

Effektiv abgestrahlt

Finite-Elemente-Modellierung von Mikrowellenantennen mit multiphysikalischen Kopplungen

Edgar J. Kaiser

Dipl.-Phys. Edgar J. Kaiser, emPhys Physikalische Technik Entwicklung – Simulation – Beratung, Tökendorfer Weg 2, 24253 Probsteierhagen

Antennen spielen in vielen Anwendungen eine wichtige Rolle – je nach Einsatzgebiet müssen sie allerdings unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Mittels Finite-Elemente-Methoden lässt sich eine Antenne modellieren, um ihre Eigenschaften zu optimieren.

Zahlreiche technische Anwendungen von Antennen spielen sich im Frequenzbereich zwischen 3 und 300 GHz ab. Beispiele sind Mobilfunk und WLAN-Systeme oder die Kommunikation mit Raumsonden über riesige Entfernungen. Die Antenne spielt stets die entscheidende Rolle, um die vom Sender bereitgestellte elektromagnetische Energie effektiv und in die gewünschte Richtung abzustrahlen bzw. die aus der Entfernung einfallende elektromagnetische Wellenfront einzufangen und sie als elektrisches Signal dem Empfänger zuzuführen.

Antennen gibt es in verschiedenen Formen: Jeder kennt Fernsehantennen – nach ihren Erfindern Yagi-Uda-Antenne genannt – oder Parabolantennen, die mit

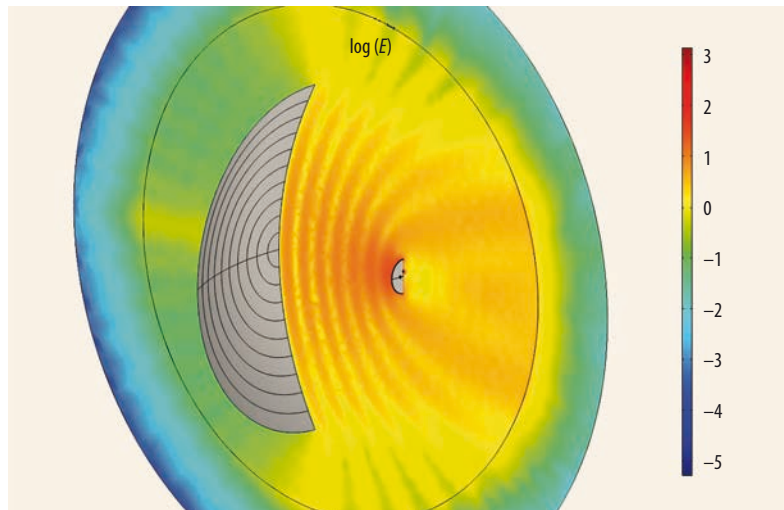


Abb. 1 Das elektrische Nahfeld der Parabolantenne mit Patcherreger. Die Farbskala zeigt den Logarithmus der elektrischen Feldstärke E .

unterschiedlichem Durchmesser zum TV-Satellitenempfang oder zur Kommunikation mit Raumsonden dienen.

Für viele Anwendungen genügen Standardantennen. Moderne Entwicklungen in der Kommunikationstechnik erfordern jedoch spezielle Lösungen. Ein neuer Trend im Mobilfunk besteht z. B. darin, mit Hilfe von Phased-Array-Antennen die Sendeenergie einer Mobilfunk-Kopfstation gezielt auf das Endgerät des Teilnehmers zu bündeln. Das spart Energie und erhöht die Zuverlässigkeit der Verbindung. Solche Antennen lassen sich weder analytisch berechnen, noch sind parametrisierte Prototypen vorhanden. Hier helfen numerische Methoden wie das Momenten- oder das Finite-Elemente-Verfahren dabei, sie auszuliegen und zu optimieren.

Das Momentenverfahren ist im Volumen gitterfrei. Lediglich die metallischen Leiter der Antenne werden in endliche Leiterstücke unterteilt (segmentiert). Damit ist es möglich, die Stromverteilungen auf den Antennenleitern zu bestimmen und die Strahlungscharakteristik der Antenne im Fernfeld zu berech-

nen. Das Verfahren ist sehr effektiv, eignet sich aber weniger dazu, das Nahfeld der Antenne zu berechnen.

Beim Finite-Elemente-Verfahren werden die Antennenleiter sowie das umgebende Volumen vernetzt und die der Wellenausbreitung zugrundeliegenden Maxwell-Gleichungen in jedem Punkt des dreidimensionalen Gitters gelöst. Aufgrund begrenzter Rechnerressourcen darf das Berechnungsvolumen in der Regel nicht größer als einige zehn bis hundert Wellenlängen sein. Daher ist es erforderlich, das Fernfeld der Antenne durch geeignete Integrationsverfahren am Rand des Volumens zu berechnen. Dieses Verfahren ist zwar rechnerisch aufwändig, bietet aber den Vorteil, dass neben dem Fernfeld auch das Nahfeld mit großer Genauigkeit zur Verfügung steht.

Wozu ist es aber überhaupt nötig, das Nahfeld zu kennen? Die Antenne soll ja in die Ferne abstrahlen. In der Praxis befinden sich häufig metallische und nichtmetallische Komponenten in unmittelbarer Umgebung der Antennenleiter. So ist heutzutage fast immer die Antenne im Inneren

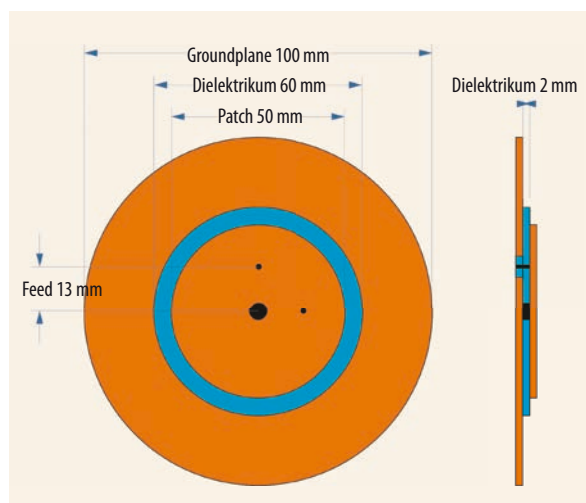


Abb. 2 Die kleinere Metallscheibe (Patch) einer Patchantenne wird an den Innenleiter des Koaxialkabels angeschlossen, die größere an den Außenleiter. Daher heißt die kleinere Scheibe auch gespeistes Element und die größere Massefläche.

eines Mobiltelefons integriert. Um in diesen Fällen die Abstrahl- und Empfangseigenschaften zu berechnen, darf die Antennenleiterstruktur nicht mehr getrennt von ihrer Umgebung betrachtet werden. Auch reicht es in vielen Fällen nicht aus, allein das elektromagnetische Feld zu betrachten, wenn zum Beispiel Verluste in den Antennenleitern und in den umgebenden Materialien eine Rolle spielen.

Hier kommt die multiphysikalische Finite-Elemente-Modellierung zum Einsatz. Multiphysikalisch bedeutet in diesem Fall, dass das elektromagnetische Feld mit dem Temperaturfeld im Modellvolumen gekoppelt wird. Das elektromagnetische Feld erfährt resistive Verluste in den leitenden Strukturen und dielektrische Verluste in den Nichtleitern. Dadurch erwärmen sich die betreffenden Komponenten, was wiederum die temperaturabhängigen resistiven und dielektrischen Eigenschaften ändert. Für die exakte Berechnung ist es also nötig, die Maxwell'schen Gleichungen zur Berechnung der E - und B -Felder mit der Wärmeleitungsgleichung zur Berechnung des Temperaturfelds zu koppeln. Quantifiziert wird die Kopplung einerseits durch die relative Dielektrizität ϵ_r und die relative Permeabilität μ_r , andererseits gehen die Wärmeleitfähigkeit k und die Wärmekapazität c_p ein. Die Rückkopplung vom thermischen in das elektromagnetische Feld erfolgt über die Temperaturabhängigkeit aller Kopplungsgrößen $\epsilon_r(T)$, $\mu_r(T)$, $k(T)$ und $c_p(T)$.

Geflickte Antenne

Nun soll es darum gehen, eine Patchantenne zu modellieren, die als Erregerantenne im Brennpunkt eines Parabolreflektors angebracht ist. Solche Antennen dienen zur Kommunikation zwischen Bodenstationen und Raumfahrzeugen im erdnahen Raum bis hin zur Mondbahn (Abb. 1). Patchantennen bestehen aus einer gespeisten Metallfläche in geringem Abstand zu einer Massefläche. In dieser Ausführung befindet sich noch ein Dielektri-

kum (PTFE) zwischen Patch und Massefläche aus Kupfer (Abb. 2). Die wichtigsten Modellierungsparameter sind die geometrischen Abmessungen von Patch und Massefläche, der gegenseitige Abstand und die Position des Anschlusses für die koaxiale Speiseleitung auf der Patchfläche. Weiterhin sind die oben genannten elektromagnetischen und thermischen Materialkenngrößen sowie deren Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen.

Die Modellierung erfolgt mit dem Multiphysik-Softwarepaket COMSOL Multiphysics. Ziel ist es, die geometrischen Abmessungen für eine Einsatzfrequenz von 2090 MHz bei einer Anschlussimpedanz von 100Ω zu ermitteln. Die Antenne soll den Spiegel mit einer linksdrehend zirkular polarisierten Welle beleuchten, damit nach der Reflexion an der Spiegeloberfläche eine rechtsdrehend zirkular polarisierte Welle in den Raum abgestrahlt wird. Auch lässt sich berechnen, wie stark sich die Antennenbauteile bei Einspeisung von 10 W Sendeleistung erwärmen.

In Parameterstudien gilt es nun, die Auslegungsgrößen der Antenne zu ändern, hier also den Patchdurchmesser. Dabei zeigt sich, dass für einen Patchdurchmesser von 54 mm die Zielimpedanz von 100Ω bei 2090 MHz schon recht gut angenähert ist (Abb. 3). Um die Zielgröße noch genauer zu treffen, wird in einer verfeinerten Parameterstudie der jeweilige Parameter mit kleineren Schrittweiten in einem engeren Bereich abgetastet.

Auch das Richtdiagramm der Antenne lässt sich optimieren und die Leistungsflussdichte in Vorwärtsrichtung erhöhen. Treten unerwünschte Seitenkeulen auf, kann man das Modell mit einer Reihe von konstruktiven Elementen erweitern, um ein saubereres Richtdiagramm zu erhalten.

Schließlich ist es möglich, die zu erwartende Temperaturerhöhung an den Oberflächen der Patchantenne bei einer bestimmten Sendeleistung vorzuberechnen. Wenn die Erregerantenne in ein kleines Schutzgehäuse eingebaut wird, ist es legitim, als thermische

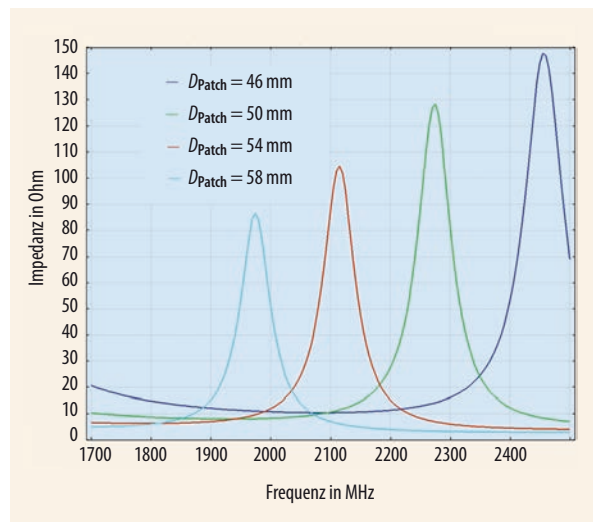


Abb. 3 Speiseimpedanz als Funktion der Frequenz für verschiedene Patchdurchmesser

Randbedingung konvektive Kühlung und Wärmeleitung in ruhender Luft anzusetzen. Bei 10 W Sendeleistung erhöht sich die Temperatur nur geringfügig und erfordert keine weitere Kühlung. Wenn die Sendeleistung aber deutlich höher ist, erlaubt es die multiphysikalische Finite-Elemente-Modellierung, geeignete Kühlvorrichtungen zu entwickeln. Dann kommt auch die Kopplung an eine Kühlmittelströmung zum Tragen.

Komplex gekoppelt

Durch Berücksichtigung multiphysikalischer Kopplungen erweitern sich die Einsatzmöglichkeiten der klassischen elektromagnetischen Antennenmodellierung beträchtlich. Weitere Kopplungen mit physikalischen Feldern lassen sich berücksichtigen, zum Beispiel die Kopplung der elektromagnetischen Verluste mit dem Temperaturfeld, die Kopplung des Temperaturfelds an Strömungsfelder zur Kühlung oder die Kopplung von Gravitation und mechanischen Beschleunigungen an die Verformung der Struktur. Die Applikation auf Basis des COMSOL Multiphysics Modells ist anwenderfreundlich und erlaubt es, Antennen selbst mit rudimentären Kenntnissen in Finite-Elemente-Methoden zu modellieren.

Die Modellierung der Parabolantenne mit Patcherregger wird am **29. September 2016** Thema eines kostenlosen Webinars der COMSOL Multiphysics GmbH sein.^{#)}

#) Mehr Informationen und Anmeldung unter www.comsol.de/events/webinar/7251