



## 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\*

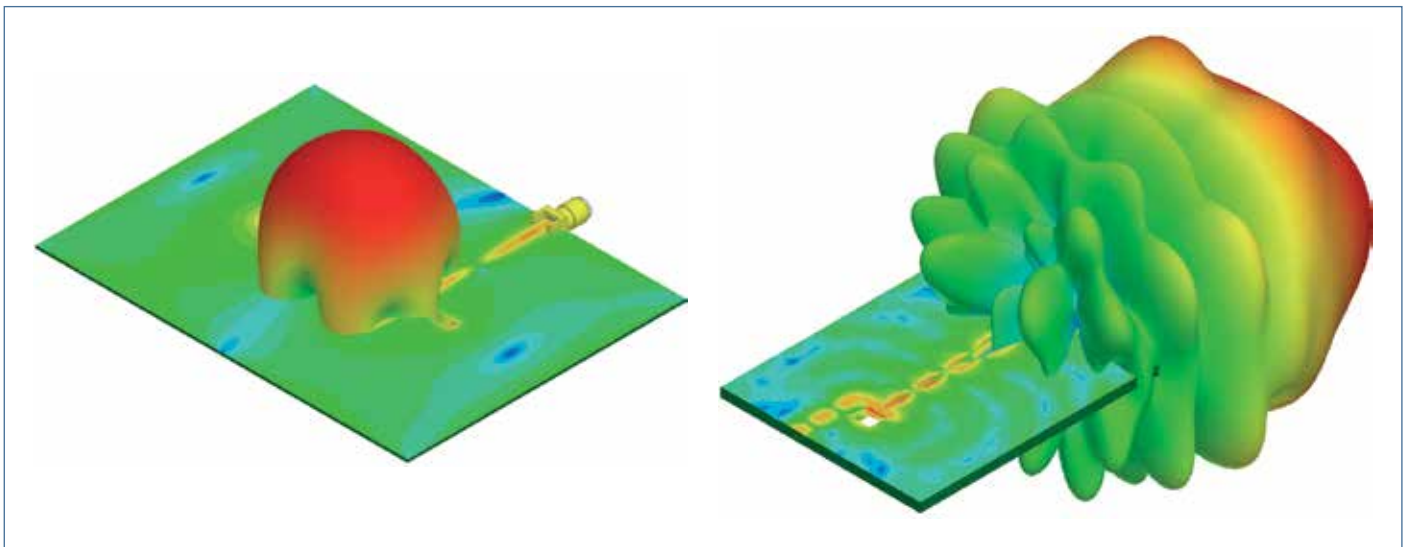


Bild: CAD/FEM

**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  $50 \Omega$  auf den Wellenwiderstand des freien Raumes ( $377 \Omega$ ) 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.

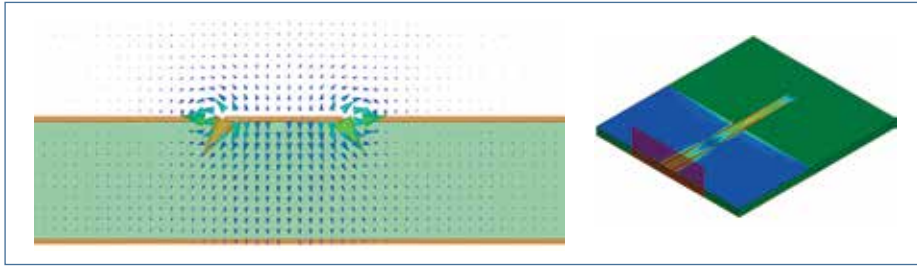


Bild: CADFEM

**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.

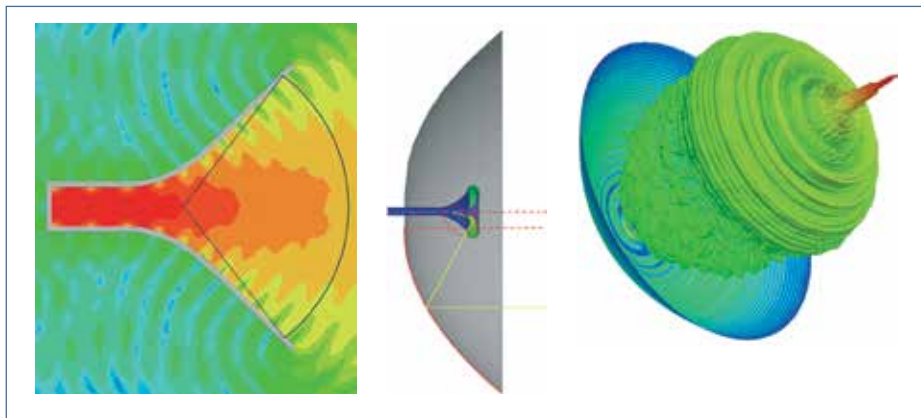
### Mit S-Parametern das exakte Stehwellenverhältnis ermitteln

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](http://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 Phaselage 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](http://WWW.RTOS.COM)  
+49 5143-911303

expresslogic