Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung

Numerische Simulationsprogramme sind in den letzten Jahren zu unverzichtbaren Werkzeugen in vielen Bereichen der Ingenieurwissenschaften geworden. Simulationen ermöglichen beschleunigte Designoptimierung, ersparen häufig den Bau von Prototypen und entsprechen damit dem grundsätzlichen Trend zu immer kürzeren Entwicklungszyklen. Zudem ermöglicht die Simulation häufig Einblicke in Zusammenhänge, die aufgrund der Miniaturisierung in dieser Form messtechnisch gar nicht mehr erfasst werden können.

Einen besonders dynamischen Bereich stellt in diesem Zusammenhang die elektromagnetische Feldsimulation mit gitterbasierten Methoden dar. Dies beruht insbesondere auf dem rasanten Fortschreiten der Informationstechnologie in allen Bereichen der Technik und des alltäglichen Lebens sowie der damit einhergehenden Verwendung immer höherer Frequenzen in elektronischen Schaltungen.

Immer höher werdende Frequenzen haben in zweierlei Hinsicht Einfluss auf den Simulationsprozess: Zum Einen erfordern die kürzeren Wellenlängen die feinere räumliche Abtastung von Strukturen und führen auf immer größere Gleichungssysteme, die im Rahmen der Simulation gelöst werden müssen. Zum Anderen erhalten Feldeffekte auch immer größere Bedeutung in Bereichen, die bis vor kurzem komplett der Schaltkreissimulation zugerechnet wurden. So gewinnen Effekte wie Laufzeitverzögerungen, Nebensprechen oder Abstrahlung auch in klassischen Netzwerken oder sogar in einzelnen Teilen wie Chipzuleitungen und Steckverbindungen zunehmend an Bedeutung.

Da es auch in nächster Zukunft nicht möglich sein wird, ganze logische Schaltungen komplett durch Feldsimulationsprogramme zu erfassen, bleibt als Alternative die Verkopplung zweier separat arbeitender Simulationsprogramme zur Netzwerk- und zur Feldsimulation. Eine weitere und komfortablere Möglichkeit stellt die Generierung so genannter Makromodelle dar, welche das Verhalten des feldbehafteten Bauteils im interessierenden Frequenzbereich durch ein System möglichst niedriger Ordnung beschreiben. Diese Modelle können beispielsweise in Form eines Ersatzschaltbildes in das Netzwerksimulationsprogramm einbezogen werden, womit zur Simulation des Gesamtsystems schließlich nur eine einzige Simulationsplattform benötigt wird.

Dass ein solches Modell mit stark reduzierter Modellordnung überhaupt existiert, wird anschaulich klar, wenn man bedenkt, dass das diskretisierte Modell Tausende bis hin zu Millionen von Unbekannten hat, während das Übertragungsverhalten im interessierenden Frequenzbereich oft nur eine kleine Anzahl von Polstellen besitzt.

Insbesondere wenn allein das Übertragungsverhalten einer feldbehafteten Struktur von Interesse ist, können Modelle reduzierter Ordnung jedoch auch direkt zur Lösung des diskretisierten Problems innerhalb der Feldsimulation herangezogen werden. Anstatt das Modell zu lösen, das sich aus der Diskretisierung ergibt und das häufig bis zu Millionen von Unbekannten hat, kann zunächst ein Reduzierungsschritt vorangestellt werden. Gelöst wird dann schließlich nur das System mit geringer Ordnung. Ein solches Vorgehen wird auch als *Fast Frequency Sweep* bezeichnet. Es ist offensichtlich, dass in diesem Fall die Rechenzeit zur Erstellung des Modells kleiner sein sollte als die Rechenzeit zur Lösung des unreduzierten Systems.

Makromodelle finden auch im Optimierungsprozess Anwendung, da das Verhalten bereits optimierter oder unveränderlicher Bereiche der Struktur durch ein nur einmalig zu erstellendes Modell erfasst werden kann, während der verbleibende Rest durch die Simulation beschleunigt optimiert werden kann. Auch wenn eine Teilstruktur innerhalb eines größeren Rechengebiets mehrfach vorkommt, kann der Einsatz eines Makromodells sinnvoll sein.

Es wird somit deutlich, dass je nach geplantem Einsatz des Modells die Schwerpunkte der Reduzierung unterschiedlich gewichtet sind: Soll das Modell für einen *Fast Frequency Sweep* verwendet werden, ist neben der Genauigkeit des Modells vor allem die Rechenzeit interessant, die zur Reduzierung benötigt wird. Wird das Modell jedoch nur ein einziges Mal erzeugt, um dann viele Male beispielsweise in einem Optimierungsprozess eingesetzt oder mit anderen Simulatoren verkoppelt zu werden, ist eine möglichst geringe Modellgröße und die Erhaltung physikalischer Eigenschaften wie Stabilität und Passivität von vorrangigem Interesse. Rechenzeit ist in diesem Fall nur von zweitrangiger Bedeutung.

Zum Auffinden eines reduzierten Modells wird im Rahmen dieser Arbeit ein sehr allgemeiner Projektionsansatz beschrieben und untersucht. Dieser ermöglicht unterschiedliche Varianten zur Wahl der Projektionsmatrizen. Als besonders geeignet erweisen sich dazu einzelne Feldlösungen, Eigenvektoren der betrachteten Polstellen, Taylormomente oder so genannte Krylov-Unterraum-Vektoren. Diese Varianten unterscheiden sich zum Teil deutlich in Rechenaufwand und resultierender Modellgröße.

Besonders die Kombination einer so genannten partiellen Realisierung basierend auf Krylov-Unterraum-Vektoren und einem momenten-basierten Verfahren zeigt sich als sehr effizient, was sowohl Rechenzeit als auch Modellgröße betrifft. Der unter dem Namen *Two-Step-Lanczos (TSL)* in dieser Arbeit vorgeschlagene Algorithmus erhält für resonante Systeme zusätzlich Stabilität und Passivität, läuft vollständig automatisiert ab und das resultierende Modell lässt sich auf einfache Weise als Ersatzschaltbild interpretieren.

Als alternatives Vorgehen wird ein Verfahren untersucht, bei dem das System zunächst mit einem sehr effizienten Zeitbereichslöser teilweise berechnet wird. Da bei resonanten Systemen die Signalamplitude jedoch nur sehr langsam abklingt, wird die Rechnung schließlich abgebrochen und das Übertragungsverhalten aus dem bereits berechneten Zeitsignal mittels moderner Signalverarbeitungsmethoden geschätzt.

1.2 Übersicht

Im Anschluss an diese Einleitung wird im Kapitel 2 die Methode der *Finiten Integration* vorgestellt. Da dieses Verfahren grundlegende physikalische Eigenschaften der kontinuierlichen Maxwellschen Gleichungen auch im Diskreten beibehält, ist es für die spätere Modellgenerierung besonders geeignet.

In Kapitel 3 werden die diskretisierten Modelle als Systeme betrachtet. Hierbei kommen klassische sowie erweiterte Zustandsraumdarstellungen zur Anwendung. Wichtige Systemeigenschaften wie Kausalität, Stabilität und Passivität werden ebenso betrachtet wie die Zusammenhänge zwischen den Impedanz- und den Streuparameter-Übertragungsfunktionen.

Kapitel 4 stellt den Kern der Arbeit dar und beschreibt den Prozess der Reduzierung der Ordnung mit Hilfe verschiedener Projektionsverfahren. Aus den jeweiligen Vorteilen einer partiellen Realisierung und einer momente-erhaltenden Padé-Approximation wird schließlich der *Two-Step-Lanczos*-Algorithmus abgeleitet und untersucht.

Verfahren zur Spektralschätzung aus Zeitsignalen werden als alternative Möglichkeit zur schnellen Berechnung des Übertragungsverhaltens einer Struktur in Kapitel 5 vorgestellt.

Kapitel 6 befasst sich mit unterschiedlichen Methoden, aus der Zustandsraumdarstellung des reduzierten Modells tatsächlich ein Netzwerk abzuleiten, das als Ersatzschaltbild verwendet werden kann. Das reduzierte System wird hierzu als Knotenanalysemodell interpretiert oder in eine Pol-Residuen-Darstellung überführt.

Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren werden schließlich in Kapitel 7 anhand von vier praxisrelevanten Beispielen aus dem Hochfrequenzbereich verglichen. Dies sind zwei resonante Filterstrukturen, ein Antennenbeispiel sowie ein Chipgehäuse mit einer großen Zahl von Anschlüssen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Kapitel 2

Die Methode der Finiten Integration

Die Maxwellschen Gleichungen und die zugehörigen Materialbeziehungen bilden die Grundlage der klassischen Elektrodynamik. Die Methode der Finiten Integration, die in diesem Kapitel vorgestellt werden soll, stellt eine Transformation dieser Gleichungen in einen diskreten Gitterraum dar, die wichtige physikalische Eigenschaften der Maxwellschen Gleichungen erhält.

Zunächst wird die Grundidee der Methode mit der Diskretisierunng der Gleichungen sowie der Materialbeziehungen beschrieben. Besondere Aufmerksamkeit erhalten frequenzabhängige Zusammenhänge wie dispersive Materialien und komplexe Berandungen des Rechengebiets wie Impedanzwände oder absorbierende Ränder, da diese bei der Interpretation des Modells als System von entscheidender Bedeutung sind.

2.1 Die Maxwellschen Gleichungen

Früheste Beobachtungen sowohl elektrischer als auch magnetischer Phänomene reichen bereits in die Antike zurück. Erste quantitative Untersuchungen erfolgten jedoch erst im 18. Jahrhundert auf dem Gebiet der Elektrostatik durch H. Cavendish (1773) und C. A. de Coulomb (1785). Die Verkopplung elektrischer und magnetischer Felder wurde erstmals 1826 von A.-M. Ampère in einer ersten Fassung des Durchflutungsgesetzes erfasst, 1831 folgte M. Faraday durch Aufstellung des Induktionsgesetzes. James Clark Maxwell erweiterte schließlich 1873 die bestehenden Ansätze zu einer einheitlichen elektromagnetischen Theorie [1]. Sein wesentlicher Beitrag hierbei war in Deutung der Ableitung der elektrischen Flussdichte als Stromdichte im Durchflutungsgesetz. Die vier - heute nach ihm benannten - Gleichungen bilden seitdem die Grundlage der klassischen makroskopischen Elektrodynamik.

Die Maxwellschen Gleichungen verknüpfen fünf vektorielle Grundgrößen[1], die elektrische Feldstärke $\vec{E}$, die elektrische Flussdichte $\vec{D}$, die elektrische Stromdichte $\vec{J}$, die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ sowie die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ und die skalare

[1] Ein Verzeichnis der verwendeten Symbole und Schreibweisen findet sich im Anhang.