

1. Einleitung

Der wissenschaftliche Fortschritt bzw. der Entwicklungsstand der Menschheit ist geprägt durch das Verständnis von immer kleineren Strukturen. Der heute erreichte Kenntnisstand, welcher systematische Forschungen und Entwicklungen im tiefen Submikrometerbereich ermöglicht, erfordert dabei eine drastische durch Vernetzung gekennzeichnete Umorientierung der Forschungslandschaft. So wachsen im Bereich kleinster Strukturen die bisher klar voneinander abgegrenzten Natur- und Ingenieurwissenschaften zusammen und bilden die sogenannte Nanotechnologie, welche beliebige chemische, biologische sowie technische Strukturen im Bereich von 1 nm bis ca. 100 nm umfasst [Stix 2001]. Entsprechend weit ist auch das Feld der Forschung, welches sich von der Erstellung neuer elektronischer Strukturen und Datenspeicher über die Synthese maßgeschneiderter Werkstoffe bis hin zu Entwicklungen im medizinisch-biologischen Bereich erstreckt. In der Bundesrepublik Deutschland wurden daher 6 Kompetenzzentren der Nanotechnologie gegründet, in denen Wissenschaftler aus den verschiedenen Disziplinen zusammenarbeiten, um einen schnellen Informationsaustausch zu gewährleisten.

Die Nanotechnologie kann in die Bereiche Nanowissenschaft, Nanofabrikation und Nanotechnik aufgliedert werden [Whitesides und Love 2001]. Die Nanowissenschaft umfasst den Bereich der Grundlagenforschung und sorgt damit für das theoretische Hintergrundwissen, also die Erklärung experimentell entdeckter Effekte sowie die Herleitung von neuen Gesetzmäßigkeiten. Die Nanofabrikation ist für die Herstellung der benötigten Nanostrukturen zuständig. Hier unterscheidet man zwischen den Top-Down- und den Bottom-Up-Verfahren [Roukes 2001]. Bei den Top-Down-Verfahren werden die Nanostrukturen durch Verkleinerung größerer Materialmengen erzeugt. Das klassische Beispiel eines Top-Down-Verfahrens bildet die Produktion mikroelektronischer Schaltkreise. Dabei werden mittels der Fotolithographie [Whitesides und Love 2001] durch Belichtungs- und anschließende Ätz- bzw. Aufwuchsprozesse aus einem makroskopischen Siliziumwafer immer feinere Strukturen erzeugt. Die Bottom-Up-Verfahren gehen den umgekehrten Weg. Hier werden basierend auf der Selbstorganisation von Atomen größere Strukturen erzeugt. Ein Beispiel für ein Bottom-Up-Verfahren ist die Herstellung von sogenannten Quantenpunkten. Dabei werden einzelne Atome oder Moleküle zu Nanokristallen zusammengesetzt, welche abhängig von ihrer Größe mit einer ganz bestimmten Wellenlänge fluoreszieren. Derartige Quantenpunkte werden bereits heute zur Markierung spezifischer Substanzen im medizinisch-biologischen Bereich eingesetzt [Alivisatos 2001]. Es spricht vieles dafür, dass im Bereich der Nanotechnologie die Bottom-Up-Verfahren von Vorteil sind, da sich mit keinem Top-Down-Verfahren schnell und ohne großen Aufwand Nanostrukturen aus beliebigen

Material herstellen lassen [Whitesides und Love 2001]. Allerdings mangelt es momentan noch an Möglichkeiten, komplexere Strukturen mit Hilfe von Bottom-Up-Verfahren zu erstellen. So lassen sich zwar Nanoröhren und Quantenpunkte mit Wachstumsprozessen schnell und kostengünstig erzeugen, jedoch ist es bisher nicht möglich, diese ohne großen Aufwand zu komplexen Strukturen äquivalent einem elektrischen Schaltkreis zusammensetzen [Lieber 2001]. Das letzte Teilgebiet der Nanotechnologie, die Nanotechnik ist der am wenigsten fortentwickelte Bereich. Die Nanotechnik setzt die im Bereich der Nanowissenschaft ausgearbeiteten Komponenten in praktische Anwendungen um. Hier liegt die Schwierigkeit in der Kommunikation zwischen den Nanostrukturen und der Makrowelt [Roukes 2001]. Es gibt zwar eine Vielzahl von Nanostrukturen mit erstaunlichen Eigenschaften, jedoch ist die Anbindung dieser Strukturen an die Makrowelt problematisch. Beispiele für eine gelungene Anbindung sind Vakuumröhren-Lampen der Firma ISE Electronics sowie Flachbildschirme von Samsung, welche Nanoröhren zur Lichterzeugung verwenden [Collins und Avouris 2001]. Beide Produkte befinden sich derzeit im Prototypenstadium.

Die Entwicklung der Nanotechnologie ist untrennbar mit den sogenannten Rastersondenmikroskopen verbunden. Diese, fast alle auf dem Rastertunnel- [Binnig und Rohrer 1982] und dem Rasterkraftmikroskop [Binnig et al. 1986] basierenden Verfahren, eignen sich nicht nur zur Messung verschiedenster physikalischer Größen mit Ortsauflösungen bis in den Subnanometerbereich hinein [Gießibl 2001], sondern können auch im Bereich der Nanofabrikation verwendet werden, um z.B. Nanopartikel zu verschieben bzw. in ganz bestimmten Mustern anzuordnen [Stix 2001]. Eine Anwendung, welche diese beiden Möglichkeiten nutzt, ist der sogenannte Millipede, ein Feld von 32 mal 32 Rastersondenspitzen, welches digitale Bits auf ein Kunststoffblatt schreiben und anschließend wieder auslesen kann [VDI 2000, Stix 2001]. Mit diesem Verfahren sollen Speicherdichten, welche über dem 20fachen der gegenwärtig üblichen Werte liegen, erreichbar sein. Allen Rastersondenmikroskopen ist gemeinsam, dass sie eine im Idealfall atomar feine Messspitze besitzen, welche mit der zu untersuchenden Struktur in irgendeiner Weise wechselwirkt. Die Art des ausgenutzten Wechselwirkungsmechanismus wird in der Bezeichnung des Rastersondenmikroskops angegeben. So bildet z.B. bei einem Rastertunnelmikroskop der Tunnelstrom und bei einem Atomkraftmikroskop die atomare Kraftwechselwirkung zwischen der Messspitze und der Probe die Messgröße.

Ein neues Einsatzgebiet für die Rastersondenmikroskope ergibt sich im Bereich der Mikroelektronik. Die stetig steigenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit elektronischer Schaltkreise erfordern immer kleinere und schnellere Strukturen, welche in naher Zukunft in den Bereich der Nanotechnologie fallen werden [Knapp 2000, ITRS 2001]. Aus diesem Grund bietet es sich an, die Messverfahren der

Nanotechnologie auch zur Funktions- und Fehleranalyse integrierter Schaltungen zu verwenden. Insbesondere auch deshalb, weil die bisher auf diesem Gebiet eingesetzten Testtechniken sich inzwischen als immer weniger geeignet erweisen, an aktuellen mikroelektronischen Strukturen zu messen [Wittpahl 2000]. So sind berührungsbehaftete Messungen mittels mechanischer Messnadeln, welche auf speziell im Schaltungslayout vorgesehenen Messpunkten abgesetzt werden, aufgrund der Komplexität heutiger Schaltkreise und der damit verbundenen inakzeptabel hohen Zahl erforderlicher Messpunkte nicht mehr vertretbar. Außerdem ist es bei den inzwischen erreichten Arbeitsfrequenzen der integrierten Schaltungen nicht mehr auszuschließen, dass eine unzulässige Beeinflussung der Schaltungsfunktionen durch die Messnadeln erfolgt [Schumacher und Strid 1990]. Berührungsbehaftete Testtechniken sind daher für den Schaltungstest nur noch in Ausnahmefällen einsetzbar. Aber auch die bekannten kontaktlosen Testtechniken wie der Elektronenstrahltest [Menzel und Kubalek 1983] oder die elektrooptische Testtechnik [Valdmanis et al. 1982, Mertin 1994] sind immer weniger in der Lage, schaltungsinterne Messungen mit der benötigten Orts- und Zeitauflösung durchzuführen [Leyk 1998, Wittpahl 2000].

Die Rastersondenverfahren besitzen außer ihrer hohen Ortsauflösung noch weitere Eigenschaften, die sie für die Funktions- und Fehleranalyse integrierter Schaltungen interessant machen. Ein großer Vorteil gegenüber den eben erwähnten Testtechniken ist die enorme Vielfältigkeit der Rastersondenverfahren. So ist es ohne große Veränderungen des Messaufbaus möglich, unterschiedlichste physikalische Größen wie z.B. elektrische Spannungen, Ströme, Temperaturen oder Topographien zu detektieren. Auch sprechen der relativ geringe apparative und damit auch finanzielle Aufwand, die einfache Handhabung sowie die Möglichkeit, unter Raumbedingungen messen zu können, für die Rastersondenverfahren. Aufgrund dieser Vorteile wird momentan versucht, die Rastersondenverfahren für die Funktions- und Fehleranalyse mikroelektronischer Schaltungen nutzbar zu machen bzw. diese an die speziellen Gegebenheiten dieses Einsatzgebietes anzupassen.

Ein Rastersondenverfahren, welches die oben genannten Testtechniken in Zukunft ersetzen könnte, ist die elektrische Kraftmikroskopie (EKM). Wie der Name es schon vermuten lässt, wird dabei die elektrische Kraftwechselwirkung zwischen der Messspitze eines Rasterkraftmikroskops und der Probe ausgenutzt, um Informationen über elektrische Spannungen und Potenziale zu erhalten. Das Leistungsspektrum der EKM erstreckt sich von der Messung von Austrittsarbeiten der Probenoberfläche [Sommerhalter 1999] über elektrostatische Messungen [Jacobs et al. 1997] bis hin zur Detektion von dynamischen elektrischen Spannungen [Böhm et al. 1994]. Besondere Anforderungen an die EKM stellt hier die dynamische Spannungsmessung, welche nicht nur eine hohe Ortsauflösung sowie Messempfindlichkeit benötigt, sondern auch

noch eine extrem hohe Zeitauflösung. Dass die EKM diesen Anforderungen genügen kann, haben erste Messungen an 75 nm breiten Leitungsstrukturen [Wittpahl 2000, Behnke et al. 2000 (a)] sowie die Detektion von Wechselfspannungen im 3-stelligen GHz-Bereich gezeigt [Leyk et al. 1998].

In der Vergangenheit wurden für die verschiedenen Einsatzgebiete der EKM diverse Messverfahren- und -anordnungen entwickelt. Aufgrund der Vielzahl von möglichen EKM-Messanordnungen sowie der Praxis, in den Veröffentlichungen nur ein spezielles Teilgebiet der EKM zu betrachten, ist es schwierig, einen guten Überblick über das komplette Leistungsspektrum der EKM zu erhalten. Ein solcher Überblick wäre aber in vielen Fällen sehr hilfreich, da aufgrund des überall geltenden Grundprinzips in unterschiedlichen Teilgebieten der EKM ähnliche Probleme auftauchen. In Kapitel 2 dieser Arbeit werden daher das Prinzip sowie die Charakteristika nahezu aller heute bekannter EKM-Messverfahren und -anordnungen beschrieben. Mit Hilfe dieses Überblicks können dann die im weiteren Verlauf der Arbeit erzielten Resultate auch für andere Teilgebiete diskutiert werden.

Der Fokus der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen liegt auf der dynamischen EKM-Spannungsmessung an Submikrometerleitungen. Für die dynamische Spannungsmessung mittels EKM wurden zahlreiche Messanordnungen entwickelt und anhand sporadischer Messungen deren Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Jedoch standen systematische Untersuchungen zur Einschätzung der EKM-Leistungsfähigkeit sowie der Aussagekräftigkeit von EKM-Messergebnissen, welche an Submikrometerstrukturen erzielt werden, bisher noch aus. Die Ursache für die Vernachlässigung dieser Untersuchungen lag in der Konzentration der bisherigen Forschungen auf Messungen im Höchsthfrequenzbereich.

In Kapitel 3 werden die bei den Messungen verwendeten Submikrometer-Teststrukturen sowie EKM-Messsonden beschrieben und das genutzte EKM-Testsystem erläutert.

Eine systematische Untersuchung der Abhängigkeit des EKM-Messsignals von der Strukturweite der Probe findet in Kapitel 4 anhand von experimentellen Ergebnissen sowie theoretischen Überlegungen statt. Darüber hinaus erlaubt die Entwicklung eines Simulationsprogramms zur elektrischen Kraftwechselwirkung weitergehende Aussagen über das Verhalten des EKM-Messsignals bei Variation der Messspitzengeometrie. Auf diese Weise kann untersucht werden, inwiefern eine Optimierung der Messspitzengeometrie hinsichtlich einer verbesserten elektrischen Orts- und Spannungsauflösung möglich ist.

Bedingt durch die Geometrie der Messsonde enthält das EKM-Messsignal einen Störanteil, den sogenannten Hebelarmeinfluss [Wittpahl 2000]. Die in Kapitel 4 durchgeführten Messungen ergaben, dass der Hebelarmeinfluss bei EKM-Messungen an Submikrometerleitungen einen nahezu ortsunabhängigen Signalanteil bildet,

welcher dem eigentlichen Nutzsignal überlagert ist. Dies lässt vermuten, dass bei mehreren dicht nebeneinander befindlichen Submikrometerleitungen eine Verfälschung des EKM-Messsignals durch Übersprechen möglich ist. In Kapitel 5 wird daher evaluiert, unter welchen Bedingungen ein Übersprechen im EKM-Messsignal auftreten kann, wie sich dieses Übersprechen im Messsignal äußert und mit welchen Methoden das unverfälschte Messsignal ermittelt werden kann.

Zur Messung hochfrequenter Probenspannungen mittels der EKM wird entweder die Samplingtechnik oder die heterodyne Mischtechnik angewandt. Während die heterodyne Mischtechnik zur Detektion der Amplitude und Phase von Wechselfspannungen eingesetzt wird, kann mit der Samplingtechnik der zeitliche Verlauf einer beliebigen periodischen Spannung ermittelt werden. Die heterodyne Mischtechnik zeichnet sich dabei durch einen relativ einfachen Messaufbau, eine hohe Spannungsauflösung sowie eine hohe Messgeschwindigkeit aus. Zudem bietet sie die Möglichkeit, Spannungskontrastbilder zur Signalpfadverfolgung aufzunehmen. Aufgrund dieser Vorteile ist es wünschenswert, die heterodyne Mischtechnik auch zur Detektion digitaler Spannungen nutzen zu können. In Kapitel 6 wird deshalb untersucht, inwiefern über die Messung einer oder mehrerer harmonischer Komponenten einer periodischen digitalen Bitfolge Aussagen über die einzelnen Bitwerte der Folge getroffen werden können. Dabei werden die theoretischen Betrachtungen anhand von experimentellen Ergebnissen verifiziert.

In Kapitel 7 findet eine abschließende Zusammenfassung der in dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse sowie ein Ausblick auf weitergehende Untersuchungen statt.