

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die immer höheren Anforderungen an die Leistungsfähigkeit elektronischer Komponenten setzen den Trend zu immer kleineren Strukturbreiten sowie steigenden Arbeitsfrequenzen der mikroelektronischen Schaltkreise fort. Diese Entwicklung führt die bisher auf dem Gebiet der Funktions- und Fehleranalyse integrierter Schaltungen eingesetzten Testtechniken mehr und mehr an ihre Grenzen. Da sich die Mikroelektronik momentan am Übergang zur Nanoelektronik befindet, bietet es sich an, auf diesem Gebiet die in der Nanotechnologie eingesetzten Rastersondenverfahren zu verwenden. Dabei könnte der Bereich der Messung von Austrittsarbeiten, elektrischen Potenzialen und dynamischen Spannungen von der elektrischen Kraftmikroskopie (EKM) abgedeckt werden. Nachdem erste Untersuchungen bezüglich der elektrischen Ortsauflösung, Spannungsauflösung und Zeitauflösung der EKM vielversprechende Resultate erzielten, wurde eine Vielzahl von Messverfahren und –anordnungen zur Anpassung der EKM an die Gegebenheiten der Funktions- und Fehleranalyse integrierter Schaltungen entwickelt und deren Funktionsfähigkeit anhand von Messungen nachgewiesen. Bisher fehlte allerdings ein genereller Überblick über die Möglichkeiten der EKM sowie eine systematische Untersuchung des EKM-Messsignals hinsichtlich Abhängigkeiten von der Messsonden-Probenanordnung. Ziel dieser Arbeit war es daher zum einen, erstmalig einen umfassenden Überblick über das Prinzip sowie die charakteristischen Eigenschaften nahezu aller heute bekannten EKM-Messverfahren und –anordnungen zu schaffen, und zum anderen, die Zusammensetzung des EKM-Messsignals bei Messungen an Submikrometerleitungen zu analysieren.

Im ersten Teil der Arbeit wurde der Überblick über die EKM-Messverfahren und –anordnungen realisiert. Dabei fand eine Einordnung der Messanordnungen nach Einsatzgebiet und anschließend nach Messprinzip statt. Auf diese Weise ist nun ein schnelles Auffinden von Messanordnungen, welche für eine bestimmte Anwendung in Frage kommen, gewährleistet. Der nächste Schritt wäre die Integration möglichst vieler der vorgestellten Messanordnungen in ein universell einsetzbares EKM-Testsystem. Durch die Implementierung der in dieser Arbeit erarbeiteten Ordnungsstruktur könnte dann schnell und effizient die für eine bestimmte Anwendung optimale Messanordnung ausgewählt werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde anhand von Messungen, Berechnungen und Simulationen die Abhängigkeit des EKM-Messsignals von der Probengeometrie untersucht. Als erstes wurden dabei die EKM-Leistungsparameter betrachtet. Hier ergab sich, dass die elektrische Ortsauflösung sowie die Spannungsauflösung der

EKM bei Strukturbreiten unterhalb von 500 nm nicht als unabhängig von der Strukturbreite angesehen werden können. Im Fall der Spannungsauflösung hat dies zur Folge, dass bei Messungen an unterschiedlichen Strukturbreiten kein direkter Rückschluss vom EKM Messsignalpegel auf die Testpunktspannung möglich ist. Wird z.B. an einer 100 nm breiten Leitung ein doppelt so hoher Signalpegel gemessen wie an einer 500 nm breiten Leitung, so kann nicht mehr wie bisher angenommen von einem doppelt so hohen Spannungspegel auf der 100 nm Leitung gegenüber der 500 nm Leitung ausgegangen werden. Da die Spannungsauflösung an einer 100 nm Leitung nur noch ungefähr dem halben Wert der Spannungsauflösung an einer 500 nm Leitung entspricht, befindet sich in Wirklichkeit ein 4-fach höherer Spannungspegel auf der 100 nm Leitung. Ein Vergleich von EKM-Messungen, welche an unterschiedlich breiten Submikrometerleitungen erfolgten, ist daher nur mit Berücksichtigung des Abhängigkeitsverlaufs der Spannungsauflösung von der Strukturbreite möglich. Dieser Abhängigkeitsverlaufs wurde für zwei kommerziell erhältliche EKM-Standardmesssonden anhand von Messungen und Simulationen ermittelt. Für die Zukunft ist ein Einbinden des bestimmten Abhängigkeitsverlaufs in die Software eines EKM-Testsystems denkbar. Auf diese Weise könnte das Programm über die normalerweise im Vorfeld durchgeführte Topographiemessung die Strukturbreiten der signalführenden Leitungen bestimmen und anschließend das EKM-Messsignal entsprechend der für die jeweilige Strukturbreite geltenden Spannungsauflösung wichten. Damit wäre wieder ein direkter Vergleich von EKM-Messergebnissen, die an unterschiedlichen Strukturbreiten erzielt wurden, möglich.

Als nächstes fand eine Untersuchung der Beeinflussung des EKM-Messsignals durch Übersprechen statt. Dabei wurde evaluiert, unter welchen Voraussetzungen ein Übersprechen auftreten kann, wie die Messsignalverfälschung aussieht und welche Möglichkeiten es zur Bestimmung des eigentlichen Nutzsignals aus dem verfälschten Messergebnis gibt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf Messungen, welche mit der heterodynischen Mischtechnik erfolgen. Hier kommt es zu einer starken Beeinflussung des Messsignals durch Übersprechen, wenn neben der interessierenden Leitungsspannung weitere signalführende Leitungen vorhanden sind, die eine Komponente bei der Frequenz der interessierenden Leitungsspannung besitzen. In diesem Fall kann es zu extremen Signalverzerrungen kommen, welche keine direkte Interpretation des EKM-Messsignalverlaufs mehr zulassen. Aus diesem Grund wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, welches auf der Nachbildung eines bekannten, unverfälschten Messsignalverlaufs basiert. Mit Hilfe dieses Berechnungsmodells kann der Verlauf des EKM-Messsignals, welcher sich bei einer Linienrasterung über parallele Submikrometerleitungen mit phasenverschobenen Spannungen ergibt, berechnet werden. Es ist somit möglich zu überprüfen, ob die Leitungsspannungen den erwarteten Werten entsprechen. Nachteil des Berechnungsmodells ist die

Notwendigkeit, vor jeder Berechnung eine Referenzmessung durchzuführen. Ein sinnvoller nächster Schritt wäre daher die Integration der Abhängigkeit des EKM-Messsignals von der Strukturbreite sowie vom Messspitzen-Probenabstand in das Berechnungsmodell. Damit wäre für jede neue Messsonde nur noch eine einmalige Referenzmessung an einer bekannten Teststruktur erforderlich.

Zur Minimierung des Übersprechens im EKM-Messsignal wurden verschiedene Möglichkeiten diskutiert. Zum einen kann die Ursache, also die elektrische Kraftwechselwirkung zwischen dem Messsondenhebelarm und der Probe, durch eine Modifizierung der Messsondengeometrie oder des Messsondenmaterials verringert werden. Ideal wäre hier eine Messsonde ohne Hebelarm oder eine Messsonde mit einem elektrisch nichtleitenden Hebelarm, welche nur eine sehr dünne elektrische Zuleitung zur elektrisch leitfähigen Messspitze besitzt. Zum anderen kann der Hebelarmeinfluss mit Hilfe einer geschickten Messanordnung aus dem EKM-Messsignal entfernt werden. Da der Hebelarmeinfluss sehr unempfindlich gegenüber Änderungen des Messspitzen-Probenabstands ist, während das Nutzsignal eine sehr starke Abhängigkeit aufweist, kann durch Messung in 2 Höhen und anschließende Differenzbildung der Messergebnisse der Hebelarmeinfluss eliminiert werden. Diese Methode wurde bereits in der Vergangenheit vorgestellt, allerdings nur für den Spezialfall von Messungen mit phasengleichen Signalen. Es wurde daher eine Verallgemeinerung dieser Methode vorgenommen, so dass jetzt auch Messungen mit phasenverschobenen Signalen bearbeitet werden können. Eine dritte Möglichkeit, das unverfälschte Messsignal zu generieren, ergibt sich, wenn bis auf die interessierende Leitungsspannung alle anderen Leitungsspannungen bekannt sind. Dann kann mit Hilfe des Berechnungsmodells die Amplitude und Phase des eigentlichen Nutzsignals berechnet werden.

Aufgrund des Hebelarms der Messsonde ergeben sich verschiedene Probleme. So schränkt dieser den Testzugriff in gehäuste bzw. gebondete integrierte Schaltungen erheblich ein und ist für das Übersprechen im EKM-Messsignal verantwortlich. Es fanden daher erste elektrische Spannungsmessungen mit einem Nadelsensor, bestehend aus einem quaderförmigen Schwingquarz und einer daran befestigten Messspitze statt, welcher keinen Hebelarm besitzt. Die Messungen ergaben, dass mit dem Nadelsensor ebenfalls kontaktlos elektrische Spannungen ermittelt werden können. Allerdings scheint die Spannungsauflösung deutlich geringer als die der EKM-Standard-Messsonden zu sein. So war es lediglich möglich, Spannungen im Voltbereich nachzuweisen. Es muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass hier nur erste orientierende Untersuchungen durchgeführt worden sind. Die Erforschung des Nadelsensors als alternative Messsonde für elektrische Spannungsmessungen innerhalb mikroelektronischer Schaltungen steht also erst am Anfang. Es ist durchaus denkbar, die Spannungsauflösung durch Messanordnungen, welche an die klassische

EKM angelehnt sind, deutlich zu erhöhen.

Die Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung und Spannungsauflösung der EKM hat gezeigt, dass Messungen mit kommerziellen EKM-Standardmesssonden an Strukturbreiten unterhalb von 100 nm problematisch sind. Deshalb wurde mit einem selbstentwickelten Simulationsprogramm die Abhängigkeit dieser beiden Leistungsparameter von der Messspitzengeometrie betrachtet, um Aussagen bezüglich einer möglichen Optimierung der Messspitzengeometrie treffen zu können. Als Ergebnis dieser Untersuchungen kann festgehalten werden, dass keine ideale Messspitzengeometrie, welche für EKM-Messungen an beliebigen Strukturen immer das optimale Verhältnis zwischen elektrischer Ortsauflösung und Spannungsauflösung bietet, existiert. Es kann aber für eine gegebene Messanordnung, bei der die erforderliche Spannungsauflösung und die notwendige elektrische Ortsauflösung bekannt sind, eine optimierte Messspitze entworfen werden. Das Hauptproblem der Optimierung ergibt sich aus der Tatsache, dass eine Verbesserung der elektrischen Ortsauflösung in der Regel eine Verschlechterung der Spannungsauflösung bewirkt. Dieser Problematik kann über die Verwendung anderer Messsondenhebelarme, welche ein verbessertes Schwingungsverhalten aufweisen, etwas entgegen gewirkt werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Spannungsauflösung zu erhöhen und den Verlust an Spannungsauflösung, der durch die Optimierung der Messspitzengeometrie hinsichtlich einer höheren elektrischen Ortsauflösung entsteht, zu kompensieren. Allerdings ist bei der Veränderung der Hebelarmgeometrie zur Optimierung des Schwingungsverhaltens zu beachten, dass der Störeinfluss des Hebelarms evtl. deutlich vergrößert wird. Außerdem kann aufgrund einer möglicherweise vergrößerten Schwingungsamplitude der Messsonden-Probenabstand eventuell nicht mehr hinreichend klein gewählt werden. Dadurch entstünde dann ein Verlust an Spannungsauflösung, der unter Umständen größer ist als der Gewinn durch das optimierte Schwingungsverhalten. Für weitergehende Aussagen ist eine umfassende Finite-Elemente-Simulation erforderlich, welche die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der kompletten EKM-Messsonde mitberücksichtigt.

Im dritten Teil dieser Arbeit wurde untersucht, inwieweit die heterodyne Mischtechnik auch zur Bestimmung digitaler Probenspannungen eingesetzt werden kann. Hintergrund der Untersuchungen war, dass die heterodyne Mischtechnik gegenüber der bisher zur Messung digitaler Signale eingesetzten Samplingtechnik einige Vorteile bietet. Zu nennen ist hier u.a. die Fähigkeit, 2-dimensionale Flächenrasterungen zur Signalpfadverfolgung durchzuführen, der relativ einfache Messaufbau sowie eine hohe Messgeschwindigkeit. Für Messungen, bei denen nicht der exakte zeitliche Verlauf des digitalen Signals, sondern nur die Bitkombination von Interesse ist, käme prinzipiell auch die Anwendung der heterodynen Mischtechnik in

Frage. Anhand von Berechnungen und experimentellen Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass über die Detektion der Grundwellenamplitude und -phase bis auf die Fälle, bei denen sich mehrdeutige Messergebnisse ergeben, die Bitkombination des periodischen digitalen Signals ermittelt werden kann. Tritt Mehrdeutigkeit auf, müssen zusätzlich zur Grundwelle Oberwellen des Signals betrachtet werden. Nachteil der Grundwellendetektion ist die Notwendigkeit, vor der eigentlichen Messung eine Referenzbitfolge zu detektieren. Es ist somit erforderlich, an den Testpunkt eine bekannte Bitfolge anzulegen. Da jedoch zweifelsohne Messanordnungen existieren, bei denen kein Referenzsignal an den Testpunkt angelegt werden kann, wurde untersucht, ob es möglich ist, die Grundwelle des digitalen Signals als Referenzsignal zu verwenden. Dabei ergab sich, dass über die Bestimmung der Amplitudenverhältnisse sowie Phasenverschiebungen zwischen verschiedenen Oberwellen und der als Referenz dienenden Grundwelle die Form des digitalen Signals bestimmt werden kann, nicht jedoch die genaue Bitkombination. So wird z.B. erkannt, dass in einer 4-Bitfolge ein Bit gesetzt ist, allerdings nicht welches. Diese Mehrdeutigkeit ist aber kein spezielles Problem der EKM, sondern tritt auch bei jeder anderen Messtechnik auf, welche auf keinen festen Bezugspunkt zurückgreifen kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der EKM sehr leistungsfähige Testsysteme für die Funktions- und Fehleranalyse integrierter Schaltungen realisierbar sind. So existieren zahlreiche Messanordnungen, mit denen sich die EKM an unterschiedlichste Anforderungen anpassen lässt. Für die Zukunft ist allerdings noch die Integration möglichst vieler dieser Messanordnungen in ein einziges EKM-Testsystem erforderlich, um ein umfassendes elektrisches Testen zu ermöglichen. Eine gute Ausgangsbasis für die Realisierung eines solchen Testsystems wurde mit dem in dieser Arbeit erstellten Überblick über die verschiedenen EKM-Messanordnungen gegeben. Da die Rastersondenverfahren ähnliche Eigenschaften besitzen, ist im nächsten Schritt die Integration anderer Messsonden zur Strommessung oder zur Leistungsmessung in das Testsystem denkbar. Auf diese Weise könnten mit einem einzigen Testsystem unterschiedlichste physikalische Größen ermittelt werden. Eine weitere große Aufgabe für die Zukunft wird in der Entwicklung leistungsfähiger Simulationsprogramme zur Berechnung des EKM-Messsignals liegen. So wurde in dieser Arbeit bereits gezeigt, dass oftmals aufgrund der Abhängigkeit des Messsignals von der Probengeometrie sowie anderen Probenspannungen kein einfacher Rückschluss auf die Testpunktspannung möglich ist. Die zu entwickelnden Simulationsprogramme müssen daher die genaue Berechnung der Beeinflussung des Messsignals durch die Probengeometrie sowie durch andere Störgrößen erlauben und die Bestimmung des eigentlichen Nutzsignals aus dem Messsignal ermöglichen.