

# Kapitel 1

## Einleitung

Auf dem Gebiet der Hoch- und Höchstfrequenzelektronik besteht laufend Bedarf nach der Erschließung höherer Frequenzbänder. Die Einsatzbereiche erstrecken sich über die unterschiedlichsten Anwendungen. Aus dem Gebiet der modernen Kommunikationssysteme wie Mobilfunk und Satellitenkommunikation [1] sind Millimeterwellen nicht mehr wegzudenken. Viele Messsysteme, wie zum Beispiel für die Abstands- und Geschwindigkeitsmessung im Automobilbereich [2] oder für die Wetterbeobachtung und die Radioastronomie [3], beruhen auf Millimeterwellentechnik. Auch in der Medizintechnik werden zunehmend Mikrowellen und Millimeterwellen eingesetzt, um eine nichtinvasive Diagnose zu ermöglichen [4]. Der vorzugsweise eingesetzte Frequenzbereich ergibt sich aus den Randbedingungen der Anwendung je nachdem, ob große oder kleine Entfernungen überwunden werden müssen, und ob eine mehr oder weniger starke atmosphärische Dämpfung erwünscht ist. In diesem Zusammenhang wird bereits deutlich, dass in den meisten Fällen nicht nur Leitungen zur Führung der Hochfrequenzsignale benötigt werden, sondern dass auch geeignete Maßnahmen getroffen werden müssen, diese Hochfrequenzsignale in den Freiraum abzustrahlen.

Für alle genannten Anwendungen ist es notwendig, ausreichend Leistung bei hohen Frequenzen zur Verfügung zu stellen, sei es als Quelle für Sender oder als Lokaloszillator für Empfängerschaltungen [5]. Die über viele Jahrzehnte hinweg ausschließlich eingesetzte Röhrentechnik [6] ist für einen großen Teil der modernen Einsatzgebiete von Hochfrequenzelektronik nicht gut geeignet. Vakuumröhren sind unhandlich und benötigen eine hohe Spannungsversorgung, so dass seit dem erstmaligen Einsatz von Halbleiterquellen etwa Mitte des 20. Jahrhunderts stetig versucht wird, diese für immer höhere Frequenzen zu nutzen [7]. Mit Halbleiterbauelementen können platz sparende Hochfrequenzquellen aufgebaut werden, allerdings stellen sie im Vergleich zu Vakuumröhren nur verhältnismäßig geringe Leistungen zur Verfügung, die mit zunehmender Frequenz abnehmen.

Um dennoch bei hohen Frequenzen hohe Leistungen erzeugen zu können, wird eine Vielzahl von gleichen Quellen nebeneinander angeordnet; in der englischen Fachliteratur werden solche Anordnungen als Arrays bezeichnet. Bei geeigneter Anordnung der Einzelelemente kann eine konstruktive Überlagerung der von den einzelnen Quellen abgegebenen Leistungsanteilen erreicht werden, man spricht von Leistungsaddition [8].

In der Standard-Hohlleitertechnik tritt hierbei jedoch das Problem auf, dass aufgrund der sperrigen Abmessungen der Hohlleiter-Bauelemente ein zu großer Abstand zwischen Einzelelementen zustande kommt, so dass eine konstruktive Überlagerung der Einzelsignale nicht mehr gewährleistet ist. Aus diesem Grund werden bei höheren Frequenzen, für die ein sehr kleiner Abstand zwischen den einzelnen Bauelementen realisiert werden muss, bevorzugt planare Schaltungstechniken eingesetzt. Die für kommerzielle Anwendungen typischerweise verwendeten Substratmaterialien sind Silizium und Galliumarsenid. Die Eigenschaften dieser Materialien sind für die derzeit gängigen Frequenzbereiche sehr gut erforscht, unzählige wissenschaftliche Veröffentlichungen geben darüber Aufschluss.

Die Schaltungstypen, die für planare Hochfrequenzschaltungen hauptsächlich verwendet werden, sind Mikrostreifenleitungen, Koplanarleitungen und Schlitzleitungen [9]. Sie haben neben der Platzeinsparung im Vergleich zu Hohlleitern den Vorteil, dass sie bezüglich der Parallel- bzw. Serienschaltung von aktiven Bauelementen sehr flexibel je nach Bedarf variiert werden können. Im Idealfall können sogar die aktiven Elemente direkt auf dem Substrat zusammen mit den passiven Schaltungsstrukturen in ein und derselben Prozessabfolge integriert werden. Dadurch können Schaltungen mit einer sehr hohen Reproduzierbarkeit hergestellt werden, die mit Hohlleiterschaltungen nie erreicht werden könnten. Dies ist für die Leistungsaddition in Array-Anordnungen von entscheidender Bedeutung.

Bei hohen Frequenzen jedoch steigen die Verluste durch die Ausbreitung von Substratmoden in Silizium und Galliumarsenid sehr stark an. Ebenso nimmt die Frequenzdispersion zu. Eine naheliegende Lösung für diese Probleme liegt in der Entfernung des Substrats, soweit dies möglich ist. Es wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Versuche unternommen, Hochfrequenzschaltungen auf Substraten zu implementieren, die gegenüber der Wellenlänge so dünn sind, dass sie die sich in der Schaltung ausbreitenden elektromagnetischen Felder nur unwesentlich stören [10]. In dieser so genannten Membran-Technologie wird das Substrat unterhalb der Leiterbahnen bis auf eine minimale Dicke abgetragen, so dass sich die Schaltungen annähernd in Luft befinden und damit das Substrat eine effektive relative Dielektrizitätskonstante von beinahe eins besitzt.

Die Arbeiten, die sich mit diesen Membranschaltungen befassen, verwenden bisher Silizium-Oxid- und Silizium-Nitrid-Schichten als Membranmaterial. In dieser Technologie

konnten zum Teil sehr beeindruckende Ergebnisse erzielt werden [11] [12].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde an der Technischen Universität Hamburg-Harburg am Arbeitsbereich Hochfrequenztechnik in enger Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich Mikrosystemtechnik eine neuartige Schaltungstechnologie etabliert, die auf Polymermembranen basiert. Dieses Material hat gegenüber den bisher verwendeten Materialien Silizium-Oxid und Silizium-Nitrid den Vorteil, dass seine mechanischen Eigenschaften bei der mikrosystemtechnischen Fertigung mit Hilfe der Prozessparameter variiert und damit den gegebenen Schaltungsanforderungen angepasst werden können. In Abhängigkeit von der Wahl der Prozessparameter können aus dem Polymer weiche, folienähnliche oder harte glasartige Schichten hergestellt werden.

Da diese polymerbasierte Membrantechnologie neu eingeführt wurde, wurden hierzu verschiedene Schaltungsanwendungen untersucht. Dies ist der Inhalt der vorliegenden Arbeit. Kapitel 2 beschreibt die Membrantechnologie zunächst anhand von verschiedenen passiven Schaltungen, die entworfen und aufgebaut wurden. Es werden Verbindungen zwischen den planaren Membranschaltungen und konventioneller Hohlleitertechnik hergestellt, um die hochfrequenztechnische Charakterisierung der Schaltungseigenschaften zu erleichtern. Darüberhinaus werden einige Filterschaltungen und Ansätze zur Erweiterung der planaren Membrantechnologie um mehrere Schaltungsebenen vorgestellt. Hier sind auch die Eigenschaften und Verlustmechanismen der planaren Membranschaltungen zusammengefasst.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem Entwurf und dem Aufbau verschiedener Antennentypen, die im Hinblick auf die Membrantechnologie ausgelegt und optimiert wurden. Es wurden Patch-Antennen, geätzte Hornantennen sowie Short-Backfire-Antennen aufgebaut und in Hinblick auf die Anwendung in Array-Anordnungen zur Leistungsaddition optimiert.

In Kapitel 4 wird als Beispiel für eine aktive Schaltung ein planarer Oszillator auf Membran betrachtet. Ein wesentlicher Teil der Arbeit bestand in der Bereitstellung eines geeigneten Simulationswerkzeugs für den Entwurf des Oszillators. An dieser Stelle werden auch einige theoretische Überlegungen zum planaren Oszillator angestellt sowie die charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Elemente der Oszillatorschaltung vorgestellt.

Beim Aufbau des in Kapitel 4 vorgestellten Oszillators stellte sich heraus, dass es für einen erfolgreichen Betrieb unerlässlich ist, in der planaren Schaltung ausreichende Abstimmmöglichkeiten vorzusehen. Aus diesem Grund wurden verschiedene Abstimmelemente in Membrantechnologie entworfen und aufgebaut. Die Ergebnisse hiervon sind in Kapitel 5 zusammengefasst.

In Kapitel 6 werden schließlich nach einem abschließenden Überblick über die Arbeit Anregungen für in der näheren Zukunft anstehende Arbeiten in Zusammenhang mit der Weiter-

entwicklung der hier eingeführten Polymer-Membrantechnologie gegeben.

Wie bereits erwähnt fand im Lauf der gesamten Arbeit bezüglich der Herstellung der planaren Membranschaltungen eine enge Zusammenarbeit mit der Mikrosystemtechnik statt. Die wesentlichen Inhalte der vorliegenden Arbeit bestehen einerseits aus dem Entwurf und der Simulation der vorgestellten Schaltungen und andererseits aus der Bereitstellung der Hochfrequenz-Messtechnik zur Charakterisierung der aufgebauten Schaltungen.

Den Kontext dieser Arbeit bildet das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Projekt MEMSTIC. Das Akronym leitet sich aus der Bezeichnung **M**ulti **E**lement **M**ulti **S**ubstrate **T**erahertz **I**ntegrated **C**ircuit her, die den Oberbegriff für die im Rahmen des Projekts untersuchten mehrschichtigen aktiven und passiven Schaltungen für Millimeter- und Submillimeterwellen darstellt.

## Kapitel 2

# Planare Schaltungstechnik

Planare Mikrowellenschaltungen wurden in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts zum ersten Mal in Erwägung gezogen, um kostengünstige Alternativen zur herkömmlichen Koaxial- und Hohlleitertechnik zu erschließen. Seitdem nimmt ihre Bedeutung stetig zu, was bis heute zu ständig wachsenden Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet führt [13]. Die Vorteile der planaren Schaltungstechnologien liegen sowohl im praktischen als auch im wirtschaftlichen Bereich [14].

In der Anwendung spielt in erster Linie die präzise Fertigungstechnik eine Rolle. Durch die Anwendung von fotolithografischen Verfahren zur Strukturierung der Schaltungen ist eine hochgenaue Herstellung mit außerordentlich kleinen relativen Abweichungen auch noch bei sehr kleinen absoluten Dimensionen gewährleistet. Herkömmliche feinmechanische Fertigungstechniken stoßen dagegen bei zunehmender Miniaturisierung der Schaltungen aufgrund der Erschließung höherer Frequenzbereiche sehr schnell an ihre Grenzen.

Aus demselben Grund zeichnen sich mikrosystemtechnisch hergestellte planare Schaltungen im Vergleich zu den feinmechanisch gefertigten Strukturen durch eine erheblich verbesserte Reproduzierbarkeit aus. Die Herstellung vieler exakt gleicher Strukturen wird dadurch erst ermöglicht. Sie stellt im Übrigen die Voraussetzung für die quasioptische Leistungsaddition durch konstruktive Überlagerung der Ausgangssignale vieler einzelner Schaltungen dar, die ja, wie bereits in der Einleitung erwähnt, den Hintergrund für die vorliegende Arbeit bildet [15].

Auch die Integrierbarkeit von aktiven und passiven Schaltungselementen auf ein und demselben Substrat ist ein herausragender Vorteil der planaren Schaltungstechnologien. Während in der klassischen Koaxial- und Hohlleitertechnik die passiven Schaltungsteile mit den aktiven Bauelementen durch Einlöten, Verschrauben oder Ähnliches verbunden wurden, ermöglichen die planaren Technologien die Herstellung der gesamten Schaltung in derselben Prozessabfol-

ge. Wesentliche Schwachstellen wie Lötungen oder Klebungen können daher aus den Schaltungen eliminiert werden. Dies birgt gleichzeitig den Vorteil, dass bereits der Entwurf der Schaltungen wesentlich genauer betrieben werden kann, da nicht reproduzierbare Elemente wegfallen. Gerade diese Elemente können durch die Simulation nur unzureichend erfasst werden und erschweren daher einen allgemein gültigen Entwurf. Beispielsweise können die in der konventionellen Hohlleitertechnik zur Kontaktierung von aktiven Bauelementen verwendeten Whisker-Drähte in Simulationen nur näherungsweise modelliert werden, da ihre Anordnung für jede Schaltung von Hand vorgenommen wird und daher nicht reproduzierbar herzustellen ist. In integrierter Schaltungstechnik dagegen sind die Kontaktierungen wie alle anderen Schaltungselemente durch die mikrosystemtechnischen Prozesse vorgegeben. Die geometrischen Parameter können an einer Testschaltung einmal exakt bestimmt werden und dann in die Simulation übernommen werden, die dennoch für alle weiteren, mit dem gleichen Maskensatz hergestellten Schaltungen Gültigkeit besitzt.

Die Verwendung von dünnen Halbleitersubstraten hat im Vergleich zu sperrigen Koaxial- oder Hohlleiterkonstruktionen darüber hinaus den Vorzug einer deutlichen Platz- und Gewichtsersparnis. Dies ist für viele praktische Aufgaben, wie beispielsweise für den Einsatz von planaren Mikrowellenschaltungen in Satelliten- und Radaranwendungen, überhaupt erst die Voraussetzung [16].

Neben den oben aufgeführten anwendungsbezogenen Vorteilen sind auch die wirtschaftlichen Vorzüge aufgrund der Kosteneinsparung durch unkomplizierte Massenproduktion nicht von der Hand zu weisen.

In diesem Kapitel werden zunächst in Unterkapitel 2.1 die Grundlagen der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten planaren Schaltungstechnologie erläutert, wobei die wesentlichen Eigenschaften der planaren Membranleitungen zusammengefasst werden. Unterkapitel 2.2 stellt die Simulations- und Messergebnisse der passiven Schaltungsentwürfe vor. Hier wird auch auf die Simulationemethode eingegangen. In Unterkapitel 2.3 wird schließlich eine Erweiterung der planaren Membrantechnologie auf eine mehrschichtige Multi-Membran-Technologie eingeführt.

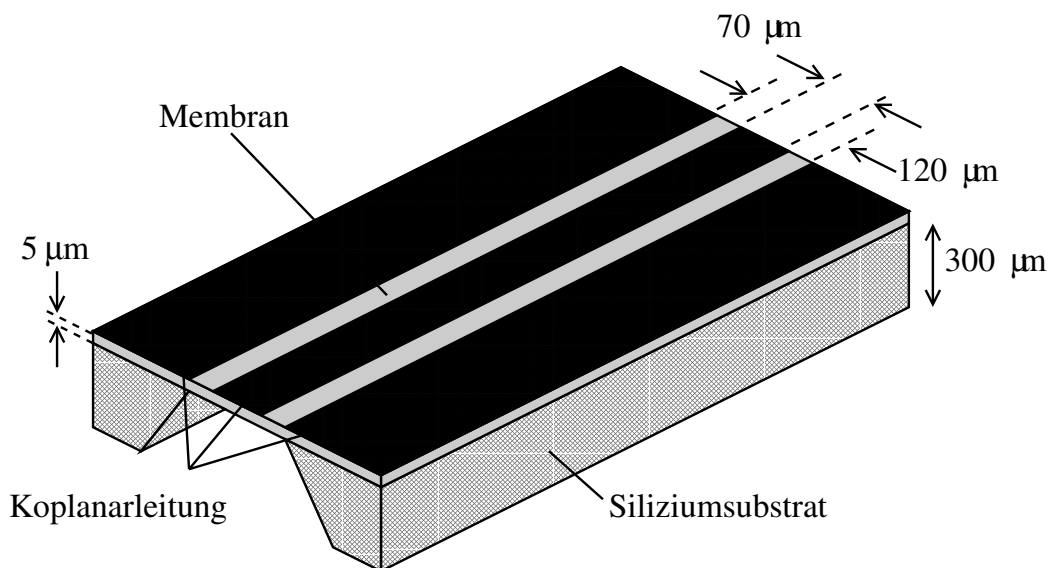
## 2.1 Grundlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine integrierbare Multi-Membran-Schaltungstechnik entwickelt, die unter erheblicher Verminderung der typischen Nachteile, nämlich zunehmender

Schaltungsverluste und Herstellungskosten aufgrund der Miniaturisierung, in den Submillimeterwellenbereich übertragen werden kann. In diesem Kapitel werden die Grundlagen dieser Schaltungstechnik erläutert und ihre Eigenschaften vorgestellt.

Bild 2.1 zeigt den Querschnitt durch eine Membranschaltung. Die Membranschaltungen werden auf die im Folgenden kurz beschriebene Weise hergestellt. Weitere Einzelheiten zum Herstellungsprozess finden sich in Anhang B.

Ein niederohmiges Silizium-Substrat wird zunächst mit einer  $5\ \mu\text{m}$  dicken dielektrischen Schicht versehen. Auf diese Schicht werden mit den Methoden der Mikrosystemtechnik Schaltungsstrukturen aus Gold aufgebracht. Als letzter Prozessschritt wird das Silizium-Substrat unterhalb der hochfrequenztechnisch relevanten Schaltungsteile von der Rückseite her nasschemisch weggeätzt, wobei die dielektrische Schicht als Ätzstop dient. Diese dielektrische Schicht bleibt nach dem Ätzvorgang als Membran, die nur von Luft umgeben ist, stehen. Sie wird lediglich durch das niederohmige Silizium, das in ausreichendem Abstand von den hochfrequenztechnisch relevanten Schaltungsteilen stehen bleibt, wie durch einen Rahmen aufgespannt. Die Hochfrequenzschaltungen werden daher nur durch die dielektrische Membran getragen.



**Bild 2.1:** Querschnitt durch eine Koplanarleitung auf Membran

Es handelt sich bei den oben beschriebenen Strukturen um Schaltungen, die aus mikrogeschirmten Leitungen auf Membranen bestehen und gegenüber herkömmlichen planaren Technologien drei wesentliche Vorteile haben: Erstens besteht der felderfüllte Raum dadurch, dass sich die Schaltungselemente auf gegenüber der Wellenlänge vernachlässigbar dünnen Membra-