



# Virtual-Reality-Darstellung elektromagnetischer Felder in dreidimensionalen Mikrowellenstrukturen

Dipl.-Ing. (FH) Markus Feißt,  
 Prof. Dr.-Ing. Andreas Christ  
 Fachhochschule Offenburg, Badstr. 24, 77652 Offenburg  
 Tel. 0781/205 - 130 , Fax 0781/205 - 110

Untersuchungen haben gezeigt, daß der Mensch ein Vielfaches an Informationen in Form von visuellen Eindrücken, im Gegensatz zur textuellen Darstellung, verarbeiten kann. Mit Hilfe des numerischen Feld-Simulationsprogramms F3D können Mikrowellenstrukturen auf die Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern untersucht werden. Das Programm F3D2VRML stellt die Ergebnisse in einer dreidimensionalen Virtual-Reality-Darstellung (VR) dar.

Damit ist es dem Betrachter möglich, mehr Informationen aufzunehmen, da die Informationen mit Formen und Farben im dreidimensionalen Raum visualisiert werden.

## 1 Einführung

### 1.1 Das Programm F3D

Das Programm F3D ist ein Simulationsprogramm, das mit Hilfe der Finite-Differenzen Methode das elektromagnetische Verhalten von Mikrowellenstrukturen simuliert [1]. Dabei wird die zu simulierende Struktur in kleine, nicht äquidistante Quader zerlegt (Abb. 1.1).

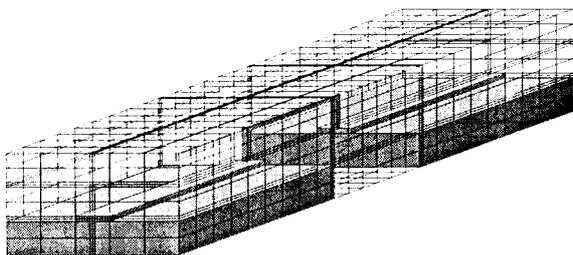


Abb. 1.1 : Unterteilung einer Mikrowellenstruktur in Quader

Das Ergebnis der Simulation beschreibt die Wechselwirkung der elektromagnetischen Felder mit der physikalischen Struktur. Es gibt zwei Möglichkeiten das Ergebnis zu „betrachten“. Zum Einen gibt es die Möglichkeit, das Ergebnis als Streumatrix darzustellen.

Zum Anderen kann das elektrische Feld (für eine Frequenz) betrachtet werden. Dabei wird als Resultat der Simulation für jeden Quader ein elektrischer Feldvektor berechnet und in einer Datei gespeichert.

### 1.2 Was ist VR (vrml,\*.wrl)

VR ist die Abkürzung für Virtual Reality (Virtuelle Realität). Darunter versteht man im Allgemeinen, daß eine Welt aus Objekten auf eine Art dargestellt wird, die dem Betrachter einen dreidimensionalen Eindruck ermöglicht. Ein wesentliches Merkmal ist der vom Betrachter frei wählbare Blickwinkel. Der Betrachter ist in der Lage sich frei durch die „VR-Welt“ zu bewegen und die Objekte von jeder gewünschten Seite zu betrachten.

Es gibt eine Vielzahl von Programmen zur 3D-Darstellung. Die meisten benutzen allerdings proprietäre Darstellungs- bzw. Speicherformate.

Das, in diesem Beitrag vorgestellte Programm F3D2VRML, verwendet als Dateiformat VRML (\*.wrl). Die Gründe sind, daß das VRML-Format ein im Internet sehr häufig verwendetes Format ist, daß Plugins für Browser erhältlich sind und fast jedes Programm zum Bearbeiten von 3D-Darstellungen einen VRML-Importfilter bereitstellt.

### 1.3 Verbindung zwischen F3D und VR

Nach erfolgter feldnumerischen Simulation mit F3D liegen die Werte der Feldverteilung vor. Das Resultat wird in einer ASCII-Datei abgelegt. Eine typische Simulation mit 200000 Quadern erzeugt eine circa zehn MByte große ASCII-Datei, die sich einer direkten Betrachtung entzieht. Mit Hilfe der Software F3D2VRML kann nun eine VR-Welt generiert werden, die durchwandert und aus allen Winkeln betrachtet werden kann.



## 2 Kurzbeschreibung des Programms F3D

Das Programm F3D ist in der Programmiersprache FORTRAN geschrieben und läuft auf einer Apollo 700 HP Workstation.

Das Programm löst dynamische elektromagnetische Feldprobleme in dreidimensionalen, berandeten Strukturen. Über angeschlossene Wellenleiter (Hohlleiter, Streifenleitungen, Koaxialleiter etc.) wird die Struktur im Innern elektrisch erregt. Die Lösung wird durch die Quantisierung der Maxwell'schen Gleichungen im Frequenzbereich (FDFD-Methode) erreicht [1].

### 2.1 Beschreibung der generierten Daten und deren Aufbau

Das Programm F3D generiert mehrere Dateien, von denen allerdings hier nur zwei Typen von Bedeutung sind. Wichtig ist zum Einen die Datei, welche die Mikrowellenstruktur-Daten enthält, zum Anderen die Datei, welche die Felddaten enthält. Da die Felddaten jeweils für eine Frequenz in eine separate Datei geschrieben werden, kann das Ergebnis einer Simulation mehrere Felddaten-Dateien umfassen. Von diesen Dateien ist für die Visualisierung allerdings immer nur eine relevant. Denn die dreidimensionale Darstellung der Mikrowellenstruktur und des elektrischen Feldes kann zur Zeit nur für eine Frequenz dargestellt werden.

Die Datei für die Mikrowellenstruktur beinhaltet die folgenden Informationen :

- Allgemeine Schlüsselwörter
- Die Anzahl der Quader in X-, Y- und Z-Richtung.
- Die realen Abmessungen der Quader in X-, Y- und Z-Richtung, da die Quader nicht äquidistant sind (Höhe, Breite, Tiefe).
- Eine Liste, die den Materialnamen die Materialkoeffizienten zuweist ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ).
- Die Informationen über die einzelnen Quader. Es wird dabei der Name des entsprechenden Materials gespeichert.

## 3 Beschreibung des Programms F3D2VRML

### 3.1 Vor-/Nachteile von Java

Die Entscheidung, das Programm in Java zu erstellen, hat mehrere Gründe. Java ist Plattform unabhängig. Dies ist für den Einsatz in heterogener Rechnerumgebung (sowohl Windows NT als auch HP UX als Betriebssysteme)vorteilhaft. Ein weiterer Vorteil ist, daß aus Java-Programmen Applets generiert werden können, bzw. Teile des Programmcodes (in Form von

Objekten) ohne Probleme in Applets übernommen werden können.

Ein Nachteil entsteht dadurch, daß ein Java Programm voraus setzt, daß eine Virtuelle Maschine (VM) korrekt installiert wurde. Außerdem ist das Einlesen von Dateien in Java, im Vergleich zu C/C++, relativ langsam. Diese Tatsache fällt beim F3D2VRML-Programm besonders auf, da sehr große Dateien eingelesen werden müssen.

### 3.2 Entscheidung für ein GUI

Eine ebenfalls wichtige Entscheidung war die einer Konsole oder einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI).

Der Vorteil einer Konsolenanwendung (ähnlich einer BATCH-Datei) ist, daß bei mehrfacher Ausführung die Eingabe über eine Datei gesteuert und somit die Generierung der Daten automatisiert werden kann.

Ein großer Nachteil ist allerdings, daß bei einer falschen Eingabe die gesamte Prozedur wiederholt werden muß.

Ein großer Vorteil der grafischen Oberfläche ist, daß dem Benutzer alle möglichen Optionen angezeigt werden, und er bei einer falschen Eingabe diese verbessern kann. Um aber bei gleichen Aufgaben nicht immer wieder alle Parameter und Optionen neu einstellen zu müssen, wurde ein Batchmodus (keine grafische Ausgabe) implementiert, der über eine Makro-Datei gesteuert wird.

### 3.3 Datenstruktur innerhalb des Programms F3D2VRML

Die Daten werden aus der Datei eingelesen und in einem internen-Format gespeichert. Alle Daten werden in entsprechenden Objekten gespeichert. Die Daten welche die Mikrowellenstruktur betreffen werden in einem „Struktur“-Objekt und alle Daten, die das elektrische Feld betreffen werden in einem „Feld“-Objekt gespeichert.

Das „Struktur“-Objekt beinhaltet einen 3-dimensionalen Array, wobei jeder Wert des Arrays das Material eines Quaders repräsentiert. Auf diese Weise läßt sich problemlos jeder Quader ansprechen. Außerdem beinhaltet das Objekt noch eine Liste der Materialien und der dazugehörigen Materialkoeffizienten ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ). Des weiteren enthält das Objekt noch 3 Arrays, welche die realen Dimensionen speichern.

Das „Feld“-Objekt beinhaltet drei dreidimensionale Arrays; jeweils ein dreidimensionaler Array für die X-, Y- bzw. die Z-Komponente des elektrischen Feldes.

Die Ergebnisdaten der feldnumerischen Simulation mit F3D, die in einem anderen Format vorliegen, müssen eingelesen und dementsprechend umgewandelt werden.

Eine Änderung des Datenformates in F3D war nicht sinnvoll, da F3D die Daten in dieser Form benötigt.



### 3.4 Mikrowellenstruktur in Polygone aufteilen

In VRML können Flächen nur in einer Ebene dargestellt werden. Dabei muß die Ebene in der sich die Fläche befindet nicht parallel zur XY-, XZ- oder YZ-Ebene sein.

Da die simulierte Mikrowellenstruktur aus Quadern zusammengesetzt ist kommen darin nur Flächen die parallel zu einer Koordinatensebene sind vor.

Jeden Quader in der VR-Welt darzustellen würde bedeuten, daß die 3D-Struktur sehr unübersichtlich würde.

Einen besseren Eindruck gewinnt der Betrachter, wenn nur die Grenzflächen zwischen zwei Quadern mit unterschiedlichen Materialien dargestellt werden. Eine Grenzfläche zwischen zwei Objekten würde in diesem Fall aus vielen kleinen Rechtecken zusammengesetzt sein, was der Betrachter nicht bemerkt. Da sehr viele Flächen eine sehr große Rechenbelastung darstellen (Rendering wird sehr zeitaufwendig), reagiert die Darstellung allerdings damit sehr träge auf Veränderungen. Deshalb wurde ein Verfahren implementiert, welches die Eckpunkte der Grenzflächen liefert. Auf diese Weise kann eine Fläche in einer Ebene als Polygon dargestellt werden.

#### 3.4.1 Problematik der Strukturfindung und der Lösungsansatz

Die erste Problematik ist, einen geeigneten Algorithmus zur Erkennung der Eckpunkte zu finden.

Hierbei wurde auf Verfahren der digitalen Bildverarbeitung zurückgegriffen [2]. Als Erstes wird die Struktur auf Grenzflächen hin untersucht. Dabei werden die Ebenen, die parallel zu den Koordinatensystem-Ebenen sind untersucht. Das Problem wird zuerst einmal vom dreidimensionalen in den zweidimensionalen Raum verlegt (Objekterkennung → Flächenerkennung). Das Ergebnis wird in einem Layer (zweidimensionale Matrix) gespeichert (Abb. 3.1).

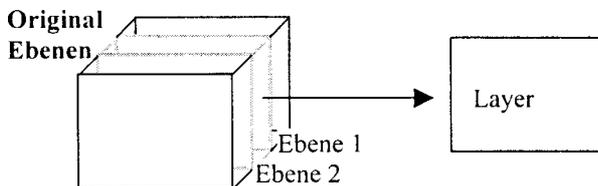


Abb. 3.1 : Erstellen eines Layers aus zwei Ebenen der Struktur

Wird ein Materialunterschied zwischen Quadern in benachbarten Ebenen (Ebene1 und Ebene2) festgestellt, wird im Layer der Wert eins abgespeichert. Sind beide Materialien gleich, wird im Layer eine Null abgelegt.

Ein Beispiel für einen erstellten Layer zeigt Bild 3.2.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abb. 3.2 : Beispiel eines Layers

Dieser Layer wird nun mit einer drei mal drei Matrix (Abb. 3.3) gefiltert, um die Eckpunkte zu bestimmen.

1	3	5
7	11	13
17	19	23

Abb. 3.3 : Filtermatrix

Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.4

Abb. 3.4 : Layer, nach erfolgter Filterung

0	0	0	23	42	59	59	59	36	17
0	0	0	41	66	90	90	90	54	24
0	23	42	77	74	99	99	99	58	25
0	36	66	90	98	99	99	99	58	25
0	41	74	99	99	99	99	99	58	25
0	41	74	99	99	99	99	99	58	25
0	41	74	99	99	99	99	99	58	25
0	18	32	40	40	40	40	40	22	8
0	5	8	9	9	9	9	9	4	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Der Filteralgorithmus setzt voraus, daß das Material mindestens zwei Reihen und zwei Spalten umfaßt. Diese Einschränkung ist im praktischen Einsatz unerheblich, da ein Material mit nur einer Reihe bzw. Spalte, aufgrund der numerischen Berechnung zu ungenauen Ergebnissen der Simulation führt und deshalb nicht sinnvoll ist.

Nachdem die Eckpunkte gefunden wurden, müssen diese der Reihe nach gespeichert werden. Hierzu wird die linke untere Ecke (Zahlenwert 32) gesucht. Danach bewegt man sich gegen den Uhrzeigersinn um das Polygon, bis man wieder am Anfangspunkt angekommen ist. Hierbei helfen die für die Ecken charakteristischen Zahlenwerte. Der Startpunkt sowie die Umlaufrichtung wurden dabei willkürlich gewählt. Wichtig ist allerdings, daß die Reihenfolge der Punkte im Umlauf stimmt. Auf diese Weise ist klar, daß der erste Punkt mit dem zweiten, der zweite mit dem Dritten... und der letzte mit dem Ersten verbunden ist. Die Speicherung, welcher Punkt mit welchem Punkt verbunden ist, entfällt.

Damit ist das Problem der Strukturfindung noch nicht gelöst. Betrachtet man Bild 3.5, stellt man fest, daß gemäß der VRML-Standards diese Fläche nicht dargestellt werden kann.

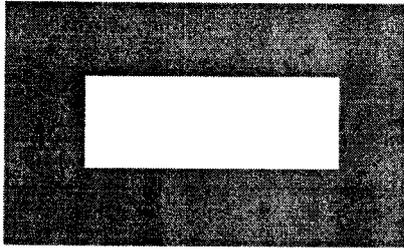


Abb. 3.5 : Nicht VRML-Standard konforme Darstellung

Das Problem ist, daß diese Fläche mehrfach zusammenhängend ist. Solche Figuren sind dem VRML-Standard unbekannt und somit nicht darstellbar. Wird trotzdem solch eine Figur erzeugt, ist die Darstellung nicht mehr vorhersagbar, die Punkte werden zu einer willkürlichen Figur verbunden.

Der hier verwendete Lösungsansatz zerteilt diese Fläche in folgende zwei Flächen (Abb. 3.6).

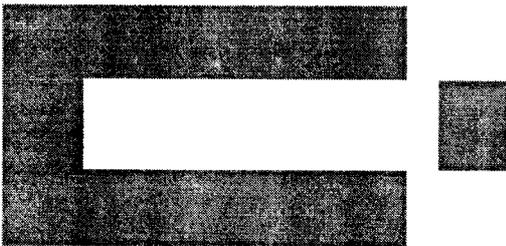


Abb. 3.6 : Zerlegung der Fläche in zwei einfach zusammenhängende Flächen

Dies bedeutet aber, daß der Layer bevor er gefiltert werden kann, so aufbereitet werden muß, daß nur einfach zusammenhängende Flächen vorkommen.

Der Originallayer der nach der Grenzflächenuntersuchung kreiert wurde, wird Zeile für Zeile in einen neuen übertragen (Layer A). Die übertragenen Einsen (Materialunterschied zwischen benachbarten Quaderebenen) werden aus dem Originallayer gelöscht (d.h. zu Null gesetzt). Wird ein Übergang von Eins auf Null innerhalb des Originallayers festgestellt, wird der restliche Teil der Zeile des Layers A automatisch mit Nullen aufgefüllt. Die restliche Zeile des Originallayers bleibt daraufhin unverändert.

Auf diese Weise ist sichergestellt, daß nur einfach zusammenhängende Flächen im Layer A vorkommen, der gefiltert und wie zuvor besprochen weiterverarbeitet werden kann.

Der Originallayer muß wiederholt untersucht werden, da in diesem gegebenenfalls noch weitere Flächen vorhanden sind. Ist kein Materialunterschied mehr im Layer vorhanden (nur Nullen im Layer), kann die Untersuchung für die nächsten Grenzflächen gestartet werden.

### 3.5 Darstellung des E-Feldes

Das elektrische Feld wird in Form von Pfeilen dargestellt. Dabei spiegelt die Größe des Pfeils die Intensität des elektrischen Feldes wieder. Die Richtung, in der das Feld wirkt wird durch die Orientierung im dreidimensionalen Raum und die Pfeilspitze dargestellt.

Weil die Quader nicht äquidistant sind, wurde ein eigenes „Raster“ für das elektrische Feld eingeführt. Obwohl die Einführung eines eigenen Rasters für das elektrische Feld eine Interpolation des elektrischen Feldes nötig macht, hat dies doch Vorteile.

Der Betrachter ist eine Darstellung mit äquidistanten Abständen der Pfeile gewohnt. Ist dies nicht der Fall, interpretiert der Betrachter dies als Feldstärkenunterschiede. Dieses verfälscht die Aussage über das elektrische Feld.

Ein weiterer Vorteil ist, daß der Betrachter für einen „ersten Eindruck“ ein gröberes Raster wählen kann, was die Anzahl der Pfeile verringert. Damit gestaltet sich die Darstellung für den ersten Eindruck übersichtlicher.

Nach der Einführung des Rasters werden die „Rastermittelpunkte“ berechnet, denn an diesen Punkten wird das elektrische Feld in der VR-Welt dargestellt.

Die Werte des elektrischen Feldes sind nur an den Mittelpunkten der Quaderkanten bekannt [1]. Da Raster- und Quaderkantenmittelpunkt im Allgemeinen nicht identisch sind, muß eine Interpolation durchgeführt werden.

Hierzu muß der Quader, in welchem der Rastermittelpunkt liegt, ermittelt werden. Mit Hilfe der benachbarten Quader wird der Wert des elektrischen Feldes linear interpoliert.

Abbildung 3.7 zeigt die prinzipielle Funktionsweise der Interpolation.

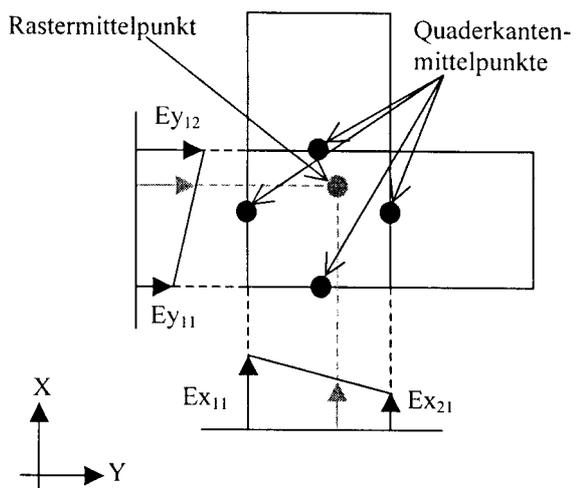


Abb. 3.7 : Prinzipielle Funktionsweise der Interpolation



Die Interpolation wird in allen drei Richtungen (X, Y und Z) durchgeführt. Die Quader, die dabei zur Interpolation benötigt werden, hängen von der Position des Rastermittelpunktes ab. Es sind insgesamt acht Fälle zu unterscheiden.

Es ist keinesfalls gewährleistet, daß die Materialien der benachbarten Quader identisch sind. Wird die Interpolation über zwei Quadern unterschiedlichen Materials durchgeführt, müssen die Materialkoeffizienten berücksichtigt werden.

Ein Sonderfall stellt ein Quader aus Metall dar. Die zur Grenzfläche parallelen E-Feld-Komponenten sind Null und die senkrechten E-Feld-Komponenten müssen gemäß dem Prinzip der Spiegelladungen berechnet werden.

Abbildung 3.8 zeigt die Interpolation für die E-Feld-Komponente in Y-Richtung im dreidimensionalen Raum.

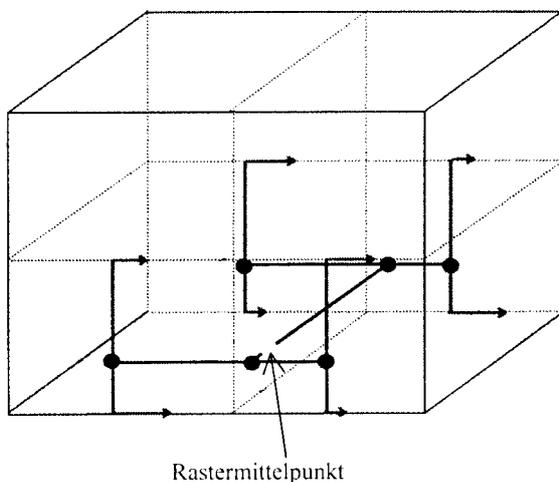


Abb. 3.8 : Interpolation der E-Feld-Komponente in X-Richtung im 3D Raum

Die Interpolation erfolgt in drei Stufen (schwarze Linien). Die schwarzen Punkte markieren hierbei Zwischenergebnisse, der graue Punkt das Ergebnis. Nach Interpolation auch der X- und Z-Komponente ist der E-Feld-Vektor im Rastermittelpunkt bekannt.

## 4 Zusammenfassung

Mit Hilfe des Programmes F3D können Mikrowellenstrukturen in bezug auf die Wechselwirkung zwischen Material und elektromagnetischen Wellen untersucht werden. Die Zusammenhänge lassen sich, durch die große Datenmenge aber vom Benutzer schwer erkennen.

Vom Menschen können durch die visuelle Wahrnehmung mehr Informationen aufgenommen werden (Farbe, Form, räumliche Anordnung, Entfernungen, usw.). Deshalb werden die Simulationsergebnisse mit Hilfe des Programme F3D2VRML in eine räumliche Darstellung umgesetzt.

## 5 Ausblicke

Es ist vorgesehen, das Programm zu erweitern, um auch das magnetische Feld darstellen zu können.

Ein weiterer Punkt ist das Verarbeiten mehrerer Dateien mit Felddaten um Animationen zu erzeugen. Damit kann gezeigt werden, wie sich das elektrische Feld in Abhängigkeit der von der Zeit oder der Frequenz verändert.

Um die Darstellungsergebnisse auch remote zugänglich zu machen, ist ein Web-Interface geplant. Dies wird durch den Einsatz von Java erleichtert.

## Literatur

- [1] Three-Dimensional Finite-Difference Methode for the Analysis of Microwave-Device Embedding  
A. Christ and H. L. Hartnagel  
IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 35, No. 8, August 1987
- [2] Theorie und Anwendung der digitalen Bildverarbeitung  
Prof. Dr. A. Erhardt-Ferron
- [3] Documentation for the Java Program F3D2VRML (Projectwork)  
P. Luchner, R. Stader, I. Kolemanov, M. Feißt  
Fachhochschule Offenburg, 2000