

# 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

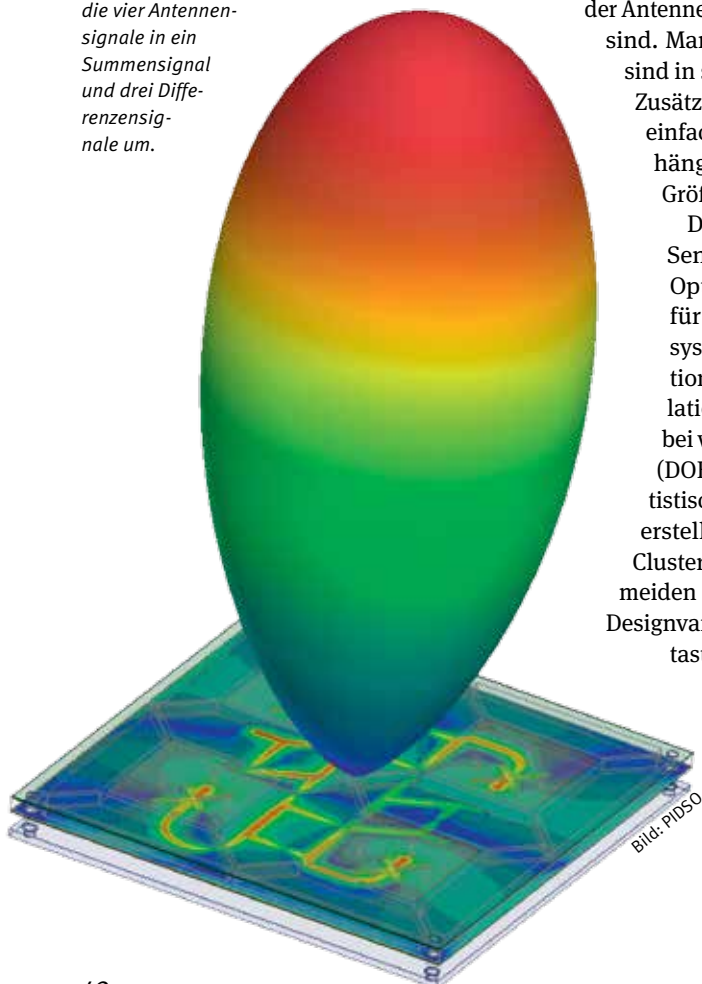
HFSS innerhalb der Workbench sorgt für effiziente und benutzerfreundliche Parametervariationen. Hierbei stellt die auto-adaptive Vernetzung eine gleichbleibende numerische Genauigkeit sicher, so dass der Einfluss des numerischen Rauschens handhabbar wird.

## 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

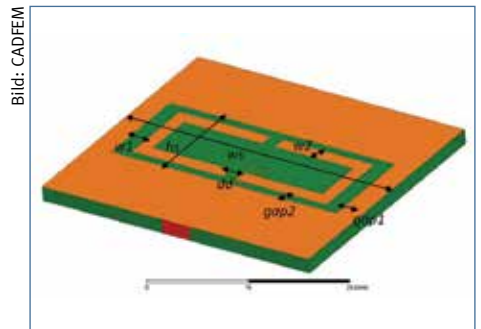
Für schmalbandige Resonanzen ist es daher oft besser, ihre Position als Ergebnisgröße

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 Summsignal 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 Summsignal 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

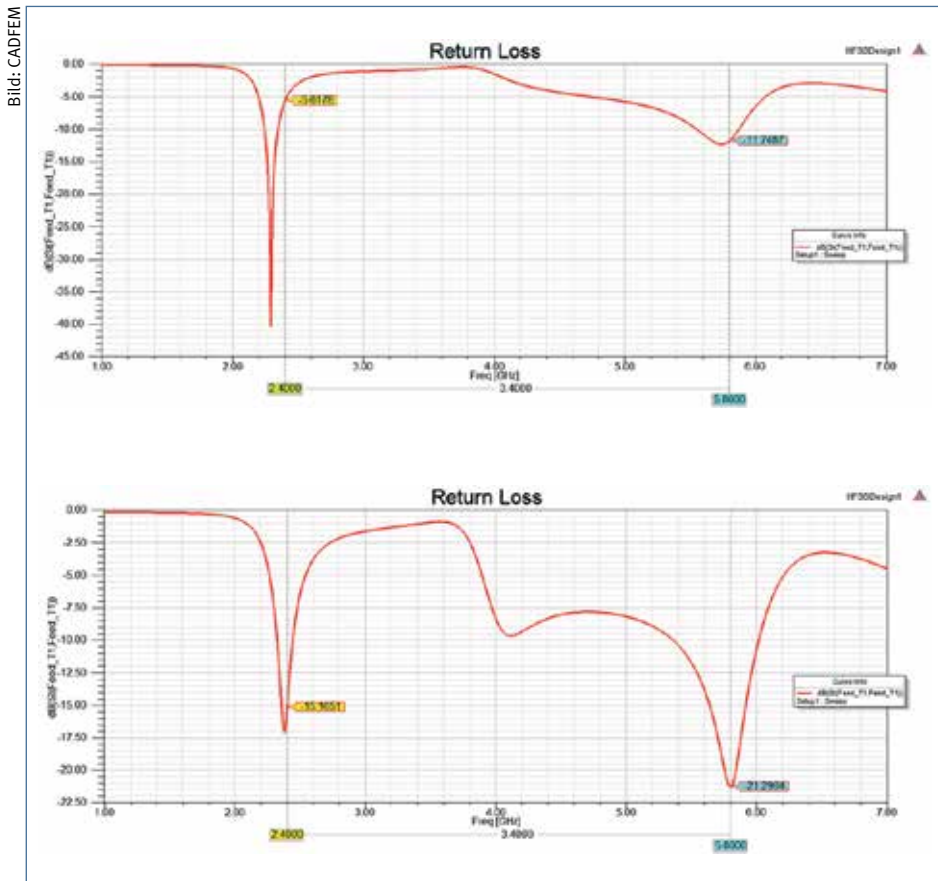
$$S_{Out,In} \sim \begin{pmatrix} i & 1 & i & 1 \\ 1 & i & 1 & i \\ -i & 1 & i & -1 \\ -1 & i & 1 & -i \end{pmatrix}$$

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 Summsignal 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

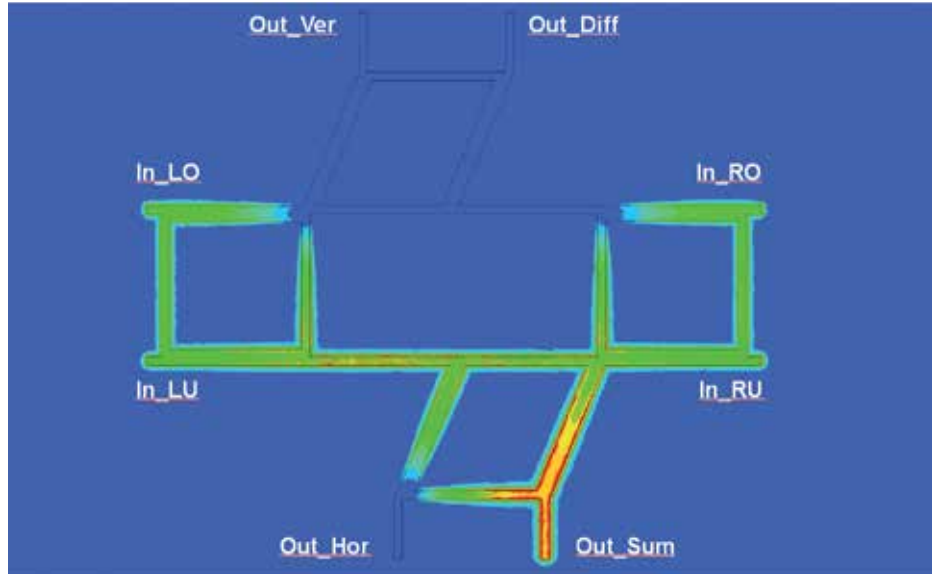


Bild 3: Vierport-Hybridkoppler mit Signal.

Bild: PIDSO

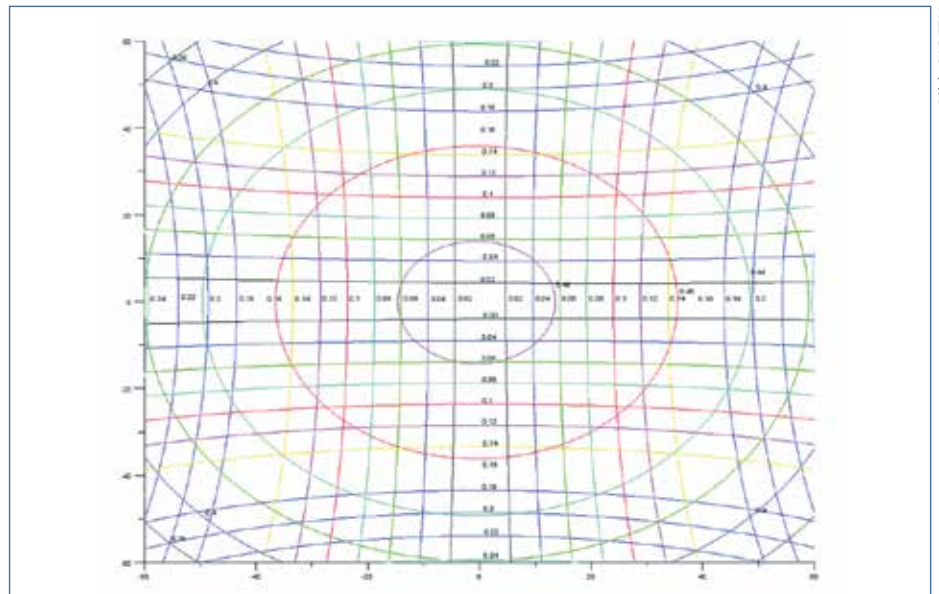


Bild 4: Konturplot der Ausgangssignale am Summen-Port und den horizontalen und vertikalen Differenzen-Ports.

Bild: CADFEM

## Webinarankündigung

CADFEM 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](http://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

CADFEM  
+49(0)8092 70050