

# Kapitel 1

## Einleitung

### Stand der Technik

Der zunehmende Bedarf mehr Informationen schneller zu verarbeiten und zu übertragen bedingt, dass analoge und digitale Systeme bei höheren Frequenzen bzw. Taktraten arbeiten müssen. Hinzu kommt der Bedarf an kostengünstigen Lösungen für die industrielle Massenproduktion. Die Integration von aktiven und passiven Mikrowellenkomponenten auf einem Halbleitersubstrat in Form von monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (engl.: MMIC für Monolithic Microwave Integrated Circuits) auf Gallium-Arsenid (GaAs) und zukünftig vermutlich auch auf Indium-Phosphid (InP) stellt hierbei eine Schlüsseltechnologie dar .

Als bedeutendes Beispiel für die vielfältigen Anwendungsbereiche von MMICs steht UMTS (engl.: Universal Mobile Telecommunications System), der Mobilfunk der dritten Generation [1], [2]. Mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 2 MBit pro Sekunde soll es den Mobilfunkmarkt revolutionieren (GSM: 9,6 KBit pro Sekunde, GPRS: 53,6 KBit pro Sekunde). Ein weiterer Markt mit großem Entwicklungspotential ist der Breitband-Richtfunk [3], [4] für Datendienste (mit Übertragungsraten in der Größenordnung von 100 MBit pro Sekunde), um z.B. drahtlose Teilnehmeranschlüsse zu realisieren oder Mobilfunk-Basisstationen untereinander zu verbinden. Die Betriebsfrequenzen liegen im Bereich 20...30 GHz, um 40 GHz, sowie bei 60 GHz. Die Satellitenkommunikation

[5], [6] und die Sensorik (z.B. Abstandswarnradar für Kfz [7] - [10]) sind weitere Anwendungsbeispiele.

Bedingt durch die hohe Packungsdichte von aktiven und passiven Komponenten auf einem MMIC können Schaltungseigenschaften durch Effekte wie Übersprechen, Oberflächenwellen und unbeabsichtigte Abstrahlung, um nur einige zu nennen, negativ beeinflusst werden. Auch die Montage einer Schaltung in einem Gehäuse kann Ursache parasitärer Effekte sein.

Die Entwicklung von MMICs erfordert deshalb leistungsfähige Software-Werkzeuge zur Vorab-Simulation. Der nachträgliche Abgleich einer einmal hergestellten Schaltung ist i. Allg. nicht möglich. In den 80er Jahren war man hauptsächlich bestrebt, exakte theoretische Beschreibungen der Grundelemente einer Mikrowellenschaltung zu finden, um diese in Schaltkreismodellen zu verknüpfen [11]. Dieses Vorgehen ist für hybrid integrierte Schaltungen möglich. Mit den wachsenden Anforderungen an heutige Mikrowellenschaltungen, dem Trend zu höheren Frequenzen und damit zu kompakteren Schaltungen muss die elektromagnetische Wechselwirkung aktiver und passiver Elemente eines MMICs berücksichtigt werden. Zunehmend werden Hybridmethoden entwickelt, bei denen verschiedene numerische Verfahren miteinander verknüpft werden, um Schaltungen als Ganzes elektromagnetisch zu erfassen. Jede Methode für sich ist für die Berechnung einzelner Komponenten eines MMICs besonders ausgezeichnet [12].

Die Weiterentwicklung der Halbleitertechnologie zur Herstellung von MMICs ist eng verbunden mit Fortschritten im Bereich des rechnergestützten Entwurfs. Gegenwärtig sind im GaAs-Bereich vielfach Herstellungstechnologien weiter entwickelt als Software-Werkzeuge, die einen schnellen Bildschirmwurf und eine Optimierung erlauben. Ingenieure sind deshalb immer wieder gezwungen, auf die kosten- und zeitintensive Herstellung von Prototypen zurückzugreifen [13].

## **Berechnungsverfahren**

Der rechnergestützte Schaltungsentwurf ist eine kostengünstige und zeitsparende Alternative zur Prototypenfertigung. Die Entwicklung von Mikrowellenschaltungen wie MMICs

kann dadurch beträchtlich beschleunigt werden. Wie eingangs bereits erwähnt (siehe „Stand der Technik“), sind aber noch viele Engpässe zu überwinden. Einen wesentlichen Beitrag leistet hierbei die elektromagnetische Simulation (EMS) für passive Hochfrequenzkomponenten (planare Leitungen, Leitungsstrukturen, Verzweigungen, Module und Gehäuse, Filterstrukturen) mit Hilfe von numerischen Berechnungsverfahren. Ihre Entwicklung wird in einer Vielzahl von Lehrbüchern und Publikationen [11] - [17] beschrieben.

Berechnungsverfahren für passive Strukturen werden nach analytischen, semi-analytischen und rein numerischen Methoden unterschieden. Analytische Methoden ermöglichen die exakte Lösung elektromagnetischer Probleme. Sie lassen sich aber nur für die Berechnung relativ einfacher Strukturen wie z. B. zylindrische Hohlleiter verwenden. Die meisten praktischen Probleme sind aber komplexer und können damit in der Regel nicht berechnet werden. Bereits weitaus vielseitiger sind semi-analytische Methoden verwendbar. Die zu analysierenden Geometrien müssen in der Regel dem Koordinatensystem angepasst sein. Charakteristisch ist, dass das elektromagnetische Problem mathematisch exakt formuliert wird. Die Lösung der resultierenden Gleichungen ist jedoch eine Näherung. Die rein numerischen Verfahren unterliegen in Bezug auf die zu analysierenden Strukturen theoretisch keinen Beschränkungen. Die Maxwell'schen Gleichungen werden direkt bzw. indirekt mit Hilfe von Approximationen – z. B. Berechnung der elektromagnetischen Felder nur an diskreten Raumpunkten – gelöst.

In Abhängigkeit der Strukturen, die berechnet werden können, unterscheidet man sogenannte 2,5D- und 3D-Verfahren. Die Methoden der Momente (engl.: MoM für Methods of Moments) [17] gehören zur Klasse der 2,5D-Verfahren. Es sind in der Regel semi-analytische Frequenzbereichsverfahren wie die Integralgleichungs-Techniken [14]. Besonders bekannt ist eine fouriertransformierte Variante, die Spektralbereichsmethode [14]. Sie finden Anwendung bei der Berechnung planarer Schaltungen und von planaren Antennen, wobei unendlich dünne Metallisierungen angenommen werden. Endliche Leiterdicken und ohmsche Verluste können nur bedingt berücksichtigt werden. Die 3D-Verfahren unterliegen bezüglich der analysierbaren Geometrien zunächst keinen Beschränkungen. Die gebräuchlichsten Methoden sind die Methode der Finiten Elemente (engl.: FEM für

Finite-Element-Method) im Frequenzbereich [14] und die Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich FDTD (engl.: FDTD für Finite-Differences Time-Domain) [16]. Eine weniger verbreitete Methode ist die Methode der Finiten Differenzen im Frequenzbereich FDFD (engl.: Finite-Differences Frequency-Domain) [18]. In allen drei Fällen handelt es sich um numerische Berechnungsverfahren. Sie sind sehr flexibel, so dass die Berechnung einer Vielzahl unterschiedlicher Strukturen möglich ist. Andererseits sind sie aber sehr rechenintensiv und benötigen einen großen Arbeitsspeicher.

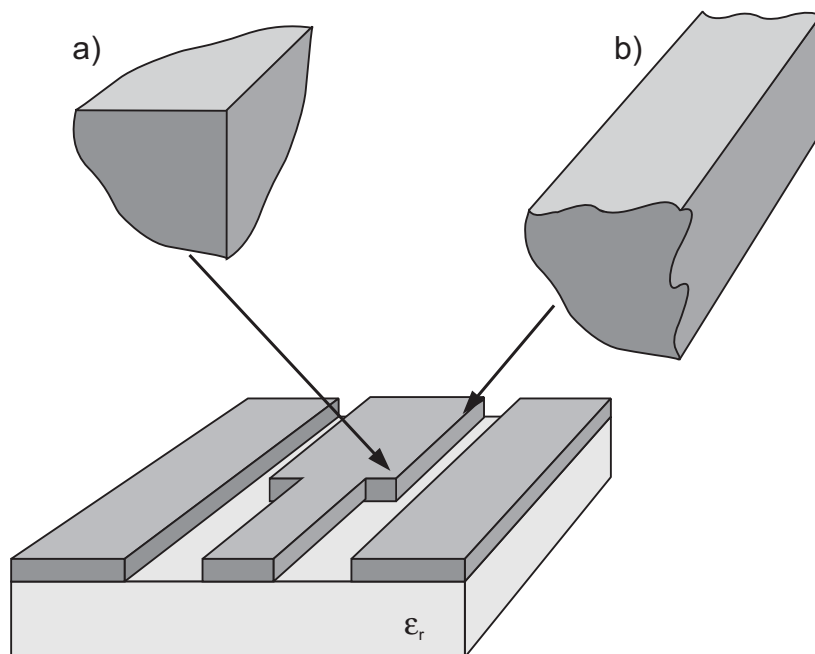


Abbildung 1.1: Ecke (a) und Kante (b) an einer Koplantarstruktur.

Die Berechnung von miniaturisierten Strukturen wie passiven MMIC-Komponenten mit Hilfe der Methode der Finiten Differenzen (FD) ist, gemessen an den Anforderungen beim Design, noch zu aufwändig. Ihre Rechenzeit und ihr Speicherbedarf wachsen mit der Größe der Finiten-Differenzen-Gitter (Anzahl der Gitterzellen). Bei der Zeitbereichs-Variante FDTD bestimmt der kleinste Diskretisierungsschritt den größten Zeitschritt, um Stabilität zu gewährleisten [16]. Im Frequenzbereich hingegen sind sehr große Gleichungssysteme zu lösen. Insbesondere an Material-Diskontinuitäten wie z.B. Ecken und Kanten (siehe Abb. 1.1) ist eine hohe Auflösung der Gitter erforderlich, um Diskretisierungsfehler infolge

großer Feldgradienten zu reduzieren.

Zudem ergibt sich mit zunehmender Miniaturisierung von Mikrowellschaltungen eine veränderte Gewichtung der Einflussgrößen [19]. Die endliche Leitfähigkeit von Leitern darf nicht vernachlässigt werden, weil die Feldanteile in den Leitern signifikanten Einfluss auf das elektrische Verhalten der Schaltung haben, denn typische Metallisierungsdicken von MMICs liegen in der Größenordnung der Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}$  von einigen Mikrometern.

Mit der Diskretisierung der FD-Methode muss deshalb die Skin-Effekt-Eindringtiefe, die sich aus der endlichen Leitfähigkeit ergibt, aufgelöst werden. Andererseits betragen die Gesamt-Abmessungen der passiven Strukturen einige Millimeter. Aufgrund dieser Größenunterschiede ergeben sich Diskretisierungen mit einer großen Anzahl von Gitterzellen.

## Bisherige Arbeiten

In den vergangenen Jahren sind eine Vielzahl von Methoden entwickelt worden, um Berechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Differenzen effizienter zu gestalten. Ein Beispiel ist die Berücksichtigung von Feldsingularitäten. Sie werden durch Modifikation der Differenzgleichungen der Gitterzellen, die an Kanten und Ecken (siehe Abb. 1.1) einer Materialverteilung grenzen, berücksichtigt [20] - [29]. Die Berücksichtigung der Feldsingularitäten basiert dabei in der Regel auf statischen Lösungen. Ein anderer Ansatz erweitert die Berücksichtigung statischer Lösungen auf das gesamte Rechenvolumen einer gegebenen Anordnung [30] - [33]. Dieses ist immer dann möglich, wenn die Abmessungen der Anordnung klein gegen die Wellenlänge sind.

Die genannten Ansätze sind für Strukturen mit idealen Leitern ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) entwickelt worden. Mit den Oberflächenimpedanz-Methoden werden auch endliche Leitfähigkeiten quasi-statisch beschrieben [16], [34] - [36]. Dieser Ansatz ist aber eine Näherung eindimensionaler Feldverteilungen und ist vielfach nicht zu verwenden, wenn Leiterdicken  $t$  wie die von MMICs in der Größenordnung der Eindringtiefe  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}$  liegen. Die Oberflächenimpedanz-Methoden sind für dicke Leiter mit  $t \gg \delta$  bzw. sehr dünne Leiter mit  $t \ll \delta$ , wie sie bei hybrid integrierten Schaltungen auftreten, entwickelt worden. Lei-