



TITELSTORY

Dieser Artikel bildet den Auftakt einer dreiteiligen Antennen-Serie. Anhand des Simulationsprogramms ANSYS HFSS wird gezeigt, wo die Vorteile für den Entwickler von der numerischen Modellierung bis zur Optimierung liegen. Aufgrund neuer Anwendungsfelder, werden Antennen stets weiterentwickelt. Es gibt sie heute in den verschiedensten Formen. Im Unterschied zur klassischen Dipolantenne sind diese Antennen analytisch nur schwer oder überhaupt nicht zu verstehen. Simulationssoftware, speziell für die 3D-Simulation hochfrequenter elektromagnetischer Felder entwickelt, hilft bei der Analyse und Auslegung innovativer Antennenstrukturen.

So funktioniert die numerische Modellierung von Antennen (Teil 1)

In der Artikelreihe wird die simulationsgestützte Entwicklung von Antennen beleuchtet, von den Grundlagen numerischer Modellierung bis zur Optimierung und der effizienten Systembetrachtung.

CHRISTIAN RÖMELSBERGER*

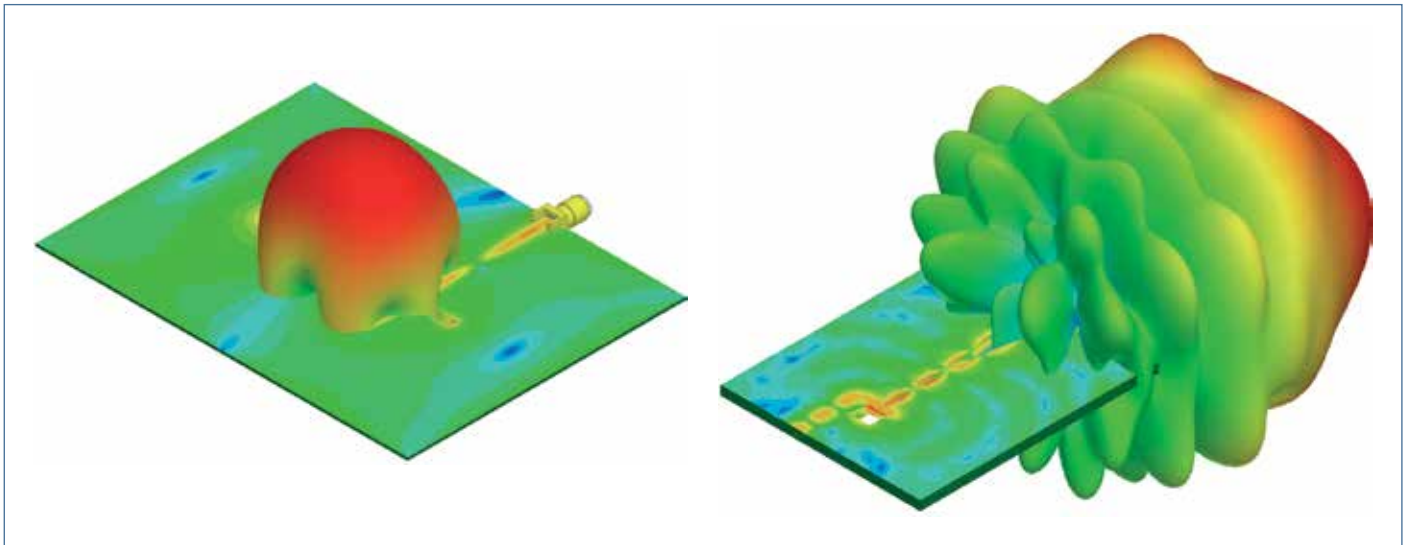


Bild: CAD/FEM

Antennendesign: Hier werden die Richtcharakteristiken und Stromverteilungen auf den Masselagen einer Schlitzantenne (links) und einer Vivaldiantenne (rechts) dargestellt.

Simple Antennendesigns sind leicht zu realisieren. Sie sind jedoch nicht die Regel. Die erste und einfachste Antenne ist die Hertz'sche Dipolantenne, ein Metallstab in zwei Hälften geteilt und in der Mitte mit einem Signal bespeist. Der Name geht auf den deutschen Physiker Heinrich Hertz zurück, der als Erster elektromagnetische Wellen im Experiment nachwies.

Der russische Physiker Alexander Stepanowitsch Popow empfing 1895 dann erstmals elektromagnetische Wellen mit der Dipolantenne. Eine solche Antenne kombiniert die Induktivität des Metallstabes mit der Kapazität zwischen den Stabenden und funktioniert somit als Schwingkreis. Wird dieser

Schwingkreis in Resonanz betrieben, fließen auch bei kleinen Eingangssignalen große Ströme. Diese wiederum erzeugen entsprechend starke elektromagnetische Felder, die sich im freien Raum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Die Antenne wird auf die Resonanzfrequenz abgestimmt

Die Resonanz lässt sich auch als stehende Welle auf dem Dipol betrachten, wobei der Dipol eine halbe Wellenlänge lang ist. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die geometrische Dimension der Antenne auf die gewünschten Resonanzfrequenzen abzustimmen ist.

Anders ausgedrückt muss ein gut angepasster Übergang einer Eingangsimpedanz von 50Ω auf den Wellenwiderstand des freien Raumes (377Ω) realisiert werden. Dazu und auf Grund unzähliger neuer Anwendungen entwickeln Ingenieure immer neue An-

tennen, welche auf der Dipolantenne aufbauen. Daraus ergeben sich folgende Anwendungen:

- Antennen werden mehr und mehr integriert und daher miniaturisiert. Sie werden auf Leiterplatten gedruckt oder in Gehäuse von Geräten integriert. Die Miniaturisierung führt dazu, dass die Dimensionen einer Antenne wesentlich kleiner als eine halbe Wellenlänge sind. Außerdem sind bei der Integration Wechselwirkungen mit der restlichen Elektronik zu vermeiden.

- Je nach Anwendung müssen Antennen an ein breites Frequenzband oder ein oder mehrere schmalere Frequenzbänder angepasst werden. Die Anpassung auf mehrere Frequenzbänder ist auch im Zusammenhang der Integration mehrerer Wireless-Funktionalitäten (drahtlose Kommunikation) in sogenannten mobile Devices (tragbaren Geräten) wichtig.



* Christian Römelsberger ist Experte im Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Simulation bei CAD/FEM.

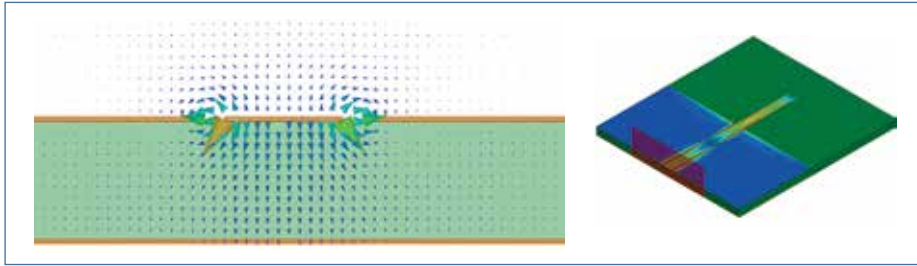


Bild: CADFEM

Auto-adaptive Vernetzung: Elektrisches Feldmuster der TEM Mode eines koplanaren Wellenleiters (links), der die Zuleitung zu einer gedruckten Monopolantenne (rechts; mit Stromverteilung) bildet.

Außerdem sind die Anforderungen an die Richtcharakteristik einer Antenne entsprechend der jeweiligen Anwendung sehr unterschiedlich. Für mobile Devices sollte die Abstrahlung gleichmäßig in alle Richtungen gehen, wogegen ein Mobilfunk-Sendemast möglichst nur einen Sektor, diesen aber gleichmäßig abdecken sollte. In der Satellitenkommunikation ist die Richtcharakteristik besonders ausgeprägt, da die Signale über sehr weite Distanzen gesendet werden müssen.

Um diesen vielfältigen Anforderungen gerecht zu werden, wurden sehr verschiedene Antennenformen entwickelt: Patch-Antennen, Schlitz-Antennen, welche ein wenig an Lochbleche erinnern, Apertur-Strahler sind meist an weiß-roten Masten hoch oben angebracht, Antennen-Arrays, Vivaldi-Antennen erinnern durch ihre Form an einen Vogelschnabel oder Pacman, und viele andere (Bild Antennendesign Seite 17). Im Unterschied zur Dipolantenne sind diese Antennen analytisch nur sehr schwierig oder nicht zu verstehen. Außerdem werden die Anforderungen immer umfassender. Deshalb wurde die Simulationssoftware ANSYS HFSS speziell für 3D-Simulation hochfrequenter elektromagnetischer Felder entwickelt.

Leistungsfähige Feldlöser ermöglichen die Simulation

Das Programm basiert auf mehreren leistungsfähigen Feldlösern, die sowohl den Frequenz- als auch den Zeitbereich abdecken. Die numerische Herangehensweise basiert auf einem unstrukturierten Netz, um beliebige Geometrien gut abbilden zu können. Der Finite-Elemente-Löser arbeitet im Frequenzbereich und löst die Wellengleichung auf einem Tetraedernetz. In jedem Tetraeder wird das elektrische Feld durch einfache polynomiale Ansatzfunktionen dargestellt, die mit der Bildung der Rotation konform sind. Dies führt zu endlich vielen Freiheitsgraden und einer Diskretisierung des Vektor-Laplace-Operators (Doppelrotation). Da der Laplace-Operator lokal ist, führt

dies zu einem dünn besetzten, linearen Gleichungssystem für das elektrische Feld, welches effizient gelöst werden kann. Die Genauigkeit einer Feldlösung mit Hilfe finiter Elemente hängt von der Netzdichte ab. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die Interpolation der elektrischen Felder durch einfache Ansatzfunktionen errechnet werden.

Kompromiss zwischen Netzdichte und Rechenzeit

Speziell in Regionen starker Feldänderungen muss die Netzdichte entsprechend hoch sein, um eine möglichst genaue Berechnung zu ermöglichen. Aber der Rechenaufwand steigt mit der Anzahl der Tetraeder, daher muss ein guter Kompromiss zwischen numerischer Genauigkeit und Rechenzeit gefunden werden. Dies wird durch einen adaptiven Vernetzungsprozess erreicht, in dem von einem Anfangsnetz ausgegangen wird, das die Geometrie gut abbildet und genügend Elemente pro Wellenlänge hat, um einen Wellenzug abzubilden. Auf diesem Anfangsnetz wird eine Feldlösung erzeugt. Danach werden das Netz an den Stellen mit den höchsten Feldgradienten verfeinert und eine neue Feldlösung erzeugt, die mit der ersten Lösung verglichen wird. Dieser Prozess der

Verfeinerung, Neuberechnung und des Vergleichs wird solange fortgeführt, bis wichtige Größen wie die S-Parameter zu der gewünschten Genauigkeit konvergiert sind.

Auto-adaptive Vernetzung mit passender Rechengenauigkeit

Das auto-adaptive Vernetzungsverfahren ist ein Beispiel dafür, wie ANSYS HFSS die Arbeit des Ingenieurs erleichtert: Er muss nicht aufwändig ein passendes Berechnungsnetz per Hand erzeugen, sondern die Simulationssoftware garantiert automatisch die gewünschte Berechnungsgenauigkeit bei gleichzeitig moderater Rechenzeit. Die Automatisierung dient außerdem als hervorragende Grundlage für die parametrische Simulation und Optimierungen. Dieses Thema wird im zweiten Teil der Artikelserie näher beleuchtet. Neben einem leistungsstarken und genauen Feldlöser hat auch die Modellierung eines Systems einen großen Einfluss auf die Qualität eines virtuellen Prototypen, der als Grundlage für die Simulation genutzt wird.

Im Bereich der Antennensimulation spielen strahlungsabsorbierende Randbedingungen, Anregungen durch freie oder leitungsgebundene Wellen und durch Spannungsquellen sowie die Materialmodellierung eine große Rolle. Anregungen durch leitungsgebundene Wellen werden durch sogenannte Wave Ports modelliert. Dies sind Flächen am Rand der Berechnungsdomäne die den Querschnitt eines Wellenleiters darstellen (Bild oben, „Wave Port“), der als unendlich lang angenommen wird, wie ein unendlich langes Koaxialkabel. An diesem Wave Port werden in einer zweidimensionalen Rechnung transversal elektrische (TE), magnetische (TM) oder elektromagnetische (TEM) Moden bestimmt, die dann an dieser Randfläche in die dreidimensionale Lösung gespeist werden.

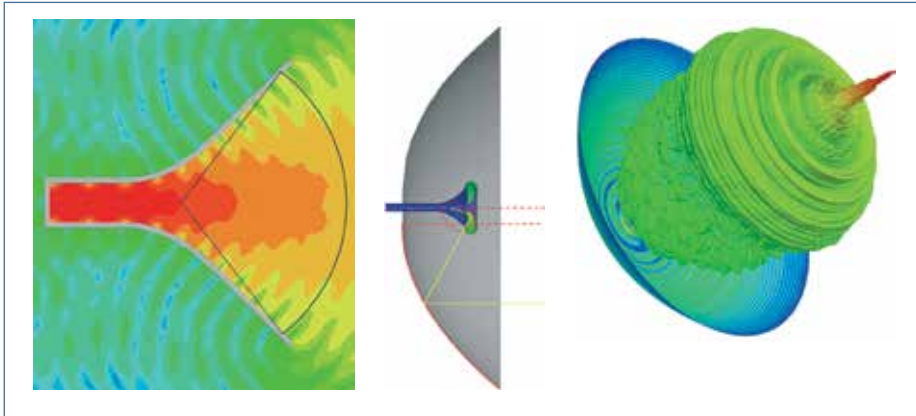
Mit S-Parametern das exakte Stehwellenverhältnis ermitteln

An einem Wave Port oder einer Spannungsquelle mit Terminierung kann das Signal in einfallende und ausgesendete Wellen geteilt werden. Die S-Parameter sind Übertragungsfunktionen, die den frequenzabhängigen, linearen Zusammenhang zwischen einfallenden und ausgehenden Signalen an solchen Ports beschreiben. Aus den S-Parametern lassen sich andere wichtige Größen berechnen, beispielsweise die Fußpunktimpedanz und das Stehwellenverhältnis. Für eine Antenne mit einer Zuleitung ist beispielsweise der S-Parameter die Reflexionsdämpfung. Aufgrund ihrer fundamentalen

Webinar-ankündigung

CADFEM zeigt im kostenlosen Webinar die Grundlagen der elektromagnetischen HF-Simulation. Anhand typischer Designaufgaben, wie die Simulation einer Parabolantenne, wird das praktische Arbeiten mit ANSYS HFSS demonstriert. Anmeldungen laufen über die ELEKTRONIKPRAXIS-Webseite oder www.cadfem.de/antennen-webinar. Termine: 9.2.2015 um 14 Uhr, 5.5.2015 um 11 Uhr.

Bild: CADFEM



Phasenzentrum einer Hornantenne: Links im Bild, sie dient als Speisetzwerk der Doppelreflektorantenne (Mitte). Die Richtcharakteristik (rechts) weist viele axialsymmetrische Nebenkeulen auf.

Rolle in der Bewertung von HF-Eigenschaften von Strukturen verwendet ANSYS HFSS die S-Parameter als Konvergenzkriterium für die adaptive Vernetzung. Aus der Reflexionsdämpfung lässt sich unter Annahme geringer Ohm'scher und dielektrischer Verluste die Effizienz einer Antenne abschätzen. Um jedoch genauere Aussagen über die Abstrahlungseigenschaften treffen zu können, berechnet ANSYS HFSS mit Hilfe von Green'schen Funktionen aus einer Feldlösung das abgestrahlte Fernfeld. Durch die Green'sche Funktion können abgestrahlte Felder als Integral über eine Fläche, die die Strahlungsquelle einschließt, dargestellt werden (Greensche Formeln). So werden Aussagen über den Antennengewinn, die Polarisation sowie die Richtcharakteristik getroffen.

Doppelreflektorantenne mit Geometrie richtig auslegen

Die Richtcharakteristik einer Antenne wird sowohl durch den primären Strahler (Resonator), der meist kleiner als eine halbe Wellenlänge (Dipolantenne) ist, als auch durch Reflexion, Beugung oder Brechung an größeren Bauteilen in der Umgebung bestimmt. Dies ist bei der Auslegung einer Doppelreflektorantenne zu berücksichtigen. Das Reflektorsystem einer Doppelreflektorantenne kann mit Hilfe geometrischer Optik ausgelegt werden (siehe Bild oben, „Phasenzentrum der Hornantenne“). Hierbei sind die Brennpunkte des Parabolspiegels und des elliptischen Reflektors so anzuordnen, dass das Phasenzentrum der speisenden Hornantenne im ersten Brennpunkt des elliptischen Reflektors liegt und der zweite Brennpunkt des elliptischen Reflektors im Brennpunkt des Parabolspiegels. Das Phasenzentrum der Hornantenne wird jedoch mit Hilfe einer Feldsimulation ermittelt, in der die Phasenlage des Fernfeldes berechnet wird. Die Feld-

simulation hilft auch, Welleneffekte wie Beugung am Rand der Reflektoren und Brechung am Radom schon in der Entwicklungsphase mit zu berücksichtigen. Die vielen axialsymmetrischen Nebenkeulen der Abstrahlcharakteristik sind durch diese Effekte bedingt. Um Modelle dieser elektrischen Größe, d.h. von der Größe vieler Wellenlängen, zu berechnen, arbeitet ANSYS HFSS mit leistungsstarken Gleichungslösern, beispielsweise mit der sogenannten „Domain Decomposition“ oder einem Finite-Elemente-Rand-Integral-Hybridlöser.

Feldsimulation erleichtert das Antennendesign

Reflexion, Beugung und Brechung spielen auch bei der Antennenplatzierung eine Rolle: In den meisten Fällen ist es mit der Auslegung der Antenne noch lange nicht getan, denn beispielsweise hängt die Funktion einer Antenne sehr stark von ihrer Positionierung ab. Wenn etwa eine gut angepasste Antenne in die Rückleuchte eines Autos integriert wird, können Reflexion, Beugung und Brechung an der Abdeckung und der Karosserie den Wirkungsgrad einschränken und die Richtcharakteristik stark beeinträchtigen. Diese Rückwirkungen lassen sich per HF-Simulation abbilden, ebenso wie viele weitere Aufgabenstellungen im Antennendesign. Durch die numerische elektromagnetische Simulation können – wie hier aufgezeigt wurde – also bereits sehr früh im Designprozess entscheidende Hürden genommen werden. In der nächsten Ausgabe wird gezeigt, wie mit Simulation das Verständnis über das physikalische Verhalten der zu entwickelnden Bauteile und Produkte erhöht wird. // LD

CADFEM
+49(0)8092 70050

THREADX

ALL YOU NEED IN AN RTOS

Source Code
No Royalties
Small Footprint



IEC-61508 • IEC-62304

Express Logic's ThreadX RTOS has received TÜV Certification for functional safety, according to IEC-61508 and IEC-62304 standards. Now, use of ThreadX for safety-critical systems is easier than ever before. Ask us about our TÜV certification, and how it can help you meet IEC-61508 and IEC-62304 regulations.

YOUR EXTRAS

Certification Pack™
Fastest RTOS
Automatic Event Trace

ADDITIONAL MODULES

NETX

TCP/IP with IPv4 & IPv6

FILEX

Embedded FAT File System

USBX

Host and Device Stack

GUIX

Embedded Graphics

TRACEX

Real-Time Event Trace

For Information visit
WWW.RTOS.COM
+49 5143-911303

expresslogic

Praxisgerechte Designvariationen durch parametrische Modelle

Durch numerische Simulation werden Strategien realisiert, die Designverständnis und Optimierung fördern. Dieser zweite Artikel der dreiteiligen Serie zeigt die sich daraus ergebenden Möglichkeiten.

CHRISTIAN RÖMELSBERGER *

Im ersten Teil dieser Antennen-Artikelserie wurden Techniken aufgezeigt, die das elektromagnetische Hochfrequenzverhalten einer Antenne mit Hilfe der numerischen Simulation am virtuellen Prototypen untersuchen. Im zweiten Teil werden nun parametrische Modelle verwendet, um Designvariationen praxisgerecht zu realisieren. Geometrische Abmessungen und Materialeigenschaften wie Permittivitäten sind durch Variablen gut beschreibbar. Bei einer Dipolantenne lassen sich die Länge und der

Durchmesser verändern. Die Auswirkungen dieser Variationen auf das Verhalten der Dipolantenne sind nachvollziehbar: Die Dipollänge hat einen direkten Einfluss auf die Resonanzfrequenz, sie muss ungefähr eine halbe Wellenlänge betragen. Der Durchmesser wirkt sich aufgrund kapazitiver Kopplung auf den Verkürzungsfaktor aus und hat einen direkten Einfluss auf die Bandbreite der Antenne.

Sampling einer aufwendigen Dualband-Schlitzantenne

Bei aufwendigeren Antennen wie der Dualband-Schlitzantenne (Bild 1) sind wesentlich mehr Geometrieparameter vorhanden, deren Auswirkungen auf das Verhalten der Antenne jedoch weniger offensichtlich sind. Manuelle Parametervariationen sind in solchen Fällen sehr mühsam. Zusätzlich lassen sich daraus nicht einfach die relevanten Zusammenhänge zwischen verschiedenen Größen ablesen.

Die Software optiSLang, die Sensitivitäten ermittelt und die Optimierung erleichtert, bietet für solche Fragestellungen mit systematischen Parametervariationen eine Ergänzung zur Simulationslösung ANSYS HFSS. Hierbei wird ein Design of Experiment (DOE) durchgeführt, also ein statistischer Versuchsplan (Sampling) erstellt und ausgewertet. Um eine Cluster-Bildung im Sampling zu vermeiden und den Raum der erlaubten Designvariationen möglichst gut abzutasten, wird ein Advanced Latin Hypercube Sampling verwendet, das auch einen Designraum mit vielen Parametern effizient abdeckt. Die direkte Drag & Drop-Anbindung von optiSLang an ANSYS

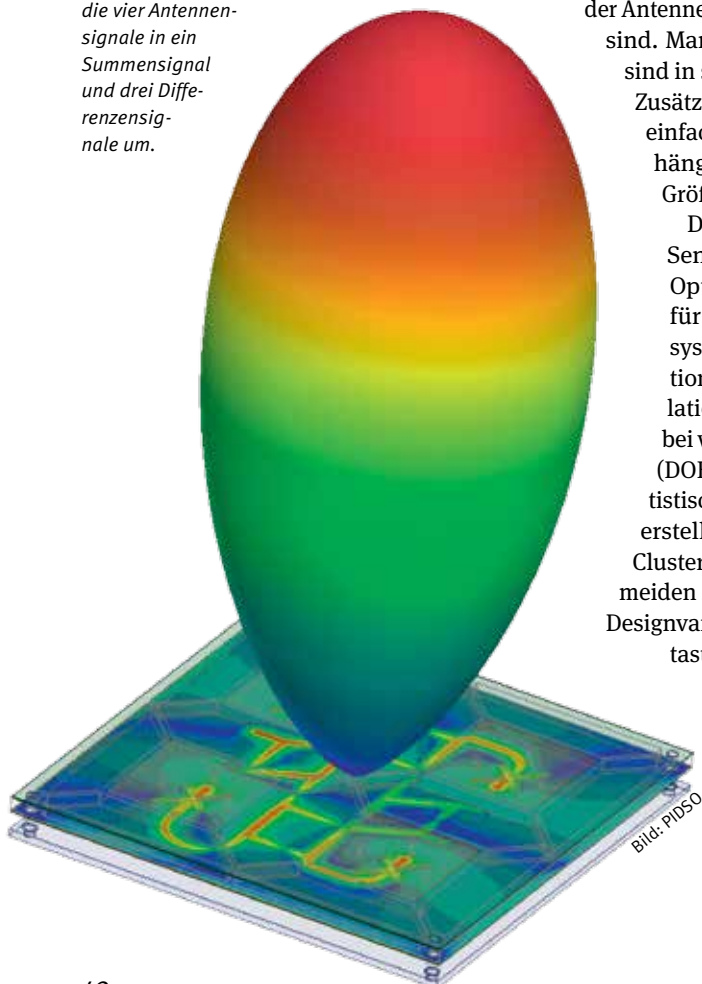
HFSS innerhalb der Workbench sorgt für effiziente und benutzerfreundliche Parametervariationen. Hierbei stellt die auto-adaptive Vernetzung eine gleichbleibende numerische Genauigkeit sicher, so dass der Einfluss des numerischen Rauschens handhabbar wird.

Statistische Samples sichern flexible Designpunkte

Als Ergebnis einer Design-of-Experiment-Analyse in optiSLang werden Korrelationen zwischen verschiedenen Ein- und Ausgangsgrößen bestimmt und Eingangsparameter nach ihrer Wichtigkeit bezüglich ihres Einflusses auf Ausgangsgrößen bewertet. Die Software visualisiert diese Ergebnisse auf anschauliche Weise, sodass die Zusammenhänge schnell erfassbar werden. In einem zweiten Schritt erzeugt die Software Metamodelle auf Basis der statistischen Samples. Diese sind Antwortflächen, wobei eine möglichst gute Annäherung an die Simulationsdaten des Samples zu gewährleisten ist. Das erlaubt Vorhersagen für neue Designpunkte, ohne eine neue Simulation zu starten. Bei der Erstellung eines Metamodells werden die wichtigsten Eingangsparameter für die jeweilige Ergebnisgröße herausgefiltert und das Modell nur in Abhängigkeit dieser Parameter bestimmt.

Außerdem werden die Metamodelle für die verschiedenen Ergebnisgrößen nach ihrer Prognosefähigkeit bewertet. Bei einer guten Prognosefähigkeit lassen sich Metamodelle für Optimierungsaufgaben verwenden, bei denen viele Datenpunkte notwendig sind. Dies führt teilweise zu erheblichen Zeiteinsparungen. Hierbei ist zu beachten, dass derselbe physikalische Sachverhalt oft durch

Aufmacherbild: 2x2 Antennenarray mit Viertor-Hybridkoppler. Dieser wandelt die vier Antennensignale in ein Summensignal und drei Differenzsignale um.



* PhD Christian Römelsberger
... ist Experte im Bereich der
hochfrequenten elektromagnetischen
Simulation bei CADFEM.

mehrere verschiedene Größen beschreibbar ist. Im Antennendesign sind die interessantesten Ausgangsgrößen:

- die Resonanzfrequenz der Antenne,
- die Bandbreite,
- der Gewinn oder die Richtcharakteristik in Form der Positionen und der Breiten der Haupt- und Nebenzipfel und in Form des maximalen Gewinns oder der Polarisierung.

Bei der zuvor erwähnten Dualband-Schlitzantenne besteht für die Reflexionsdämpfung bei den beiden Frequenzen 2,4 GHz und 5,8 GHz eine sehr schwer beschreibbare Abhängigkeit von den Eingangsparametern. Kleine Variationen der Geometrie können die Minima der Reflexionsdämpfung um eine Bandbreite verschieben. Daher tritt bei einer gegebenen Frequenz eine äußerst nichtlineare Abhängigkeit der Reflexionsdämpfung von den Eingangsparametern auf. Um diese Abhängigkeit genau zu ermitteln, werden in einem kleinen Parameterbereich viele Samples benötigt.

2x2-Antennenarray mit Viertor-Hybridkoppler

Für schmalbandige Resonanzen ist es daher oft besser, ihre Position als Ergebnisgröße

zu wählen, denn diese ist meist besser durch ein Metamodell zu beschreiben. So lässt sich die Antenne gut an die beiden Frequenzen anpassen (Bild 2).

Ein Antennensystem besteht im Allgemeinen aus mehr als nur dem Strahler. Das Speisetzwerk enthält oft auch andere passive Mikrowellenkomponenten wie Koppler, Filter, Diplexer und Zirkulatoren. Die Funktionsweise dieser Komponenten beruht auch auf Resonanzen, Interferenz und Impedanzanpassung. Beispielsweise hat das Unternehmen PIDSO für Tracking-Anwendungen ein kardanisch aufgehängtes 2x2-Antennenarray entwickelt, um eine schärfere Richtcharakteristik und somit auch eine höhere Reichweite zu erreichen.

Das Summensignal der vier Antennen wird hierbei zur Signalübertragung verwendet. Aus den Laufzeitunterschieden einfallender Wellen auf die vier Antennen können die Richtung des zu lokalisierenden Objekts bestimmt und somit die Antennennachführung geregelt werden.

Das Speisetzwerk des Arrays enthält einen Viertor-Hybridkoppler (siehe Aufmacherbild und Bild 3). Dieser wandelt die vier Antennensignale in ein Summensignal und

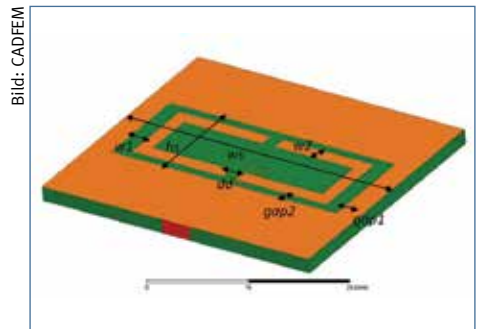


Bild 1: Bei einer Dualband-Schlitzantenne kann eine Vielzahl von Parametern variiert werden.

drei Differenzsignale um, wovon zwei Auskunft über die horizontale und vertikale Abweichung des einfallenden Signals von der Normalenrichtung des Arrays geben. Der Viertor-Hybridkoppler nutzt konstruktive und destruktive Interferenzen, um die Summen- und Differenzsignale zu bilden.

Die Kantenlänge des Hybridkopplers beträgt ungefähr eine Viertel-Wellenlänge. Das heißt, die S-Matrix für das Übertragungsverhalten des Kopplers von den Eingangs- zu den Ausgangs-Ports soll durch

$$S_{Out,In} \sim \begin{pmatrix} i & 1 & i & 1 \\ 1 & i & 1 & i \\ -i & 1 & i & -1 \\ -1 & i & 1 & -i \end{pmatrix}$$

beschrieben sein. In einer Optimierung mit optiSLang wurde dies durch die passende Wahl einer Zielfunktion erreicht: die mittlere quadratische Abweichung der wahren S-Matrix des Kopplers von der mit einer entsprechenden multiplikativen (komplexen) Konstante angepassten, idealen S-Matrix. Außerdem sollte der Return-Loss des Summen-Ports unter -12dB liegen.

Konturplot zeigt hohe Optimierungsqualität

Wie der Konturplot (Bild 4) der Ausgangssignale am Summen-Port und den horizontalen und vertikalen Differenz-Ports über den horizontalen und vertikalen Phasendifferenzen zeigt, ist die Qualität der Optimierung sehr gut. Die Konturen der horizontalen und vertikalen Differenzsignale bilden über einen großen Winkelbereich ein rechtwinkliges Koordinatensystem. Außerdem hängt das Summensignal kaum von den Phasendifferenzen ab.

Aus der visuellen Darstellung der elektrischen Feldstärke (siehe Bild 3) ist ersichtlich, dass bei senkrecht auf die Antennen-Patches einfallenden Wellen kaum etwas an den

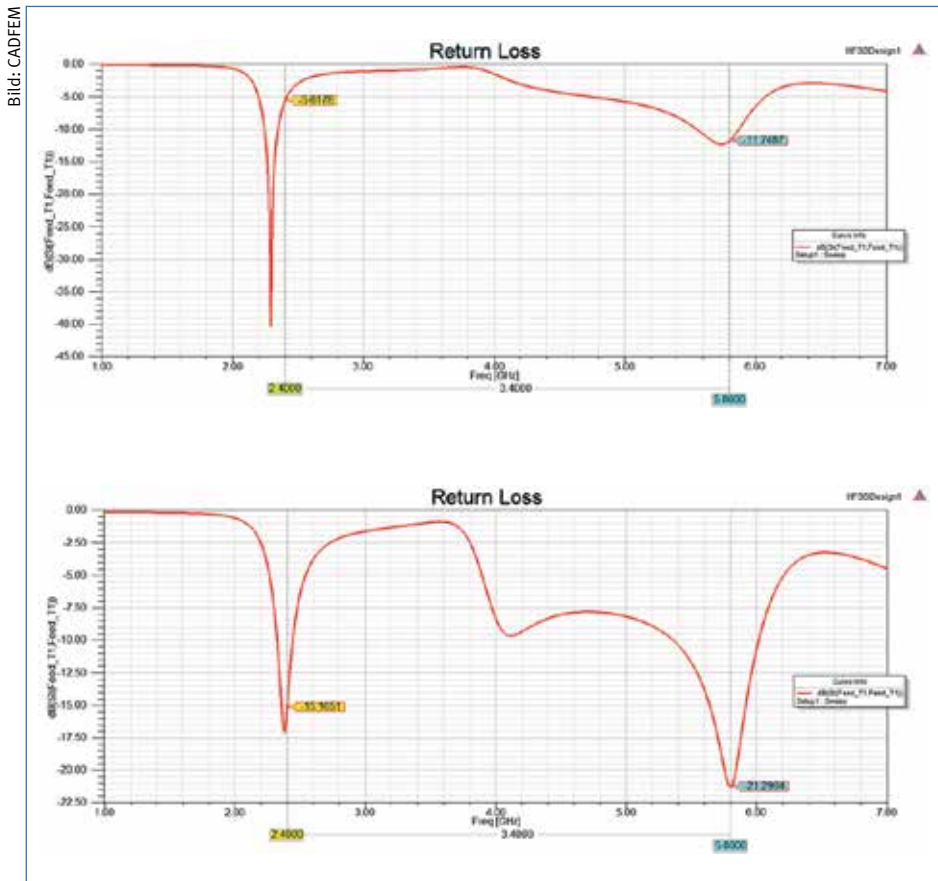


Bild 2: Anpassung der Reflexionsdämpfung einer Dualband-Antenne auf zwei gegebene Frequenzbänder bei 2,4 GHz und 5,8 GHz.

Differenzen-Ports des Hybridkopplers ankommt. Dies illustriert, wie wichtig die richtige Formulierung der Fragestellung bei der Optimierung von HF-Strukturen ist.

Eine weitere wichtige Fragestellung in der Entwicklung von Antennenstrukturen und RF-Anwendungen (Radio Frequency) ist die der Robustheit. Hier sind verschiedene Aspekte zu beachten: Wie sensitiv/robust verhält sich eine Struktur gegenüber Fertigungstoleranzen, Materialschwankungen oder auch äußeren Einflüssen wie thermischen Dehnungen?

Die Robustheit muss bei der Entwicklung beachtet werden

In einer solchen Analyse werden Streuungen mit bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsparameter berücksichtigt, um Ausfallwahrscheinlichkeiten oder Six-Sigma-Betrachtungen zu untersuchen. RF-Komponenten wie Filter basieren oft auf sehr akkurat abgestimmten Resonanzen, die sehr sensitiv gegenüber kleinen Geometrieänderungen reagieren.

Daher stellt sich unter anderem die Frage nach der Robustheit eines Cavity-Filters (RF-Filter aus Hohlraumresonatoren) gegenüber thermischer Dehnung, die durch die eigene Verlustleistung hervorgerufen wird. Diese Aufgabenstellung lässt sich sehr gut innerhalb der ANSYS Workbench als parametrischer Simulationsplattform beantworten, in der auch verschiedene physikalische Domänen per Drag & Drop gekoppelt werden können.

In diesem Fall interessiert die Kopplung der hochfrequent-elektrischen an die thermische und mechanische Domäne, wobei auch Rückwirkungen berücksichtigt werden müssen. Die Einbindung von optiSLang in die ANSYS Workbench erleichtert solche Untersuchungen erheblich. Auf ähnliche Weise

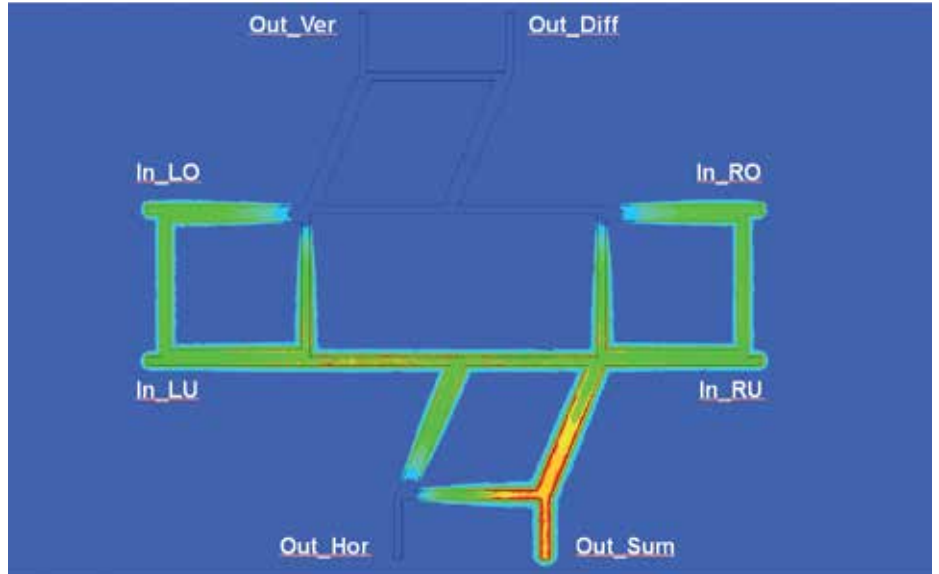


Bild 3: Vierport-Hybridkoppler mit Signal.

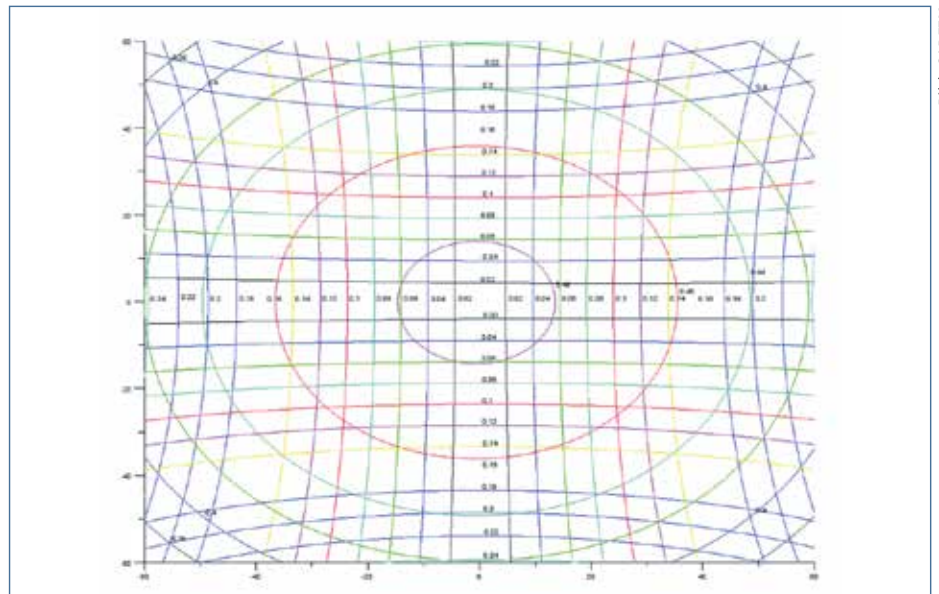


Bild 4: Konturplot der Ausgangssignale am Summen-Port und den horizontalen und vertikalen Differenzen-Ports.

Webinarankündigung

CADFEEM zeigt im kostenlosen Webinar die Grundlagen der elektromagnetischen HF-Simulation. Im Design von Antennen sind vielfältige Anforderungen zu erfüllen:

Ein kleiner Bauraum, wie er durch die Größe eines Gerätes oder einer Platine limitiert ist, eine gute Empfangs- bzw. Sende-Leistung sowie eine für die Anwendung optimierte Richtcharakteristik. Die FEM-Simulation mit ANSYS HFSS bietet die Möglichkeit, diese Aufgaben-

stellungen schon in einer frühen Designphase zielgerichtet zu lösen. Anhand typischer Designaufgaben, wie der Simulation einer Parabolantenne, der Anpassung der Richtcharakteristik eines Mobilfunk-Antennenarrays und der Optimierung einer Dualband-Schlitzantenne wird das praktische Arbeiten mit der Software demonstriert. Anmeldungen unter www.cadferm.de/antennen-webinar Termine: 9.2. und 5.5. jeweils 14 bis 15 h sowie 26.3. von 11 bis 12 h

lassen sich auch Fragestellungen nach der Robustheit der Richtcharakteristik von großen Antennen wie Parabolantennen auf äußere Einwirkungen wie Windlasten oder thermische Dehnungen durch Sonneneinstrahlung beurteilen.

Im dritten und letzten Teil dieser Artikelserie wird darauf eingegangen, wie Antennen mit Speisernetzwerken anhand von Systemsimulationen untersucht werden. Dabei lassen sich auch aktive Bauelemente im virtuellen Prototypen eines Antennensystems berücksichtigen. // LD

CADFEEM
+49(0)8092 70050

Designverständnis von Antennensystemen (HF-Simulation, Teil 3)

Der dritte und letzte Teil der Artikelserie erläutert, wie Schaltungssimulationen, die auf den Resultaten von Feldsimulationen basieren, zum Verständnis ganzer Antennensysteme beitragen.

CHRISTIAN RÖMELBERGER *

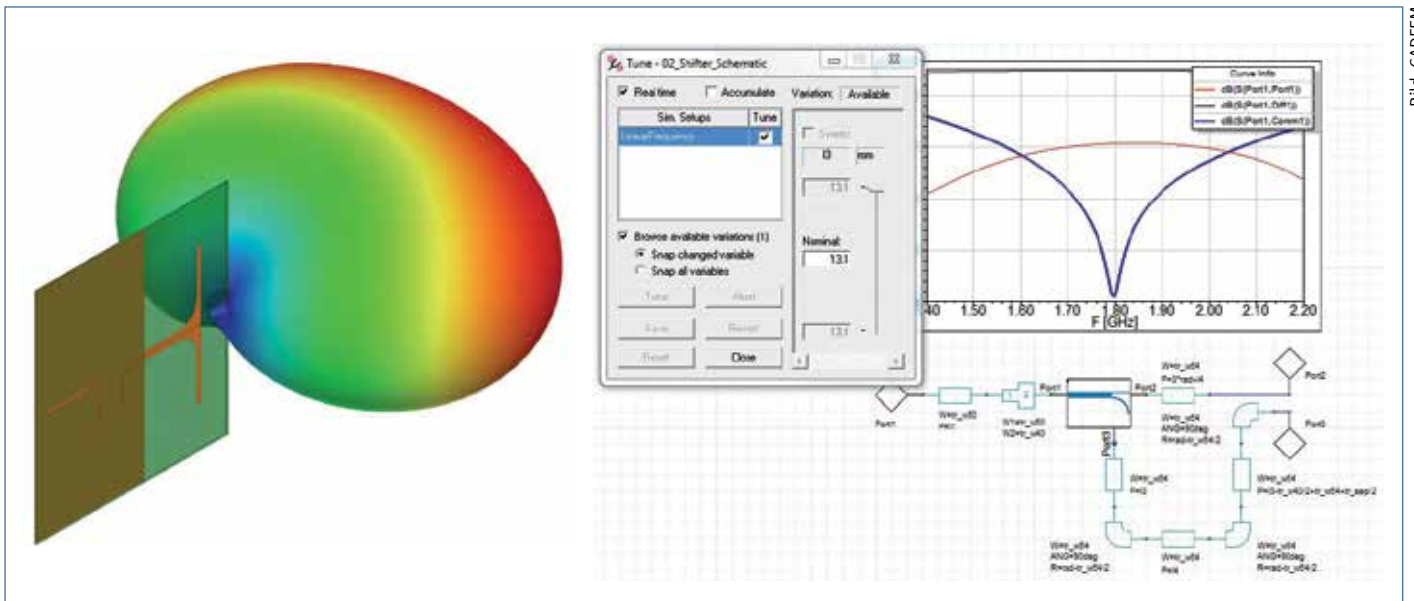


Bild 1: Gedruckte Dipolantenne mit Speisetzwerk (links) und Schaltungssimulation des Speisetzwerks (rechts). Die Modenumwandlung in eine Gleichtaktmode ist in blau dargestellt, die Reflexionsdämpfung in rot.

In den ersten beiden Teilen dieser Artikelserie wurde im Detail beschrieben, welche Unterstützung die hochfrequente elektromagnetische Feldsimulation beim Entwickeln von Antennen oder passiven RF-Komponenten bietet. Hierbei wurde ein großes Augenmerk auf die Optimierung des Designs gelegt, indem mit Hilfe parametrischer Variantenuntersuchungen das Verständnis bezüglich des Produktverhaltens erhöht wurde. Darauf aufbauend ließ sich das Design verbessern und dessen Robustheit bewerten. Dieser dritte und letzte Teil der Artikelserie erläutert, wie Schaltungssimulationen, die auf Ergebnissen der Feldsimulation aufbauen, helfen können, ein ge-

samtes Antennensystem oder größere Teile davon zu verstehen.

Um die Systemsimulation an einem einfachen Beispiel zu erklären, soll hier das Design einer gedruckten Dipolantenne, die aus einer Mikrostreifenleitung gespeist wird, betrachtet werden (Bild 1). Die Dipolantenne wird dabei durch ein differenzielles Signal gespeist und die Abstrahlcharakteristik ist durch die Masseebene unter dem Speisetzwerk ein wenig gerichtet. Das Speisetzwerk auf der anderen Seite soll das Signal einer 50-Ohm-Mikrostreifenleitung mit Hilfe einer Verzögerungsleitung in ein differenzielles Signal umwandeln, das der Fußpunktimpedanz der Dipolantenne angepasst ist.

Kopplung von Segmenten des Speisetzwerks

Das Verhalten des Speisetzwerks lässt sich sehr gut und effizient in einer Systemsimulation im ANSYS Electronics Desktop ab-

bilden: Da sich das Signal entlang der Mikrostreifenleitungen als leitungsgebundene Welle ausbreitet, die sehr stark durch die Grundmode (Quasi-TEM-Mode – Transversal Elektro-Magnetisch) dominiert ist, können unterschiedliche Segmente des Speisetzwerks über Terminals gekoppelt werden (siehe Bild 1 rechts).

Dabei wird das Übertragungsverhalten jedes Segments durch ein frequenzabhängiges S-Parametermodell beschrieben. Für Mikrostreifenleitungen lässt sich das Übertragungsverhalten analytisch beschreiben, wogegen zum Beispiel der Teiler als Ergebnis einer Feldsimulation hinterlegt ist.

Die Kopplung der Segmente erfolgt auf konservative Weise. Das heißt, dass der Strom erhalten bleibt. Denn zum einen gilt die Kirchhoff'sche Knotenregel und zum anderen fließt an jedem Port aller Strom, der durch die Terminals hereinkommt, durch den Referenzterminal auf die Erde ab.



* Christian Römelsberger, PhD
... ist Experte im Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Simulation bei CADFEM.

Aufgrund der starken Reduktion der Freiheitsgrade und somit der Modellgröße lässt sich eine solche Systemsimulation in Sekunden vornehmen. Folglich ist das Speisetzwerk sehr schnell per Hand optimierbar, indem die Länge des Extraweges eines der beiden Teilsignale verändert wird. Hier soll bei der Resonanzfrequenz die Umwandlung des Eingangssignals in eine Gleichtaktmode der Dipolantenne minimiert werden.

Antennenabstimmung durch Feldsimulation

In weiteren Schritten wird dann die Antenne aus dem Dipol und dem Speisetzwerk zusammengesetzt und in einer Feldsimulation nochmals abgestimmt. Das ist notwendig, um die Wechselwirkung zwischen dem Dipol und der Verzögerungsleitung auszugleichen, die durch freie Wellen hervorgerufen werden, also nicht durch die terminale Kopplung abgebildet sind.

Hierbei werden die Dipollänge und die Länge der Verzögerungsleitung als bestimmende Parameter für die Anpassung der Antenne verwendet. Die Längen werden mit einer Tuning-Funktionalität in ANSYS HFSS angepasst, die auf der Ableitung – und der damit verbundenen Taylor-Entwicklung – der S-Parameter nach den Tuning-Parametern beruht. Diese sehr effiziente Methodik basiert zum einen auf Ingenieurwissen und zum anderen auf dem Wechselspiel zwischen System- und Feldsimulation, das durch den ANSYS Electronics Desktop als integrierte Simulationsumgebung realisierbar wird.

Abbildung nichtlinearer Bauteileigenschaften

Bei der oben beschriebenen Schaltungsanalyse handelt es sich um eine lineare Netzwerkanalyse im Frequenzbereich. Folglich wird von einem linearen Verhalten der einzelnen Komponenten des Systems ausgegangen, was bei diesen passiven Strukturen der Fall ist.

Die Systemsimulation lässt sich aber auch verwenden, um nicht-lineare Bauteileigenschaften wie zum Beispiel die von Transistoren, Dioden oder komplexeren Baugruppen wie Mixern oder Verstärkern effizient abzubilden. Dafür stehen je nach vorliegendem Anwendungsfall und aktueller Fragestellung verschiedene Analysetypen im ANSYS Electronics Desktop bereit:

- 1. Transiente Analysen zur Abbildung nicht-periodischer Signale oder von Signalen mit sehr scharfen Schaltflanken, also mit einem sehr großen Frequenzgehalt.
- 2. DC-Analysen zum Bestimmen von Arbeitspunkten aktiver Bauteile.

PRAXIS WERT

Entscheidungen können früher fallen

Durch Simulationsmethoden lassen sich wichtige Entscheidungen bereits in einer sehr frühen Phase der Antennenentwicklung fällen. Die Simulation trägt zum tiefen Verständnis des Verhaltens des Antennendesigns bei, da sich nicht nur Einzelkomponenten berechnen lassen, sondern auch die Untersuchung von Gesamtsystemen möglich wird.

Emissionspektrum bestimmen

So lassen sich zum Beispiel ungewollte Antennen entdecken. Dazu zählen etwa Leiterbahnen und Kabel, die Teil des Gesamtsystems sind. Durch Feld- und Systemsimulationen ist es möglich, diese ungewollten Antennen aufzuspüren und zu ermitteln, wie stark sie im Betrieb angeregt werden. So lässt sich das Emissionsspektrum bestimmen.

- 3. Nicht-lineare Frequenzbereichsanalysen zur Berechnung des Oberwellengehalts periodischer Signale.

- 4. Modulationsanalysen zur Untersuchung der Einhüllenden von nicht-periodischen Signalen auf hochfrequenten Trägerwellen.

- 5. Augendiagrammanalysen zur Analyse der digitalen Signalqualität.

Beim Design eines rauscharmen Verstärkers (LNA – Low Noise Amplifier) ist das Zusammenspiel des verstärkenden Transistors mit den Anpassungsnetzwerken des Ein- und Ausgangs von besonderem Interesse. Da ein LNA möglichst linear operieren soll, interessiert bei seiner Auslegung speziell auch die Abweichung von der Linearität. Deshalb muss in einer Simulation besonders das nicht-lineare Verhalten des Transistors abgebildet werden.

Zahl der diskreten Bauelemente verringern

Die Impedanzen der Anpassungsnetzwerke werden oft durch spezielle Leiterbahnführungen erreicht. Auf diese Weise wird die Anzahl der diskreten Bauelemente reduziert und auch Induktivitäten, die nicht dem Stan-

Top Qualität für hohe Leistung

Ultrakondensatoren sind kompakte Energiespeicher mit schneller Energieabgabe und hoher Leistungsdichte.

Die neue DuraBlue Technologie, mit der 2.85V, 3400F Zelle erfüllt die höchsten Schock und Vibrationsanforderungen.

Maxwell Ultrakondensatoren – Top Qualität für hohe Leistung.

Anwendungen:

- ❖ Energiespeicherung und -Backup für kurzfristige Netzausfälle und Spitzenlaststrom für Industrieanlagen
 - ❖ Transport
 - ❖ Grid, Wind- und Solar-Anlagen
- ... und die Liste wird ständig länger.



Maxwell
TECHNOLOGIES
Enabling Energy's Future™

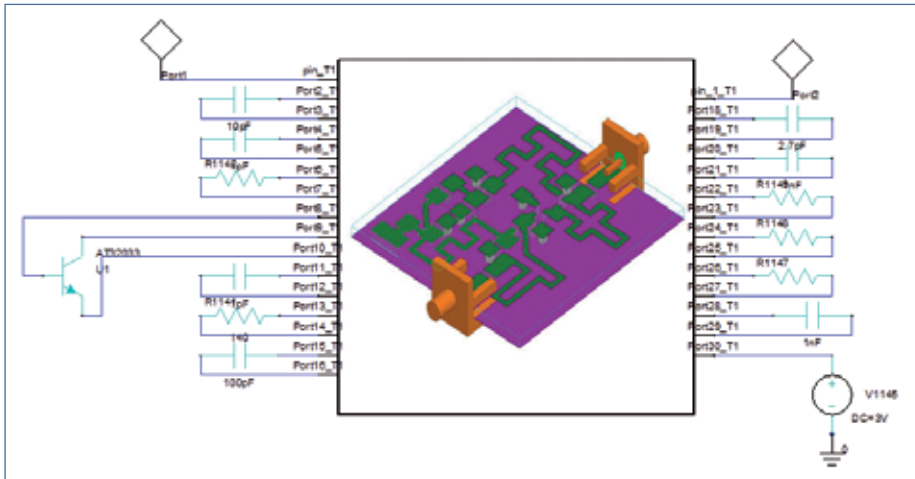


Bild: CADFEM

Bild 2: Der Schaltplan für die Systemsimulation eines Low Noise Amplifiers. Das Übertragungsverhalten der Platine inklusive parasitärer Impedanzen ist in dem großen Block hinterlegt.

Standard entsprechen, sind sehr einfach realisierbar. Der gesamte LNA ist daher in einer Systemsimulation (siehe Bild 2) abzubilden, in die sowohl die Impedanzen des Layouts aus einer Feldsimulation als auch ein gutes nicht-lineares Verhaltensmodell des Transistors eingebunden werden.

Die Untersuchung des LNA erfolgt mit mehreren Analysen:

- 1. Der Arbeitspunkt des Transistors wird in einer DC-Analyse bestimmt.
- 2. Der Frequenzgang des Kleinsignalverhaltens lässt sich in einer linearen Netzwerkanalyse ermitteln. Hierbei geben die S-Parameter Auskunft über die Verstärkung und die Reflexionsdämpfung an beiden Eingängen sowie über die Bandbreite des Verstärkers. In dieser Analyse wird der Arbeitspunkt verwendet, der in der DC-Analyse bestimmt wurde.
- 3. Das nicht-lineare Verhalten des LNA kann in einer ‚Harmonic Balance‘-Analyse untersucht werden. Beispielsweise wird es

bei einer gegebenen Eingangsleistung und Frequenz durch die angeregten höheren harmonischen Anteile im Ausgangssignal charakterisiert bzw. durch die Kennlinie, der Ausgangsleistung gegen die Eingangsleistung bei der Grundfrequenz.

Nachbildung eines gesamten Antennensystems

Die Systemsimulation kann natürlich noch eine Stufe weiter getrieben werden, indem ein gesamtes Antennensystem nachgebildet wird. In solchen Modellen können die verschiedenen Komponenten in unterschiedlichen Detailgraden modelliert werden. Dabei sind sowohl einfache Verhaltensmodelle von gesamten Verstärkern, Mixern oder Filtern verwendbar als auch eine detaillierte Modellierung, die auf komplexen Feldsimulationen und vielen detaillierten Einzelkomponenten beruht.

Zum Beispiel sind bei einem RFID-System (Radio Frequency Identification) viele Her-

ausforderungen zu bewältigen: Die Signale müssen vom Lesegerät zum Chip auf dem RFID-Tag und zurück gut übertragen werden, der Chip auf dem Tag wird dabei aber auch mit Energie aus dem empfangenen Signal gespeist. Hierfür müssen sowohl das Energie-Harvester-System als auch das Send- und Empfangssystem mit der Modulation des Signals untersucht werden.

Von ganz besonderer Bedeutung ist die Feldkopplung zwischen den Antennen. Diese sollte in einer wohldefinierten Region um das Lesegerät und bei möglichst vielen Tag-Ausrichtungen möglichst günstig sein. Hierbei hilft die ‚Dynamic Link‘-Technik im ANSYS Electronics Desktop für Systemsimulationen, die auf parametrischen Feldsimulationen aufbaut. Um bei solchen Fragen auch Felddaten in einer Systemsimulation zu berücksichtigen, lassen sich die Anregungen, die in der Systemsimulation ermittelt wurden, automatisch in die Feldsimulation übertragen.

Effekte ungewollter Antennen spielen große Rolle

Die HF-Simulationslösungen von ANSYS basieren auf leistungsstarken 3D-Feldlösern und Schaltungssimulatoren, die an die jeweiligen Anforderungen angepasst sind und nahtlos miteinander zusammenspielen. Diese eignen sich hervorragend, um Antennensysteme zu simulieren. Darüber hinaus ist der Anwendungsbereich dieser Lösungsverfahren noch viel breiter: Im EMV-Bereich spielen zum Beispiel Leiterbahnen und Kabel, die als ungewollte Antennen betrieben werden, eine große Rolle. Diese ungewollten Antennen können mit Feldsimulationen entdeckt werden und in einer Systemsimulation lässt sich bewerten, wie stark sie im Betrieb angeregt werden. Damit ist das Emissionsspektrum bestimmbar.

Die hier aufgezeigten Simulationen für Antennen und Antennensysteme zeichnen sich durch einen durchgängigen parametrischen Workflow aus – von der Berechnung der einzelnen Komponente bis zur Untersuchung des Gesamtsystems. Damit lassen sich komplette Antennensysteme als virtuelle Prototypen systematisch analysieren und optimieren. Auf diese Weise können schon in einer sehr frühen Entwicklungsphase wichtige Entscheidungen – mit einem durch die Simulation gewonnenen umfassenden Verständnis des physikalischen Verhaltens des Antennendesigns – fundiert getroffen werden. // FG

CADFEM
+49 (0)8092 70050

Webinare zum Thema Antennendesign

CADFEM zeigt in kostenlosen Webinaren die Grundlagen der HF-Simulation. Im Design von Antennen sind vielfältige Anforderungen zu erfüllen: Ein kleiner Bauraum, wie er durch die Größe eines Gerätes oder einer Platine limitiert ist, eine gute Empfangs- beziehungsweise Sendeleistung sowie eine für die Anwendung optimierte Richtcharakteristik. Die FEM-Simulation mit ANSYS HFSS bietet die Möglichkeit, diese Aufgabenstellungen schon in einer frühen Designphase

zielgerichtet zu lösen. Anhand typischer Designaufgaben wie der Simulation einer Parabolantenne, der Anpassung der Richtcharakteristik eines Mobilfunk-Antennenarrays und der Optimierung einer Dualband-Schlitzantenne wird das praktische Arbeiten mit der Software demonstriert. Anmeldungen sind unter der Adresse www.cadfem.de/antennen-webinar möglich. Termine: Donnerstag, 26. März, 11.00 Uhr und Dienstag, 5. Mai, 14.00 Uhr.