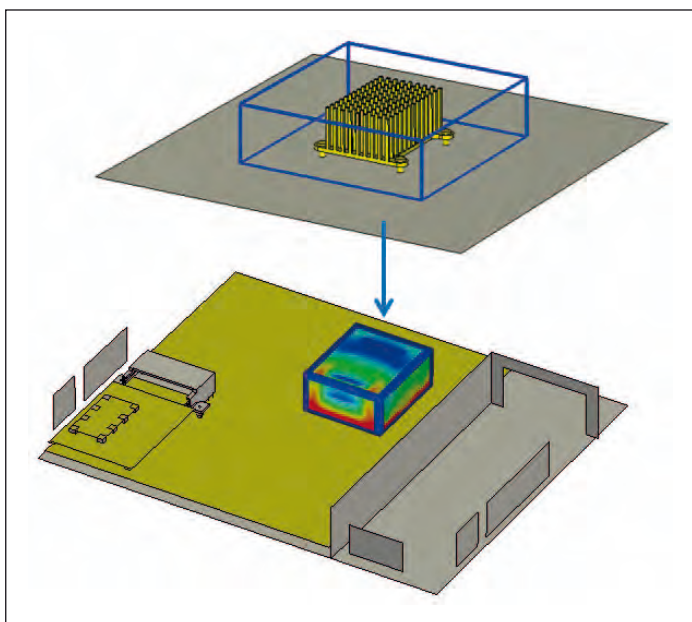
tätszahl von 4,2 modelliert (Bild 1). Die Leitung wurde auf der einen Seite durch einen 50-Ohm-Widerstand terminiert und auf der anderen Seite mit einer 1-Volt-Breitbandquelle angeregt. Die Position der Leitung wurde parametrisiert: Ein Offset von 0 mm entspricht der Position an der Kante des Substrates während die Leitung bei einem Offset von 9 mm in der Mitte platziert ist. Es wurde eine Simulation mit dem Zeitbereichslöser (FIT – Finite Integration Technique) in CST MICROWAVE STUDIO durchgeführt, bei der das horizontale elektrische Feld in einer Entfernung von drei Metern mittels einer Feldsonde aufgezeichnet wurde. Das Diagramm auf der rechten Seite zeigt deutlich, wie das ausgestrahlte Feld sowohl von der Frequenz als auch von der Position des Mikrostreifens abhängt. Eine Verschiebung der Leitung von der Mitte zur Kante des Substrats erhöhte das abgestrahlte elektrische Feld um mehr als 30 dB; ein enormer Strahlungsanstieg.

Sobald die Ingenieure ein mögliches Problem identifiziert haben, müssen sie entscheiden, ob es schwerwiegend genug ist, um ein Re-Design der Platine zu rechtfertigen. Dafür ist die Vollwellensimulation ein geeignetes Werkzeug – dabei kann das Design in eine dreidimensionale elektromagnetische Simulation importiert werden, um die beim Betrieb erzeugten Felder zu untersuchen. Hierbei kann die Position oder Ausrichtung einer Leitung oder einer Komponente parametrisiert werden, um eine Parameterstudie durchzuführen. Dadurch lässt sich untersuchen, ob der Vorteil, der sich z. B. daraus ergibt, eine Leitung weiter von der Kante zu entfernen, die zusätzliche Designarbeit rechtfertigt.

Der Entwurf einer komplexen Multilayer-Hochgeschwindigkeitsplatine unter strenger Berücksichtigung der Designregeln wäre sehr schwierig und hinsichtlich der benötigten Zeit und Aufwände ineffizient. Bei vielen Netzen führen Verstöße gegen die Regeln nicht zwangsläufig zu EMC-Problemen. Darüber hinaus erfordern verschiedene Gerätetypen unterschiedliche Regeln. So hat zum Beispiel Leistungselektronik nicht die gleichen EMC-Probleme wie ein hochfrequentes HF-Bauelement.



**Bild 4: Der Kühlkörper und ein 3D Simulationsmodell.**



**Bild 5: Eine Nahfeldquelle als Ersatz eines detaillierten Modells.**

Der eleganteste Weg, die Designregeln anzuwenden ist der, bestimmte, besonders kritische Komponenten der Platine, wie z. B. I/O Netze, Hochgeschwindigkeits-Datenleitungen oder Taktsignale, auszuwählen. Mit Softwarewerkzeugen, wie CST BOARDCHECK, können anschließend die ausgewählten Bereiche untersucht und die Einhaltung der Designregeln überprüft werden, um alle Regelverstöße hervorzuheben und gleichzeitig das Risiko menschlicher Fehler auszuschließen. In einem realen Gerät kann man die Leiterplatte jedoch nicht als isoliert

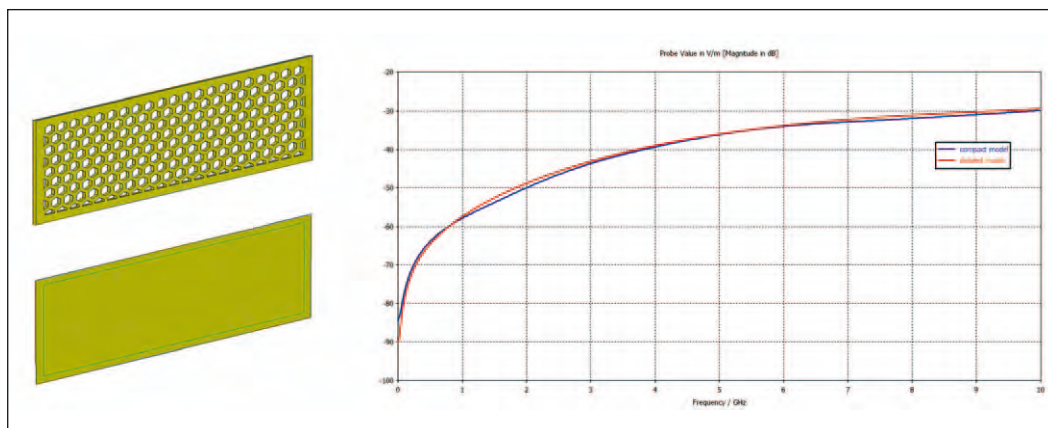
betrachten. Die Umgebung der Leiterplatte, wie auch andere Komponenten, Kabel sowie das Gehäuse, können zu weiteren EMC-Problemen führen.

So arbeiten beispielsweise viele Geräte in einem Bereich von mehreren hundert Megahertz bis in den Gigahertzbereich. Bei diesen Frequenzen ist die Wellenlänge des EM Feldes vergleichbar mit den Dimensionen der Kabel und des Gehäuses. Wenn z.B. Streufelder an diese Strukturen koppeln, können sie Resonanzen erzeugen.

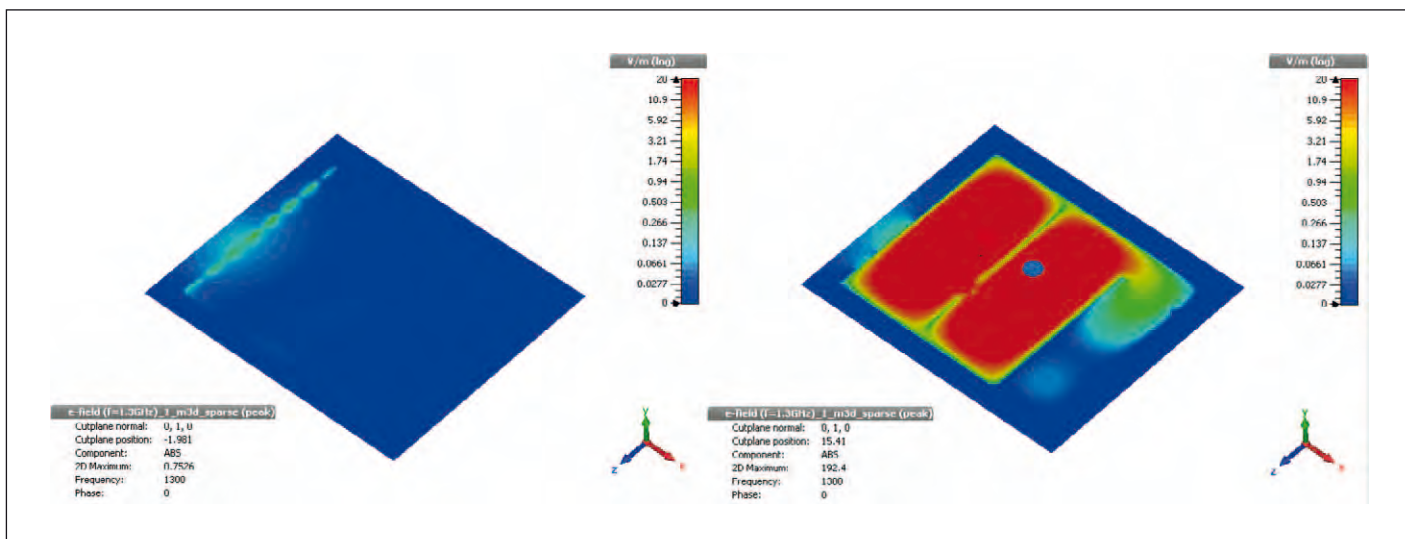
Aufgrund ihrer Eigenschaften sind Resonanzen mit Zeitbereichsmethoden nur mit sehr großem Zeitaufwand zu simulieren – eine Resonanz mit hohem Q-Faktor wird für eine

lange Zeit weiterklingen. Für diese Art von Problemstellung eignen sich Simulationsmethoden im Frequenzbereich besser. Der erste Schritt bei der Überprüfung der EMC Eigenschaften des Router-Gehäuses ist der Aufbau eines stark vereinfachten Modells, angeregt durch einen diskreten Port.

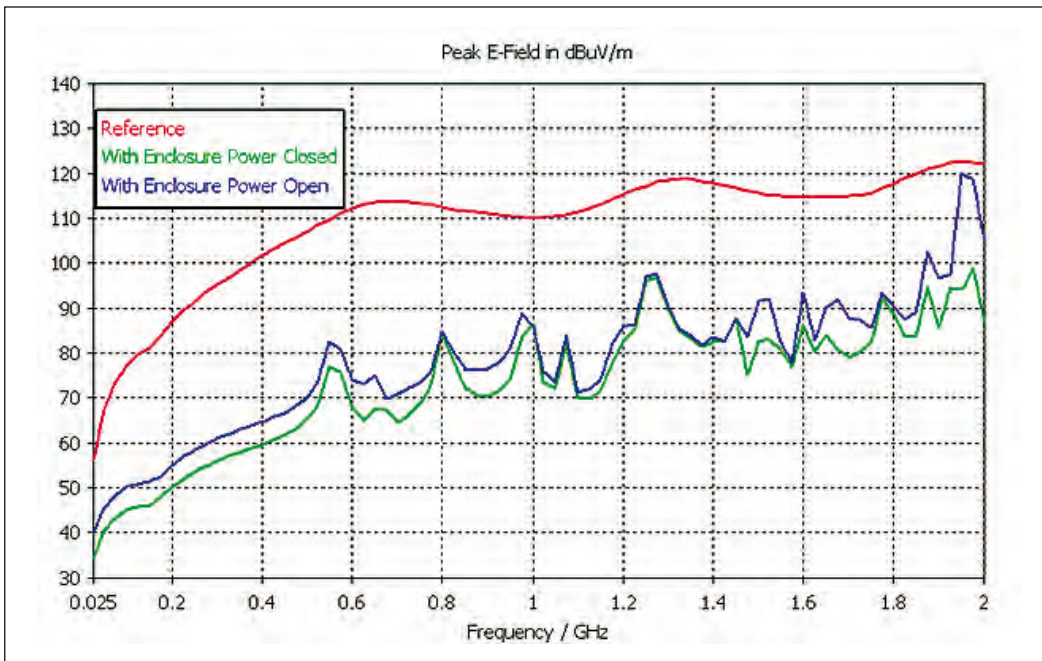
Eine Breitband-Frequenzsimulation zeigt zahlreiche Resonanzmoden (Bild 2), von denen jeder einzelne möglicherweise zur Abstrahlung des Gerätes beiträgt. Gibt es eine störende Komponente, die in einer resonanten Frequenz ausstrahlt, lohnt es sich meist, sie an einer anderen Stelle auf der Platine anzubringen. Wie in Bild 3 dargestellt, führt eine Verschiebung der Quelle von der



**Bild 6: Detailliertes (oben) und kompaktes (unten) Modell der Lüftungsöffnungen und ein Vergleich der Modelle.**



**Bild 7: Austritt am Spalt (links) und an der Lüftungsöffnung (rechts) bei 1.3 GHz.**



**Bild 8: Breitbandergebnisse für den Router mit der Leiterplatte ohne Gehäuse als Referenz.**

Ecke zur Kante des Gehäuses zu anregung anderer Resonanzen.

**Platzierung der Komponenten**

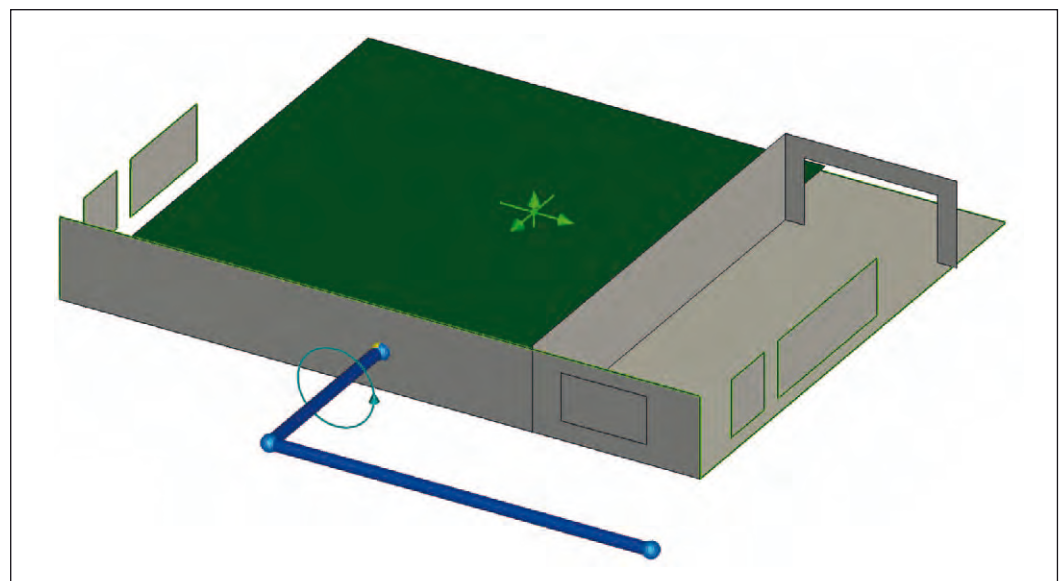
Sobald eine Vorstellung des Gehäuseverhaltens vorliegt, kann das Modell des Geräts verfeinert werden. Aufgrund ihrer Größe und ihres Aufbaus stellen Kühlkörper oft eine wesentliche Ursache von EMC-Problemen auf Leiterplatten dar – sie sind häufig über Hochgeschwindigkeits-Signalleitungen platziert, was bedeutet, dass Ströme zu ihnen koppeln können und dadurch Felder erzeugt werden, die wiederum abgestrahlt werden.

Anstelle einer einfachen Spannungsquelle kann zur Untersuchung der erzeugten Felder auch ein realistisches Modell des Kühlkörpers verwendet werden (Bild 4). Man kann das Kühlkörpermodell einfach in das Gesamtmodell des Routers einfügen, allerdings wird das Rechengitter unter Umständen sehr fein und wird die Berechnung verlangsamen.

Für Detailmodelle – z. B. ein integrierter Schaltkreis oder eine Multilayer-Leiterplatte – ist es effizienter, die Komponente einzeln über einen hybriden Ansatz

mit zwei unterschiedlichen Solver-Technologien zu modellieren. Das detaillierte Modell wird mit der für Komponenten geeigneten Zeitbereichs-Methode (FIT) simuliert. Hierbei erfasst ein Nahfeld-Monitor das umgebende Feld. Diese Feld wird dann als Quelle in das Router-Modell importiert (Bild 5) und dafür verwendet, eine Simulation mit dem Zeitbereichs (TLM – Transmission Line Matrix) Solver, der sich für Gehäuse bestens eignet, durchzuführen.

Mit dem detaillierten Modell kann der Ingenieur Abhilfestrategien anwenden, wie z.B.: die Ergänzung des Modells um Erdungspins oder eine veränderte Anzahl der Kühlrippen. Sogar die Abmessungen des Modells können parametrisiert werden. Mit dem System Assembly and Modeling (SAM) Ansatz der CST STUDIO SUITE können Parameterstudien durchgeführt und das sich ändernde Nahfeld in der Simulation berücksichtigt werden – in diesem Fall,



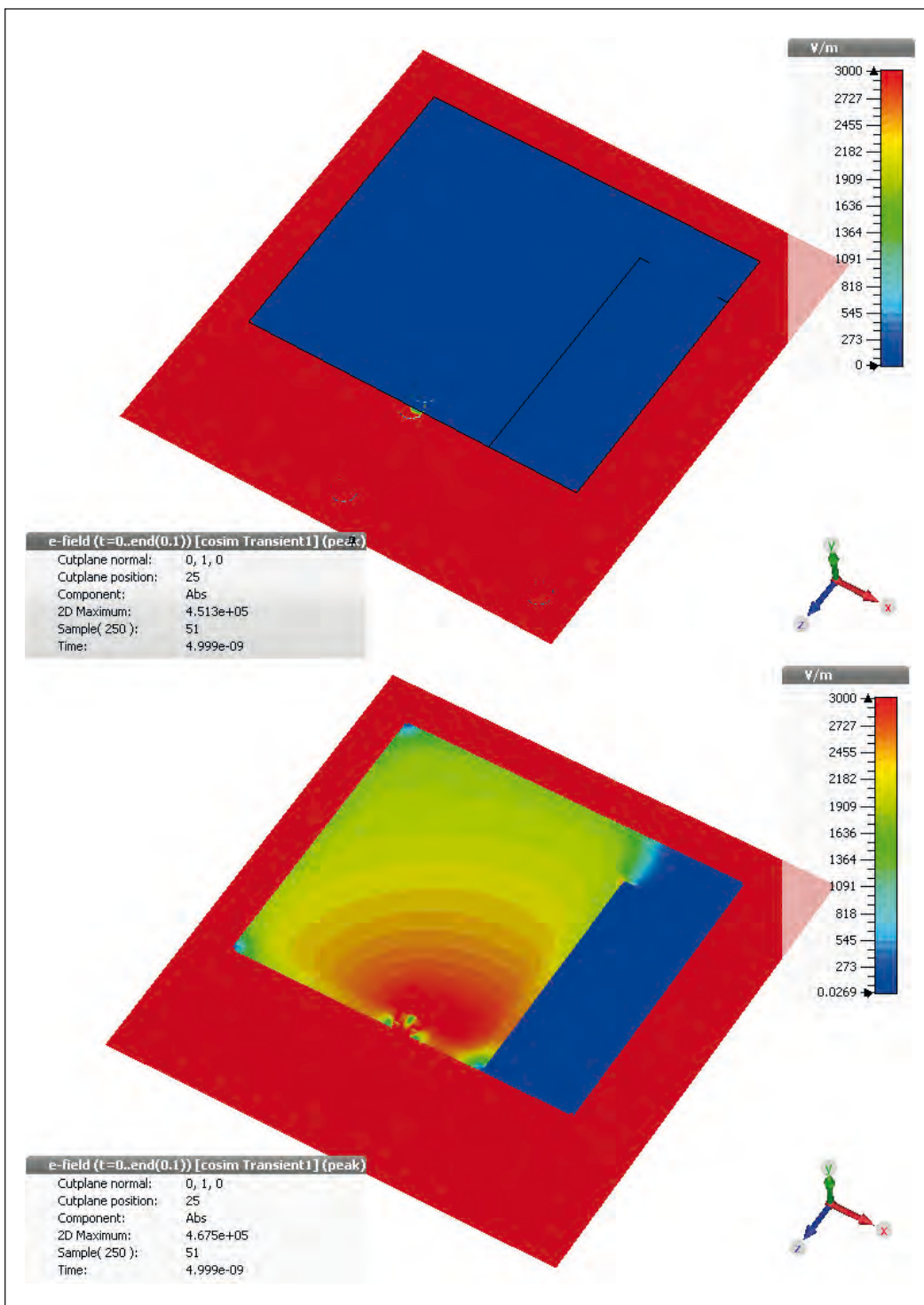
**Bild 9: Ein vereinfachtes Modell des Routers mit in das Gerät führenden Kabeln (blau).**

um die Wechselwirkung des Kühlkörpers und der HF-Komponenten in der linken unteren Ecke des Routers zu berechnen. Mit SAM kann eine Abfolge von Simulationen automatisch ausgeführt werden, indem Tasks in CST DESIGN STUDIO einfach definiert und Monitore und Ports zur Datenübertragung zwischen verschiedenen Teilen der Simulation verwendet werden.

**Das Gehäusedesign**

Felder können auch durch Spalten, Lüftungsöffnungen und Panels austreten, daher ist es wichtig, diese in der Berechnung zu berücksichtigen. Die Details dieser Strukturen sind jedoch für gewöhnlich sehr klein, was zu sehr zeitaufwändigen Simulationen führt. In diesem Fall kann die Simulation durch die Anwendung von „Compact Models“ beschleunigt werden. „Compact Models“ sind eine Funktion im TLM Solver und ersetzen die feinen Strukturen mit einem Äquivalent, das in der gleichen Weise mit den Feldern interagiert hierbei allerdings deutlich effizientere Simulationen erlaubt..

Bild 6 zeigt den Vergleich des detaillierten mit dem „Compact Model“ bei einer Struktur mit hexagonalen Lüftungsöffnungen mit einer Seitenlänge von 1,74 mm und einer Tiefe von 1 mm. Das „Compact Model“ zeigt



**Bild 10: E-Felder innerhalb des Gerätes bei verbundenem (oben) und nicht verbundenem Gehäuse (unten).**

das gleiche Verhalten wie das detaillierte Modell; die Ergebnisse der Feldstärke sind über den gesamten Frequenzbereich identisch. “Compact Models“ können nicht nur schneller gelöst werden (in Bild 6 wurde beispielsweise die Simulationszeit durch das kompakte Modell

halbiert), sie erfordern auch ein weniger detailliertes Gitter, was zu einer noch größeren Zeiterparnis bei elektrisch großen Modellen führt.

Die Simulationsergebnisse des gesamten Gerätes werden in Bild 7 und 8 gezeigt. Für die Kühlungs-Öffnungen auf der

linken und rechten Seite des Gerätes und für die Spalte, bei denen die Panels des Gehäuses zusammen kommen, wurden “compact Models“ verwendet.

Bei 1,3 GHz gibt es einen Feldaustritt durch das Gehäuse – dieser ist jedoch immer noch mehrere Größenordnungen klei-

ner als die Felder, die um die offene Leiterplatte herum zu beobachten waren. Bei 1,95 GHz gibt es einen starken Anstieg des E-Feldes um den Router und die Abstrahlungen sind fast so stark wie die, die ohne Gehäuse auftraten. Dies entspricht dem Austritt durch die Netzanschlussöffnung – ohne diese Öffnung beträgt die Differenz der Ausstrahlung 20 dBuV/m.

## Störanfälligkeit

Neben einer möglichst geringen Ausstrahlung müssen Ingenieure auch sicherstellen, dass das Gerät nicht durch externe Felder beeinflusst wird. Eine weit verbreitete Ursache von Interferenzproblemen ist die Verkabelung. Lange Kabel wirken in gewisser Weise für die externen Felder wie Antennen und leiten Felder in das Gerät ein.

Es ist schwierig, Kabel, die mehrere Meter lang aber nur wenige Millimeter dick sind und oft eine komplexe interne Struktur aufweisen, mit herkömmlichen 3D-Simulationsmethoden zu modellieren. Für diese Art von Kabeln und Kabelsträngen kann der Einsatz einer hybriden Kabelsimulation sehr effizient sein.

Kabelsimulationen können, abhängig von den berücksichtigten Kopplungen, unidirektional oder bidirektional sein. In einer unidirektionalen Simulation berechnet der Solver entweder die von den Stromflüssen im Kabel generierten Felder oder die Ströme, die im Kabel durch die externen Felder induziert werden. Dies ist gewissermaßen der gleiche Ansatz, der zuvor zur Modellierung des Kühlkörpers, separat zur Leiterplatte, verwendet wurde.

In einer bidirektionalen Simulation werden die Kabel innerhalb des 3D-Modells simuliert. Dies bedeutet, dass beide Effekte berücksichtigt werden, so dass, z.B. Felder vom Kabel ausgestrahlt werden, die dann Ströme innerhalb des Gehäuses induzieren. Die dann wiederum abgestrahlten Felder interagieren ein weiteres Mal mit dem

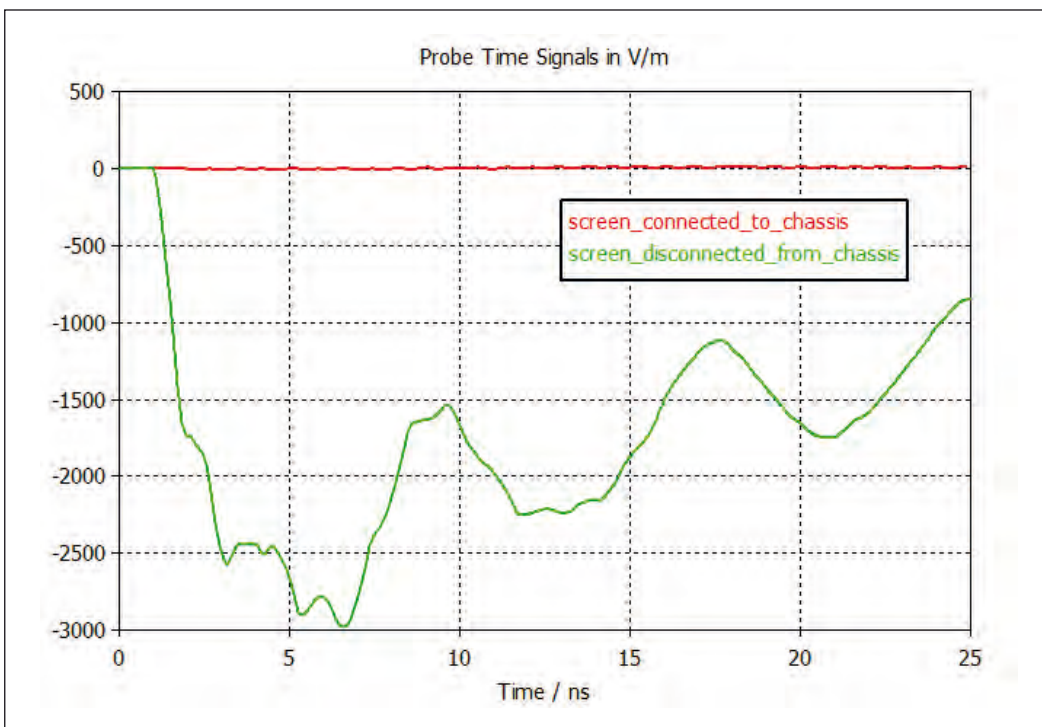


Bild 11: E-Feld Werte in der Mitte des Gerätes.

Kabel. Bidirektionale Simulationen erzeugen eine physikalisch genauere Simulation, werden aber nicht von allen Kabel-Simulationswerkzeugen auf dem Markt angeboten.

Der verwendete Router verfügt über einen USB-Port. Hier sollte untersucht werden, wie ein USB-Kabel Energie in das Gerät einleitet. USB-Kabel sind hybride Kabel mit einer 5 V Stromleitung, einer Erdungsleitung und einem verdrehten Paar Signalleitungen. Obwohl es normalerweise schwierig ist, dies als dreidimensionales Modell aufzubauen, wird in CST CABLE STUDIO durch die Definition des Kabelverlaufs und des Querschnittes ein Hybrid-Modell erzeugt. Alle relevanten Eigenschaften des Kabels können angepasst werden, darunter der Verwindungsgrad der verdrehten Leitung, die Dicke und die Permittivität des Isolators sowie das Material und die Ausgestaltung der Abschirmung. In diesem Fall wurde ein Schirmgeflecht verwendet, es sind aber eine ganze Reihe von frequenzabhängigen Schirm-Modellen verfügbar und darüber hinaus können beliebige Abschirmungen durch den

Import von Transfer-Impedanzen simuliert werden.

In diesem Fall wurde ein in das Gehäuse eintretende USB-Kabel definiert, das aus einem langen Teil abgeschirmten Kabels außerhalb und einem kurzen, nicht abgeschirmten Teil innerhalb des Gehäuses bestand (Bild 9). Anschließend konnten zwei bidirektionale Simulationen durchgeführt werden, bei denen die Verbindung zwischen der Kabelabschirmung und dem Gehäuse variiert wurde. Bei der einen Simulation wurde der Pfad zwischen Abschirmung und Gehäuse mit einem geringen Widerstand modelliert, was einer guten Verbindung entspricht, bei der anderen wurde ein großer Widerstand dazwischen definiert. Die Struktur wurde durch eine breitbandige, ebene Welle angeregt, um die Bestrahlung der Struktur durch einen starken externen elektromagnetischen Impuls (EMP) zu modellieren. Wieder wurden Sonden eingesetzt, um die Felder innerhalb des Gehäuses zu beobachten.

Wie in Bild 10 und 11 dargestellt, hat die Verbindung zwischen Abschirmung und Gehäuse einen wesentlichen Einfluss auf

die Störanfälligkeit des Gerätes durch externe Strahlung. Bei einer gut verbundenen Kabelabschirmung lag die E-Feld Spitze bei etwa 15 V/m. Wurde die Verbindung getrennt, erreichte das E-Feld fast 3000 V/m.

Anhand dieser Simulationen kann man zusammenfassend feststellen, dass die Verbindung der Kabel zum Gehäuse bezüglich der Störanfälligkeit entscheidend ist. Während der Designphase muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass diese Verbindung gut definiert ist. Darüber hinaus ist es wichtig, dass sich die Verbindung während der Lebensdauer des Gerätes nicht verschlechtert, da eine reduzierte Konnektivität, z.B. durch Alterungseffekte, die Störanfälligkeit des Gerätes drastisch erhöhen kann.

### Zusammenfassung

Mittels Simulation kann der Ingenieur, bereits lange bevor im Labor gemessen wird, viele verschiedene EMC Eigenschaften eines Entwurfs untersuchen. Von der Designregel-Überprüfung in den frühen Layout-Phasen bis hin zur Gesamtsystemsimulation, kann die Simulation, neben

den traditionellen Prototypen, in jeder Phase des Produktdesigns eingesetzt werden.

Komponenten können als Teil eines komplexen Systems getestet und nicht nur isoliert betrachtet werden – mit SAM können, soweit erforderlich, verschiedene Simulationstechniken für verschiedene Teile des Systems verwendet werden. Zusätzliche spezialisierte Hybridmethoden für die Modellierung von Leiterplatten, Kabeln und Feinstrukturen ermöglichen es, diese oft komplizierten Elemente zusammen mit dem Rest des Gerätes zu simulieren.

Dieser Artikel beschreibt den Simulationsablauf zur Analyse der elektromagnetischen Verträglichkeit eines Wireless-Routers und verdeutlicht, wie die Simulation beim Auftreten von Schwierigkeiten eingesetzt werden kann, um Lösungen zu finden: alternative Designs können, ohne den Aufwand zur Erstellung mehrerer Prototypen, untersucht werden.

### Autor

Andreas Barchanski ist EMC Market Development Manager bei CST ([www.cst.com](http://www.cst.com)). Er hat einen Master in Physik und einen Dokortitel in numerischer Elektromagnetik. 2007 kam er als Applikationsingenieur zu CST. Neben EMC liegt sein Hauptinteresse in der Simulation zahlreicher elektronischer Systeme, von digitaler Hochgeschwindigkeits- bis hin zu Leistungselektronik.