Christoph Ullrich (Autor)

Effiziente Simulationsmethoden für die Optimierung von komplexen Fahrzeugantennensystemen

https://cuvillier.de/de/shop/publications/1042

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

des metallischen Drehtellers auf die Mess- und Simulationsergebnisse wurde bestimmt. Außerdem wurde der Fehler, der durch eine ungenaue Positionierung des Fahrzeugs auf dem Drehteller entsteht, bestimmt und in seiner Größe mit anderen Messfehlern verglichen [94].

Im Abschlusskapitel 7 wird eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse gegeben. Es wird ein kurzer Ausblick auf dem Thema dieser Arbeit benachbarten Forschungsgebiete gegeben, die zur weiteren Verbesserung der Simulation von Fahrzeugantennen beitragen könnten.

Kapitel 2

Fahrzeugantennen

2.1 Entwicklung von Fahrzeugantennen

Hervorgerufen durch Trends im Design und technologischen Fortschritt, werden heutzutage kaum noch die vor 10 Jahren üblichen Stabantennen auf Fahrzeugen eingesetzt. Konforme Antennen, die versteckt im Fahrzeug angebracht sind, übernehmen den Empfang der verschiedenen Datensignale. Üblicherweise werden diese Antennen als in die Fensterscheiben des Fahrzeuges eingelegte Drähte ausgeführt, jedoch gibt es auch alternative Konzepte, bei denen die Antenne unter diversen Kunststoffanbauteilen verbaut wird. Als Beispiele sind hier aufgesetzte Heckspoiler, Zierleisten, Plastikkotflügel und -heckdeckel zu nennen. Die Entwicklung und Verwendung von optisch und mechanisch ansprechenden Kunststoffelementen ist kostspielig und zudem kundenseitig noch wenig akzeptiert. Der schlechte Ruf von Kunststoff ist überwiegend auf die Verwendung von billigsten Plastikkarosserien bei schlecht konstruierten Automobilen (Stichwort "Plastikbomber") zurückzuführen. Dennoch ist aufgrund der Vielzahl der in ein Fahrzeug einzubauenden Antennen die Nutzung verschiedener Plastikelemente als Antennenabdeckung unumgänglich. Zudem ist ein Trend zu drahtlosen Funktionen im Fahrzeug erkennbar, wodurch die Verbreitung von ausgeklügelten unsichtbaren Antennensystemen weiter zunehmen wird. Gleichzeitig steigen die Kundenanforderungen an die Performance der Antennen [27].

Bei der Entwicklung von versteckten Antennensystemen sind die dielektrischen Eigenschaften des Materials der Plastikabdeckungen sehr wichtig für das Antennenverhalten. Gleiches gilt für das Glas der Scheibenantennen. Zwar ist die Wellenlänge im VHF-Band mit $\lambda \approx 1 - 10\,\mathrm{m}$ ca. um den Faktor 100 größer als die Dicke des Glases, und der Effekt des dünnen Dielektrikums auf eine es durch-

dringende Welle ist sehr klein [18, 1, 80], da die Antenne aber direkt auf dem Glas liegt, ist der Effekt des Dielektrikums nicht mehr zu vernachlässigen [81, 7]. Für direkt auf dem Dielektrikum aufliegende Antennen ist deshalb eine genaue Modellierung des Materials nötig, da dieses einen ähnlichen Einfluss auf die Antenne hat wie die Substratparameter auf eine Koplanarleitung.

In einigen Berechnungsmethoden ist die Berücksichtigung von Dielektrika komplizierter. Deswegen wurden die Glasscheiben oft einfach vernachlässigt [93, 7], teilweise mit der Begründung, der Einfluss im HF-Band sei minimal. Im VHF-Band allerdings ändert bereits die dünne Schicht des Dielektrikums die effektive relative Permittivität $\varepsilon_{r_{eff}}$, was zu einer Vergrößerung der elektrischen Länge der Antenne führt. Die Verwendung einer verlängerten Antenne im Modell ist ebenfalls ungeeignet, da die räumliche Position der einzelnen Antennenelemente relativ zum Gesamtfahrzeug nicht korrekt dargestellt wird. Dadurch verändert sich die Stromverteilung im Gesamtsystem, was insbesondere einen Einfluss auf das Abstrahldiagramm hat.

2.1.1 Einbaupositionen

Aus ästhetischen Gründen werden Antennen möglichst verborgen eingebaut. Weitere Einschränkungen der möglichen Einbaupositionen entstehen durch die Berücksichtigung von EMV-Richtlinien. So empfehlen diese gewisse Mindestabstände von Kommunikationsantennen zu bestimmten Steuergeräten oder Leitungen, die Bussignale führen. Eine Übersicht der sich so ergebenden Einbaupositionen ist in Abb. 2.1 gegeben. Die schraffiert dargestellten Einbaupositionen befinden sich unter Flächen, die bei Standardfahrzeugen aus Metall (Stahl oder Aluminium) bestehen. Soll eine Antenne an dieser Position angebracht werden, muss das darüber liegende Bauteil speziell aus geeignetem Kunststoff gefertigt werden. Da Kunststoffanbauteile lange Zeit nur in der Einstiegsklasse akzeptiert waren, besitzen die Hersteller vergleichsweise wenig Erfahrung bei der Entwicklung solcher Bauteile mit hochwertiger Anmutung. Deshalb ist die Entwicklung von Plastikanbauteilen derzeit relativ kostspielig, weil nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Aus diesem Grund werden solche Einbaupositionen meist nur bei Cabrios genutzt, wo die Heckscheibe als wichtigster Antennenträger entfällt.

Zusätzlich zu den in Abb. 2.1 gezeigten Einbaumöglichkeiten gibt es weitere, die speziell auf bestimmte Fahrzeugtypen abgestimmt sind:

- hinter Zierleisten auf den Seitentüren,
- im Verdeckdeckel bei Cabrios,

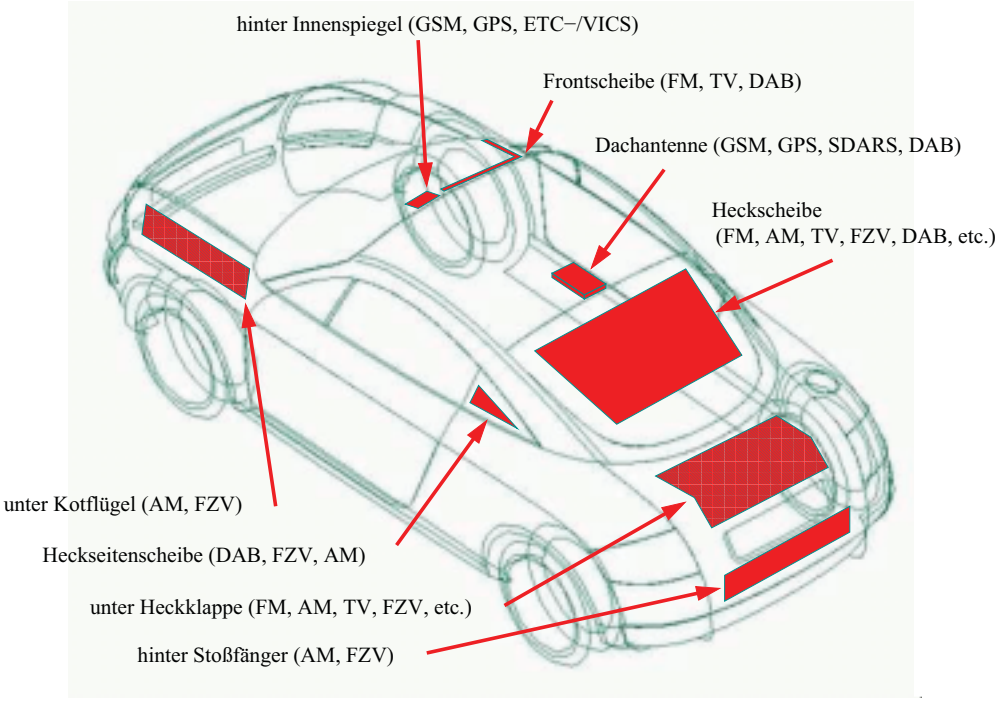


Abbildung 2.1: Darstellung der verschiedenen möglichen Einbaupositionen

- in den Seitenspiegeln.

Diese Positionen haben jedoch allesamt den Nachteil, dass sich die Antenne in beweglichen Teilen befindet und die HF-Leitung über Scharniere o.Ä. geführt werden muss, was verschleiß- und fehleranfällig ist.

Allen genannten Einbauorten ist gemein, dass die Antennen in unmittelbarer Nähe zu Metallteilen liegen. Bei höheren Frequenzen wie beispielsweise für GPS (1,575 GHz) und GSM (1,8 GHz) wird dieser Umstand genutzt und Patchantennen mit Massefläche eingesetzt. Hier wird der kurze Abstand zum Metall inhärent für die Antennenfunktion verwendet.

Für die Frequenzen im VHF-Bereich sind solche Entwicklungen nicht mehr möglich. Deswegen muss hier eine andere Lösung gefunden werden.

2.1.2 Antennendiversity

Aufgrund der bereits angesprochenen steigenden Anforderungen der Kunden an die Empfangsqualität werden in Ober- und Luxusklassefahrzeugen Diversity-Systeme eingesetzt. Antennendiversity wurde zuerst in den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts für große Basisstationen in Form von Polarisationsdiversity

eingesetzt. Hierbei setzte man getrennte Sende- oder Empfangsantennen für horizontal und vertikal polarisierte Anteile des Signals ein [3]. Seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden Antennendiversitysysteme zunehmend für den mobilen Empfang eingesetzt, zunächst für dedizierte (Militär-)Anwendungen [56, 87]. Parallel dazu wurden die ersten Glasantennen für Fahrzeuge entwickelt, die aus einzelnen in die Frontscheibe eingelegten Drähten bestanden [13, 4]. Diese Antennen hatten allerdings im Vergleich zu den üblichen Stabantennen schlechtere Empfangseigenschaften, weshalb sie sich nie durchsetzen konnten.

Infolge schnellerer integrierter Schaltungen eröffneten sich für die Weiterentwicklung von Antennendiversity in mobilen Empfangsgeräten [75] neue Möglichkeiten. Lindenmeier *et al.* entwickelten erste Antennendiversityverfahren für Automobile, die die Heizstruktur der Heckscheibe als Antenne nutzten [62, 60].

Dieses sogenannte Scanning Diversity nutzt mehrere an verschiedenen Orten eingebaute Antennen, die hinsichtlich der radialen Verteilung ihrer Empfangsminima so optimiert sind, dass in jede beliebige Richtung mindestens eine Antenne ausreichend gute Empfangseigenschaften besitzt. Sinkt der Empfangspegel unter einen bestimmten Wert oder werden die Verzerrungen zu groß, wird zur nächsten Antenne geschaltet [59, 77]. In modernen Fahrzeugen werden je nach Ausstattung des Fahrzeuges bis zu vier verschiedene Antennen für einen Dienst (FM-Radio) eingesetzt. Da nun mehrere Antennen optimiert werden müssen, erhöht sich somit der Entwicklungsaufwand deutlich. Um die Entwicklung zu beschleunigen, werden verschiedene Simulationsmethoden eingesetzt.

2.2 Simulation von Fahrzeugantennen

Um die immer komplexeren Systeme bei gleichzeitig kürzer werdenden Entwicklungszyklen weiterhin optimal entwickeln zu können, werden zunehmend Simulationstools eingesetzt. Computersimulationen ganz allgemein sind Methoden, die auf einem Computer implementiert wurden, um die Eigenschaften von mathematischen Modellen zu bestimmen, für die keine analytische Lösung gefunden werden kann [44]. Ein Beispiel für ein solches mathematisches Modell sind die Maxwellgleichungen und deren Lösung in komplexen Umgebungen.

2.2.1 Ziel der Simulation

Das Ziel der Simulation ist eine Voraussage der wichtigsten Antennenparameter ohne ein reales Modell aufzubauen und zu vermessen. So können die Kosten für

Prototypenbau und -nutzung gesenkt werden.

Die zu bestimmenden Parameter sind in erster Linie Reflexionsdämpfung der Antenne sowie Abstrahl- bzw. Empfangscharakteristik für geringe Elevationen von weniger als $3°$.[1] Dabei soll das Abstrahldiagramm möglichst keine starke Richtwirkung aufweisen, da sonst der unerwünschte Effekt auftritt, dass die Empfangsqualität von der Fahrtrichtung des Fahrzeugs abhängt.

2.2.2 Simulationsmethoden

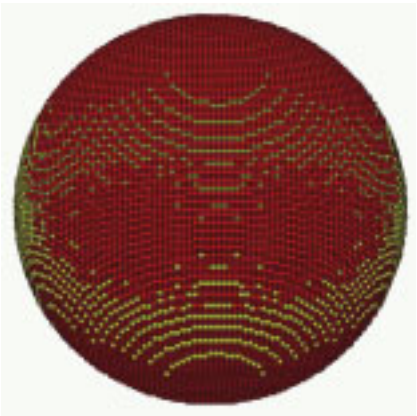
Zunächst soll ein Überblick über die gängigen numerischen Berechnungsverfahren gegeben werden, um die Wahl einer Methode zu begründen.

Bei komplexen Systemen wie Autos ergeben verschiedene numerische Ansätze teilweise unterschiedliche Ergebnisse. Dies liegt unter anderem daran, dass bei der Umsetzung des realen Problems in ein Computermodell dem Lösungsansatz entsprechende Näherungen vorgenommen werden müssen. Diese Näherungen müssen bei der Umwandlung der dreimensionalen Körper und Flächen in diskrete Berechnungsmodelle eingesetzt werden. Bei der Diskretisierung gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Raumdiskretisierung und Oberflächendiskretisierung. In Abb. 2.2 ist ein Kugelmodell mit den beiden verschiedenen Methoden dargestellt.

Raumdiskretisierende Methoden

Die erste Möglichkeit ist eine vollständige Diskretisierung des Raumes (s. Abb. 2.2a). Hierbei wird der gesamte Raum in eine Vielzahl von Volumenelementen zerlegt. Vorteile hat diese Methode bei der Betrachtung von inhomogenen und anisotropen Dielektrika, weil jedem Volumenelement eine andere Permittivität zugeteilt werden kann. Da die Rechenzeit hauptsächlich von der Anzahl der Zellen abhängt, können in diesem Volumen beliebig viele Oberflächen wie beispielsweise Innen- und Außenhaut einer Fahrzeugkarosserie berücksichtigt werden, ohne dass die Rechenzeit signifikant ansteigt [80]. Der Nachteil liegt bei verteilten Strukturen darin, dass auch der Raum zwischen den einzelnen Elementen diskretisiert werden muss. Dies führt zu sehr großen Modellen, wenn beispielsweise

[1] Größere Elevationen sind für die in dieser Arbeit zu betrachtenden Frequenzen nicht von Interesse, da die Dienste im VHF-Band nur terrestrisch von Sendetürmen ausgestrahlt werden. Zwar sind höhere Elevationen für den Empfangsfall möglich, wenn sich ein Fahrzeug einem Sendeturm extrem annähert, jedoch ist in diesem Fall die eingestrahlte Leistung durch die Nähe zur Sendeantenne im Allgemeinen so groß, dass hier keine Optimierung bezüglich der Antennenperformance mehr nötig ist.



(a)

(b)

Abbildung 2.2: Beispiele von zwei unterschiedlichen Diskretisierungen: (a) Diskretisierung des Raumes, (b) Diskretisierung der Oberfläche

Sende- und Empfangsantenne in einem Modell berechnet werden sollen. Des Weiteren müssen zwingend absorbierende Randschichten eingeführt werden, um eine Struktur im freien Raum simulieren zu können [38]. Sollen dünne Drähte oder andere Elemente mit extremem Verhältnis von Länge zu Breite berücksichtigt werden, führt dies ebenfalls zu einer hohen Anzahl von Elementen und längerer Rechenzeit, da in der Regel der Diskretisierungsabstand vom kleinsten zu berücksichtigenden Element abhängt. Zu diesen Methoden gehören:

- FEM (Finite Elemente)[2]: Die skalare Wellengleichung kann gelöst werden, indem die Funktion innerhalb der einzelnen Zellen linearisiert wird. Die Zellen können beliebige Formen annehmen. Bei der numerischen Berechnung könnten Elemente, die weit von der Diagonalen entfernt sind, vernachlässigt werden, wodurch effiziente Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Die Methode wird oft in Form von hybriden Methoden mit anderen Methoden kombiniert [47]. Eine kommerziell erhältliche Software, die diese Methode verwendet, ist z. B. COMSOL Multiphysics RF Module (früher FEMLAB) [20].

- FD (Finite Differenzen) / FDTD (Finite Difference Time Domain) / FIT (Finite Integrationstechnik): Bei dieser Methode wird anhand eines fes-

[2]Hier ist zu beachten, dass die Bezeichnung FEM im Maschinenbau ubiquitär für alle diskretisierenden Methoden - auch Oberflächendiskretisierungen - verwendet wird. Im Weiteren wird der Begriff jedoch nur im Sinne der engeren, hier gegebene Definition verwendet

ten Gitters diskretisiert, mit Hilfe dessen die Maxwellschen Differentialgleichungen in einfach zu lösende Gleichungssysteme überführt werden können. Aus diesem Grund können nur würfelförmige Raumelemente genutzt werden. Der Unterschied zwischen FD und FIT besteht darin, dass bei der FD-Methode das Feld nur an einem Punkt ausgewertet wird, während bei der FIT-Methode über ein gewisses Volumen gemittelt wird. Wird die FD-Methode im Zeitbereich angewandt, so wird sie als FDTD bezeichnet. Eines von vielen Beispielen für die Anwendung dieser Methode ist die Software CST Microwave Studio [22].

- TLM (Transmission Line Matrix Method): Die TLM ist eine Mischung verschiedener Verfahren, die auf der Ähnlichkeit der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen und einem dichten Netz von Transmission Lines beruht. Die Rechengrößen sind daher analog zu Strömen und Spannungen in einem Knotennetzwerk. Die Leitungen werden mit L-C-Werten beaufschlagt, die das durchdrungene Medium charakterisieren. Durch geeignete Scattering-Matrizen der Knotenpunkte kann die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle im Raum berechnet werden [55, 5, 82, 72]. Diese Methode wird beispielsweise vom Open Source Tool YATPAC [83], sowie von dem kommerziellen Programm MEFiSTo-3D Pro [32] eingesetzt.

Oberflächendiskretisierende Methoden

Die zweite Art der Diskretisierung ist die Oberflächendiskretisierung (s. Abb. 2.2b). Hierbei werden alle Volumina und Streukörper durch ihre Oberflächen diskretisiert. Der eingeschlossene Raum ist implizit durch die Oberflächen gegeben [66]. Die Rechenzeit ist abhängig von der Anzahl der Oberflächen, so dass die Berücksichtigung von Innen- *und* Außenhaut einer Fahrzeugkarosserie hier einen deutlichen Anstieg der Rechenzeit zufolge hat. Elemente mit großem Seitenverhältnis wie beispielsweise Drähte können in der Regel direkt als zylinderförmige Oberfläche berücksichtigt werden und benötigen zur Berechnung nur wenig Speicherplatz. Freier Raum zwischen den Elementen führt im Gegensatz zu den raumdiskretisierten Methoden zu keiner Rechenzeiterhöhung. Eine solche Diskretisierung wird bei den folgenden Verfahren eingesetzt:

- GO (Geometrical Optics), GTD (Geometrical Theory of Diffraction), UTD (Uniform Theory of Diffraction):

  Die GO-Methode entspricht prinzipiell der Strahlenoptik; elektromagnetische Wellen werden in einer Hochfrequenznäherung als Strahlen betrach-

tet. Demzufolge ist die Methode auf Modelle beschränkt, bei denen die Dimensionen der betrachteten Streukörper deutlich über der Wellenlänge liegen. Die GTD ist eine Erweiterung der GO um gebeugte Strahlen, jedoch müssen sich auch hier alle Objekte im Fernfeld befinden. Die UTD ergänzt die GTD um weitere Näherungen, so dass auch Kaustiken berücksichtigt werden können [38]. GO, GTD und UTD eignen sich gut für die Berechnung von Wellenausbreitungen in Städten und bergigen Regionen, hierzu wird es auch von verschiedenen Simulationspaketen wie z. B. Remcoms Wireless InSite verwendet [78].

- PO (Physical Optics), PTD (Physical Theory of Diffraction): PO ähnelt der GO, wobei hier jedoch die eintreffenden Felder auf den Oberflächen integriert werden, wodurch sich eine Stromgröße ergibt. Aus dieser Stromgröße werden dann die abgestrahlten Felder berechnet. Im Schatten liegende Oberflächen bleiben folglich stromfrei und werden vernachlässigt. Bei der PTD werden insbesondere gebeugte Strahlen durch eine Korrektur der Strombelegung genauer abgebildet. Auch hier gilt die Einschränkung, dass die Oberflächen Dimensionen in der Größenordnung mehrerer Wellenlängen besitzen sollten. Auch diese Methoden werden von Remcom Wireless InSite eingesetzt [78].

- BEM/MoM (Boundary Element Method / Method of Moments): Bei der BEM werden zur Lösung von Differentialgleichungen nur die begrenzenden Randelemente, an denen die verschiedenen Randbedingungen gelten, herangezogen. Für Probleme mit einem kleinen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen müssen daher im Vergleich zu den raumdiskretisierten Methoden wesentlich weniger Elemente berücksichtigt werden. Die Oberfläche kann mit verschiedensten Elementen reproduziert werden, zumeist wird sie jedoch durch ein Netz von Dreiecken nachgebildet [105].

  Zur Lösung von elektrodynamischen Problemen werden die Maxwellschen Gleichungen in Integralform (EFIE/MFIE) aufgestellt. Sind die Randbedingungen und Greenschen Funktionen zu den interessierenden Differentialgleichungen bekannt, können diese numerisch mittels der MoM[3] gelöst werden [42, 41, 34]. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Fernfeldtransformation nicht gesondert durchgeführt werden muss,

[3] In der Elektrodynamik wird oft der Begriff MoM synonym zur BEM/MoM verwendet, wobei MoM streng genommen nur das numerische Lösungsverfahren für das mit der BEM aufgestellte Gleichungssystem ist.