

## **Kapitel 2 Methoden zur kontaktlosen Charakterisierung integrierter Hoch- und Höchstfrequenz-Bauelemente und -Schaltungen – ein Überblick**

Die Einleitung hatte das Ziel, die Notwendigkeit einer kontaktlos und schaltungsintern arbeitenden Meßtechnik zur Charakterisierung von Hoch- und Höchstfrequenzbauelementen und -schaltungen, welche jedoch das zu untersuchende elektromagnetische Feld der propagierenden Mikrowelle nur möglichst gering stören darf, vor Augen zu führen und das Forschen nach solchen Möglichkeiten zu motivieren. Dem nun folgenden Überblick über verschiedene Höchstfrequenz-Meßmethoden sollen diese Anforderungen, welche zu erfüllen sind, nochmal detaillierter vorangestellt werden.

Schaltungsinternes Messen: bei der Fülle von Einzelkomponenten, die mittlerweile zu einer integrierten Schaltung zusammengefaßt werden, um die gesteigerten Anforderungen an moderne MMICs erfüllen zu können, reicht eine Charakterisierung dieser Schaltung als Ganzes nicht mehr aus, um so einen Funktionstest oder eine Fehleranalyse durchzuführen. Es kommt immer mehr darauf an, die Teilbereiche oder ganz konkret das Einzelelement innerhalb des ICs ausfindig zu machen, welches nicht kompatibel ist mit der gewünschten Systemspezifikation oder gar durch fehlerhafte Technologieschritte das Funktionieren der Schaltung verhindert, um so ganz gezielt diesen Bereich oder diese Komponente modifizieren zu können.

Hohe Ortsauflösung: dies kann nur bewerkstelligt werden, wenn die Ortsauflösung der Meßtechnik in der Größenordnung der Bauelemente liegt. Hier ist längst das Zeitalter der sub- $\mu\text{m}$ -Technologie angebrochen – auch heute schon stehen Höchstfrequenzbauelemente mit Strukturbreiten von 200 nm und weniger zur Verfügung [4, 5] – so daß auch die Meßsonde in der Lage sein muß, diese Dimensionen aufzulösen.

Hohe Frequenzbandbreite: Arbeitsfrequenzen größer 100 GHz werden von modernen MMICs bereits erreicht. Das Meßsystem selbst muß also diese Bandbreite zur Verfügung stellen. Für den Zeitbereich ergibt dies eine zu fordernde zeitliche Auflösung kleiner 4 ps.

Hohe Empfindlichkeit: bedingt durch die immer kleineren Signalspannungen, die an die immer miniaturisierteren Schaltungen angelegt werden, muß

die Meßtechnik in der Lage sein, auch kleinste elektrische Spannungen zu detektieren.

Geringe Beeinflussung durch die Messung: aus dem gleichen Grund muß gefordert werden, daß die Meßtechnik das zu messende elektrische Signal nur so wenig wie möglich stört. Nur dann können aussagekräftige Ergebnisse über die Hochfrequenzeigenschaften des DUT erzielt werden.

Kompatibilität mit Modellrechnungen: schließlich wird eine Meßtechnik vor allem dann von Nutzen für Schaltungsentwickler und -designer sein, wenn die gemessenen Größen direkten Einzug in die Simulationsprogramme halten bzw. wenn umgekehrt die Meßergebnisse direkt mit den Simulationsergebnissen verglichen werden können.

Gemäß dieses Forderungskatalogs, der sicherlich nur die wichtigsten Eigenschaften eines Meßverfahrens für Hoch- und Höchstfrequenzbauelemente enthält, sollen nun verschiedene Meßmethoden vorgestellt und ihre Stärken und Schwächen benannt werden. Aufgrund der Fülle unterschiedlicher Verfahren und der zahlreichen Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Mikrowellenmeßtechnik kann hier nur ein begrenzter Überblick gegeben werden, der keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Begonnen wird mit den Verfahren, die nichtoptisch arbeiten.

## 2.1 Nichtoptische Meßverfahren

Elektronenstrahltestverfahren:

Ein Rasterelektronenmikroskop (*REM*) ist bekannt für seine sehr gute Ortsauflösung in der Größenordnung weniger nm. Die Probe wird in eine Vakuumkammer eingeschleust und mit einem sehr fein gebündelten Elektronenstrahl "beschossen", wodurch Sekundärelektronen aus dem DUT herausgeschlagen und detektiert werden. Auf diese Weise kann das REM zu Mikroskopiezwecken benutzt werden. Es gibt aber auch Auskunft über das elektrische Potential auf dem DUT, denn die kinetische Energie der Sekundärelektronen ist proportional zu diesem [21]. Diese Methode zeichnet sich vor allem durch ihre hohe Ortsauflösung aus und ermöglicht Messungen auf jedem beliebigen

Substrat. Durch Transitzeiteffekte der Sekundärelektronen zum Detektor besitzt sie aber nur eine begrenzte Bandbreite von etwa 24 GHz [22] und eine um etwa eine Größenordnung schlechtere Spannungsempfindlichkeit als die elektrooptische Meßtechnik [6]. Außerdem ist man gezwungen, die Proben zu jeder Messung in die Vakuumkammer des REM einzubauen.

#### Photoemissionsmikroskop:

Ersetzt man in einem Rasterelektronenmikroskop den Elektronenstrahl durch einen Laser hoher Intensität, so werden auch durch diesen Sekundärelektronen erzeugt, deren Energie proportional dem elektrischen Potential auf der Teststruktur am Ort der Messung ist<sup>\*)</sup>. Durch die Verwendung eines gepulsten Lasers kann die Bandbreite wie auch die Empfindlichkeit im Gegensatz zum REM gesteigert werden [23]. Die räumliche Auflösbarkeit liegt im Bereich des Strahldurchmessers von ungefähr 0,5  $\mu\text{m}$ , und das zeitliche Auflösungsvermögen ist begrenzt durch die Zeit, welche die Sekundärelektronen benötigen, um das DUT zu verlassen. Auf der anderen Seite werden sehr hohe Felder zwischen dem Bauelement und dem Detektor angelegt, was dessen Verhalten beeinträchtigt und was auch hier zur Vermeidung von Feldentladungen den Einbau der Teststruktur in eine Vakuumkammer erfordert.

#### Rasterkraftmikroskopie:

Beim Rasterkraftmikroskop (*SFM; scanning force microscope*) wird eine atomar feine Spitze, die an einem Hebelarm (englisch: *cantilever*) befestigt ist, über die Mikrostruktur geführt und die Auslenkung dieses Hebelarms optisch gemessen. Dazu wird die Rückseite des Cantilever mit einem Laser beleuchtet und das reflektierte Licht von einem Photodetektor detektiert, der aus 4 Quadranten besteht und dadurch sensitiv für die Position des reflektierten Lichts, sprich für die Auslenkung des Hebelarms ist. Im sog. *Topographie-Modus* [24], das bedeutet, daß die Probenspitze nur wenige Nanometer über die Oberfläche bewegt wird, sind van der Waals-Kräfte für die Auslenkung des Cantilever verantwortlich. Ist die zu untersuchende Probe ein Mikrowellenbauelement, so kann man an die Meßspitze eine bekannte Wechselspannung anlegen und den Abstand Meßspitze–MMIC erhöhen, wodurch nur noch die

---

<sup>\*)</sup> Aus diesem Grund wird diese Methode hier bei den nicht-optischen Meßverfahren aufgeführt. Der benutzte Laser dient hier lediglich der Erzeugung der Sekundärelektronen, deren kinetische Energie wie beim REM gemessen wird. Es wird keine Modulation des Lasers gemessen, die durch das über das DUT propagierende Mikrowellensignal hervorgerufen wird.

Coulomb-Wechselwirkung zwischen DUT und Spitze dominiert. Diese Kraftwirkung variiert quadratisch mit der Spannung zwischen DUT und Meßspitze, was dazu führt, daß Mischterme im Frequenzspektrum entstehen, u.a. mit der Differenzfrequenz zwischen der Wechselfspannung der Meßspitze und der Wechselfspannung des Mikrowellensignals. Diese Differenzfrequenz kann detektiert und das unbekannte Hochfrequenzsignal (*HF-Signal*; *high frequency*) des MMIC extrahiert werden. Auf diese Weise sind schon Strukturen mit lateralen Abmessungen im sub- $\mu\text{m}$  Bereich und Sinussignale bis 104 GHz gemessen worden [24 - 26], doch darf nicht vergessen werden, daß a) die konstante Positionierung der Meßspitze nur wenige 10 nm über dem DUT äußerst diffizil ist und daß b) aufgrund dieser Nähe eine kapazitive Störung des Bauelements unvermeidbar ist.

#### Modulated Scattering:

Bei diesem Verfahren, welches man ins Deutsche mit "modulierte Streuung" übersetzen müßte, wird anstelle der passiven Meßspitze beim SFM eine aktive Dipol- oder Monopolantenne in das Nahfeld über der Mikrowellenschaltung gebracht [27]. Auf dieser Antenne befindet sich eine Diode, deren Bias-Spannung mit einem niederfrequenten Signal (*LF-Signal*; *low frequency*) moduliert wird. Diese Antenne ist ebenfalls wie beim SFM frei über dem DUT positionierbar. Das HF-Signal, welches über die Schaltung läuft, wird von der Antenne dergestalt beeinflusst, daß es nun als mit der Frequenz LF moduliertes HF-Signal sowohl zum Eingangsport der Schaltung zurückgestreut wird als auch zum Ausgangsport weiterläuft. Von beiden externen Anschlüssen gelangt es auf einen Quadraturmischer, wo es homodyn mit dem unmodulierten HF-Signal des Mikrowellensynthesizers gemischt wird. Aus der Amplitude und der Phase des zurückgestreuten bzw. des transmittierten modulierten Signals erhält man so Auskunft über die elektrischen Feldverteilung im DUT am Ort der Antenne. Dies bedeutet, daß diese Meßtechnik nur durchgeführt werden kann an Meßorten, die über eine direkte Zuleitung zu den Ein- bzw. Ausgängen der Schaltung verfügen. Messungen an einfachen Mikrostreifen- und Koplanarleitungen bis 13 GHz sind auf diese Art durchgeführt worden sowie zweidimensionale Feldverteilungsmessungen an einem Bandpaßfilter bei 10 GHz bzw. an einem Verstärker bei 13,5 GHz [28]. Die Ortsauflösung dieses Systems wird mit 100  $\mu\text{m}$  angegeben, was der Größe der ins Nahfeld des DUT gehaltenen Antenne entspricht. Außerdem leidet auch diese Meßtechnik unter dem Positionieraufwand, wie er z.B. beim SFM betrieben werden muß.

### Messung der Photoleitfähigkeit:

Ein Photoschalter ist prinzipiell so aufgebaut, daß eine elektrische Leitung auf einem Halbleitermaterial an einer Stelle unterbrochen ist. Beleuchtet man diesen Fleck jedoch mit Licht geeigneter Wellenlänge, so werden im Halbleitermaterial Elektronen-Loch-Paare erzeugt und der Stromkreis für die Dauer der Beleuchtung geschlossen. Benutzt man dazu Laser mit sehr kurzen Pulsen, so erzeugt man in der Leitung einen Strompuls von ähnlich kurzer Dauer. In einer Variante von Huang et al. [29] befindet sich ein solcher Schalter vor bzw. hinter der zu untersuchenden Schaltung unmittelbar auf demselben Substrat, so daß durch den kurzzeitig beleuchteten Eingangphotoschalter ein elektrischer Puls generiert wird, der nun durch das DUT wandert. Der Laserstrahl ist vorher in zwei Teilstrahlen aufgespalten worden, so daß der zweite Teilstrahl nach Durchlaufen einer geeigneten optischen Verzögerungsstrecke den Ausgangphotoschalter kurzschließt. Das Signal, welches inzwischen durch das DUT gelaufen ist, kann so detektiert werden und liefert die Streuparameter der untersuchten Schaltung ähnlich einem herkömmlichen Netzwerkanalysator<sup>\*)</sup>. Also wird auch hier an deren Ein- bzw. Ausgang und nicht schaltungsintern gemessen, und man hat zusätzlich entweder wie im oben erwähnten Fall das Schaltungsdesign um die monolithisch integrierten Photoschalter zu erweitern, oder man verbindet diese Schalter hybrid über Bonddrähte mit den Ein- bzw. Ausgängen der zu testenden Struktur [30]. Erst modifizierte Verfahren, bei denen ein Photoschalter in eine frei positionierbare Meßspitze integriert ist und über eine angeklebte Glasfaser angesteuert wird, ermöglichen schaltungsinterne Messungen bis 600 GHz [31 - 34]. Hierzu wird der Prober auf das DUT an unterschiedlichen Stellen aufgesetzt. Absolutmessungen des Mikrowellensignals konnten demonstriert werden [35], und die erreichte Empfindlichkeit liegt bei  $15 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  [36].

## 2.2 Optische Meßverfahren

---

<sup>\*)</sup> Aus diesem Grund wird diese Methode hier bei den nicht-optischen Meßverfahren aufgeführt. Der benutzte Laser dient hier lediglich der Erzeugung des elektrischen Pulses, aus dem anschließend die Streuparameter der Schaltung ähnlich einem NWA bestimmt werden. Es wird keine Modulation des Lasers gemessen, die durch das über das DUT propagierende Mikrowellensignal hervorgerufen wird.

Die Wechselwirkung von Licht mit Materie ist vielfältig und kann für unterschiedlichste Untersuchungsverfahren wie Photolumineszenz, Raman-Spektroskopie oder Ellipsometrie eingesetzt werden. Für die Mikrowellenmeßtechnik besonders interessant sind Phänomene wie der plasmaoptische, der elektroabsorptive oder der elektrooptische Effekt. Ganz allgemein zeichnen sich die optischen Meßverfahren durch ihre hohe Sensitivität aus sowie durch die Tatsache, daß sie vornehmlich im Zeitbereich arbeiten [23]. Das bedeutet, daß in der Fourier-Transformierten der Pulsantwort des DUT, die man mit einem optischen Abtastpuls erhält, alle Frequenzanteile des DUT enthalten sind. Somit kann auch das nichtlineare Verhalten der Teststruktur untersucht werden, wohingegen die Messung mit einem elektrischen Netzwerkanalysator, der im Frequenzbereich arbeitet, verlangen würde, die Meßfrequenz auf der Suche nach nichtlinearen Frequenzkomponenten kontinuierlich durchzustimmen. Durch die kommerzielle Verfügbarkeit von Lasersystemen mit Pulsbreiten nur noch weniger Femtosekunden sind Messungen mit Bandbreiten  $> 1$  THz möglich [37].

#### Elektrooptische Meßtechnik:

Dieses Meßprinzip wurde zu Beginn der 80er Jahre zum ersten Mal vorgestellt [38, 39] und seither kontinuierlich verbessert und erweitert. In der Regel nutzt es die induzierte optische Doppelbrechung aus, die in nicht-zentral-symmetrischen Kristallen durch ein anliegendes elektrisches Feld erzeugt wird (linearer elektrooptischer<sup>\*)</sup> oder Pockels-Effekt [40], siehe Kapitel 3.1). Als doppelbrechendes Medium kann dabei sowohl das Trägersubstrat des Bauelements selbst gewählt werden (*direkte Meßtechnik*) [37], sofern dieses den linearen elektrooptischen Effekt zeigt, oder es wird ein doppelbrechender Kristall, z.B.  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , KDP, BSO oder GaAs, als externe Sonde in das Nahfeld des DUT gebracht (*indirekte Meßtechnik*) [41 - 43]. Aufgrund der induzierten Doppelbrechung ändert ein polarisierter Laserstrahl, der in dieses Medium fokussiert wird, seine Polarisations Ebene abhängig von der am Meßpunkt herrschenden elektrischen Feldstärke. Diese Polarisationsmodulation wird durch die Verwendung je eines Polarisators vor und hinter dem DUT (man spricht dann von einer *Pockels-Zelle*, siehe Kapitel 3.1) in eine Intensitätsmodulation des Lichts transformiert und detektiert. Die transmittierte Lichtleistung  $I_{\text{aus}}$  ist proportional dem elektrischen Feld am Meßort [44]

---

<sup>\*)</sup> siehe Fußnote Seite 3

$$I_{aus} \propto \int_0^h E_z dz \propto U, \quad \text{Gl. 2.1}$$

wobei  $E_z$  die Feldstärkekomponente des elektrischen Feldes in Strahlrichtung  $z$  bedeutet und  $h$  die Wechselwirkungsstrecke des Lichts mit dem elektrischen Feld angibt. Dies ist aber nichts anderes als die elektrische Spannung  $U$  am Ort der Messung.

Als Lichtquelle dient in der Mehrzahl der Fälle ein gepulstes Lasersystem (modengekoppelte Nd:YAG-Laser, Ti-Saphir-Laser, in jüngerer Zeit auch gütegeschaltete Laserdioden) mit Pulsbreiten bis hinab in den fs-Bereich. Unter Anwendung der sog. *Sampling-Technik* (siehe Kapitel 4.2) wird hier das DUT stroboskopisch beleuchtet. Dies ermöglicht Zeitbereichsmessungen mit einer zeitlichen Auflösung im sub-ps-Bereich, was im Frequenzbereich mit Bandbreiten deutlich  $> 100$  GHz korrespondiert. Darüber hinaus ist es so möglich, das HF-Signal in niedrigere Frequenzregionen herunter zu transformieren (zu *samplen*) ähnlich der stroboskopischen Beleuchtung bei Plattenspieler vor dem Aufkommen der Compact Disc (CD).

Zunächst wurde diese Meßtechnik an ausgewählten Knotenpunkten innerhalb von Mikrowellenbauelementen angewendet, sowohl im Frequenzbereich [45] als auch im Zeitbereich [41]. Im Laufe der Zeit konnte diese Meßtechnik immer weiter verfeinert werden, so daß auch eindimensionale Messungen entlang koplanarer Leitungsstrukturen gelangen [37], zweidimensionale Messungen – das sog. *field mapping* – an solchen Strukturen [46] und schließlich auch zweidimensionale Messungen an MMICs, ebenfalls sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich [16, 47]. Vergleiche mit NWA-Untersuchungen haben belegt, daß die elektrooptische Meßtechnik in der Lage ist, Leitungs- wie auch Schaltungsparameter quantitativ zu bestimmen [48 - 52]. Ebenfalls ist mit dieser Methode die Anregung parasitärer Moden in Koplanarleitungen analysiert worden [53, 54] oder das Hochfrequenzverhalten nichtlinearer Transmissionsleitungen [55, 140 - 142].

Diese Leistungsfähigkeit der elektrooptischen Meßtechnik zeigt sich auch in der Fülle der veröffentlichten Ergebnisse. Studiert man diese, so arbeiten derzeit mehr als 30 Gruppen weltweit mit dieser Technik bzw. an Verbesserungen des elektrooptischen Sampling [22]. Kalibrierungsvorschriften und Untersuchungen zur quantitativen Auswertung der elektrooptisch gewonnenen Daten existieren [56 - 60]. Bzgl. der Frequenzbandbreite, der Empfindlichkeit oder des räumlichen Auflösungsvermögens werden Werte weit über 100 GHz für die Bandbreite und Empfindlichkeiten bis hinab zu 224

$nV/\sqrt{\text{Hz}}$  genannt [52, 61 - 63] sowie eine Ortsauflösung besser  $0,5 \mu\text{m}$  [16, 64], was der beugungsbedingten Grenze der elektrooptischen Meßtechnik entspricht. Es häufen sich in der Literatur auch Beiträge, in denen dieses Verfahren zur Detektion freistrahrender Mikrowellen bis in den THz-Bereich eingesetzt wird [65 - 68].

Es sei darauf hingewiesen, daß für die elektrooptische Meßtechnik nicht zwangsläufig ein gepulstes Lasersystem vonnöten ist. Es existieren auch Systeme, bei denen ein bzw. zwei kontinuierlich emittierende Laser als Lichtquelle eingesetzt werden [19, 20, 44, 69]. Auf diese Möglichkeiten wird im vierten Kapitel ausführlicher eingegangen werden, da diese Änderungen Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind.

#### Ladungsdichtemessung:

Der plasmaoptische Effekt betrachtet die Wechselwirkung einer elektromagnetischen Welle mit den freien Ladungsträgern in Halbleitern, wobei die Betonung auf *freien* Ladungsträgern im Gegensatz zum Pockels-Effekt liegt (siehe Kapitel 3.1). Er bewirkt, daß sich der komplexe Brechungsindex durch die Änderung der freien Ladungsträgerkonzentration ändert und ist besonders in Silizium von Bedeutung [70]. Zu solchen Änderungen der Ladungsträgerkonzentration kommt es z.B. in vielen aktiven elektronischen Bauelementen, bei denen das Spannungssignal mit dieser korreliert ist. Für die Meßtechnik bedeutet dies, daß ein Laserstrahl, der auf das Bauelement fällt, seine Phase aufgrund des geänderten Brechungsindex ändert. Betrachtet man den reflektierten Strahl, nachdem er einen polarisierenden Strahlteiler passiert hat, so stellt man eine Intensitätsänderung fest, die proportional zur Änderung der freien Ladungsträgerdichte am Meßort ist [70]. Wie bei der elektrooptischen Meßtechnik ist auch hier das räumliche Auflösungsvermögen beugungsbeschränkt, also durch die verwendete Wellenlänge des Lasers gegeben, sowie die Meßbandbreite abhängig von der Pulsdauer des verwendeten Lasers. Experimentelle Ergebnisse mit dieser Methode zeigen eine Empfindlichkeit von wenigen  $\mu V/\sqrt{\text{Hz}}$  [71].

#### Optische Anregung der zweiten Harmonischen:

Die elektrooptische Meßtechnik erfordert bei zentralsymmetrischen Substraten wie etwa Silizium die Verwendung eines externen Kristalls, welcher den Pockels-Effekt zeigt (indirekte Meßtechnik). Um dies zu umgehen, besteht die Möglichkeit, den nichtlinearen Effekt der Frequenzverdopplung (*SHG*; *second*



*harmonic generation*) z.B. in Silizium zu nutzen. Darunter ist zu verstehen, daß in zentralsymmetrischen Kristallen abhängig von der Polarisierung und der Orientierung des eingestrahnten Lasers zur optischen Achse des Kristalls eine Oberwelle erzeugt wird, deren Frequenz doppelt so groß ist wie die des eingestrahnten Lichts. Die Intensität dieser Oberwelle ist proportional zur Feldstärke am Meßort und kann vom reflektierten Licht mit der ursprünglichen Frequenz durch einen Monochromator separiert werden. Nahata et al. [72] detektierten auf diese Weise einen elektrischen Puls, der entlang einer Koplanarleitung auf Silizium propagierte, mit einer Halbwertsbreite von 1 ps und einer Empfindlichkeit von  $100 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, daß auch elektroabsorptive Effekte wie die exzitonische Elektroabsorption [73] oder der quantenunterstützte Stark-Effekt bereits für die Hochfrequenzmeßtechnik benutzt wurden [74]. Ebenso existieren Arbeiten, in denen der photoelastische Effekt eingesetzt wurde, also die Messung akustischer Wellen [16], oder das Phase Space Absorption Quenching, bei dem die Variation des Reflexionskoeffizienten aufgrund der unterschiedlichen Ladungsträgerkonzentration entlang der propagierenden Mikrowelle detektiert wird [75].

In der folgenden Tabelle sind die Kenndaten der soeben vorgestellten, kontaktlos arbeitenden Hochfrequenzmeßverfahren noch einmal gegenübergestellt. Die darin enthaltene letzte Spalte faßt in wenigen Worten nochmal die jeweiligen meßtechnischen Besonderheiten zusammen [23]. Es ist offensichtlich, daß vorerst das Rasterelektronen- bzw. das Rasterkraftmikroskop das Maß aller Dinge in Hinblick auf das räumliche Auflösungsvermögen darstellen. Dem ist speziell im ersteren Fall die begrenzte Meßbandbreite sowie das teure Equipment eines REM entgegenzuhalten, was diese Methode als nicht allzu vorteilhaft erscheinen läßt. Gegen das Verfahren des *modulated scattering* spricht seine geringe Ortsauflösung. Auch liegen bislang nur Veröffentlichungen mit Meßergebnissen bis zu Frequenzen von 13,5 GHz vor.

Bei den optischen Meßverfahren hat sich ganz eindeutig die elektrooptische Meßtechnik durchgesetzt. Dies liegt vor allem begründet in der Verfügbarkeit von Kurzpulslasersystemen und der damit verbundenen hohen Meßbandbreite. Die mit ihr erzielten Ergebnisse belegen, daß sie trotz der Fülle der verschiedenen Meßverfahren auch weiterhin als eine vielversprechende Methode für ein- und zweidimensionale Feldverteilungsmessungen in MMICs bezeichnet werden darf. Ihr ist daher der

Großteil der beiden nun folgenden Kapitel gewidmet, zunächst in Form der Behandlung der physikalischen und anschließend der technischen Grundlagen. Da aber der ihr zugrunde liegende Pockels-Effekt eine weniger intensive optoelektronische Wechselwirkung darstellt als z.B. der Franz-Keldysh-Effekt, und da für die elektrooptische Meßtechnik stets eine Pockels-Zelle in den Meßaufbau implementiert werden muß zur Transformation der nicht direkt meßbaren Polarisationsmodulation in eine meßbare Intensitätsmodulation, werden entsprechend die Vor- und Nachteile dieses Meßverfahrens erörtert und Alternativen auf physikalischer wie auch auf technischer Seite vorgestellt.

Technik	Empfindlichkeit	Störung des DUT	räumliche Auflösung	Meßbandbreite	Besonderer Aufwand
REM		Aufladung des DUT	$\ll 1 \mu\text{m}$	24 GHz [22]	Vakuumkammer
Photoemission		hohes elek. Feld	$\approx 0,5 \mu\text{m}$ [23]	abh. von Pulsdauer	Vakuumkammer
SFM		kapazitiver Einfluß	160 nm	104 GHz [24]	Äquidistante Positionierung,
mod. scattering		groß	100 $\mu\text{m}$ [28]	13,5 GHz [28]	Positionierung
Photoleitfähigkeit	$15 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ [36]	gering	$< 1 \mu\text{m}$	600 GHz [31]	
eo. Meßtechnik	$224 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ [52]	gering	$\approx 0,5 \mu\text{m}$ [16]	$> 1 \text{ THz}$ [65]	Externer Kristall beim indir. Verf.
Ladungsdichte	$\approx 10 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ [71]	gering	$\approx 0,5 \mu\text{m}$	abh. von Pulsdauer	
Frequenzverdopplung	$100 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ [72]	gering		$\approx 400 \text{ GHz}$	

*Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten der zuvor vorgestellten kontaktlosen Hochfrequenzmeßverfahren*