3 Realisierung einer Strommesstechnik

Dieses Kapitel stellt die Gesamtkonzeption des Messsystems vor. Im Rahmen der Arbeit finden zwei Testsysteme Verwendung, die sich in ihrem physikalischen Prinzip nicht unterscheiden. Für den überwiegenden Teil der Messungen wurde ein kommerzielles RKM mit einigen Modifikationen genutzt. Das Beheben auftretender Mängel und die Nutzung der Erfahrungen mit dem ersten System führten zur Entwicklung und Konstruktion eines zweiten, optimierten Systems.

3.1 Aufbau des Testsystems

Das erste Testsystem besteht aus dem kommerziellen Rasterkraftsystem Accurex der Firma Topometrix mit einigen apparativen Erweiterungen, die in Bild 3.1 grün dargestellt sind. Diese dienen dem Erzeugen der Signale, der Beschaltung der Probe und der Auswertung der erhaltenen Signale. Außerdem wird die Probenaufnahme und die Positioniereinrichtung der Probe des RKM ersetzt. Bild 3.1 zeigt ein Blockschaltbild des realisierten Gesamtaufbaus.

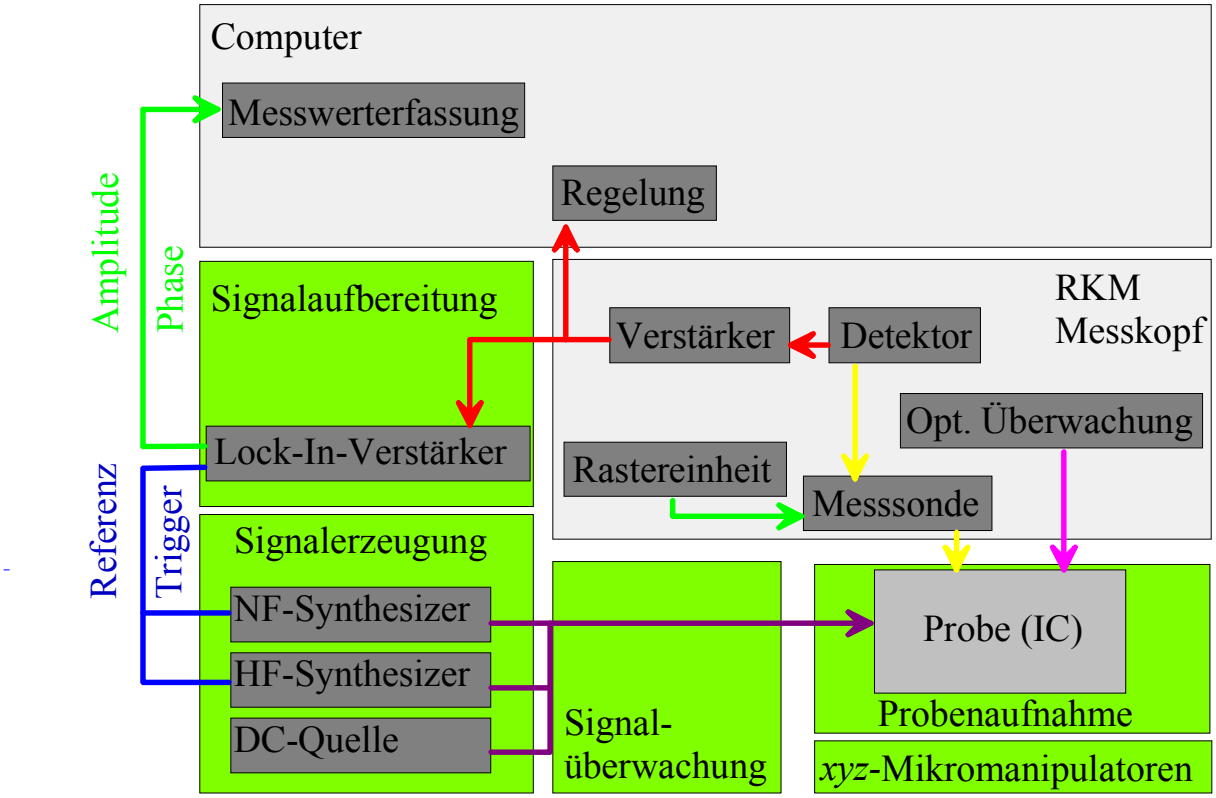


Bild 3.1: Gesamtaufbau des Messsystems zu Strommessung

Die Signalerzeugung wird je nach Bedarf mit nieder- oder hochfrequenten Synthesizern bzw. mit Gleichstromquellen realisiert. Diese müssen jeweils über ein Triggersignal phasenstarr miteinander verbunden sein, um unnötige Störsignale durch Phasenverschiebungen in den zu testenden Bauelementen zu vermeiden. Ein weiteres Triggersignal wird als Referenzsignal für den Lock-In-Verstärker benötigt. Der Lock-In-Verstärker wertet die von der Detektoreinheit des RKM ausgegebenen Messsignale aus. Hierbei werden, wie bereits in Kap 2.2 beschrieben, die Amplitude der Hebelarmschwingung und die Phase des Eingangssignals im Bezug auf das Referenzsignal gemessen. Diese Messwerte können über die beiden am RKM befindlichen Analogeingänge aufgezeichnet und über die RKM-Software dargestellt werden. Bild 3.2 zeigt ein Foto des realisierten Messaufbaus.

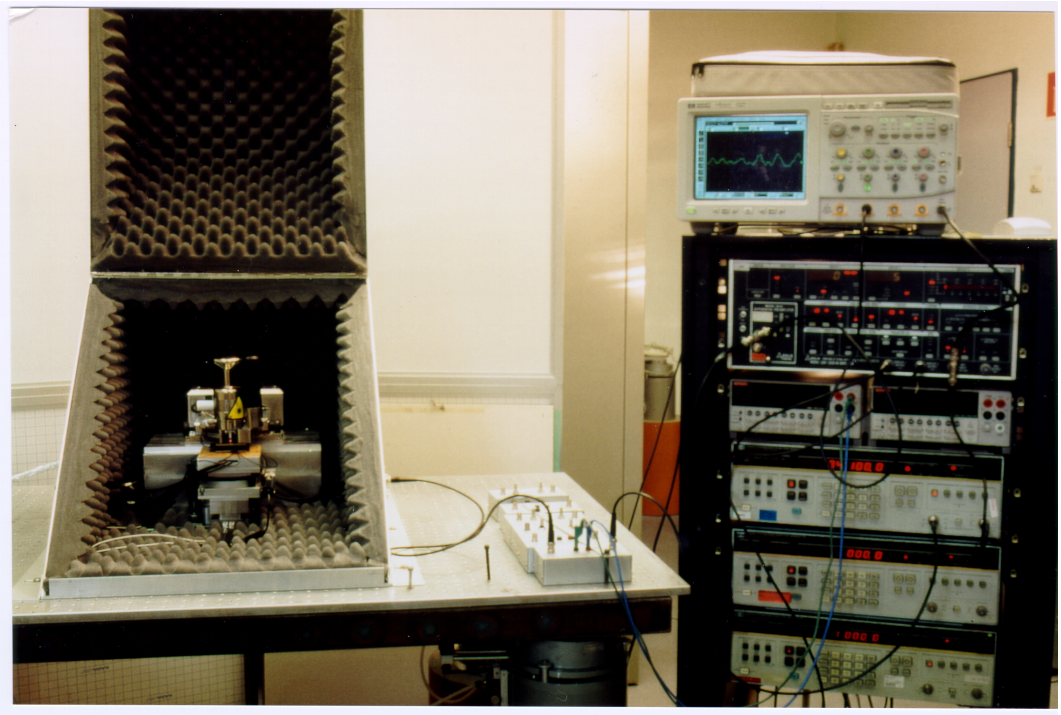
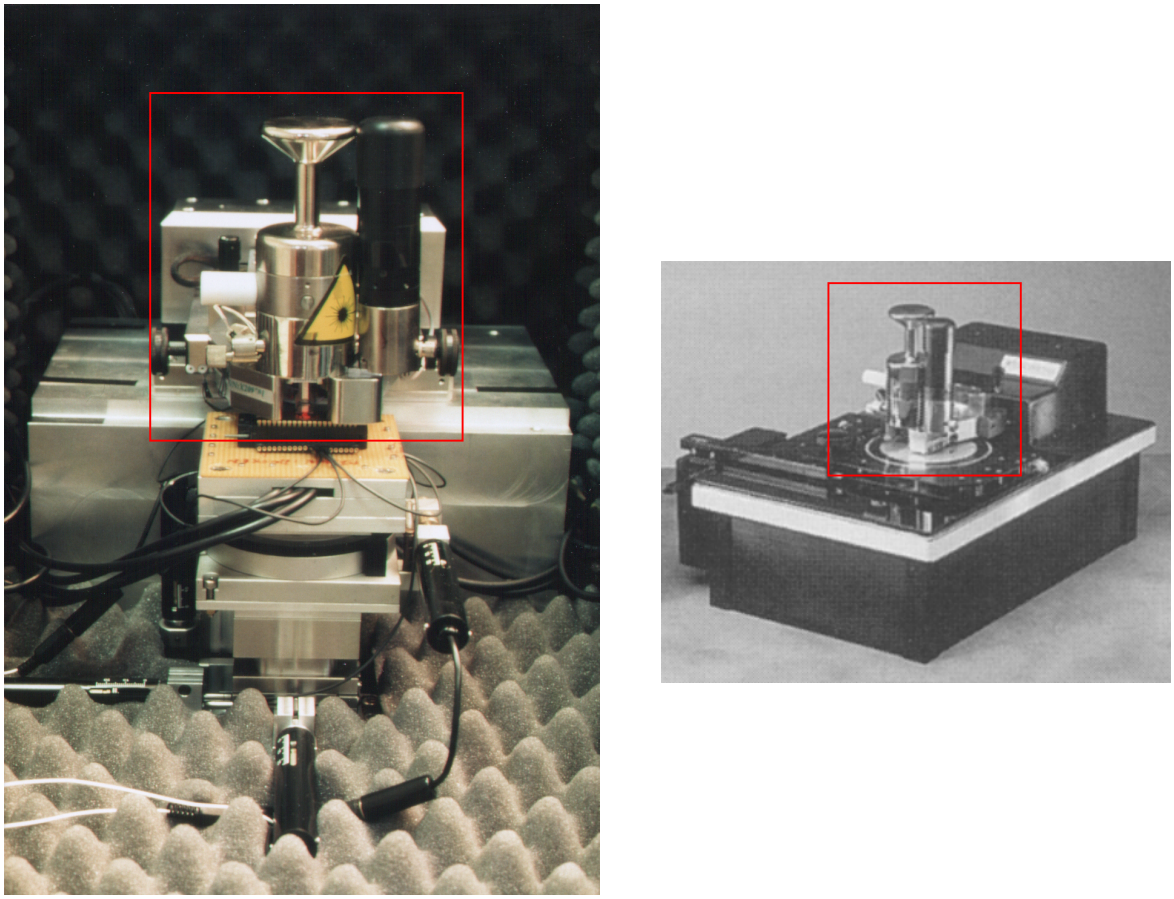


Bild 3.2: Foto des realisierten Messsystems

Rechts im Bild sind die Signalgeneratoren (HP 3325a [HP 1978]) und der Lock-In-Verstärker (EG&G [EG&G 2001]) zu sehen. Links im Foto ist das Rasterkraftmikroskop Accurex 1 der Firma Topometrix [Topometrix 1997] abgebildet. Es ist zur Abschirmung elektrischer, magnetischer und akustischer Wellen in ein mit Schaumstoff ausgekleidetes Alublechgehäuse eingebaut. Links daneben (auf dem Bild nicht mehr zu sehen) befindet sich der PC des RKM. Die Signalzuführung ist nicht für hochfrequente Signale ausgelegt, da nur Koaxialdurchführungen in das Alublechgehäuse vorhanden sind.

Bild 3.3 zeigt ein Foto des Rasterkopfes über dem Probenhalter, der auf *xyz*-Mikromanipulatoren befestigt ist.



a) b)

Bild 3.3: *a) Foto des realisierten Messaufbaus zum Positionieren des Rasterkopfes über der Probe*
b) Foto des Originalgerätes [Topometrix 1997]

Das RKM des Typs Accurex der Firma Topometrix liefert für diesen Messaufbau nur noch den Rasterkopf, in Bild 3.3 rot eingerahmt, die Elektronik und den Steuer-PC.

Die Probenaufnahme für die zu testenden Bauelemente wird gegen einen 40-poligen Dilgehäuse-Textoolsockel ausgetauscht, um in gehäusten ICs messen zu können.

Die Komponenten, die zum Positionieren der Probe vorgesehen sind, werden gegen die in Bild 3.3 a unten dargestellten, exakteren *xyz*-Mikromanipulatoren bzw. den schwingungsarmen Alublock ausgetauscht. Die Mikromanipulatoren sind mit elektrischen Verstelleinheiten, sogenannten Micromikes [Oriel 2000, Coherent 2000] ausgestattet. Diese ermöglichen es, die Probe bei geschlossenem Gehäuse von außen zu verfahren, um exakte Positionswechsel auch während einer Messung durchführen zu können.

Das Alublechgehäuse besitzt Durchführungen für spezielle Zuleitungen, wie beispielsweise Hochfrequenzsignale. Diese Durchführungen sind, wenn sie nicht benötigt werden, durch Abdeckbleche verschlossen. Bei Bedarf kann der Textoolsockel leicht gegen einen anderen Probenhalter ausgetauscht werden. Somit sind auch Messungen an Bauelementen möglich, die nicht im Dil-Gehäuse aufgebaut sind.

Das hier verwendete RKM weist einige Defizite auf. Diese sind:

- schlechter Testzugriff aufgrund des kompakten Aufbaus des RKM-Messkopfes und der großen Messsondenhalterung,
- schlechte Handhabung beim Messsondenwechsel,
- schlechte Justage der Detektionseinrichtung,
- starke Drift der *xyz*-Piezostellglieder trotz einer Linearisierung über DMS,
- stark verrauschtes Detektorsignal (schlechte Verstärkerbausteine),
- schwieriger Einbau neuartiger Sensorkonzepte und
- begrenzte Möglichkeiten der Probenbeschaltung.

Aufbau des neuentwickelten Testsystems

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Testsystem basiert auf dem selben Konzept wie das oben vorgestellte Testsystem und auf den in Kap. 2 aufgeführten physikalischen Grundlagen. Einige Detaillösungen und Verbesserungen im Bezug auf die oben genannten Defizite werden vorgenommen, so dass die Messergebnisse beider Geräte vergleichbar sind.

Bei diesem RKM wird die Positionierung der Messsonde nicht mehr durch Verfahren der Probe, sondern durch Verfahren des Messkopfes erreicht. Nur die Verkippung der Probe ist über zwei Verkipptische in beide Raumrichtungen geregelt. Somit hat man die Möglichkeit, mit Nadelprobern, die nach der Ausregelung der zum Messkopf relativen Verkippung aufgesetzt werden, jeden beliebigen Punkt auf der Probe anzufahren. Dabei wirken, wie in Kap. 2.4.4 beschrieben, keine Beschleunigungskräfte auf die empfindlichen Nadeln. In Bild 3.5 ist der realisierte Messaufbau zu sehen.

Bild 3.4 zeigt den schematischen Aufbau des neuentwickelten RKM.

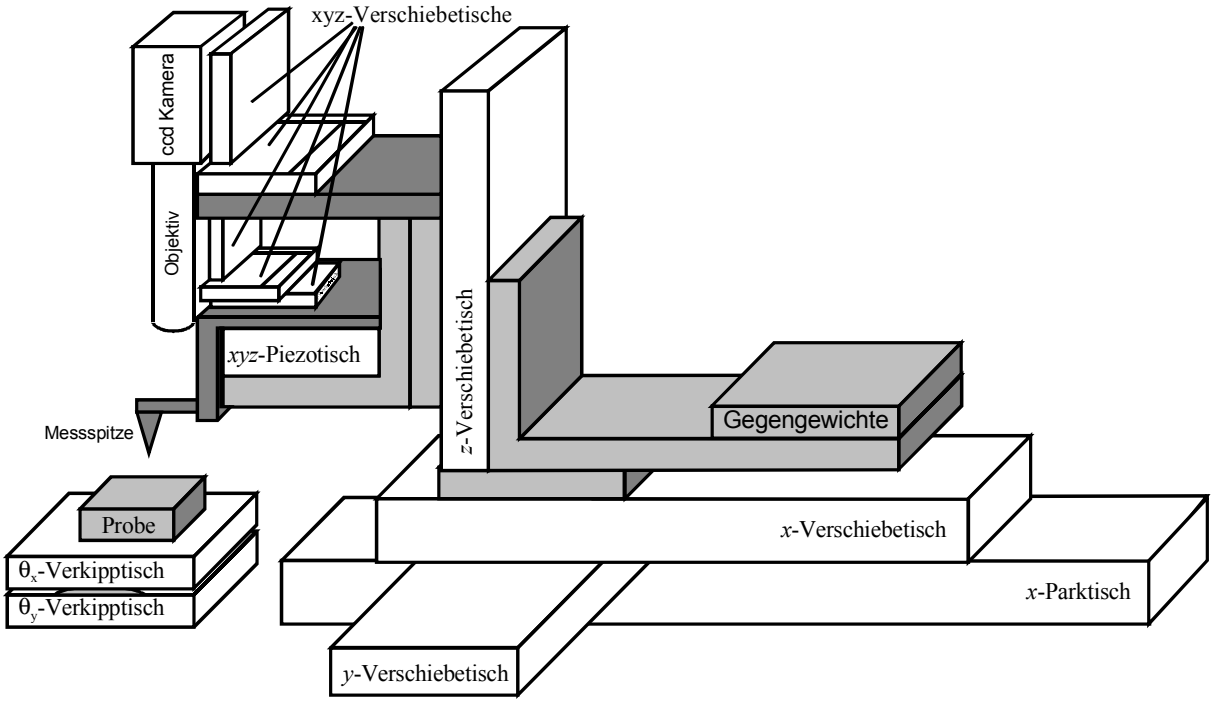


Bild 3.4: Aufbau des neuentwickelten RKM

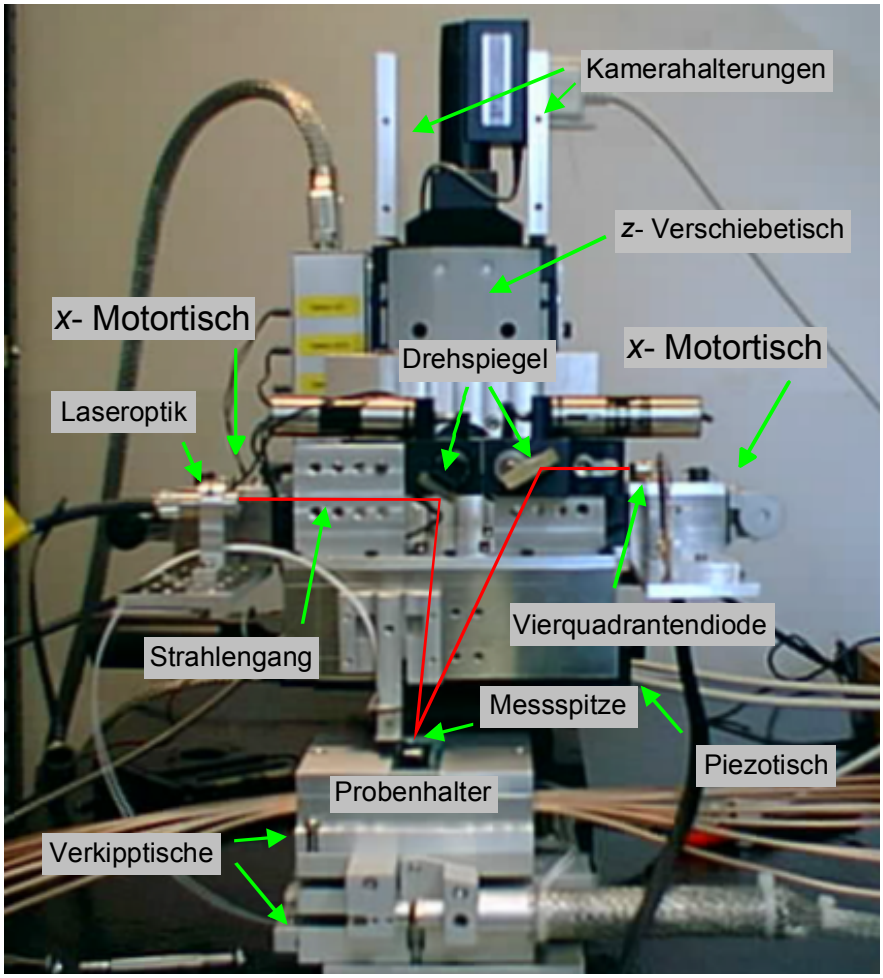


Bild 3.5: Foto des Messaufbaus [Ney 2000]

In Bild 3.5 ist die optische Kontrolle, eine Kamera mit Verschiebemotoren, entfernt worden, um den Blick auf die Detektionseinheit freizugeben.

Durch die offene Bauweise der Detektionseinheit ist es möglich, die Neigung der Messsonde nahezu beliebig zu verändern. Üblicherweise beträgt der Winkel der Messsonde zur Probenoberfläche nur α=15°, was Messungen an gebondeten ICs verhindert.

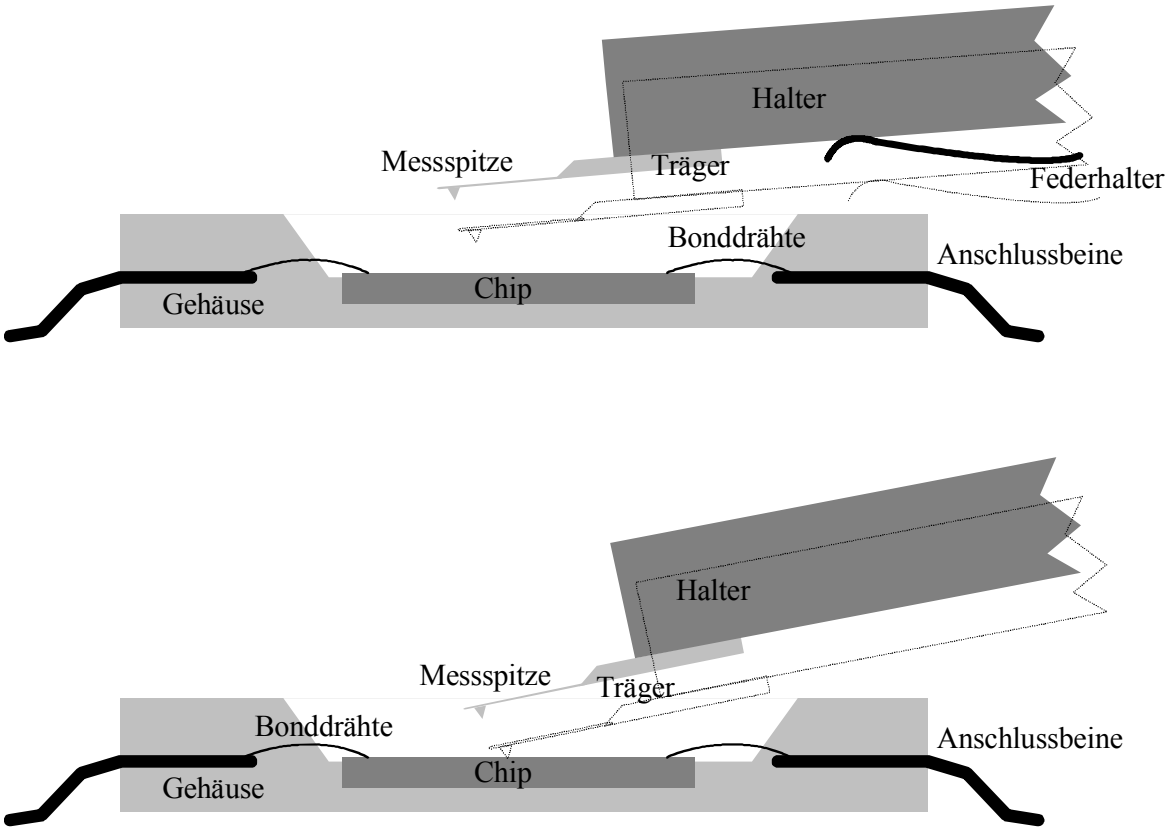


Bild 3.6: Schematische Darstellung des Testzugriffs an gehäusten ICs

Bild 3.6 verdeutlicht das Problem. In dem neuen Aufbau kann der Winkel zwischen Messsonde und Probe deutlich größer sein. Dies ermöglicht die Messung in ICs, wenn auch nur in flachen Gehäusen. Auch die Form der Messsondenhalterung, an welcher der Trägerkörper der Messsonde angeklebt wird, ist deutlich verbessert. Sie läuft spitz zu, so dass der benötigte Platz wesentlich minimiert werden konnte. Eine weitere Verbesserung ist die Aufnahme der Messsondenhalterung, die nicht durch eine Feder, wie in Bild 3.6 zu sehen, sondern durch eine Schraube, die über einen Winkel an den Messkopf befestigt ist, realisiert wird. Somit kann ein zusätzlicher Platzgewinn zwischen Probe und Messsondenhalterung, wie das Foto in Bild 3.7 zeigt, erreicht werden [Ney 2000].

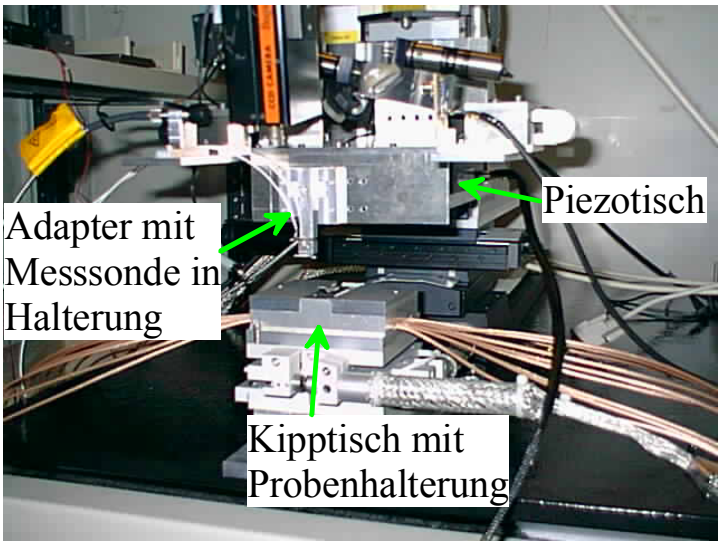


Bild 3.7: Foto der Messsondenhalterung [Ney 2000]

Durch die Größe der Aufnahme für die Messsondenhalterung und der Halterung selbst ist eine gute Handhabung möglich. Auch das Aufkleben der Messsonden gestaltet sich durch einen externen Aufbau zum Befestigen der Messsondenhalterung sehr einfach. So kann die benötigte Zeit zum Wechseln einer Messsonde deutlich reduziert werden. Eine weitere Verbesserung in der Handhabung stellt der voll motorisierte Messkopf dar. Mit ihm kann man den Laser sehr schnell und einfach auf der Messsonde positionieren. Dies ist nicht zuletzt dadurch unterstützt, dass die Motoren den Laser parallel zu den Monitorkanten verfahren. Ebenso kann durch eine zweidimensionale Darstellung des Auftreffpunktes auf dem positionssensitiven Detektor eine sehr schnelle Einstellung des Detektors erreicht werden.

Als Rastereinheit dient ein *xyz*-Piezopositioniertisch der Firma PI [PI 2000]. Er ist mit einer Positioniergenauigkeit von Δs=7,5 nm und einem Verfahrweg von s=100 µm in *x*- und *y*-Richtung und s_z=20 µm in *z*-Richtung spezifiziert. Dieser Tisch verfügt durch den Einsatz kapazitiver Sensoren über eine sehr gute aktive Linearisierung und besitzt somit eine Wiederholgenauigkeit von $s_{w,z}$=1,5 nm in *z*-, und s_w=7,5 nm in *x*- und *y*-Richtung. Diese Auflösung wird vor allem durch die Ansteuerelektronik bestimmt. Die kapazitive Linearisierung funktioniert deutlich besser als die Linearisierung über Dehnungsmessstreifen [PI 2000]. Somit kann auch das Driften deutlich reduziert werden, vor allem bei sehr kleinen Messbereichen von s_m=5 µm, bei denen die Linearisierung durch den Einsatz von Dehnungsmessstreifen an ihre Grenzen stößt [Topometrix 1997].

Das neu aufgebaute Testsystem verwendet, analog dem Topometrix Accurex, die Lasertriangulie als Detektionsverfahren mit einer Vierquadrantendiode als positionssensitivem Detektor. Jedoch ist es durch geeignete Anpassung der Verstärkereinheit

der Auswerteelektronik möglich, die Auflösungsgrenze des Systems sowohl im statischen, als auch im, für die Strommessung entscheidenden, dynamischen Fall um den Faktor 12 gegenüber dem oben vorgestellten Testsystem zu steigern [Hartmann 2000].

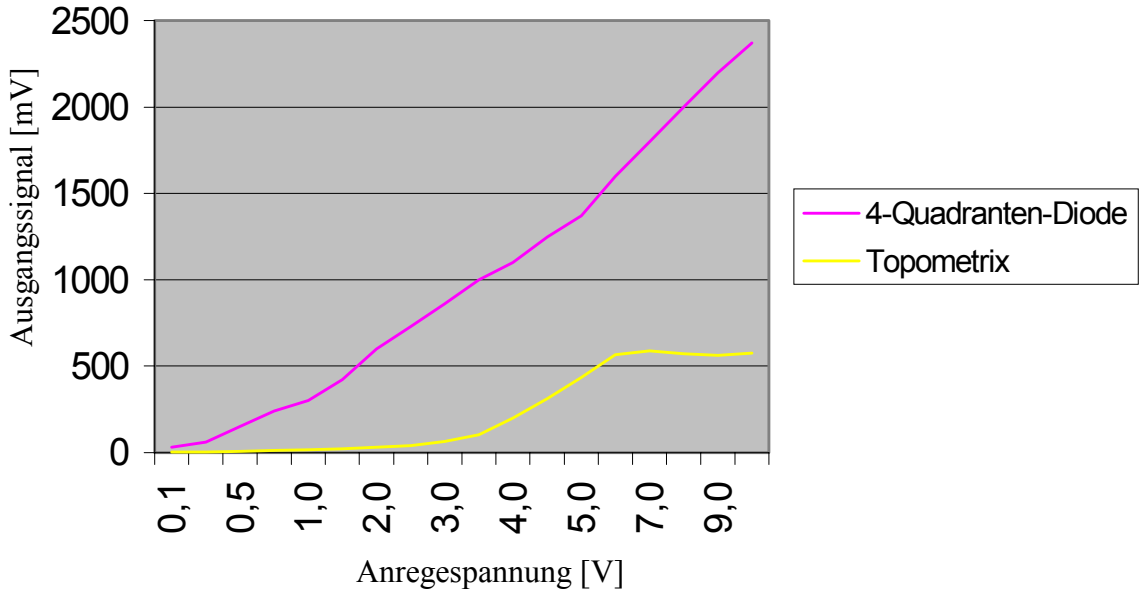


Bild 3.8: *Vergleich des mit einem Lock-In-Verstärker gemessenen Detektorausgangssignals zwischen dem Accurex und dem neu entwickelten RKM* *[Hartmann 2000]*

Bei der in Bild 3.8 dargestellten Messung wird die Messsonde mit einem Piezokristall, der sich zwischen Rastereinheit und Messsonde befindet, über ein Wechselsignal bei der Resonanzfrequenz zum Schwingen angeregt. Im Diagramm ist das Ausgangssignal des Detektorsystems über die Anregespannung am Piezoglied dargestellt.

Die optische Kontrolle des Testsystems ist ebenfalls deutlich verbessert. Die Kamera ist in alle Raumrichtungen frei beweglich, wird aber in *x*- und *y*-Richtung von den Lineartischen mitbewegt. Dies ermöglicht es, eine einmal eingestellte Perspektive relativ zur Messsonde beizubehalten. Die Kamera wird jedoch nicht mit dem Messkopf mitgerastert, sodass das Bild während der Messung feststeht. Auch das Annähern oder Entfernen der Messspitze führt nicht zu einer Veränderung des Kontrollbildes.

Ein unter der *xyz*-Positioniereinheit angebrachter „Parktisch“ mit einem Verfahrweg von 30 cm ermöglicht das schnelle Entfernen des gesamten Messkopfes, um ohne Behinderung an der Probe arbeiten zu können. Dies hat neben dem erhöhten Platzangebot auch den Vorteil, dass die Messsonde nicht unbeabsichtigt zerstört werden kann, zum Beispiel bei der Positionierung von Nadelprobern. Beim „Parken“ kann die vorherige Position der Messsonde

gespeichert, und mit den Motoren bis auf ca. s_w=2 µm wieder angefahren werden. Durch den Einsatz von Zusatzkomponenten wie Positionsgebern, verbessert sich dieser Wert auf s_w=0,5 µm [PI 2001]. Dies ist bei einem Rasterbereich des Piezoverschiebetisches von $s_{r,x}$=100 µm, $s_{r,y}$=100 µm und $s_{r,z}$=20 µm jedoch nicht erforderlich.

Die Probenaufnahme und Beschaltung wird, wie beim zuvor vorgestellten System, durch einen 40-poligen Textoolsockel mit koaxialen Zuleitungen realisiert. Wegen des s_x=5 cm großen Verfahrweges des Messkopfes in *z*-Richtung, hat man im Bezug auf neue Probenaufnahmen, neue Gehäuse oder Prober einen sehr großen Spielraum.

Die Ansteuerelektronik des Piezotisches und der Messeingänge stammt von der Firma Anfatec. Sie ermöglicht die Ansteuerung des über kapazitive Sensoren linearisierten Piezoverschiebetisches. Die Elektronik der *xyz*-Verfahrtische liefert die Firma PI, die auch die entsprechenden Tische herstellt. Die verwendete Software basiert auf einer Freewarelösung der Firma Anfatec, bei der alle Quellcodes frei und unentgeltlich zugänglich sind. Als Signalquellen dienen die bereits oben vorgestellten Synthesizer und DC Quellen. Die Auswertung der Detektorsignale erfolgt ebenfalls analog dem obigen Messstand mittels des Lock-In-Verstärkers.

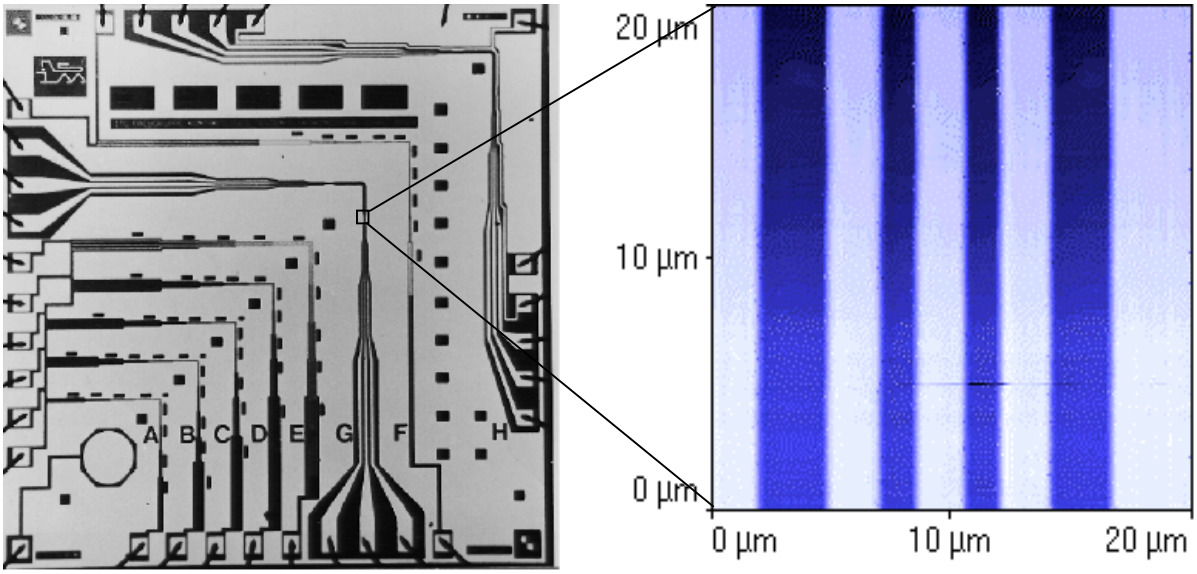
Beim Aufbau wird auf größtmögliche Modularität geachtet, so dass das Adaptieren neuer Messsonden sehr schnell durch Anpassung einzelner Komponenten realisiert werden kann. So ist es zum Beispiel möglich, den Nadelsensor, der ein vielversprechendes Konzept im Hinblick auf den Testzugriff darstellt [Neinhys 2001], an diesem Gerät zu betreiben.

3.2 Verwendete Teststrukturen

Im Rahmen dieser Arbeit finden unterschiedliche Teststrukturen Verwendung. Für den überwiegenden Teil der Messungen dient ein Testchip der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG), der zur Evaluation der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Elektronenstrahltester entworfen wurde [Richter 1992]. Da diese Teststruktur nur Leitungsgeometrien zur Strommessung von b_L=2-32 µm besitzt, wird für Messungen an kleineren Leiterbahngeometrien eine Teststruktur, hergestellt am Fraunhofer Institut München, verwendet. Zur Messung hochfrequenter Ströme dient eine Koplanarleitung. Die Teststrukturen sind im Folgenden dargestellt.

3.2.1 ITG-Teststruktur

Entwickelt wurde die ITG-Teststruktur zur Evaluation der Leistungsfähigkeit des E-Beam Testers [Richter 1992]. Bei ihr handelt es sich um eine Teststruktur auf einem Siliziumsubstrat. Auf einer Fläche von A_{Str}=4,5 mm x 4,5 mm befinden sich unterschiedliche Leiterbahnanordnungen. Ein Foto der Teststruktur ist in Bild 3.9 zu sehen.



a) b)

Bild 3.9: ITG –Teststruktur
a) Lichtmikroskopische Aufnahme
b) RKM-Aufnahme der in a) markierten Stelle

Die Strommessungen im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich an der Struktur G der Teststruktur durchgeführt. Diese Leiterbahnstruktur aus drei nebeneinander verlaufenden Leiterbahnen ist als Koplanarleitung ausgeführt und verjüngt sich 4 mal von b_L=32 µm durch jeweiliges Halbieren der Strukturbreite auf b_L=2 µm. Der Abstand der einzelnen Leiterbahnen zueinander beträgt jeweils die halbe Leiterbahnbreite. Die Leiterbahnbreite am 90°-Winkel beträgt b_L=4 µm. Dieser Winkel ist in Form von zwei 45°-Winkeln ausgeführt.

Umgeben sind die h_L=600 nm hohen Leiterbahnstrukturen von einer ebenfalls h_{Str}=600 nm hohen Massefläche. Sowohl die Leiterbahnen, als auch die Masseflächen bestehen aus Aluminium.

3.2.2 Leiterbahnen mit b_L=75 nm bis b_L=1000 nm Breite (Fraunhoferstruktur)

Eine weitere im Rahmen der Arbeit eingesetzte Teststruktur ist die im Fraunhofer Institut München hergestellte, und in Bild 3.10 dargestellte Struktur.

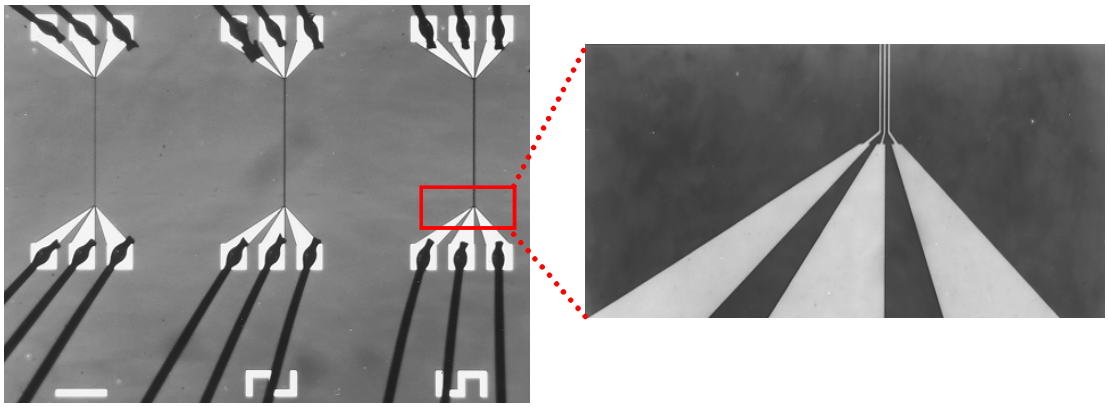
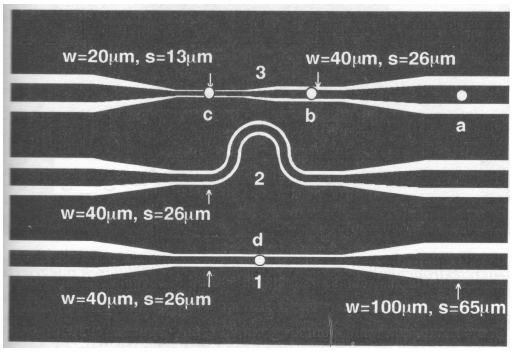


Bild 3.10: Lichtmikroskopische Aufnahme der Teststruktur

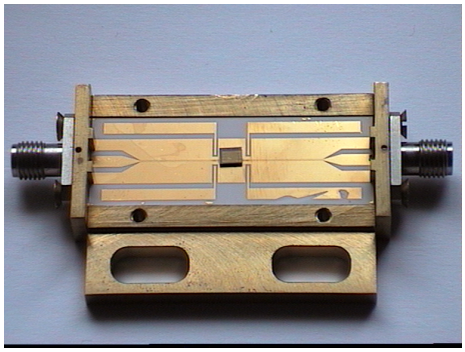
Sie besteht aus Siliziumsubstrat und hat fünf Testanordnungen von jeweils drei parallelen Leiterbahnen. Die Leiterbahnen bestehen aus h_L=5 nm Titan und h_L=25 nm Gold. Die Breite der Leiterbahnen beträgt jeweils b_L=1000 nm, b_L=500 nm, b_L=250 nm, b_L=100 nm und b_L=75 nm. Der Abstand entspricht der Breite der Leiterbahnen. Je drei dieser Strukturen befinden sich in einem Dil-40-Gehäuse, wobei der Chip höher eingebaut ist als normal vorgesehen. So entstehen keine Probleme bezüglich des Testzugriffes. Die b_L=75 nm breiten Leiterbahnen sind aufgrund von Defekten zur Strommessung ungeeignet.

3.2.3 Hochfrequenz-Koplanarleitungen

Die hochfrequenzfähige Probe besteht aus einer Leiterbahnstruktur, die auf h_{Sub}=510 µm dickem semiisolierenden GaAs-Substrat aufgebaut ist. Bild 3.11 zeigt den Aufbau dieser Leiterbahnanordnung. Die Struktur befindet sich in einem Gehäuse, das bis f=40 GHz ausgelegt ist [Mertin 1994].



a)



b)

Bild 3.11: HF-Teststruktur
a) Foto der Hochfrequenz-Teststruktur
b) Foto der Testobjekthalterung. Darin ist der Trägerkörper eingebaut, auf dem sich die Testschaltung befindet

In Bild 3.11 ist deutlich zu erkennen, dass die A_{Str}=3 mm x 2 mm große Teststruktur aus drei koplanaren Leiterbahnen besteht. Die Geometrie der Strukturen ist derart gewählt, dass sie jeweils einen Wellenwiderstand von R=50 Ω besitzen. Die Goldschicht der Leitungs- und Masseelektroden ist h_{Str}=3 µm dick. Die Testchips sind auf Aluminiumoxid-Keramik (Al_2O_3)-Trägern angebracht, da ein Dil-Gehäuse nicht die für hochfrequente Messungen notwendige Leitungsspannung von einem Wellenwiderstand R=50 Ω aufweist. Auf der Oberfläche des Trägers befinden sich wellenangepasste, koplanare Leiterbahnstrukturen aus Gold. Die elektrischen Verbindungen zwischen Testobjekt und Testträger werden jeweils durch Bonddrähte der Dicke d_B=25 µm hergestellt. Die Keramikträger werden, wie in Bild 3.11 zu sehen, anschließend in Testobjekthalterungen eingebaut. Diese dienen neben einer mechanisch stabilen Fixierung auch dem Übergang von den Hochfrequenzkabeln auf die Koplanarleitungen, die auf dem Keramikträger aufgebracht sind. Die Übertragungseigenschaft der Teststruktur ist nicht über den gesamten Frequenzbereich gleichbleibend [Mertin 1994].