

3. Messaufbau, Teststrukturen und Messsonden

Im Folgenden wird kurz der Aufbau und die Funktionsweise des bei den Messungen verwendeten EKM-Testsystems erläutert. Außerdem werden die für die Untersuchungen entwickelten Teststrukturen sowie die genutzten Messsonden vorgestellt.

3.1. Das EKM-Testsystem

Bei den experimentellen Untersuchungen wurde ein Rasterkraftmikroskop der Firma Topometrix verwendet, welches speziell für die Belange des elektrischen Schaltungstests von integrierten Schaltungen modifiziert worden ist [Leyk 1998]. Dieses lässt sich in 3 Funktionsgruppen aufteilen: den Messkopf, die Ansteuerelektronik und einen PC.

Der Messkopf (siehe Bild 3.1-1) ist die Schnittstelle des Rasterkraftmikroskops zur Probe. Er befindet sich über der Probe und enthält die Komponenten, welche direkt an der Messung beteiligt sind. Dies sind in erster Linie die Messsonde, das Detektorsystem zur Bestimmung der Messsondenauslenkung Δh und das xyz-Piezsystem zur Bewegung der Messsonde über die Probe.

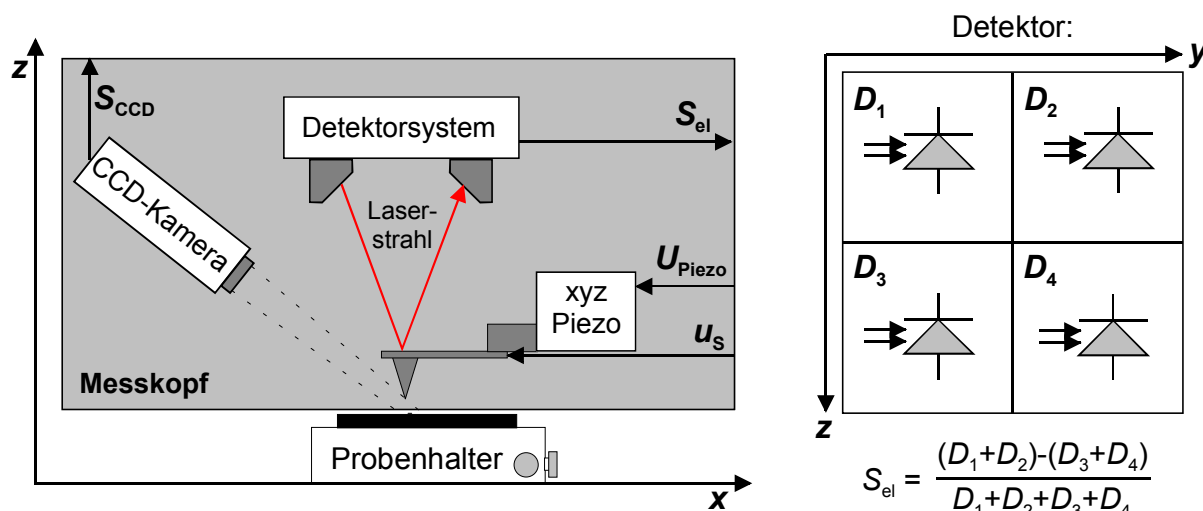


Bild 3.1-1: Schematischer Aufbau des Messkopfes des verwendeten RKM-Systems

Die Detektion der Messsondenauslenkung Δh erfolgt mittels einer Halbleiterlaser-Vierquadrantenphotodioden-Kombination. Der Laserstrahl wird auf die Messsonde fokussiert und von dort auf den Photodiodendetektor reflektiert. Für Topographiemessungen sowie die durchgeführten elektrischen Messungen ist nur die Auslenkung Δh der Messsonde in z-Richtung, also vertikal zur Probenoberfläche, von Interesse. Daher wird als Detektorausgangssignal S_{el} das in Bild 3.1-1 angegebene Verhältnis der Photodiodenströme $D_{1,2,3,4}$ gewählt. Für die Ausführung des

Bewegungsablaufs der Messsonde über die Probenoberfläche ist das xyz -Piezosystem zuständig. Aufgrund der maximal erlaubten Ausdehnung der xy -Piezostellglieder von $100\ \mu\text{m}$ ergibt sich ein maximaler Rasterbereich von $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. Das z -Piezostellglied ermöglicht die Abstandsregelung bei Topographiemessungen im Kontaktmodus (s. Kapitel 2.1.) sowie die Einstellung des Messspitzen-Probenabstands z_0 bei den elektrischen Messungen im Nichtkontaktmodus ohne Regelung.

Außer den bereits erwähnten Komponenten ist noch eine CCD-Kamera zur groben optischen Kontrolle der Positionierung der Messsonde über der Probe und eine Lichtquelle zur Beleuchtung in den Messkopf integriert. Speziell für die elektrischen Messungen ist ein Eingang zur Beschaltung der Messsonde mit einer elektrischen Spannung u_s vorgesehen.

Der Messkopf ist über Kabelverbindungen mit der Ansterelektronik verbunden, welche als Schnittstelle zwischen diesem und dem PC fungiert (siehe Bild 3.1-2). Die Ansterelektronik sorgt für die Umsetzung der am PC eingestellten Parameter für den Rastervorgang in die entsprechenden Piezospannungen $U_{\text{Piezo},xyz}$ und umgekehrt für die Umwandlung des Messsignals, welches entweder das Detektorausgangssignal S_{el} , die Spannung $U_{\text{Piezo},z}$ am z -Piezo oder eine extern zugeführte analoge Spannung sein kann, in ein dem PC verständliches, 16 Bit breites Digitalsignal. Für Messungen mit Abstandsregelung ist ein PID Regler integriert, welcher die Spannung $U_{\text{Piezo},z}(x,y)$ des z -Piezos regelt. Im Normalfall wird das Detektorausgangssignal S_{el} als Regelgröße verwendet. Es ist aber auch möglich, einen der beiden Eingänge $\text{IN}_{1,2}$ auf den Reglereingang zu schalten.

Der PC dient als Benutzerschnittstelle und Speichermedium. Hier kann der Benutzer den Messablauf über die Eingabe verschiedener Parameter wie z.B. Rastergeschwindigkeit, Rasterbereich, Auflösung und PID-Regelparameter festlegen. Weitere Aufgaben des PCs sind die graphische Darstellung der Messwerte während der Messung, das Abspeichern von Messergebnissen sowie das Ermöglichen der Bearbeitung von Messergebnissen zu Auswertungszwecken.

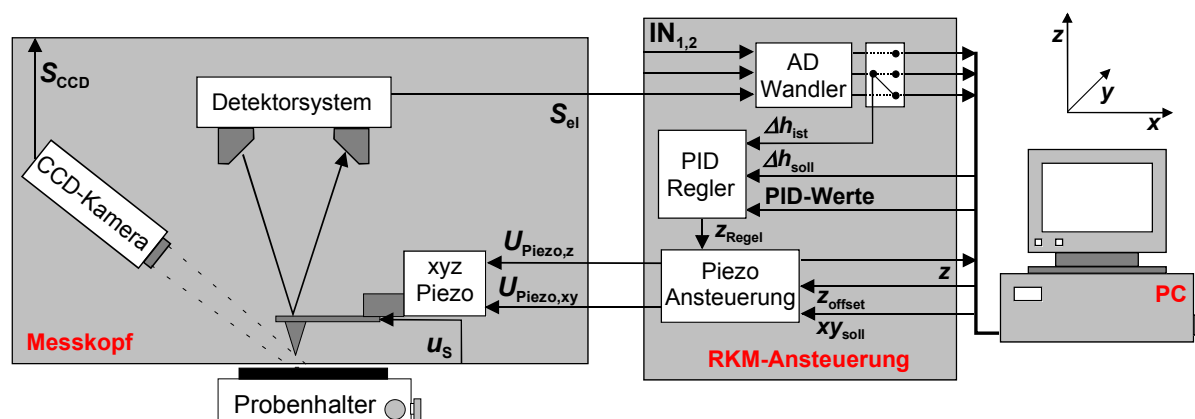


Bild 3.1-2: Funktionsgruppen des RKM und ihre Verschaltung bei Topographiemessungen

Bei der Topographiemessung wird das Rasterkraftmikroskop wie in Bild 3.1-2 dargestellt verschaltet. Am PC werden die Parameter für den Rastervorgang in xy -Richtung und die Parameter für die Abstandsregelung eingestellt. Anschließend wird die Messsonde langsam an die Probenoberfläche herangefahren bis sich der am PC eingegebene Sollwert Δh_{soll} für die Messsondenauslenkung eingestellt hat und dann die Messung gestartet. Während der Messung sorgt der PID-Regler dafür, dass die Spannung $U_{\text{Piezo},z}$ des z -Piezos immer so variiert wird, dass die Sollauslenkung Δh_{soll} beibehalten wird. Die Ermittlung der Topographie kann daher nicht über das Detektorausgangssignal S_{el} erfolgen. Dieses gibt nur Aufschluss über die Qualität der Regelung. Die Topographieinformation steckt bei Messungen mit Abstandsregelung immer in der Spannung $U_{\text{Piezo},z}$ des z -Piezostellglieds (siehe Kapitel 2.1), welche vom PC in eine Höhenangabe umgerechnet wird.

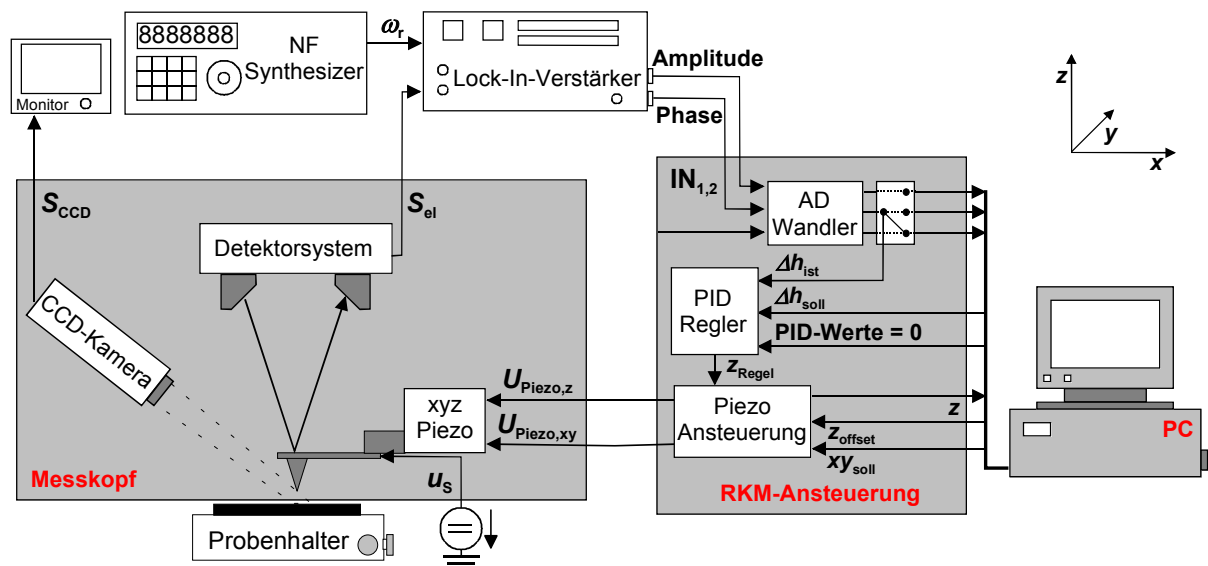


Bild 3.1-3: Funktionsgruppen des RKM und ihre Verschaltung bei elektrischen Spannungsmessungen

Nachdem die Topographie des Testgebiets ermittelt und die Verkippung der Probe minimiert worden ist, kann die elektrische Messung erfolgen. Diese wird immer im Nichtkontaktmodus durchgeführt. Dazu wird die Messsonde in den Kontaktmodus gebracht, anschließend die Regelung ausgeschaltet und dann über die Spannung $U_{\text{Piezo},z}$ am z -Piezo der gewünschte Messspitzen-Probenabstand z_0 eingestellt. Zur Optimierung der Messempfindlichkeit wird bei elektrischen Messungen in den meisten Fällen eine Messanordnung gewählt, welche einen, die Spannungsinformation tragenden, elektrischen Kraftterm $F_{\text{el}}(\omega_r)$ bei der mechanischen Resonanzfrequenz ω_r der Messsonde erzeugt. Das eigentliche Messsignal ist somit der entsprechende Frequenzterm $S_{\text{el}}(\omega_r)$ im Detektorausgangssignal. Zur extrem schmalbandigen Detektion des Messsignals $S_{\text{el}}(\omega_r)$ wird in der Regel ein Lock-In-Verstärker genutzt. Bild 3.1-3 zeigt die Verschaltung des Rasterkraftmikroskops mit dem Lock-In-

Verstärker, welche in dieser Arbeit bei den elektrischen Spannungsmessungen verwendet worden ist. Das Detektorausgangssignal S_{el} wird an den Eingang des Lock-In-Verstärkers gelegt. An den zweiten Eingang des Lock-In-Verstärkers muss ein Referenzsignal angelegt werden, welches die Frequenz, bei der das Eingangssignal bezüglich Amplitude und Phase ausgewertet werden soll, liefert. Im Messaufbau wird dieses Referenzsignal von einem Synthesizer erzeugt. Die beiden Ausgänge des Lock-In-Verstärkers werden mit den analogen Eingängen $IN_{1,2}$ der Ansteuerelektronik des Rasterkraftmikroskops verbunden. So kann am PC die Amplitude und die Phase des Messsignals in Abhängigkeit von der xy -Position der Messsonde über der Probe visualisiert werden.

3.2. Die Teststrukturen

Für die Messungen zur Untersuchung der Leistungsparameter der EKM wurden spezielle Teststrukturen verwendet, welche sich aus jeweils 3 parallelen, $500 \mu\text{m}$ langen Leiterbahnen der Leiterbahnbreite a , die sich im Abstand a voneinander entfernt befinden, zusammensetzen (siehe Bild 3.2-1). Im Folgenden wird die Leiterbahnbreite a bzw. der Leiterbahnabstand mit "Strukturbreite" bezeichnet. Die Leiterbahnen besitzen eine Höhe von ca. 30 nm (5 nm Titan, 25 nm Gold) und befinden sich auf einem Silizium-Substrat. Es existieren Teststrukturen in 5 verschiedenen Strukturbreiten: $1 \mu\text{m}$, 500 nm , 250 nm , 100 nm und 75 nm . Jeweils 3 dieser Strukturen sind in ein DIL40-Gehäuse eingebaut und über Bonddrähte mit den Pins des Gehäuses verbunden. So kann über die entsprechenden Pins auf die Leitungen der Strukturen zugegriffen werden.

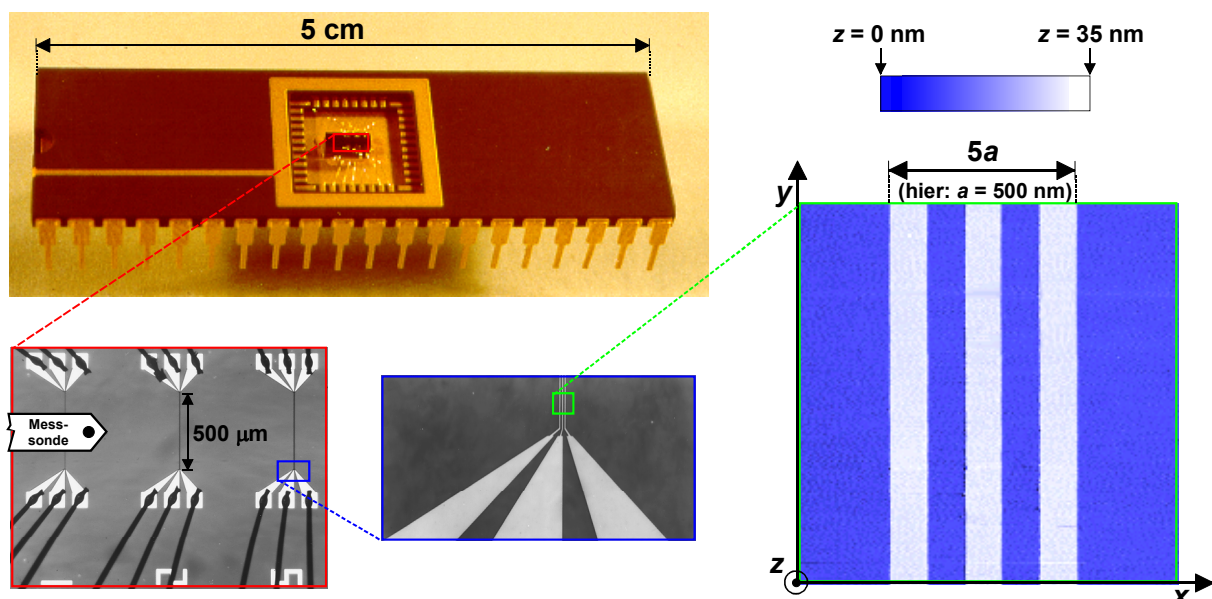


Bild 3.2-1: Aufnahmen von den bei den Messungen verwendeten Submikrometer-Teststrukturen

Für die DIL40-Gehäuse wurde ein Probenhalter entwickelt (siehe Bild 3.2-2), welcher eine unkomplizierte Signalführung an die Teststrukturen erlaubt. Mit Hilfe dieses Probenhalters werden die 3 Leitungen der zu untersuchenden Teststruktur auf der einen Seite mit 3 Synthesizern verbunden und auf der anderen Seite an ein Oszilloskop geführt. Soll an einer anderen der 3 im Gehäuse befindlichen Teststrukturen gemessen werden, so kann am Probenhalter durch Umstecken der Kabelzuführungen ein schneller Wechsel erfolgen.

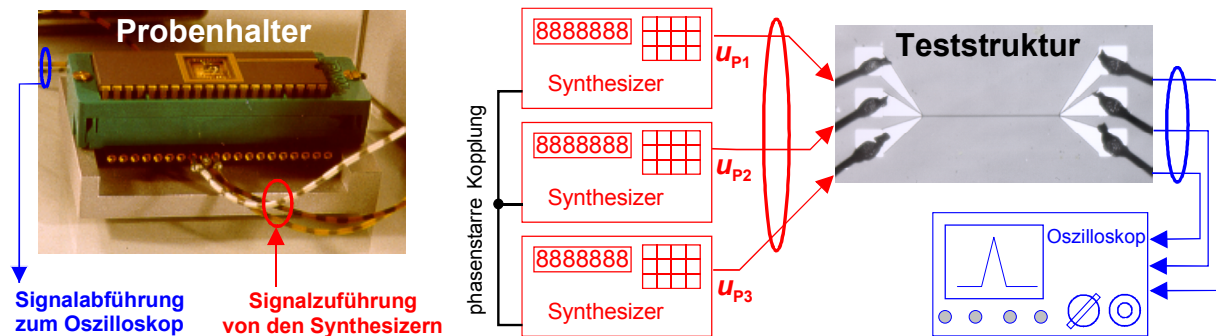


Bild 3.2-2: Elektrische Beschaltung der Teststrukturen

Eine weitere in dieser Arbeit verwendete Teststruktur ist der sogenannte ITG-Testchip [Richter 1992], welcher speziell zur Charakterisierung des Elektronenstrahltests [Menzel et al. 1983] entwickelt wurde.

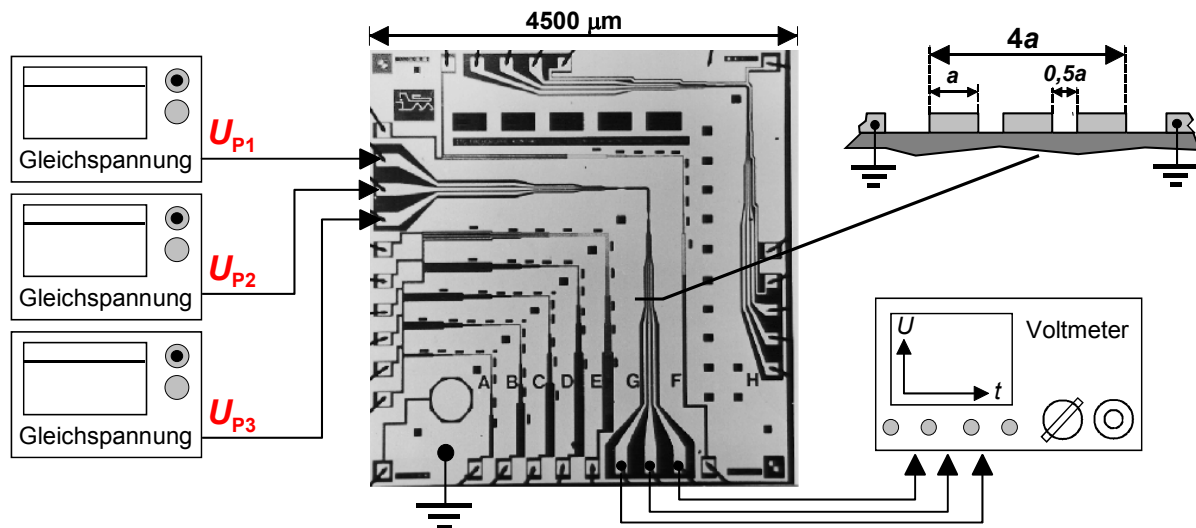


Bild 3.2-3: Topographie und elektrische Beschaltung des ITG-Testchips

Der ITG-Testchip besitzt eine Fläche von 4,5 mm x 4,5 mm und enthält verschiedene Leitungsstrukturen (siehe Bild 3.2-3). Die 500 nm hohen Aluminiumleitungen befinden sich auf einem Siliziumsubstrat und sind rechts und links von ebenfalls 500 nm hohen Aluminiumflächen umgeben. Die Messungen wurden alle an der Leitungsstruktur G durchgeführt, welche aus 3 parallelen

Leitungen, die sich zur Chipmitte hin 4 mal verjüngen, besteht. Bei jeder Verjüngung findet eine Halbierung der Strukturbreite a der Leitungen statt, so dass die anfänglich $32\ \mu\text{m}$ breiten Leitungen auf eine Breite von $2\ \mu\text{m}$ reduziert werden. Der Abstand zwischen den Leitungen entspricht dabei immer der halben Leitungsbreite a .

Da der ITG-Testchip aufgrund seiner im Mikrometerbereich liegenden Strukturbreiten nicht zur Untersuchung des Verhaltens der EKM bei Messungen an Submikrometerstrukturen eingesetzt werden konnte, wurde er für die Evaluation der Einsetzbarkeit des Nadelsensors zur kontaktlosen Spannungsmessung genutzt. Bei diesen Messungen wurden an die 3 Leitungen der Leitungsstruktur G je nach Experiment unterschiedliche Gleichspannungen U_{Pi} gelegt (siehe Bild 3.2-3).

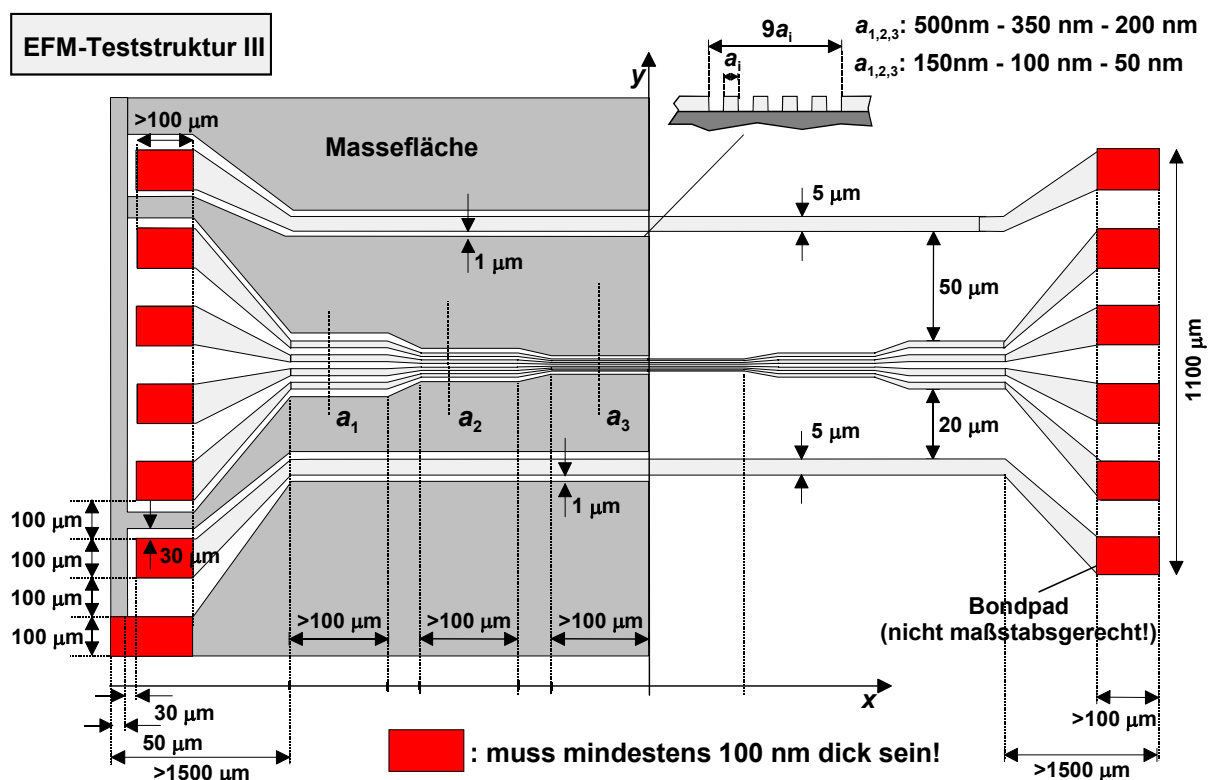


Bild 3.2-4: Entwurf der neu entwickelten Teststruktur

Für weitergehende experimentelle Untersuchungen des Verhaltens der EKM bei dynamischen Spannungsmessungen an Submikrometerstrukturen wurde im Zuge dieser Arbeit eine neue Teststruktur ausgearbeitet (siehe Bild 3.2-4). Diese Teststruktur besteht wie die bisherigen Submikrometer-Leitungsstrukturen nach Bild 3.2-1 aus parallelen, $30\ \text{nm}$ hohen Ti/Au-Leitungen. Sie besitzt allerdings anstatt der 3 parallelen Leitungen konstanter Strukturbreite 4 parallele Leitungen, welche sich zur Mitte der Struktur hin jeweils 3 mal verjüngen (siehe Bild 3.2-4). Die Strukturbreiten dieser Leitungen liegen zwischen $500\ \text{nm}$ und $50\ \text{nm}$. Der Vorteil dieser Leitungsanordnung besteht darin, dass bei Messungen mit einer notwendigen Variation der Strukturbreite a nicht wie bisher die komplette Teststruktur gewechselt

werden muss. Auf diese Weise kann die Verfälschung der Messergebnisse durch die bei einem Wechsel der Teststruktur unvermeidliche Veränderung des Messspitzen-Probenabstands z_0 minimiert werden, so dass eine genauere Untersuchung der Abhängigkeit der Orts- und Spannungsaufösung der EKM von der Strukturbreite a ermöglicht wird.

Zur Untersuchung des Einflusses weit vom Testpunkt entfernter signalführender Leitungen auf das EKM-Messergebnis, befinden sich noch zwei weitere, jeweils $5 \mu\text{m}$ breite Leitungen im Abstand von $20 \mu\text{m}$ bzw. $50 \mu\text{m}$ von den 4 Submikrometerleitungen entfernt auf der neuen Teststruktur.

Außerdem kann ein Vergleich von EKM-Messergebnissen bei Messungen an nur von Siliziumsubstrat umgebenen Leitungen mit Messungen an von großflächigen Masseflächen umgebenen Leitungen erfolgen. Auf der linken Hälfte der Teststruktur sind nämlich alle Leitungen von Masseflächen umrahmt, während auf der rechten Hälfte neben den Leitungen nur das Siliziumsubstrat vorhanden ist.

3.3. Verwendete Messsonden

Die EKM-Messungen erfolgten mit zwei verschiedenen, kommerziell erhältlichen Messsondentypen, welche sich hinsichtlich der Geometrie ihrer Hebelarme und damit auch in ihrer Resonanzfrequenz ω_f sowie Federkonstanten c unterscheiden. Der Trägerkörper (siehe Bild 3.3-1) und die daran befestigte Messsonde werden aus Silizium geätzt [Itho et al. 1994 und 1995]. Da EKM-Messungen nur mit elektrisch leitfähigen Messsonden durchgeführt werden können, ist entweder das Silizium extrem hoch n-dotiert oder eine 23 nm dicke Platin-Iridium Metallisierung auf der Messsondenoberfläche vorhanden. Auf diese Weise wird ein spezifischer Widerstand der Messsonde von $0,01 \Omega\text{cm}$ bis $0,025 \Omega\text{cm}$ erreicht.

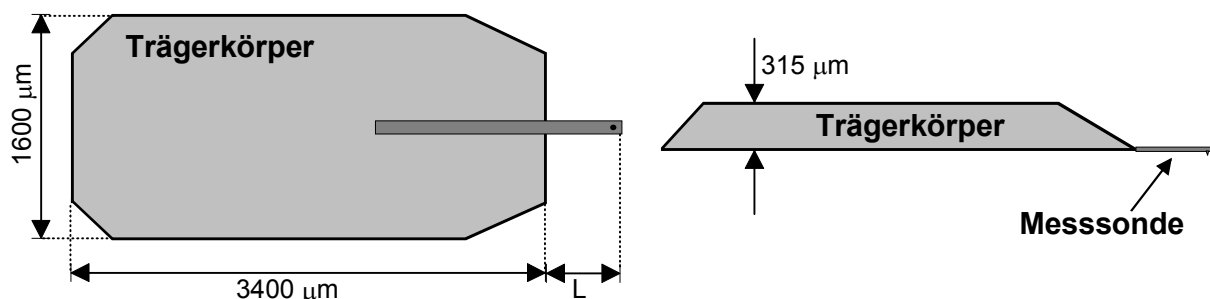


Bild 3.3-1: Skizze der Trägerkörper-Messsondenkombination

Die pyramidenförmige, ca. $15 \mu\text{m}$ hohe Messspitze befindet sich in der Nähe des freien Hebelarmendes (siehe Bild 3.3-2). Sie besitzt an ihrer Spitze einen Radius von typischerweise 20 nm . Laut Hersteller ist die Messspitzengeometrie für beide Messsondentypen gleich.

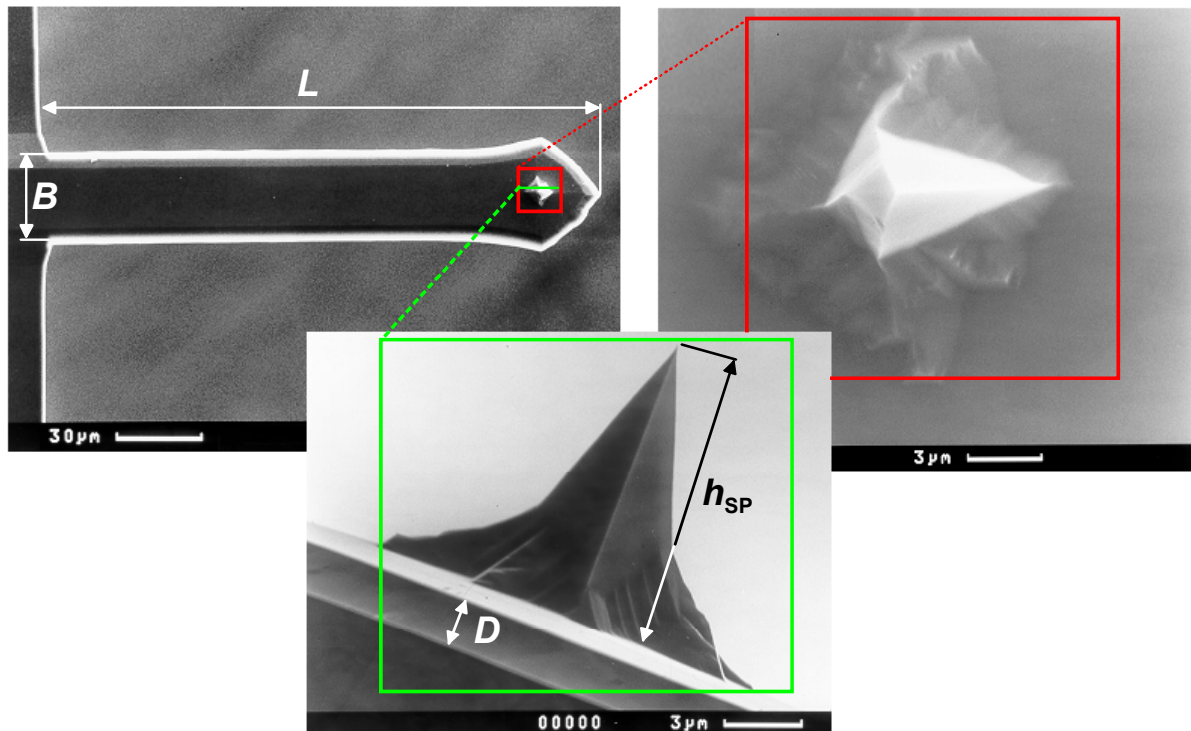


Bild 3.3-2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer EKM-Messsonde

In Tabelle 3.3-1 ist eine Übersicht über die Kenndaten der beiden verwendeten EKM-Messsondentypen angegeben. Dabei wird die längere Messsonde mit Typ L bezeichnet und die kürzere Messsonde mit Typ K. Diese Bezeichnungen sollen auch in den folgenden Kapiteln beibehalten werden.

	Typ L	Typ K
Hebelarm:		
Breite B in μm	45 - 55	22 - 33
Dicke D in μm	1,5 - 2,5	2,5 - 3,5
Länge L in μm	440 - 460	220 - 230
Federkonstante c in Nm^{-1}	0,07 - 0,4	1,2 - 5,5
Resonanzfrequenz ω_f in kHz	9 - 17	60 - 90
Messspitze:		
Höhe h_{SP} in μm	10 - 15	10 - 15
Durchmesser am Spitzenende in nm	20 - 80	20 - 80
Öffnungswinkel in Grad	30 - 40	30 - 40

Tabelle 3.3-1: Übersicht über die Kenndaten der verwendeten EKM-Messsonden

Die EKM besitzt den Nachteil, dass sie nur an ausgedehnten, relativ ebenen Flächen eingesetzt werden kann. Durch den langen Hebelarm sowie den Trägerkörper der Messsonde (siehe Bild 3.3-1), dessen Abmessungen im mm-Bereich liegen, ist der Testzugriff auf von Bonddrähten oder Gehäuseumrandungen umgebene Proben sehr schwierig. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit außer den beschriebenen EKM-

Standardmesssonden auch ein Nadelsensor [Bartzke 1994, Grunewald et al. 1995, Michels et al. 1995, Vogelgesang 2000, Neinhüs 2001] eingesetzt, welcher bedingt durch seine Geometrie ohne Probleme an für die EKM-Standardmesssonden unzugänglichen Testgebieten messen kann. Ein weiterer voraussichtlicher Vorteil des Nadelsensors ist ein geringeres Übersprechen im Messsignal durch neben dem Testpunkt befindliche signalführende Leitungen. Bei der EKM kann dieses Übersprechen zu einer deutlichen Beeinflussung des Messergebnisses führen (siehe Kapitel 5). Die Ursache liegt dabei in der Kraftwechselwirkung zwischen dem Hebelarm der Messsonde und darunter liegenden, signalführenden Leitungen. Da der Nadelsensor keinen Hebelarm besitzt, kann vermutet werden, dass gegenüber den EKM-Standardmesssonden ein verringertes Übersprechen erreichbar ist.

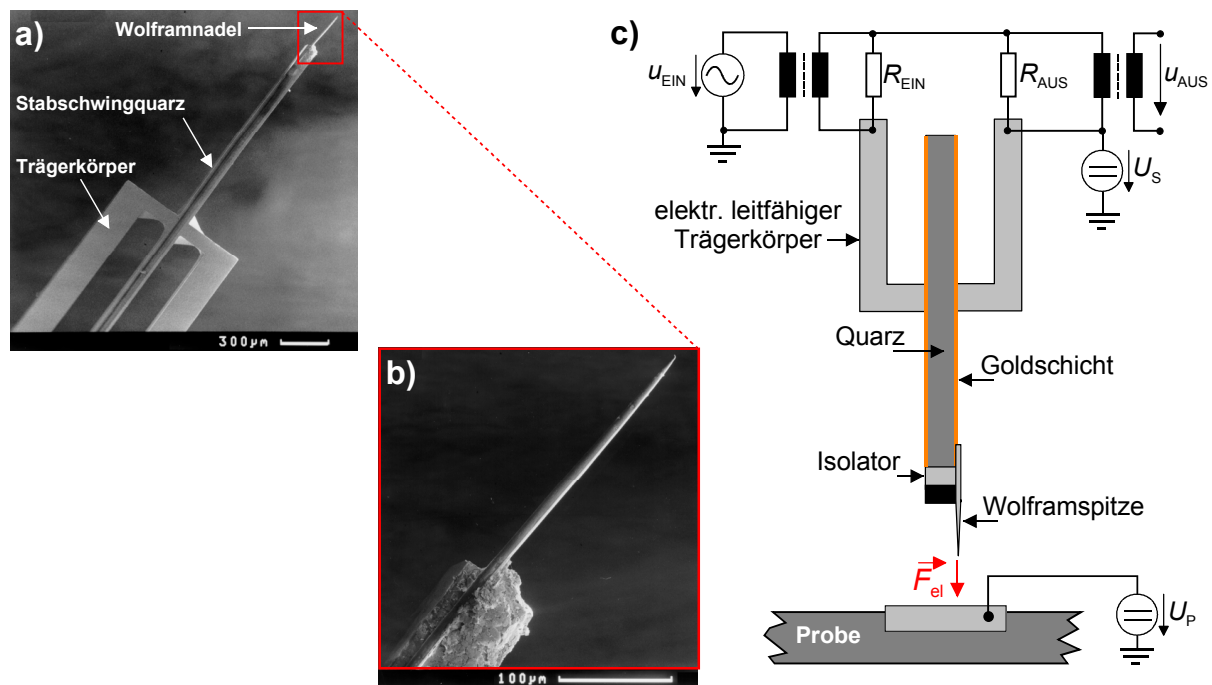


Bild 3.3-3: a), b): Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Nadelsensors
c): Elektrische Beschaltung des Nadelsensors

Der Nadelsensor besteht aus einem Stabschwingquarz, welcher senkrecht zur Probenoberfläche zum Schwingen angeregt wird und einer daran befestigten Messspitze (siehe Bild 3.3-3). Die Anregungsspannung u_{EIN} , deren Frequenz dicht bei der Resonanzfrequenz ω_r des Quarzschwingers von 1 MHz liegt, wird über einen Trägerkörper und zwei aufgedampfte Goldelektroden an den Quarz geführt. Das Wirkungsprinzip des Nadelsensors ist dem der im Nichtkontaktmodus betriebenen Rasterkraftmikroskopie sehr ähnlich. Der Schwingquarz kann ebenfalls als durch eine externe Kraft zum Schwingen angeregtes Feder-Masseschwingungssystem angesehen werden, dessen Güte Q durch je nach Anwendung unterschiedliche Kraftwechselwirkungen zwischen der Messspitze und der Probe beeinflusst wird. Über

die Verschiebung der Schwingungsamplitude bzw. –phase können dann Rückschlüsse auf diese Kraftwechselwirkung gezogen werden.

Die elektrische Beschaltung des Quarzschwingers ist in Bild 3.3-3c) dargestellt. Das aus dem Schwingquarz und den beiden Widerständen R_{EIN} und R_{AUS} bestehende Zweitor bildet einen Bandpass, dessen Durchlassfrequenz der Resonanzfrequenz ω_r des Quarzes entspricht. Dieser Bandpass wird eingangsseitig bei einer festen, durch die Spannungsquelle u_{EIN} vorgegebenen Frequenz betrieben. Durch eine Kraftausübung auf die Messspitze findet eine Veränderung des Schwingungsverhaltens des Quarzes und somit eine Variation der Übertragungsfunktion des Bandpasses statt. Auf diese Weise können über die Messung der Amplitude und Phase der Ausgangsspannung u_{AUS} Informationen über die Kraftwirkung auf die Messspitze gewonnen werden. Im verwendeten Messaufbau wird zur Bestimmung der Kraftwechselwirkung zwischen der Probe und der Messspitze die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen Eingangsspannung u_{EIN} und Ausgangsspannung u_{AUS} ausgewertet. Die Messung der Amplitudenänderung $\Delta\hat{u}_{\text{AUS}}$ der Ausgangsspannung ergab weniger gute Resultate und wurde daher nicht als Messgröße ausgewählt.

Für die elektrischen Messungen ist eine weitere Spannungsquelle U_s in den Messaufbau integriert. Über diese Spannungsquelle wird die für die Spannungsmessungen notwendige elektrische Beschaltung der Messspitze festgelegt.