

Kapitel 1 Einleitung

Hochfrequenz-Bauelemente erreichen heutzutage Bandbreiten bzw. Grenzfrequenzen von 100 GHz und mehr [1 - 3] und kommen zum Einsatz z.B. in der Telekommunikation, im Automobilbau oder in militärischen Anwendungen. Dieser Fortschritt wurde zum einen möglich durch den Gebrauch von Substratmaterialien aus III-V-Halbleitern wie Galliumarsenid (*GaAs*) und Indiumphosphid (*InP*) sowie von Verbindungen von oder mit diesen Elementen für die darüberliegenden Halbleiterschichten, aber auch durch die Weiterentwicklung der Herstellungstechniken für Mikrowellen-Bauelemente. Die Strukturierung mittels der Elektronenstrahlolithographie z.B. öffnete den Weg zu räumlichen Dimensionen nur noch weniger Nanometer [4, 5], die Perfektionierung der Molekularstrahlepitaxie (*MBE; molecular beam epitaxy*) erlaubte das atomlagengenaue "Komponieren" der erforderlichen Schichtfolgen. Als Motor für den weiteren Entwicklungsschub hin zu noch schnelleren, noch kleineren und noch leistungsfähigeren Bauelementen kann man den Boom der Telekommunikation in den 90er Jahren bezeichnen: die Zunahme des Datentransfers per Internet, neuartige Verkehrsleitsysteme oder die Liberalisierung des Telefonmarktes und die damit verbundene Gründung neuer Netzbetreiber für den Mobilfunk wie auch für das Festnetz. Zur Bewältigung dieser Datenmengen werden hohe Trägerfrequenzen benötigt, da nur dann hinreichend große Bandbreiten für die einzelnen Übertragungskanäle gewählt werden können. Nur auf diese Weise ist eine fehlerfreie Datenübertragung in ausreichendem Umfang gewährleistet. Glasfasern mit Licht als Übertragungsmedium eignen sich dazu in hervorragender Weise, stellen sie doch solche breitbandigen Übertragungskanäle zur Verfügung. Anhand dessen ist verständlich, daß der Optoelektronik als Schnittstelle zwischen der optischen Übermittlung elektronischer Informationen mit Lichtgeschwindigkeit in den letzten Jahren eine neue und große Bedeutung zugekommen ist und weiter zukommen wird. Denn die neuen Bedürfnisse der Informationsgesellschaft verlangen nach neuen Konzepten und folglich auch nach neuen Bauelementen und integrierten Schaltungen (*IC; integrated circuit*), die multiplexfähig sind und bei Frequenzen weit oberhalb 1 GHz arbeiten.

Damit geht einher, daß an die Modellierung, Simulation und an die Meßtechnik der neuen elektronischen und optoelektronischen Komponenten die gleichen hohen Anforderungen gestellt werden wie an die Entwicklung dieser Bau-

elemente selbst [6, 7]. Aus Kostengründen liegt dabei von Firmenseite ein besonderes Augenmerk auf der Simulation neuer Schaltungen, welche langwierige und kostspielige Entwicklungs- und Testphasen reduziert. Von den Berechnungsmodellen wird daher erwartet, daß sie trotz der immer komplexer werdenden geometrischen Strukturen und Abmessungen und trotz neuartiger verwendeter Materialien und Materialzusammensetzungen praxisgerechte Aussagen liefern über das Hochfrequenzverhalten der zu entwickelnden Komponenten. Weiterentwickelte Algorithmen und hohe Rechnerleistungen sind hier also gefragt [8, 9]. Dennoch muß auch eine noch so ausgeklügelte Theorie mit Leben gefüllt, sprich mit Meßergebnissen verifiziert werden. Erst dieses Zusammenspiel von Simulation und Meßergebnis ermöglicht den Schaltungsentwicklern, die Architektur ihrer Schaltungen stetig, kostengünstig und schnell zu verbessern. Aus diesem Grund wird gehöriger Aufwand von etlichen Forschergruppen und Institutionen betrieben, die Meßtechnik monolithisch integrierter Mikrowellenschaltungen (*MMIC*; *monolithic microwave integrated circuit*) mit der Zunahme von deren Schnelligkeit und Komplexität Schritt halten zu lassen.

Bislang gebräuchlichstes Mittel zur Analyse der Hochfrequenzeigenschaften von MMICs ist die Verwendung von Netzwerkanalysatoren (*NWA*). Hierbei handelt es sich um eine *on-wafer* Meßmethode, was besagt, daß Mikrowellen-Meßspitzen an geeigneter Stelle auf das zu untersuchende Bauelement (*DUT*; *device under test*) aufgesetzt werden. Dabei rührt die Bezeichnung "on-wafer" daher, daß dieser Vorgang noch vor dem Einbau des Bauelements in sein schlußendliches Kunststoffgehäuse geschieht, also unmittelbar nach dem letzten Technologieschritt, wenn die Schaltung sich noch auf ihrem Herstellungssubstrat befindet. Im speziellen wird bei der Netzwerkanalyse nach der Kontaktierung des DUT mit den Mikrowellen-Meßspitzen seine Übertragungsfunktion in Abhängigkeit der Frequenz ermittelt und in Form der sog. *Streuparameter* angezeigt. Aus diesen lassen sich anschließend die Dämpfungskonstante und Impedanzen der Schaltung oder der Wellenwiderstand bzw. Leitungsbeläge eines verteilten Bauelements ermitteln und das Ersatzschaltbild bestimmen. Alternativ dazu werden Spektrumanalysatoren zur Messung des Leistungsdichtespektrums des elektrischen Signals benutzt sowie Sampling-Oszilloskope für die Ermittlung seines zeitlichen Verlaufs. Die Frequenzbandbreiten dieser Methoden sind geräteabhängig und bewegen sich bei etwa 120 GHz [10 - 15].

Weit gravierender als diese Beschränkung der Bandbreite ist für die moderne Testanwendung die Tatsache, daß mit diesen Verfahren nicht schaltungsintern (englisch: *in-circuit*) gemessen werden kann [6]. Die Meßspitzen haben meist

Kontaktflächen von mehreren $10 \mu\text{m}^2$ und erfordern somit Anschlußpads am DUT von der gleichen Größe. Diese werden in der Regel als Ein- bzw. Ausgangstor der Schaltung ausgearbeitet und erlauben somit nur eine integrale Charakterisierung der Schaltung als Ganzes. Vonnöten ist jedoch eine detaillierte Auskunft über das Zusammenspiel aller im MMIC vereinten Komponenten. Den Schaltungsdesigner interessieren Fragen nach der gegenseitigen Beeinflussung der Einzelkomponenten sowie das Lokalisieren des einen Bauelements, an dem die Erfüllung der geforderten Systemspezifikation ggf. scheitert. Von daher besteht ein gesteigertes Interesse an Möglichkeiten, im wahrsten Sinne des Wortes einen "Einblick" in die Vorgänge im Inneren des DUT zu erhalten.

Optische Meßverfahren eignen sich dazu in hervorragender Weise, und eine dieser Meßmethoden, die sich immer mehr etablieren konnte, ist die elektrooptische Meßtechnik. Bei dieser wird die elektrische Feldverteilung innerhalb der Schaltung mit einem Laserstrahl detektiert und quantitativ ausgewertet. Sie konkurriert gegen andere Meßverfahren, die im Kapitel 2 kurz erläutert werden sollen. Allen Verfahren gemeinsam ist das Bestreben, möglichst exakte Aussagen über das *interne* Hochfrequenzverhalten des untersuchten Bauelements zu machen, was aber im Umkehrschluß bedeutet, daß dieses nur so wenig wie nötig gestört werden darf. Auf der anderen Seite liegt genau dort oft das Problem: das Schaltungsdesign wird immer komplizierter, die Strukturabmessungen immer kleiner. Dennoch soll bzw. muß die wie auch immer geartete Meßsonde so nah wie möglich an das DUT herangeführt werden. Somit muß für den Fall, daß die Sonde über elektrische Zuleitungen verfügt, der Einfluß dieser Kontaktanschlüsse mit mehr oder weniger komplizierten Kalibrationsalgorithmen eliminiert werden.

Hier liegt ganz allgemein der Vorteil optischer Meßverfahren. Der Laserstrahl fungiert als Sonde, die vollkommen ohne elektrische Zuleitungen auskommt. Über optoelektronische^{*)} Effekte wechselwirkt der Laserstrahl mit dem elektromagnetischen Feld der sich auf dem untersuchten Bauelement ausbreitenden Mikrowelle und ändert dabei seine Eigenschaften. Diese werden an anderer Stelle mittels geeigneter Detektoren abgefragt und übermitteln so die Information über den Zustand des elektrischen Signals zum Zeitpunkt der

^{*)} Der Begriff "optoelektronisch" wird in dieser Arbeit immer dann verwendet werden, wenn allgemein die Wechselwirkung von Licht mit elektromagnetischen Feldern gemeint ist. Dies mag an der einen oder anderen Stelle nicht ganz korrekt sein, dient aber der klaren Unterscheidung zum linearen "elektrooptischen" Effekt oder zur "elektrooptischen" Meßtechnik, wo ganz speziell die feldinduzierte Doppelbrechung in nicht-zentralsymmetrischen Kristallen und die damit verbundene Änderung der Polarisationssebene eines polarisierten Laserstrahls gemeint sein wird (s. Kapitel 2.2, 3.1, 4.1 und 5.1).

Wechselwirkung Laser–Mikrowelle am Ort dieser Wechselwirkung, und das nahezu störungsfrei.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Aus diesen einführenden Worten leitet sich unmittelbar die Zielsetzung und Motivation der vorliegenden Arbeit ab: die elektrooptische Meßtechnik ist ein Werkzeug, welches seine Qualitäten und seine Bedeutung bei der Charakterisierung monolithisch integrierter Mikrowellenbauelemente schon vielfältig unter Beweis gestellt hat. Mit dem vorhandenen elektrooptischen Meßaufbau, der auf einem gepulsten Lasersystem basiert, werden qualitativ und quantitativ sowie ein- und zweidimensional Messungen in MMICs durchgeführt. Die Meßbandbreite dieses Systems beträgt etwa 90 GHz und sein räumliches Auflösungsvermögen weniger als $0,5 \mu\text{m}$ [16]. Ausgehend von diesen Meßergebnissen ist es das Ziel dieser Arbeit, den Meßbereich dieses Systems in den Bereich $> 100 \text{ GHz}$ zu steigern, wie er für moderne MMICs benötigt wird [1-3].

Jedoch ist die Meßbandbreite eines Meßaufbaus mit einem gepulsten Lasersystem begrenzt durch die Pulsbreite der optischen Pulse sowie durch den zeitlichen Jitter des Kurzpulslasers [17, 18]. Dem vorhandenen Meßsystem sind also durch den vorhandenen Nd:YAG-Laser inhärent Grenzen bzgl. seiner Meßbandbreite auferlegt. Um diese Einschränkung zu umgehen, wird in dieser Arbeit der Weg eingeschlagen, den gepulsten Laser durch zwei wellenlängenverstimmbare, kontinuierlich emittierende Laser (*cw*; *continuous wave*) zu ersetzen. Bei dieser sog. *Heterodyn-Meßtechnik* dient der zweite Laser als sog. *lokaler Oszillator*, mit dessen Hilfe die zu messende Mikro- oder Millimeterwellenfrequenz im untersuchten Bauelement in einen Frequenzbereich transformiert wird, in dem sie leicht durch handelsübliche Auswertegeräte detektiert werden kann. Mit diesem Verfahren läßt sich die Meßbandbreite auf weit über 100 GHz zu steigern. Sie ist gegeben durch die Differenzfrequenz, die sich zwischen beiden *cw* Lasern einstellen läßt. Die benutzten *cw* Laser verfügen überdies über integrierte Glasfaserausgänge, so daß ein sehr kompakter und handlicher Meßaufbau möglich wird, bei dem Justierarbeiten durch das "einfache" Koppeln von Glasfasern weitestgehend entfällt.

Des Weiteren ist diese Methode, durch zwei cw Laser die Frequenzbandbreite des Meßsystems zu erhöhen, nicht an den linearen elektrooptischen Effekt als Wechselwirkungsmechanismus gebunden. Je nach Struktur und Beschaffenheit des untersuchten Bauelements kann es von Vorteil sein, andere wie z.B. elektroabsorptive oder elektrorefraktive Effekte für die Evaluierung des Hochfrequenzverhaltens der integrierten Schaltungen auf optischem Weg auszunutzen. Dadurch ergeben sich Unterschiede in den Meßaufbauten wie auch in den Einsatzbereichen des jeweiligen Meßsystems. Auf diese wird in der eingereichten Arbeit im einzelnen eingegangen.

Ein Blick in die Literatur zeigt, daß bislang nur von einer Forschergruppe ein heterodyn-elektrooptischer Meßaufbau zur Messung von Mikrowellensignalen eingesetzt wurde [19]. Der Aufbau eines elektrooptischen Meßsystems in Glasfasertechnik ist bislang nur in [20] veröffentlicht worden, und die Messung lichtinduzierter Ströme als Verfahren zur Mikrowellendetektion in MMICs wurde noch nicht demonstriert.

1.2 Struktur der Arbeit

Die soeben vorgestellte Motivation bedingt die folgende Gliederung der vorliegenden Arbeit. Einen Überblick über kontaktlos arbeitende nichtoptische wie auch optische Meßmethoden gibt Kapitel 2. Der Stand der Höchstfrequenzmeßtechnik soll in diesem Kapitel betrachtet werden.

In Kapitel 3 schließen sich die physikalischen Grundlagen optischer Meßverfahren an. Die bislang gebräuchlichste Wechselwirkung, die dazu genutzt wird, ist der Pockels-Effekt, mit dem dieses Kapitel beginnt. Da dies jedoch nicht der einzig nutzbare optoelektronische Effekt ist, werden in diesem Kapitel auch die Elektroabsorption sowie etwas kürzer der quantenunterstützte Stark-Effekt und der Kerr-Effekt vorgestellt und ihre Auswirkungen auf die hervorgerufene Änderung des Brechungsindex verglichen.

Das vierte Kapitel hat die technischen Grundlagen der optoelektronischen Meßtechnik zum Thema. Zunächst ist es wichtig, die zwei grundsätzlichen Verfahrensweisen, also die direkte und die indirekte Meßtechnik vorzustellen und auf ihre Unterschiede hinzuweisen. Da zudem die elektrooptische Meßtechnik in der Regel mit einem gepulsten Laser betrieben wird, aber auch

dies nicht die einzige Variante darstellt, wird anschließend das dabei verwendete Sampling-Prinzip besprochen. Daran schließt sich die Vorstellung der Heterodyn-Meßtechnik an. Die meisten Ergebnisse, die in dieser Arbeit präsentiert werden, beruhen auf diesem Meßverfahren. Die Flexibilität bei der Wahl der Interaktion zwischen Licht und Mikrowelle eröffnet die Möglichkeit, das Meßobjekt auch gleichzeitig als Meßsonde zu benutzen und den dort induzierten Photostrom (*OBIC; optical beam induced current*) zu messen. Dem Prinzip, welches hinter einer solchen Meßtechnik steckt, widmet sich das letzte Unterkapitel in diesem Abschnitt.

Das fünfte Kapitel schließlich stellt die Meßaufbauten vor, die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung standen bzw. realisiert wurden, und zeigt die Ergebnisse, die mit diesen Aufbauten erzielt werden können. Dabei wird die Trennung so vorgenommen, daß zunächst die Meßaufbauten unter Anwendung des Pockels-Effekts behandelt werden und anschließend der, bei dem der elektroabsorptive Effekt ausgenutzt wird, jeweils unterteilt in den jeweiligen Meßaufbau und die damit erzielten Ergebnisse. Begonnen wird mit dem bereits vorhandenen Meßaufbau für die elektrooptische Meßtechnik mit einem gepulsten Lasersystem. Es folgt das heterodyn-elektrooptische Meßsystem, welches komplett in Glasfasertechnik aufgebaut wurde. Das 5. Kapitel wird abgeschlossen durch die Vorstellung des Heterodyn-Meßsystems für OBIC-Messungen.

Für den Einsatz in optischen Millimeterwellensystemen ist ein Photodetektor speziell für die heterodyne Mischung zweier Lichtwellen konzipiert und hergestellt worden. Er kommt auch in den hier realisierten Heterodyn-Meßsystemen zum Einsatz, weshalb in einem separaten Unterkapitel des fünften Kapitels seine Grundzüge und Eigenschaften näher erläutert werden.

In konzentrierter Form gibt die Zusammenfassung die Ergebnisse dieser Arbeit nochmal wieder, bevor ein Ausblick den Abschluß bildet.