

4. Systematische Untersuchung der EKM-Leistungsparameter bezüglich Messungen an Submikrometerleitungen

Für jedes technische System existieren verschiedene, das System charakterisierende Größen, über deren Ausprägung die Leistungsfähigkeit des Systems beschrieben wird. Die für die elektrische Rasterkraftmikroskopie charakteristischen Größen, im folgenden auch Leistungsparameter genannt, wurden in der Vergangenheit schon des öfteren evaluiert [Leyk 1998, Wittpahl 2000]. Allerdings lag der Fokus dieser Untersuchungen auf der Angabe der Leistungsparameter in Bezug auf Höchstfrequenzmessungen in integrierten Schaltungen. Dagegen wurden die Leistungsparameter hinsichtlich des eigentlichen Einsatzgebiets der EKM, also elektrischen Messungen an ultrakleinen Strukturen, nur oberflächlich betrachtet. So wurde z.B. die elektrische Ortsauflösung der EKM aus einer einzelnen Messung abgeleitet und die Spannungsauflösung immer als von der Strukturbreite unabhängiger Wert angegeben [Böhm 1995, Leyk 1998, Wittpahl 2000]. Systematische Untersuchungen bezüglich des Verhaltens der Leistungsparameter bei Messungen an Strukturbreiten im Bereich der Auflösungsgrenze der EKM fanden nicht statt. Allerdings war zur Zeit der durchgeführten Untersuchungen die genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge noch nicht unbedingt erforderlich, da die damals aktuellen Strukturbreiten weit von der Auflösungsgrenze der EKM entfernt lagen.

Heute sind die immer kleiner werdenden Strukturbreiten bei den integrierten Schaltungen jedoch in Bereiche gelangt, die in der Nähe der elektrischen Ortsauflösung der EKM liegen. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Messungen an derart kleinen Strukturen einige Leistungsparameter eine Abhängigkeit von der Strukturbreite aufweisen, die nicht mehr vernachlässigbar gering ist. So nimmt z.B. die Spannungsauflösung mit sinkender Strukturbreite ab und kann nicht mehr wie bisher als konstanter Wert angenommen werden [Behnke et al. 1999]. Für eine sinnvolle Interpretation von EKM-Messergebnissen, die an ultrakleinen Strukturen erzielt werden, ist die Kenntnis dieser Abhängigkeit unerlässlich. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die wichtigsten Leistungsparameter der EKM auf eine mögliche Abhängigkeit von der Strukturbreite hin untersucht werden. Nachdem die in Frage kommenden Leistungsparameter festgestellt worden sind, wird der Verlauf dieser Abhängigkeit mit Hilfe von theoretischen Überlegungen und experimentellen Untersuchungen ermittelt.

Wie bereits erwähnt, erreichen die Strukturbreiten integrierter Schaltungen langsam die räumliche Auflösungsgrenze der EKM. Während für die Atomkraftmikroskopie immer feinere Messspitzengeometrien entwickelt wurden, um die topographische Ortsauflösung zu verbessern, gab es bei der EKM keine derartigen

Optimierungen. EKM-Messungen an in wenigen Jahren aktuellen Strukturbreiten werden jedoch mit den heute verwendeten EKM-Standardmesssonden nicht mehr möglich sein, so dass auch hier eine Optimierung der Messspitzengeometrie erforderlich wird. Bei der EKM ist die Optimierung der Messspitzengeometrie in Bezug auf eine verbesserte elektrische Ortsauflösung allerdings komplizierter als bei der Atomkraftmikroskopie, wo lediglich feinere Messspitzenenden realisiert werden müssen, da auch die EKM-Spannungsauflösung von der Messspitzengeometrie abhängig ist. Am Ende des Kapitels wird daher ein Simulationsprogramm entwickelt, um die Abhängigkeit der elektrischen Ortsauflösung und der Spannungsauflösung der EKM von der Messspitzengeometrie zu untersuchen. Mit Hilfe dieser Untersuchungen kann dann eine Aussage bezüglich der Optimierungsmöglichkeiten der Messspitzengeometrie in Bezug auf diese beiden Leistungsparameter getroffen werden.

4.1. Die Leistungsparameter der EKM

Da die EKM-Leistungsparameter bereits in der Vergangenheit untersucht worden sind, braucht keine komplett neue Betrachtung aller Leistungsparameter durchgeführt werden. Lediglich die Abhängigkeit der einzelnen Leistungsparameter von der Strukturbreite muss neu erarbeitet werden. Dazu werden im Folgenden die wichtigsten Leistungsparameter kurz vorgestellt und festgestellt, ob eine derartige Abhängigkeit denkbar ist. Die in Frage kommenden Parameter werden dann in den nächsten Unterkapiteln genauer auf ihre Abhängigkeit von der Strukturbreite hin untersucht.

4.1.1. Die Messempfindlichkeit

Laut Definition [Meinke und Gundlach 1968] gibt die Messempfindlichkeit das minimal detektierbare Messsignal bei einer Empfängerbandbreite von 1 Hz an. Für das minimal detektierbare Signal wird dabei ein Signal-Rauschverhältnis von 1 angenommen. Auf die EKM bezogen, gibt die Messempfindlichkeit die minimal detektierbare elektrische Kraft $\vec{F}_{el,min}$ an. Da die Detektion der elektrischen Kraft \vec{F}_{el} über ein Laser-Photodiodensystem erfolgt, kann anstelle der minimal detektierbaren elektrischen Kraft $\vec{F}_{el,min}$ auch der minimal aus dem Rauschen detektierbare Detektorstrom angegeben werden (siehe Bild 4.1-1). Als Rauschprozesse treten das thermische Rauschen der Messsonde, das Rauschen der Laserdiode sowie das Rauschen der Photodioden auf. Die minimal detektierbare elektrische Kraft $\vec{F}_{el,min}$ entspricht nun derjenigen Kraft, welche einen dem Rauschstrom i_{rausch} entsprechenden Photostrom i_{signal} erzeugt. Für das in dieser Arbeit verwendete EKM-Testsystem wurde der die Messempfindlichkeit festlegende Rauschstrom i_{rausch} bereits theoretisch und

experimentell ermittelt [Leyk 1998]. Es wurde dabei der durch den Laser erzeugte Photostrom i_0 in Verhältnis zum Rauschstrom gesetzt. Hiermit ergab sich ein berechnetes Signal-Rauschverhältnis von 55 dB für Messungen bei der Resonanzfrequenz ω_r der Messsonde und von 69 dB für Messungen im Nichtresonanzfall. Die experimentellen Untersuchungen führten zu einem etwas schlechteren Signal-Rauschverhältnis von 45 dB für Messungen im Resonanzfall.

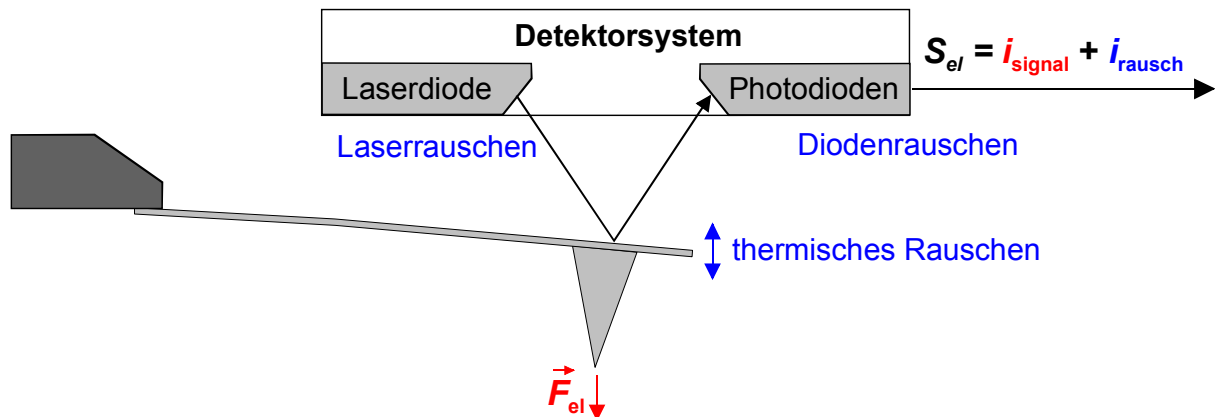


Bild 4.1-1: Rauschprozesse, welche die Messempfindlichkeit der EKM beeinflussen

Die Messempfindlichkeit ergibt sich aus dem Rauschen des EKM-Testsystems und ist somit unabhängig von der Probe. Aufgrund dessen ist eine Abhängigkeit der Messempfindlichkeit von der Strukturweite a nicht gegeben.

4.1.2. Die Spannungsauflösung

Die Spannungsauflösung der EKM ist eng mit der Messempfindlichkeit verbunden und wird aufgrund dessen auch häufig mit ihr verwechselt. Bei einem direkten Messverfahren, welches als Eingangsgröße die elektrische Spannung besitzt, entsprechen sich diese beiden Leistungsparameter. Da die EKM die elektrische Spannung jedoch nicht direkt misst, sondern über die elektrische Kraft \vec{F}_{el} indirekt bestimmt, muss zwischen der Spannungsauflösung und der Messempfindlichkeit unterschieden werden. Wie der Name schon aussagt, gibt die Spannungsauflösung die minimal aus dem Rauschen detektierbare Probenspannung $u_{p,min}$ an. Betrachtet man die Gleichung für den Zusammenhang zwischen der Probenspannung u_p und der elektrischen Kraft \vec{F}_{el} , so wird ersichtlich, dass die Spannungsauflösung von der Strukturweite a der Probe abhängig ist.

$$\vec{F}_{el} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC(a, z_0)}{dz} (U_S - U_P)^2 \vec{e}_z \quad (4.1-1)$$

Die Geometrie der Probe geht nämlich in die Kapazität C der Messsonden-Probenanordnung ein und beeinflusst damit die elektrische Kraft \vec{F}_{el} . Es kann bei

unterschiedlichen Probengeometrien somit vorkommen, dass dieselbe Probenspannung u_P unterschiedliche elektrische Kräfte \vec{F}_{el} erzeugt. Die Folge sind unterschiedliche Spannungsaufösungen. Bei größeren Strukturbreiten fällt diese Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite a kaum ins Gewicht, so dass die Spannungsauflösung in der Vergangenheit als ein von der Strukturbreite a unabhängiger Wert angegeben worden ist. Für das genutzte EKM-Testsystem wurde so für die dynamische Spannungsmessung eine minimal detektierbare Spannungsamplitude $\hat{u}_{P,min}$ von 31 mV [Leyk 1998] bei einem Messspitzen-Probenabstand z_0 von 30 nm ermittelt. Bei Strukturbreiten, welche deutlich im Submikrometerbereich liegen, ist die Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite a allerdings nicht mehr vernachlässigbar [Behnke et al. 1999] und muss daher bei der Interpretation von Messergebnissen berücksichtigt werden.

4.1.3. Die Ortsauflösung

Die Ortsauflösung beschreibt die Genauigkeit, mit der ein Messsystem eine ortsabhängige Größe auflösen kann. Sie ist definiert als der geringst mögliche Abstand zweier benachbarter Punkte, die bei einer Abbildung noch deutlich voneinander getrennt erscheinen [Brockhaus 1951]. Die Ortsauflösung wird in der Regel über die Flankensteilheit des gemessenen Signalverlaufs s_{mess} bei Messung an einem abrupten Übergang der Messgröße s_{real} ermittelt (siehe Bild 4.1-2) [Kölzer et al. 1992]. Als Ortsauflösung wird dann der Abstand zwischen dem 10% und dem 90%-Wert des maximalen Messsignals $s_{mess,max}$ angesehen.

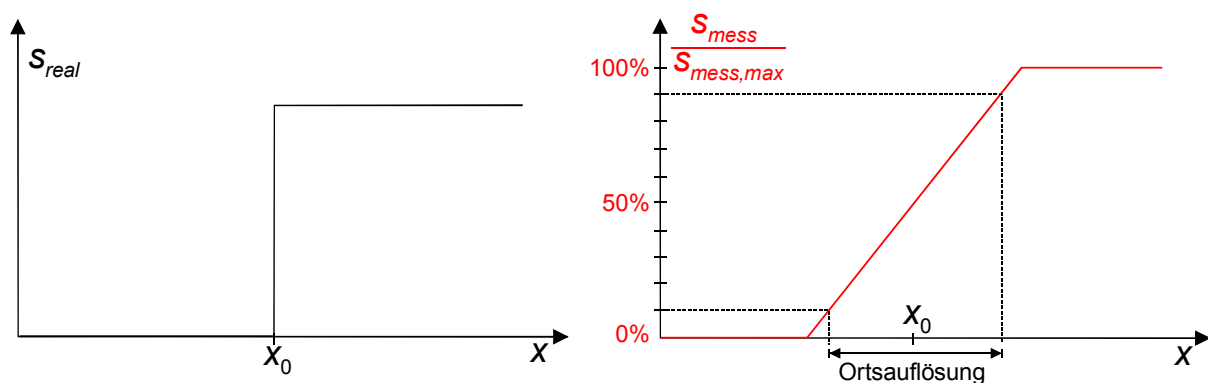


Bild 4.1-2: Bestimmung der Ortsauflösung über die Flankensteilheit des Messsignals s_{mess} bei einem abrupten Wechsel der Messgröße s_{real}

Im Fall der EKM werden sowohl Topographien als auch elektrische Spannungen in Abhängigkeit vom Ort gemessen. Für beide Messungen kann daher auch eine Ortsauflösung angegeben werden. Um Verwechslungen zu verhindern, wird für die elektrischen Messungen der Begriff der elektrischen Ortsauflösung verwendet, während bei den Topographiemessungen von der topographischen Ortsauflösung

gesprochen wird. Mit einem im Nichtkontaktmodus betriebenen Rasterkraftmikroskop lassen sich extrem hohe topographische Ortsauflösungen erzielen. In der Literatur werden subatomare Auflösungen angegeben [Gisibel 2000]. Für die EKM ist in erster Linie die elektrische Ortsauflösung von Bedeutung. Mit der oben angegebenen allgemeinen Definition entspricht die elektrische Ortsauflösung dem Abstand, bei welchem sich zwei verschiedene Spannungspegel auf der Probenoberfläche noch deutlich voneinander unterscheiden. Die Ermittlung der elektrischen Ortsauflösung kann wie in Bild 4.1-2 beschrieben über die Flankensteilheit des EKM-Messsignals bei einer Linienrasterung über einen abrupten Potenzialwechsel auf der Probenoberfläche erfolgen. Geht man davon aus, dass sich nur eine einzige Potenzialstufe unter der Messspitze befinden darf, so ist die elektrische Ortsauflösung eine von der Strukturbreite a unabhängige Größe, da die Struktur der Probe festgelegt ist. Sie besteht aus zwei Halbebenen mit jeweils unterschiedlichen, konstanten Potenzialen. Für die Praxis ist die auf diese Weise bestimmte elektrische Ortsauflösung nur für EKM-Messungen an sehr breiten Leitungen relevant, da hier die 2. Potenzialstufe, welche sich durch die 2. Seite der Leitung ergibt, so weit von der ersten Potenzialstufe entfernt liegt, dass sich der Maximalwert des EKM-Messsignals einstellen kann. Die beiden Potenzialwechsel sind in diesem Fall hinreichend weit voneinander entfernt. Befindet sich dagegen eine sehr schmale Leitung unter der Messspitze, erreicht das Messspitzenende bei der Linienrasterung bereits die 2. Seite der Leitung bevor sich das maximal mögliche Messsignal einstellen konnte. Die Folge ist ein anderer Flankenverlauf des EKM-Messsignals als bei Linienrasterungen über Leitungen mit großen Strukturbreiten und somit eventuell eine andere elektrische Ortsauflösung. Die elektrische Ortsauflösung kommt also als von der Strukturbreite a abhängige Größe in Frage.

Frühere Messungen mit dem vorhandenen EKM-Testsystem ergaben eine elektrische Ortsauflösung im Bereich von 80 nm [Leyk 1998, Wittpahl 2000]. Hier wurden allerdings keine systematischen Untersuchungen mit Messungen an verschiedenen Strukturbreiten durchgeführt. Für genauere Aussagen sind daher weitere Messungen und theoretische Überlegungen notwendig.

4.1.4. Die Zeitauflösung, Bandbreite und Frequenzauflösung

Die Zeitauflösung beschreibt die Genauigkeit, mit der ein Messsystem eine zeitabhängige Größe auflösen kann. Entsprechend der Ortsauflösung kann die Zeitauflösung über die Flankensteilheit des gemessenen zeitlichen Signalverlaufs $s_{\text{mess}}(t)$ bei Messung an einem abrupten Übergang der Messgröße $s_{\text{real}}(t)$ ermittelt werden. In Bild 4.1-2 braucht daher nur die x -Achse durch eine t -Achse ersetzt zu werden. Da mit der EKM nur auf indirektem Wege hochfrequent gemessen werden kann (siehe Kapitel 2.4.), wird die Zeitauflösung der EKM durch die Breite der

Abtastpulse (siehe Kapitel 2.4.2.) festgelegt. Mit dem vorhandenen EKM-Testsystem konnte eine Zeitauflösung von 1,2 ps erreicht werden [Leyk 1998]. Eine Verbesserung der Zeitauflösung ist über die Erzeugung noch kürzerer Abtastpulse möglich [van der Weide 1994]. Eine Abhängigkeit der Zeitauflösung von der Strukturbreite a der Probe ist nicht gegeben, da die Erzeugung der Abtastpulse in keinem Zusammenhang mit der Probengeometrie steht.

Zur Bestimmung der Bandbreite wird die Frequenz der Messgröße, also im Fall der EKM die Frequenz ω_p der Probenspannung u_p , bei gleichbleibender Amplitude immer weiter erhöht und dabei die Messsignalamplitude aufgenommen. Die Bandbreite des Testsystems entspricht dann genau der Frequenz, bei welcher die Messsignalamplitude um 3 dB gegenüber dem Maximalwert abgefallen ist. Zur Berechnung der Bandbreite der EKM wird die Zeitkonstante des durch die Messsonden-Probenanordnung gebildeten RC-Glieds ermittelt. Als bestimmende Kapazität geht hier die Messsonden-Probenkapazität C ein. Damit ist eine Abhängigkeit der EKM-Bandbreite von der Strukturbreite a möglich. Aufgrund der extrem hohen, theoretischen Bandbreite der EKM, die im THz-Bereich liegt [Leyk 1998], ist diese Abhängigkeit allerdings praktisch nicht von Bedeutung. So ist die Erzeugung derart hochfrequenter elektrischer Spannungen bisher schwerlich möglich.

Die Frequenzauflösung gibt den minimalen Frequenzabstand an, den das Testsystem aufzulösen vermag. Im Fall der EKM müssen also 2 leicht frequenzverschobene Probenspannungen betrachtet werden. Die Frequenzauflösung wird dann erreicht, wenn diese beiden Probenspannungen nicht mehr voneinander unterschieden werden können. Im vorhandenen EKM-Testsystem sind die Signalgeneratoren für die Frequenzauflösung bestimmend. Sie besitzen eine Genauigkeit von 2 Hz im Bereich von 10 MHz bis 20 GHz und von 12 Hz im Bereich von 75 GHz bis 110 GHz [Leyk 1998]. Da die Frequenzauflösung durch die Signalgeneratoren festgelegt wird, ergibt sich keine Abhängigkeit der Frequenzauflösung a von der Strukturbreite a .

Zusammenfassung

Die kurze Untersuchung der verschiedenen Leistungsparameter auf eine mögliche Abhängigkeit von der Strukturbreite a der Probe hat ergeben, dass die Spannungsauflösung, die elektrische Ortsauflösung und die Bandbreite prinzipiell eine solche Abhängigkeit aufweisen können. Die Bandbreite der EKM besitzt allerdings einen so hohen Wert, dass eine genauere Betrachtung ihrer Abhängigkeit von der Strukturbreite a nicht notwendig und experimentell auch gar nicht möglich ist. Damit sind im Folgenden lediglich die Spannungsauflösung und die elektrische Ortsauflösung genauer zu untersuchen. Die Abhängigkeit dieser beiden Leistungsparameter von der Strukturbreite a ergibt sich aus der in der elektrischen

Kraftgleichung enthaltenen Messsonden-Probenkapazität C . Da der funktionale Zusammenhang zwischen der elektrischen Kraft \vec{F}_{el} und der Messsonden-Probenkapazität C im Geometriefaktor k der elektrischen Kraft enthalten ist, macht es Sinn, zunächst einmal die Zusammensetzung des Geometriefaktors k genauer zu betrachten.

4.2. Der Geometriefaktor der elektrischen Kraft

Die elektrische Kraft \vec{F}_{el} zwischen der Messsonde und der Probe setzt sich aus einem spannungsabhängigen und einem geometrieabhängigen Faktor, dem sogenannten Geometriefaktor k zusammen (siehe Kapitel 2.2.). Der spannungsabhängige Faktor enthält die Information über die Messsonden-Probenspannung u_{SP} und ist für das Frequenzspektrum $\hat{F}_{el}(\omega)$ der elektrischen Kraft verantwortlich. In Kapitel 2. wurde dieser Faktor hinsichtlich der Erzeugung eines detektierbaren, niederfrequenten Terms in der elektrischen Kraft \vec{F}_{el} , welcher die Probenspannungsparameter enthält, ausführlich untersucht. In diesem Kapitel wird nun genauer betrachtet, welchen Einfluss der Geometriefaktor k auf die Orts- und Spannungsauflösung der EKM hat.

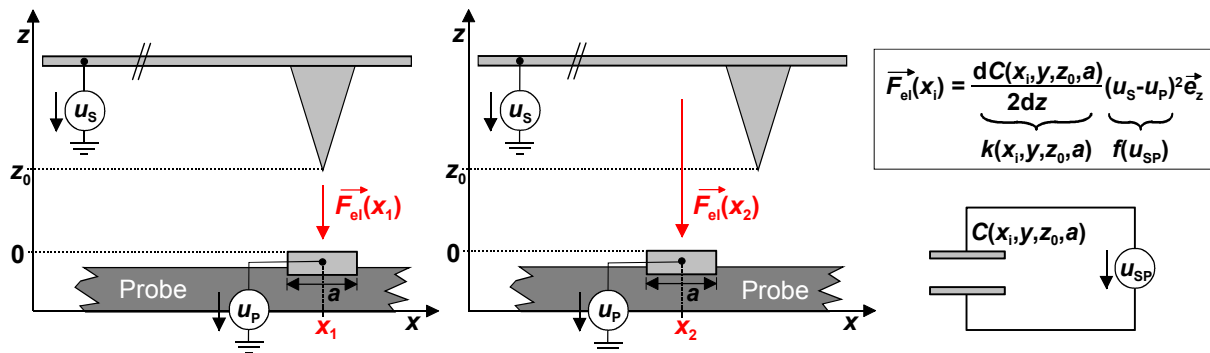


Bild 4.2-1: Abhängigkeit der elektrischen Kraft von der Position x_i der signalführenden Leitung unter der Messsonde

Stellt man sich eine Linienrasterung der Messsonde über eine signalführende Leitung vor, so bleibt die Messsonden-Probenspannung u_{SP} während der kompletten Rasterung unverändert. Folglich ist auch der spannungsabhängige Faktor in der elektrischen Kraft konstant, sofern man von einer örtlich konstanten Austrittsarbeitsdifferenz $\Delta\phi$ ausgeht. Dagegen wird sich der Geometriefaktor k aufgrund der Abhängigkeit der Kapazität C von der x -Position der Messsonde von Messpunkt zu Messpunkt verändern (siehe Bild 4.2-1). Die EKM-Linienrasterung über eine signalführende Leitung ergibt also nicht den räumlichen Verlauf der Probenspannung $u_p(x)$, sondern den räumlichen Verlauf des Geometriefaktors $k(x)$. Der spannungsabhängige Faktor entscheidet lediglich über die Ausprägung der elektrischen Kraft \vec{F}_{el} und kann somit als ortsunabhängiger Proportionalitätsfaktor

angesehen werden (siehe Bild 4.2-2). Eine direkte Proportionalität zwischen dem Verlauf der elektrischen Kraft $F_{el}(x)$ und dem räumlichen Verlauf der Probenspannung $u_p(x)$ würde sich nur dann ergeben, wenn der Geometriefaktor $k(x)$ die Form einer Rechteckfunktion besäße, welche neben der Leitung zu Null wird und über der Leitung einen konstanten Wert annimmt.

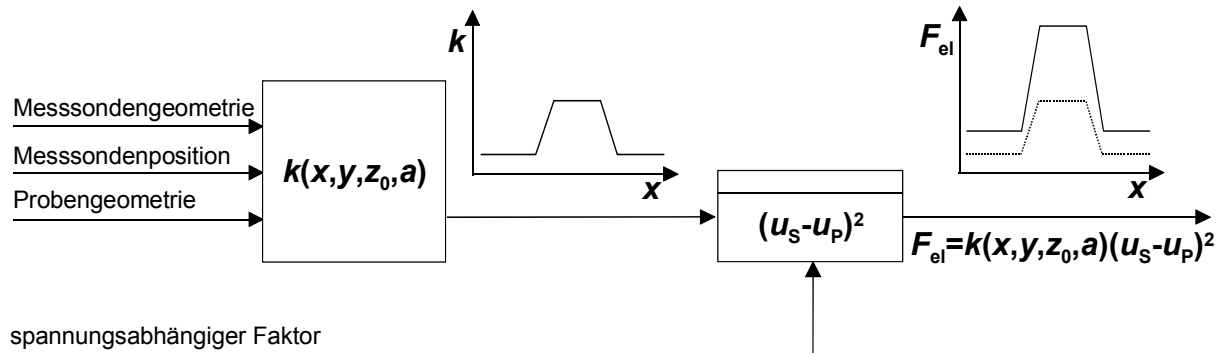


Bild 4.2-2: Schematische Darstellung der Spannungs- und Geometrieabhängigkeit der elektrischen Kraft

In der Vergangenheit wurde häufig angenommen, dass für die elektrische Kraftwechselwirkung \vec{F}_{el} nur das Plateau des Messspitzenendes relevant ist [Bloom 1994, Ho et al. 1994, Böhm 1996]. In diesem Fall konnte die Berechnung des Geometriefaktors k ohne Probleme erfolgen, da sich im elektrischen Ersatzschaltbild für die Messsonden-Probenanordnung eine einfache Plattenkondensatoranordnung ergibt. Die eine Elektrode wird dabei durch das Messspitzenende gebildet und die andere Elektrode entsteht durch die Projektion des Messspitzenendes auf die Probenoberfläche.

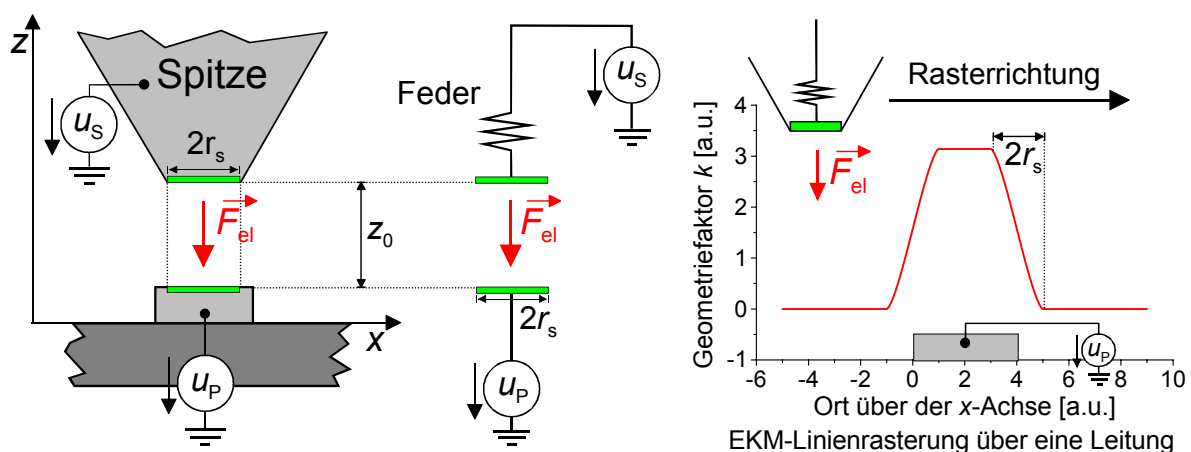


Bild 4.2-3: Das Plattenkondensatormodell zur Beschreibung der elektrischen Kraftwechselwirkung und sich damit ergebender Verlauf des Geometriefaktors $k(x)$ bei einer Linienrastrung über eine signalführende Leitung

Berechnet man für dieses sogenannte Plattenkondensatormodell den Verlauf des Geometriefaktors $k(x)$ bei einer Linienrasterung über eine signalführende Leitung, so ist dieser nur dann von Null verschieden, wenn die Projektion des Messspitzenendes auf die Probenoberfläche zumindest teilweise auf der signalführenden Leitung liegt (siehe Bild 4.2-3).

Zur Untersuchung der Zusammensetzung des Geometriefaktors k bei Messungen an Submikrometerleitungen ist in Bild 4.2-4 das Ergebnis einer Linienrasterung über eine der 250 nm Teststrukturen dargestellt. Bei dieser Messung war die Mittelleitung der Teststruktur mit einer elektrischen Wechselspannung u_p der Messsondenresonanzfrequenz ω_r beschaltet, und die Messsonde lag auf statischem Potenzial U_s . Als Messsignal wurde die elektrische Kraft bei der Messsondenresonanzfrequenz ω_r bezüglich ihrer Amplitude $\hat{F}_{el}(\omega_r)$ ausgewertet. Für den detektierten Kraftterm ergibt sich unter Anwendung von Gl. 2.2-7 die folgende Beziehung:

$$\vec{F}_{el}(\omega_r, x) = -2k(x)U_s\hat{u}_p\cos(\omega_r t)\vec{e}_z \quad (4.2-1)$$

In Gl. 4.2-1 wurde eine örtlich unveränderliche Austrittsarbeitsdifferenz $\Delta\phi$ angenommen, die ohne Beschränkung der Aussagekräftigkeit zu Null gesetzt werden darf.

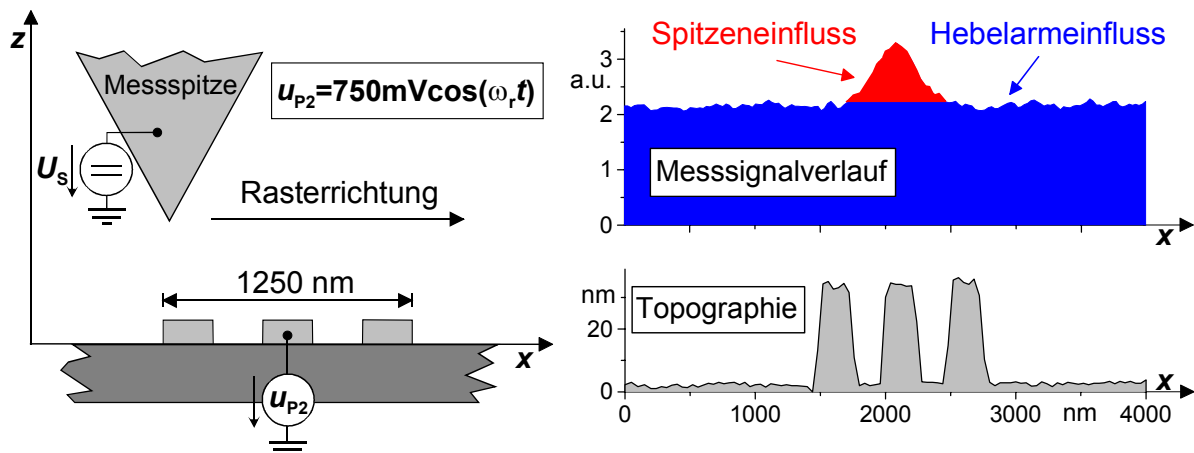


Bild 4.2-4: EKM-Messsignalverlauf bei einer Linienrasterung über eine signalführende Leitung der 250 nm Teststruktur

Betrachtet man den experimentell ermittelten Messsignalverlauf in Bild 4.2-4 und vergleicht ihn mit dem in Bild 4.2-3 dargestellten, mit dem Plattenkondensatormodell berechneten Verlauf, können kaum Übereinstimmungen festgestellt werden. So ist der gemessene Signalabfall neben der signalführenden Leitung deutlich flacher als in der Modellvorstellung. Hier müsste sich bei einem typischen Radius des Messspitzenendes von 20 nm ein Flanke von 40 nm ergeben. Die Messung zeigt jedoch Flankenverläufe von mehreren 100 nm. Außerdem bleibt das Messsignal auch weit von der signalführenden Leitung entfernt auf einem relativ

hohen, nahezu ortsunabhängigen Pegel, während nach dem Plattenkondensatormodell ein Nullsignal zu erwarten wäre. Demnach kann das Plattenkondensatormodell zur theoretischen Untersuchung des Geometriefaktors k der elektrischen Kraft \vec{F}_{el} nicht verwendet werden. Diese Aussage gilt nicht nur für die hier betrachteten Messungen an Submikrometerleitungen, sondern auch für größere Strukturbreiten a [Behnke 1998, Wand 1998, Wittpahl 2000].

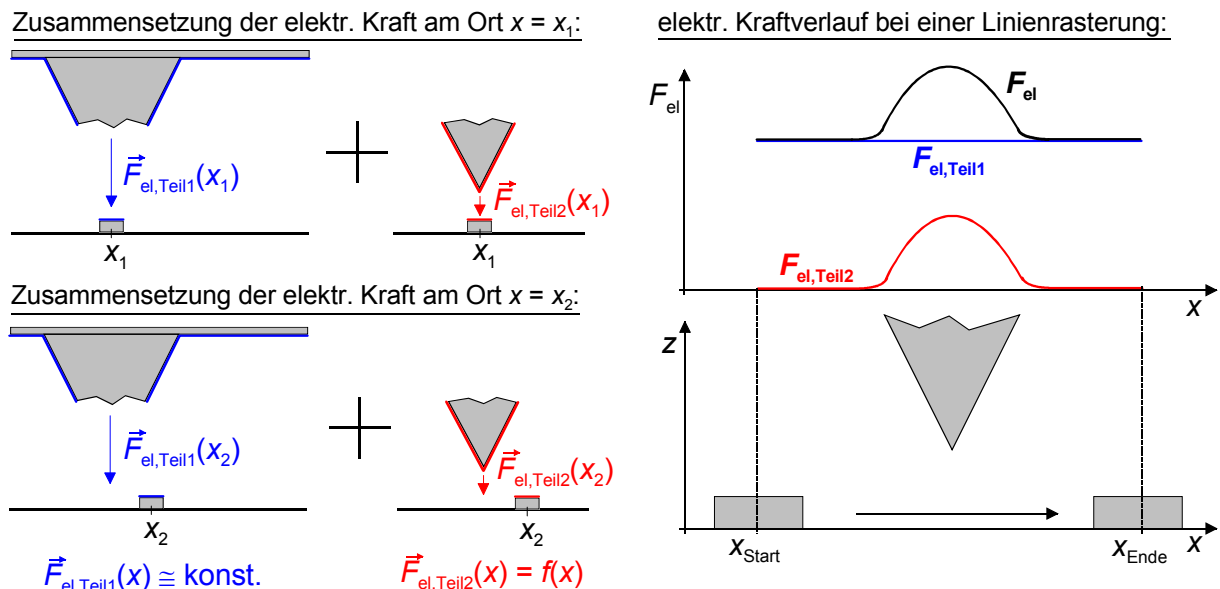


Bild 4.2-5: Gedankenexperiment zur Erklärung des in Bild 4.2-4 dargestellten Messsignalverlaufs

Zur Erklärung des experimentell ermittelten Geometriefaktorverlaufs $k(x)$ bei Messungen an Submikrometerleitungen wird in einem Gedankenexperiment die Messsonde in zwei Teile aufgetrennt. Der erste Teil besteht aus dem Hebelarm und dem daran befestigten oberen Teil der Messspitze und der zweite Teil aus dem Messspitzenende. Die elektrische Kraft \vec{F}_{el} auf die gesamte Messsonde berechnet sich aus der Addition der elektrischen Kräfte, welche auf die beiden Messsondenteile wirken (siehe Bild 4.2-5). Da für den ersten Teil der Messsonde der Abstand zur Leiterbahn sehr groß ist, wird sich die Kapazität $C_{Teil1}(x)$ dieser Anordnung während der Linienrasterung kaum verändern. Der Geometriefaktor $k_{Teil1}(x)$ bleibt also bei geringen Rasterweiten nahezu konstant. Der zweite Teil der Messsonde befindet sich dagegen dicht über der Probenoberfläche, so dass sich der Abstand zur Leiterbahn während der Rasterung gravierend verändert. Aufgrund dessen wird sich der Geometriefaktor $k_{Teil2}(x)$ des Messspitzenendes als stark ortsabhängig erweisen. Setzt man nun die beiden Messsondenteile zusammen, so erhält man im Verlauf der elektrischen Kraft $\vec{F}_{el}(x)$ einen positionsunabhängigen Gleichanteil $\vec{F}_{el,offset}$ und einen positionsabhängigen Anteil $\vec{F}_{el,signal}$, welcher nur dann deutlich von Null verschieden ist, wenn sich das Messspitzenende in unmittelbarer Nähe der Leiterbahn befindet (siehe Bild 4.2-5). Messungen an anderen Strukturbreiten a und mit anderen

Messspitzen-Probenabständen z_0 ergaben, dass sich am prinzipiellen Kraftverlauf $\vec{F}_{el}(x)$ nichts verändert. Immer trat ein relativ hoher Gleichanteil $\vec{F}_{el,offset}$ und über der signalführenden Leitung ein ortsabhängiger Nutzanteil $\vec{F}_{el,signal}$ auf. Dies ist mit dem durchgeführten Gedankenexperiment auch nachvollziehbar.

Als Ergebnis der Untersuchungen kann somit festgehalten werden, dass bei EKM-Messungen an Submikrometerleitungen der Geometriefaktor k der elektrischen Kraft aus einem nahezu ortsunabhängigen Gleichanteil k_{offset} und einem ortsabhängigen Signalanteil $k_{signal}(x,y,z_0)$ besteht:

$$k = k_{offset} + k_{signal}(x, y, z_0) \quad (4.2-2)$$

Entsprechend der Ursache für den jeweiligen Anteil wird im Folgenden der Gleichanteil k_{offset} bzw. $\vec{F}_{el,offset}$ als Hebelarmeinfluss und der ortsabhängige Signalanteil k_{signal} bzw. $\vec{F}_{el,signal}$ als Messspitzeneinfluss bezeichnet. Während der Hebelarmeinfluss aufgrund der parallelen Ausrichtung von Probenoberfläche und Hebelarm näherungsweise als Plattenkondensatoranordnung angesehen werden kann, muss zur Berechnung des Spitzeneinflusses die Geometrie der Messspitze berücksichtigt werden (siehe Bild 4.2-6).

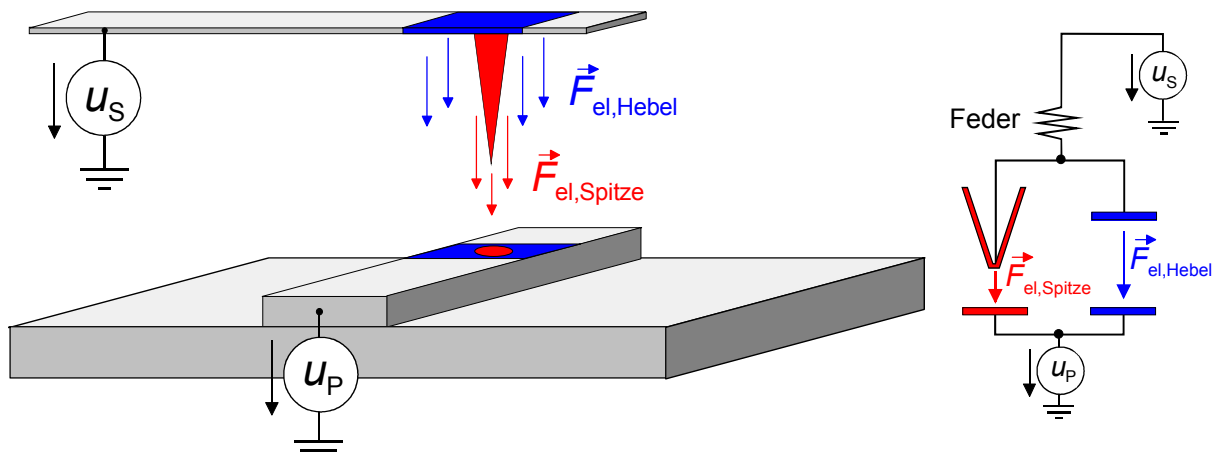


Bild 4.2-6: Aufteilung der elektrischen Kraftwechselwirkung in Hebelarm- und Messspitzeneinfluss

Da das ortsaufgelöste EKM-Messsignal alleine durch den Messspitzeneinfluss erzeugt wird, reicht es für die Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung und der Spannungsauflösung aus, den Messspitzeneinfluss zu analysieren. Für erste grundlegende Aussagen bezüglich des Verhaltens dieser beiden Leistungsparameter bei Variation der Strukturbreite a wird daher im nächsten Unterkapitel der Messspitzeneinfluss mittels einer einfachen 2-dimensionalen Modellbeschreibung untersucht.

Der Hebelarmeinfluss kann bei mehreren unter der Messspitze befindlichen signalführenden Leitungen zu einer Verfälschung der Messergebnisse durch Übersprechen führen. Dieser Effekt wird in Kapitel 5. ausführlich analysiert.

4.3. Zwei-dimensionale Modellbeschreibung des Spitzeneinflusses

Bevor nun eine experimentelle Untersuchung der elektrischen Orts- und Spannungsauflösung der EKM erfolgt, wird erst mit Hilfe einer einfachen 2-dimensionalen Modellbeschreibung für die elektrische Kraftwechselwirkung zum besseren Verständnis der geltenden Zusammenhänge beigetragen.

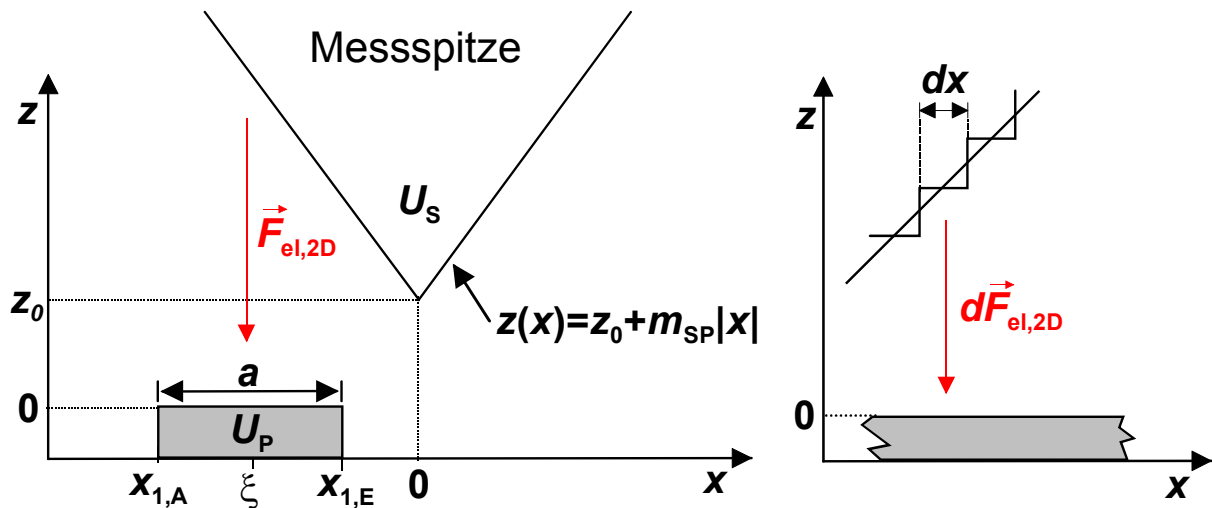


Bild 4.3-1: Zwei-dimensionale Modellbildung zur Berechnung der elektrischen Kraftwechselwirkung zwischen Messspitze und Probe

Bei der Modellbildung wird von einer dreieckförmigen Messspitze mit der linearen Randkurve $z(x) = z_0 + m_{SP}|x|$ und dem Potenzial U_S ausgegangen, die sich im Abstand z_0 über einer Leiterbahn der Strukturbreite a und dem Potenzial U_P befindet (siehe Bild 4.3-1). Zur Bestimmung der elektrischen Kraft $\vec{F}_{el,2D}$ wird die 2-dimensionale Messspitze in infinitesimal kleine, parallel zur Probenoberfläche ausgerichtete Streckenelemente dx zerlegt und für jedes dieser Flächenelemente die in z -Richtung wirksame elektrische Kraft $d\vec{F}_{el,2D}$ unter Anwendung des Plattenkondensatormodells (siehe Kapitel 2.2. und 4.2.) berechnet:

$$d\vec{F}_{el,2D} = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (U_S - U_P)^2 \frac{dx}{z(x)^2} \vec{e}_z \quad (4.3-1)$$

Die elektrische Gesamtkraft $\vec{F}_{el,2D}$, welche in z -Richtung auf die Messspitze ausgeübt wird, ergibt sich aus der Integration von $d\vec{F}_{el,2D}$ entlang der x -Achse. Da nur unmittelbar über der Leiterbahn eine elektrische Kraftwirkung auftritt, wird von der linken Kante $x = x_{1,A}$ der Leiterbahn bis zur rechten Kante $x = x_{1,E}$ integriert:

$$\vec{F}_{el,2D} = K \int_{x_{1,A}}^{x_{1,E}} \frac{dx}{z(x)^2} \cdot \vec{e}_z \quad \text{mit: } K = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (U_S - U_P)^2 \quad (4.3-2)$$

Für die Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung reicht es nicht aus, die elektrische Kraft $\vec{F}_{\text{el},2\text{D}}$ für einen einzelnen Messpunkt zu berechnen. Hierfür muss, wie in Kapitel 4.1.3. erläutert, der Flankenverlauf der elektrischen Kraft bei einer Linienrasterung über die signalführende Leitung bestimmt werden. Zur Berechnung eines solchen Kraftverlaufs mittels der 2-dimensionalen Modellbeschreibung wird angenommen, dass sich die 2-dimensionale Messspitze ortsfest mit ihrer Symmetrieachse bei $x = 0$ über der x -Achse befindet und die Leiterbahn in x -Richtung unter der Messspitze verschoben wird. Die Lage des aktuellen Leiterbahnmittelpunktes auf der x -Achse wird dabei durch die Variable ξ angegeben. In diesem Fall kann der Verlauf der elektrischen Kraft $\vec{F}_{\text{el},2\text{D}}(\xi)$ in Abhängigkeit von der Position des Leitungsmittelpunktes ξ mit folgendem Faltungsintegral berechnet werden:

$$\vec{F}_{\text{el},2\text{D}}(\xi) = K \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left[\frac{x-\xi}{a}\right] \cdot z(x)^{-2} dx \cdot \vec{e}_z \quad (4.3-3)$$

Für die im Folgenden präsentierten, mit Gl. 4.3-3 berechneten Kraftverläufe wurde bei der Messspitzenrandkurve $z(x)$ eine Steigung von $m_{\text{SP}} = 2$ zu Grunde gelegt sowie ein Messspitzen-Probenabstand von $z_0 = 50$ nm verwendet. Dies entspricht in etwa den realen Gegebenheiten bei den experimentellen Untersuchungen.

Berechnet man mit Gl. 4.3-3 elektrische Kraftverläufe $\vec{F}_{\text{el},2\text{D}}(\xi)$ für Linienrasterungen über signalführende Leitungen mit Strukturbreiten im mehrfachen Mikrometerbereich, so sind die Flankenverläufe sowie der maximal erreichte Kraftpegel nahezu unabhängig von der Strukturbreite a (siehe Bild 4.3-2). Hier liegen die beiden Seiten $x_{1,\text{A}}$ und $x_{1,\text{E}}$ der signalführenden Leitung soweit auseinander, dass sich bei einer Linienrasterung der maximal mögliche Kraftpegel einstellen kann. D.h. der Anstieg des elektrischen Kraftpegels, der sich bei Rasterung der Messspitze über den ersten Potenzialwechsel ergibt, wird komplett durchlaufen bevor der 2. Potenzialwechsel einen Einfluss auf die Kraftwechselwirkung ausübt. Folglich können bei Strukturen im Mikrometerbereich die elektrische Ortsauflösung und die Spannungsauflösung als unabhängig von der Strukturbreite a betrachtet werden.

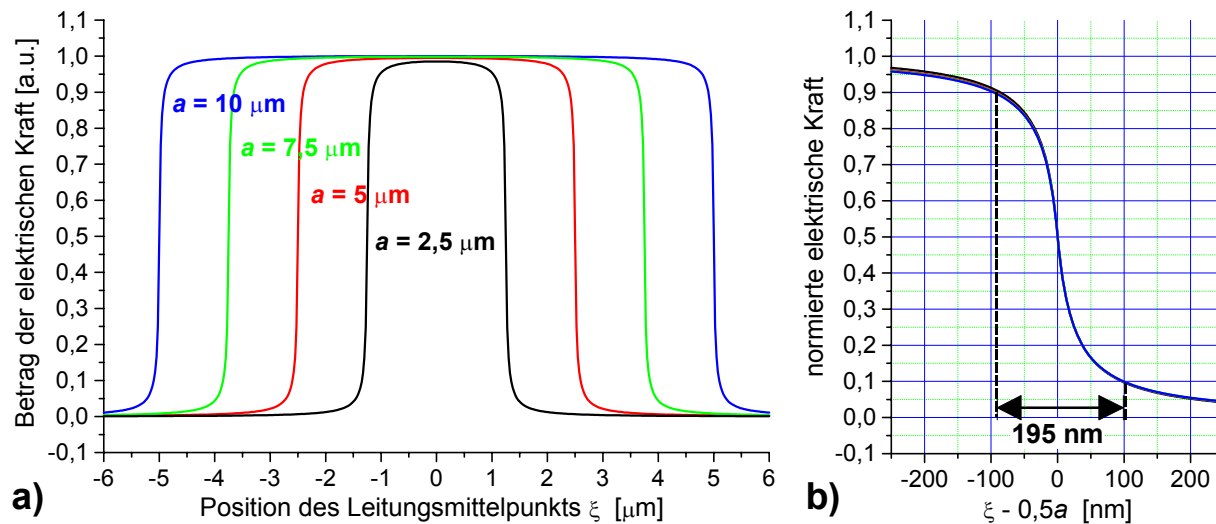


Bild 4.3-2: a) Mit dem 2-dimensionalen Modell berechnete Kraftverläufe für Linienrasterungen über relativ breite Leitungen b) Vergleich der normierten Flankenverläufe

Werden dagegen Linienrasterungen an Strukturen im Submikrometerbereich durchgeführt, so erreicht die Messspitze die 2. Seite der signalführenden Leitung bevor der Flankenanstieg der elektrischen Kraft abgeschlossen ist. In diesem Fall besitzen über der signalführenden Leitung beide Potenzialwechsel einen Einfluss auf die elektrische Kraftwechselwirkung, und es kann sich nicht mehr der maximal mögliche Kraftpegel einstellen. Die Folge ist ein von der Strukturbreite a abhängiger Flankenverlauf sowie maximaler Kraftpegel (siehe Bild 4.3-3). Aufgrund der unterschiedlichen Flankenverläufe ergibt sich bei Messungen an Submikrometerleitungen eine von der Strukturbreite a abhängige elektrische Ortsauflösung, während die verschiedenen maximalen Kraftpegel zu einer Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite a führen.

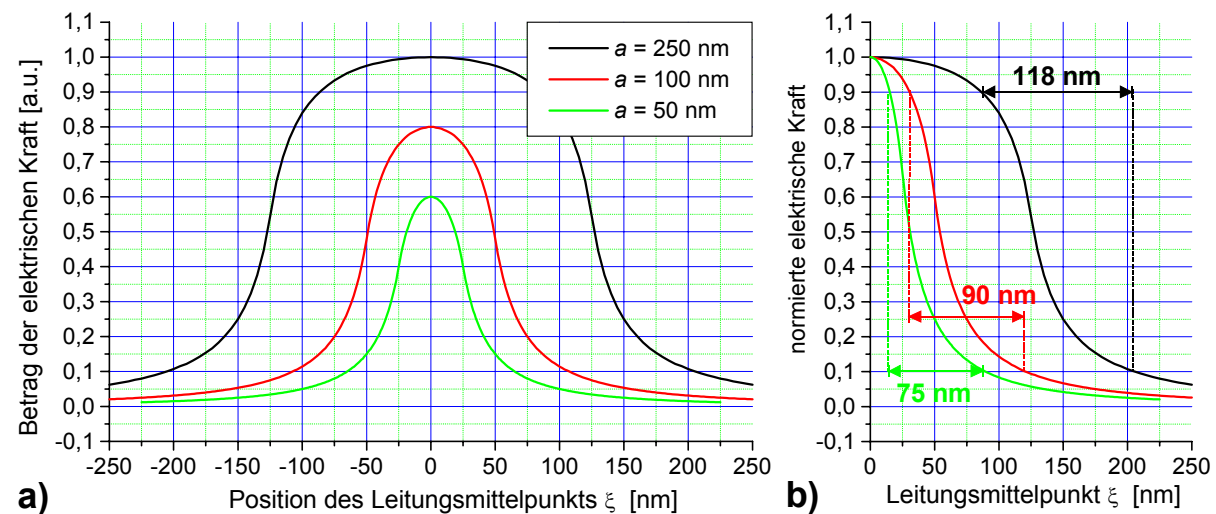


Bild 4.3-3: a) Mit dem 2-dimensionalen Modell berechnete Kraftverläufe für Linienrasterungen über Submikrometerleitungen b) Vergleich der normierten Flankenverläufe

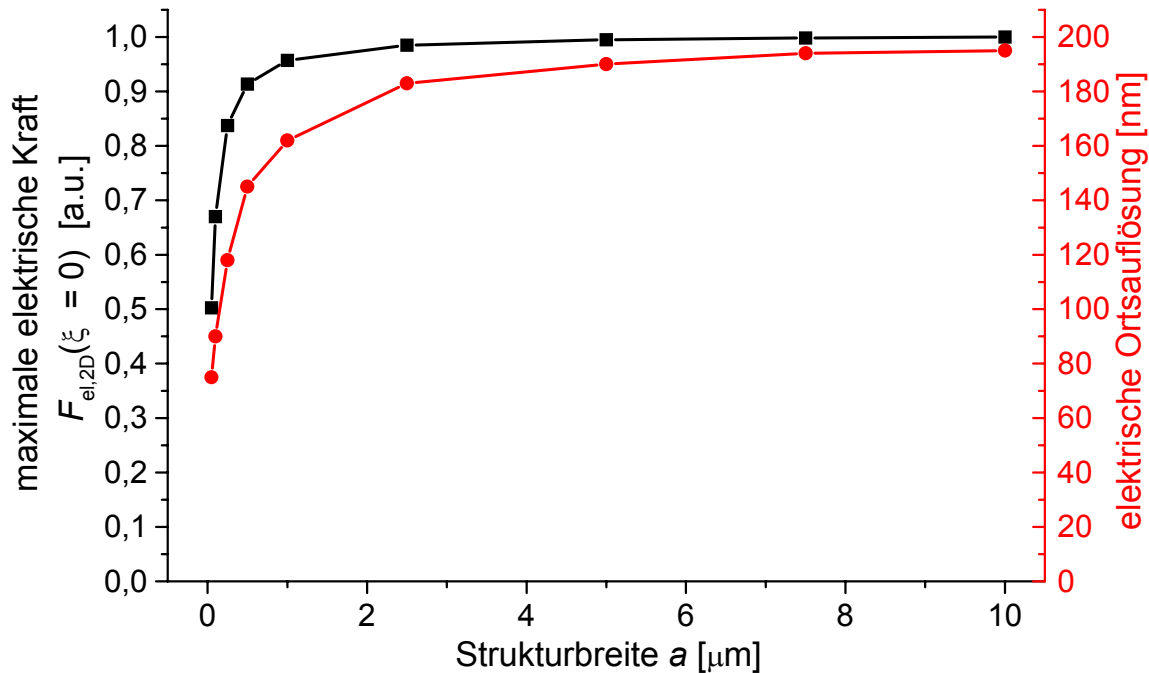


Bild 4.3-4: Mit dem 2-dimensionalen Modell berechnete Abhängigkeit des maximalen Kraftpegels und der elektrischen Ortsauflösung von der Strukturbreite a

Bild 4.3-4 zeigt den Verlauf der Abhängigkeit von der Strukturbreite a für die elektrische Ortsauflösung und die Spannungsauflösung der EKM. Es ist deutlich zu erkennen, dass die elektrische Ortsauflösung sowie die zur maximalen elektrischen Kraft proportionale Spannungsauflösung bei großen, im Mikrometerbereich liegenden Strukturbreiten nahezu unabhängig von der Strukturbreite a sind. Wird dagegen an Submikrometerstrukturen gemessen, so ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Hier findet mit sinkender Strukturbreite eine Verbesserung der elektrischen Ortsauflösung statt, die allerdings mit einer stark abnehmenden Spannungsauflösung einher geht.

Mittels der 2-dimensionalen Modellbeschreibung konnte somit der prinzipielle Verlauf der Abhängigkeit der elektrischen Ortsauflösung sowie der Spannungsauflösung von der Strukturbreite a und die Ursache für diese Abhängigkeit angegeben werden. Da jedoch das 2-dimensionale Modell die 3-dimensionale Realität mit Sicherheit nicht sehr präzise wiedergibt, können aus den in Bild 4.3-4 dargestellten Abhängigkeiten keine quantitativen Aussagen bezüglich des Verhaltens der beiden Leistungsparameter getroffen werden. Aufgrund dessen werden nun anhand von experimentellen Ergebnissen diese Abhängigkeiten genauer untersucht.

4.4. Experimentelle Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung und Spannungsauflösung

Die experimentellen Untersuchungen der elektrischen Ortsauflösung und der Spannungsauflösung bei EKM-Messungen an Submikrometerstrukturen erfolgten an den in Kapitel 3.2. beschriebenen Submikrometer-Teststrukturen. In Kapitel 4.3. konnte gezeigt werden, dass diese beiden EKM-Leistungsparameter bei Messungen an ultrakleinen Strukturen eine Abhängigkeit von der Strukturbreite a aufweisen. Aufgrund dieser Abhängigkeit kann die elektrische Ortsauflösung nicht wie bisher praktiziert aus einer einzelnen EKM-Messung bestimmt werden. Mit systematischen Messungen an den verschiedenen Strukturbreiten der Submikrometer-Teststrukturen sollte es jedoch möglich sein, die elektrische Ortsauflösung der EKM relativ genau zu ermitteln. Dasselbe gilt für die Bestimmung der EKM-Spannungsauflösung. Bei Messungen an Submikrometerstrukturen ist mit einer starken Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite zu rechnen, deren Verlauf mit Hilfe von Messungen an den Submikrometer-Teststrukturen bestimmt werden kann. Die Kenntnis dieser Abhängigkeit ist wichtig, um EKM-Messergebnisse, welche an unterschiedlichen Strukturbreiten erzielt worden sind, vergleichen zu können.

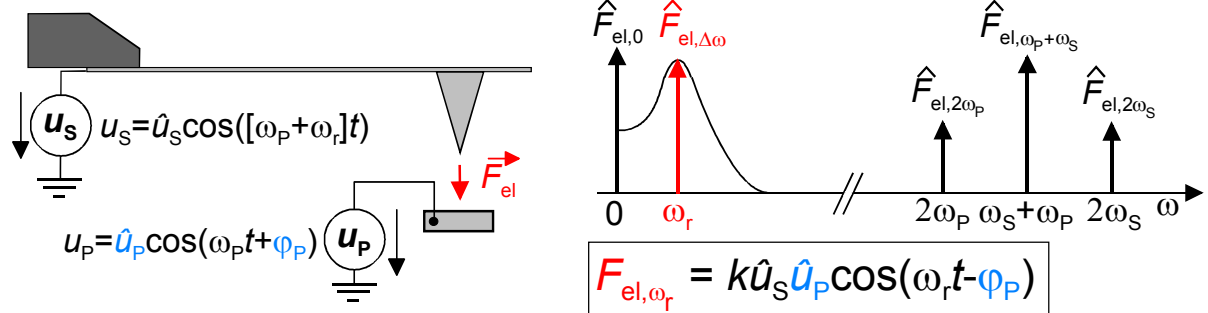
4.4.1. Verwendete Messanordnung

Da die Submikrometer-Teststrukturen nicht hochfrequenztauglich sind und eine starke Abhängigkeit des Frequenzgangs von der Strukturbreite a aufweisen, können nur bei sehr geringer Frequenz ω der Probenspannung u_p vergleichbare Messergebnisse erzielt werden. Aus diesem Grund wurde eine Messanordnung gewählt, bei welcher die signalführenden Leitungen mit Wechselspannungen u_p der Messsondenresonanzfrequenz ω_r beschaltet wurden, während die Messsonde auf statischem Potenzial U_S lag. Detektiert wurde die Messsondenschwingung bei der Resonanzfrequenz ω_r . Für den zugrunde liegenden elektrischen Kraftterm $\vec{F}_{el}(\omega_r)$ ergibt sich unter Anwendung von Gl. 2.2-7 der folgende Zusammenhang:

$$\vec{F}_{el}(\omega_r) = -2k \left[U_S + \frac{\Delta\phi}{e} \right] \hat{u}_p \cos(\omega_r t + \varphi_p) \vec{e}_z \quad (4.4-1)$$

Betrachtet man Gl. 4.4-1 und vergleicht diese mit dem detektierten Kraftterm bei der heterodynen Mischtechnik (siehe Gl. 2.4-9), so wird ersichtlich, dass die gewählte Messanordnung und die heterodyne Mischtechnik einen elektrischen Kraftterm bei der Messsondenresonanzfrequenz ω_r erzeugen, welcher direkt proportional zur Amplitude \hat{u}_p der Probenspannung ist und auch deren Phase φ_p enthält (siehe Bild 4.4-1). Es können daher mit der beschriebenen Messanordnung für die heterodyne Mischtechnik repräsentative Ergebnisse erzielt werden.

heterodyne Mischtechnik:



verwendete Meßanordnung:

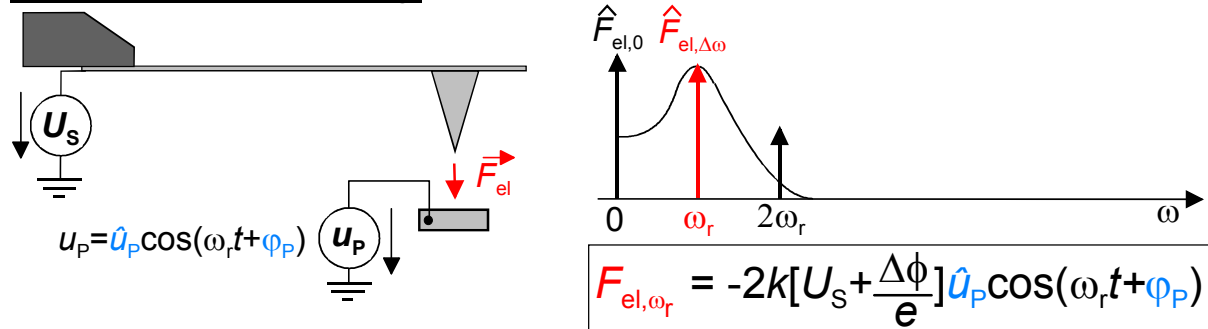


Bild 4.4-1: Frequenzspektrum der elektrischen Kraft bei der heterodynen Mischtechnik und der verwendeten Messanordnung

4.4.2. Untersuchung der EKM-Spannungsauflösung

Bei den Messungen zur Untersuchung der EKM-Spannungsauflösung an Submikrometerstrukturen wurde die Mittelleitung der Teststrukturen mit einer Wechselspannung u_{P2} der Resonanzfrequenz ω_r beschaltet, während die beiden Außenleitungen auf Massepotential lagen (siehe Bild 4.4-2a). Anschließend wurde eine 2-dimensionale Flächenrasterung mit einem Messspitzen-Probenanstand z_0 von ca. 50 nm durchgeführt, in deren Verlauf sich die Spannungsamplitude \hat{u}_{P2} der Mittelleitung linear verringerte. In Bild 4.4-2b ist das Ergebnis einer solchen Messung dargestellt, welche an einer der 1000 nm Teststrukturen erfolgte. Anhand dieser Messung wird die gewählte Vorgehensweise zur Bestimmung der EKM-Spannungsauflösung erläutert.

Aus dem 2-dimensionalen Verteilungsbild der Messsignalamplitude werden zwei Linienrasterungen in y -Richtung extrahiert: eine unmittelbar über der signalführenden Leitung ($x = x_1$) und eine neben der signalführenden Leitung ($x = x_2$). Da die Spannungsamplitude \hat{u}_{P2} während der Messung linear verändert worden ist, kann jeder y -Koordinate eine Spannungsamplitude \hat{u}_{P2} zugeordnet werden (siehe Bild 4.4-3a). Man erhält somit die Verläufe der EKM-Messsignalamplitude über und neben der signalführenden Leitung in Abhängigkeit von der angelegten Spannungsamplitude \hat{u}_{P2} .

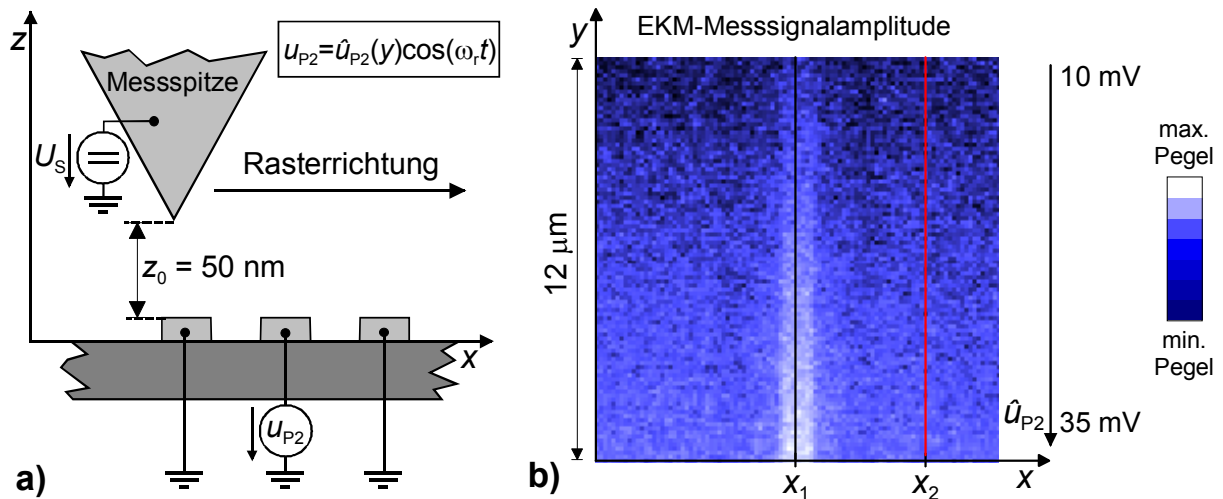


Bild 4.4-2: a) Beschaltung der Teststrukturen bei den Messungen zur EKM-Spannungsauflösung; b) an der 1000 nm Teststruktur aufgenommenes Spannungskontrastbild

Im nächsten Schritt werden durch die beiden Messsignalamplitudenverläufe Ausgleichsgeraden gelegt und die Standardabweichung des Messsignals von diesen Geraden berechnet. Die Grenze des EKM-Spannungsauflösungsvermögen ist dann erreicht, wenn der Abstand der beiden Ausgleichsgeraden der doppelten Standardabweichung des Messsignals von den Ausgleichsgeraden entspricht. Hier kann der Messsignalpegel über der signalführenden Leitung noch gerade vom Signalpegel neben der Leitung unterschieden werden. Für die 1000 nm Leitungen ergibt sich nach dieser Vorgehensweise eine minimal detektierbare Spannungsamplitude $\hat{u}_{P2,\min}$ von ca. 15 mV (siehe Bild 4.4-3b).

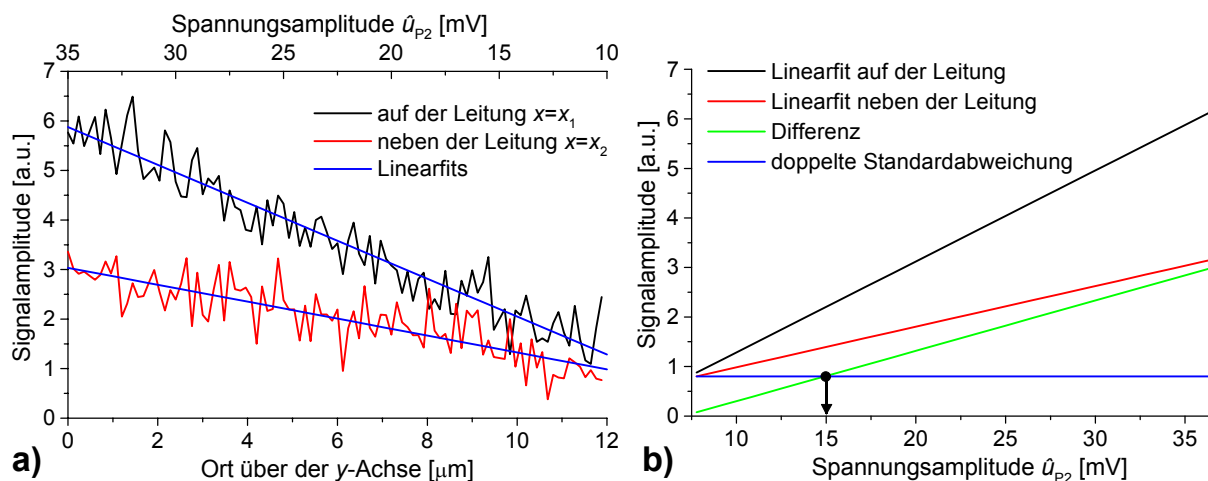


Bild 4.4-3: a) Extrahierte Linienrasterungen auf (schwarz) und neben (rot) der signalführenden Leitung; b) Bestimmung der Spannungsauflösung

Dieses Ergebnis ist jedoch relativ ungenau, da der Messspitzen-Probenabstand z_0 während der Flächenrasterung als nicht konstant angenommen werden kann. Ursache hierfür sind die z -Drift des RKM-Piezosystems sowie geringfügige

Probenverkipfungen, welche bei dem verwendeten geringen Messspitzen-Probenabstand z_0 von 50 nm nicht vernachlässigt werden dürfen. Von dieser Variation des Messspitzen-Probenabstands z_0 ist nur der Messsignalverlauf über der signalführenden Leitung betroffen, da hier der Messspitzeneinfluss im Messsignal enthalten ist. Der Messsignalverlauf neben der signalführenden Leitung enthält dagegen nur den Hebelarmeinfluss, welcher relativ unempfindlich gegenüber kleineren Veränderungen des Messspitzen-Probenabstands z_0 ist (siehe Kapitel 4.2.). Geht man davon aus, dass der Messspitzen-Probenabstand z_0 zu Beginn der Messung den eingestellten 50 nm entspricht, kann eine Korrektur des verfälschten Messsignalverlaufs erfolgen, indem die zugehörige Ausgleichsgerade so um den ersten Messwert gedreht wird, dass sich die beiden Ausgleichsgeraden bei $\hat{u}_{P2} = 0V$ schneiden (siehe Bild 4.4-4). Auf diese Weise ergibt sich für die 1000 nm Leitung eine minimal detektierbare Spannungsamplitude $\hat{u}_{P2,\min}$ von 10 mV.

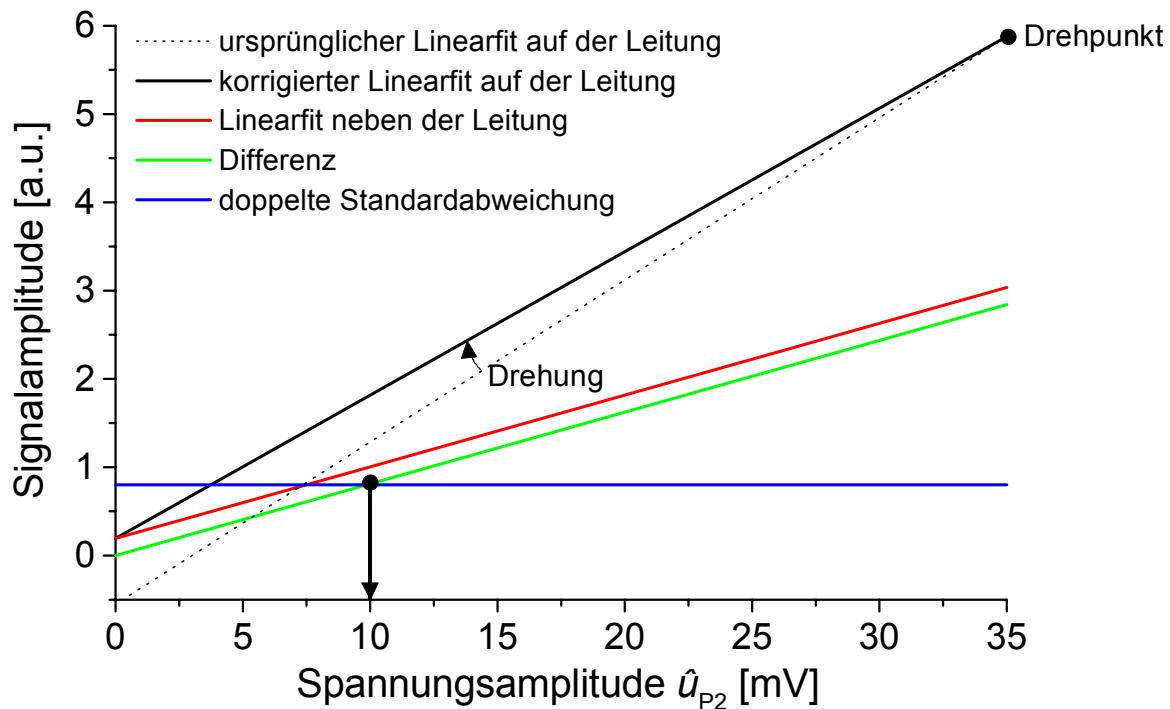


Bild 4.4-4: Bestimmung der Spannungsauflösung an der 1000 nm Leitung mit korrigierter Ausgleichsgerade über der signalführenden Leitung

Die Ergebnisse der Messungen an den anderen Strukturbreiten sowie mit der kurzen Messsonde (siehe Kapitel 3.3.) sind in Bild 4.4-5 eingetragen. Man erkennt, dass die minimal detektierbare Spannungsamplitude $\hat{u}_{P2,\min}$ für Strukturbreiten a oberhalb von 500 nm nur geringfügig von der Strukturbreite abhängig ist. Hier kann näherungsweise von einer konstanten Spannungsauflösung gesprochen werden. Bei Messungen an Strukturbreiten < 500 nm ist die Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite nicht mehr vernachlässigbar. Hier müssen bei Messungen an verschiedenen Strukturbreiten die unterschiedlichen Spannungsaufösungen berücksichtigt werden, um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten.

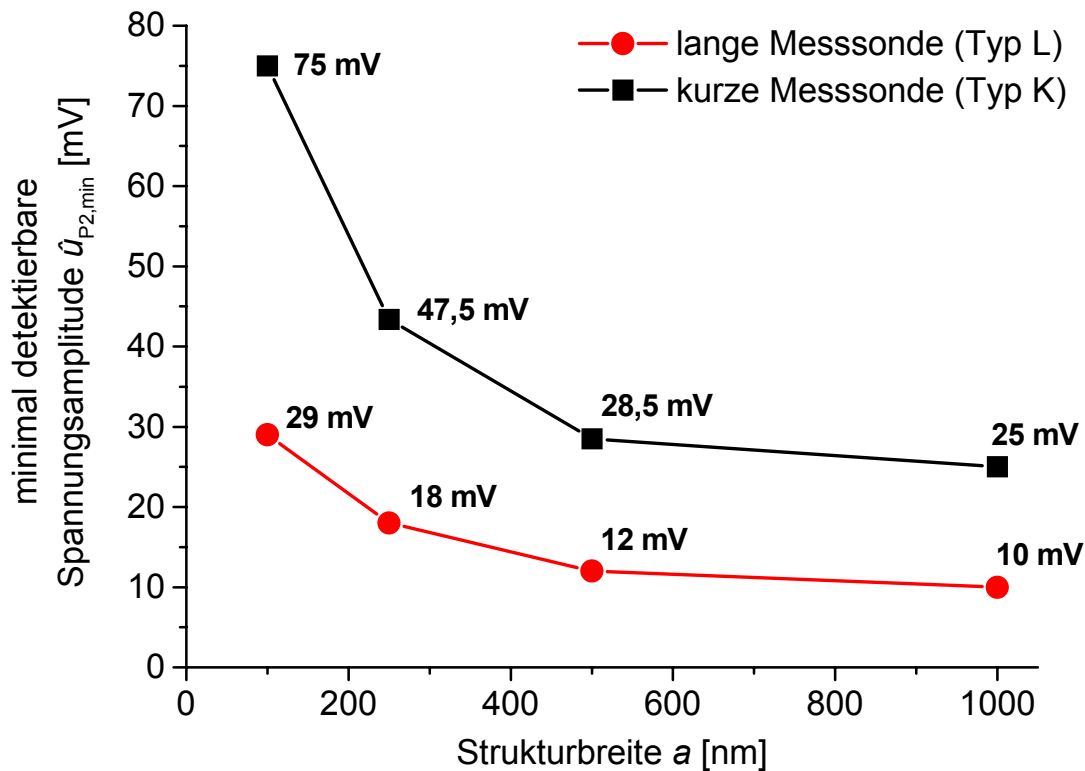


Bild 4.4-5: Verlauf der minimal detektierbaren Spannungsamplitude $\hat{u}_{P2,min}$ in Abhängigkeit von der Strukturbreite a

Als weiteres Ergebnis der Untersuchungen zur EKM-Spannungsauflösung kann festgehalten werden, dass mit der langen Messsonde gegenüber der kurzen Messsonde eine deutlich bessere Spannungsauflösung erzielt wird. So ist die minimal detektierbare Spannungsamplitude $\hat{u}_{P2,min}$ bei Verwendung der langen Messsonde ungefähr um den Faktor 2,5 kleiner als bei der kurzen Messsonde.

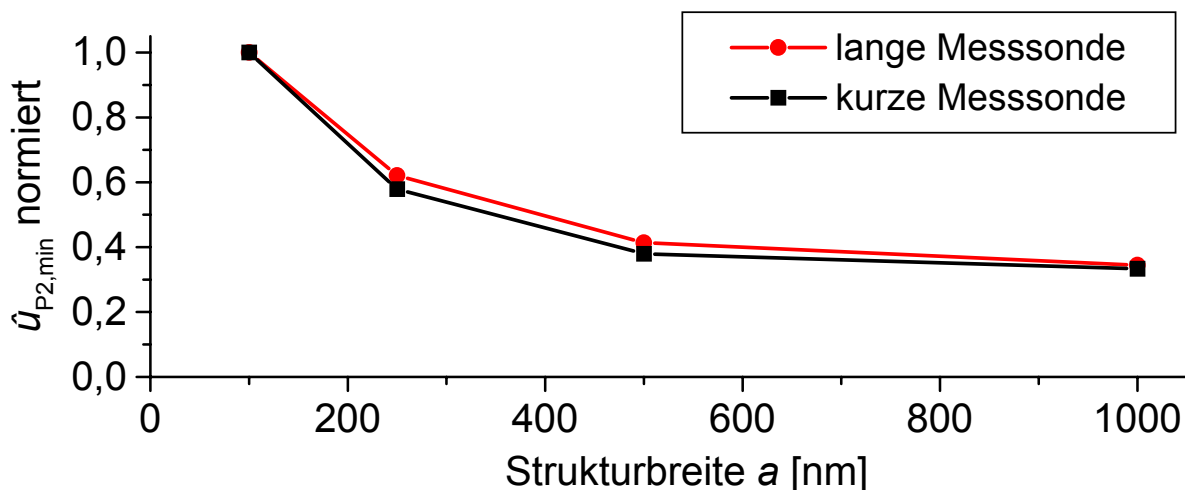


Bild 4.4-6: Normierung der minimal detektierbaren Spannungsamplituden aus Bild 4.3-5 auf den Wert bei $a = 100$ nm

Ursache hierfür ist das unterschiedliche Schwingungsverhalten der beiden Messsondentypen. Nahezu identisch ist dagegen bei beiden Messsondentypen der

relative Verlauf der minimal detektierbaren Spannungsamplitude in Abhängigkeit von der Strukturbreite (siehe Bild 4.4-6). Dies kann damit erklärt werden, dass beide Messsondentypen die gleiche Messspitzengeometrie besitzen (siehe Tabelle 3.3-1).

4.4.3. Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung der EKM

Die elektrische Ortsauflösung gibt an, bis zu welcher Strukturbreite a zwei nebeneinander liegende, signalführende Leitungen im EKM-Messsignal noch voneinander getrennt aufgelöst werden können. Zur experimentellen Bestimmung der elektrischen Ortsauflösung der EKM wurden alle drei Leitungen der untersuchten Teststrukturen mit derselben Spannungsquelle verbunden und eine Linienrasterung über die jeweilige Teststruktur durchgeführt (siehe Bild 4.4-7). Anders als in Kapitel 4.1.3. beschrieben, wird nicht der Flankenanstieg des EKM-Messsignals von 10% auf 90 % des Maximalpegels betrachtet, sondern der Überlappungsgrad der Signalpeaks benachbarter, signalführender Leitungen. Dieser hängt natürlich direkt mit dem Flankenanstieg zusammen, berücksichtigt jedoch den kompletten Verlauf der Signalpeaks und ermöglicht somit eine genauere Bestimmung der elektrischen Ortsauflösung. Außerdem kann direkt aus dem Messsignalverlauf ersehen werden, ob die untersuchte Strukturbreite noch auflösbar ist.

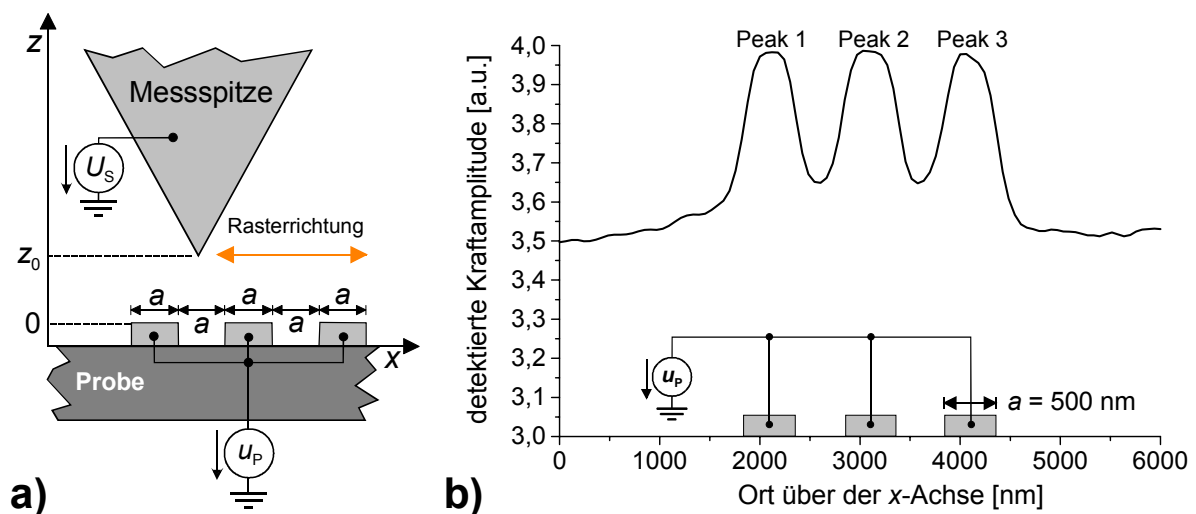


Bild 4.4-7: a) Beschaltung der Teststrukturen bei den EKM-Messungen zur Bestimmung der elektrischen Ortsauflösung und b) an der 500 nm Teststruktur aufgenommener Messsignalverlauf

Zur Ermittlung des Überlappungsgrads der Nutzsinalpeaks bei einer bestimmten Strukturbreite a wird der zugehörige EKM-Messsignalverlauf durch Subtraktion des Gleichanteils vom Hebelarmeinfluss befreit und anschließend auf den Maximalwert normiert (siehe Bild 4.4-8). Ein Maß für den Überlappungsgrad benachbarter Peaks ergibt sich aus dem Verhältnis des elektrischen Kraftpegels $F_{el,min}$ zwischen zwei Leitungen zum Kraftpegel $F_{el,max}$ über einer signalführenden Leitung. Aufgrund der Normierung entspricht das Kräfteverhältnis dem Wert von $F_{el,min}$.

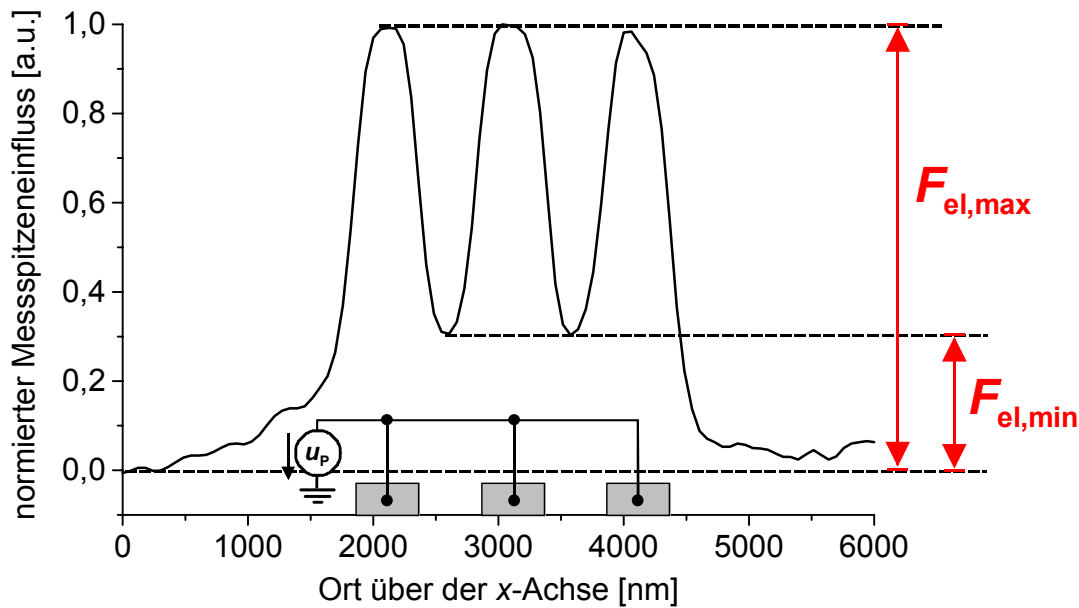


Bild 4.4-8: Vom Hebelarmeinfluss befreiter und anschließend normierter EKM-Messsignalverlauf

In Bild 4.4-9 ist der experimentell ermittelte Verlauf des Kräfteverhältnisses $F_{el,min}/F_{el,max}$ in Abhängigkeit von der Strukturbreite a für die beiden Messsondentypen dargestellt. Wie bei der elektrischen Spannungsauflösung zeigt sich für Strukturbreiten oberhalb 500 nm nur eine sehr geringe Abhängigkeit des Kräfteverhältnisses von der Strukturbreite a . Hier sind die Nutzsinalpeaks hinreichend weit voneinander entfernt, so dass es zu keiner signifikanten Überlappung kommt.

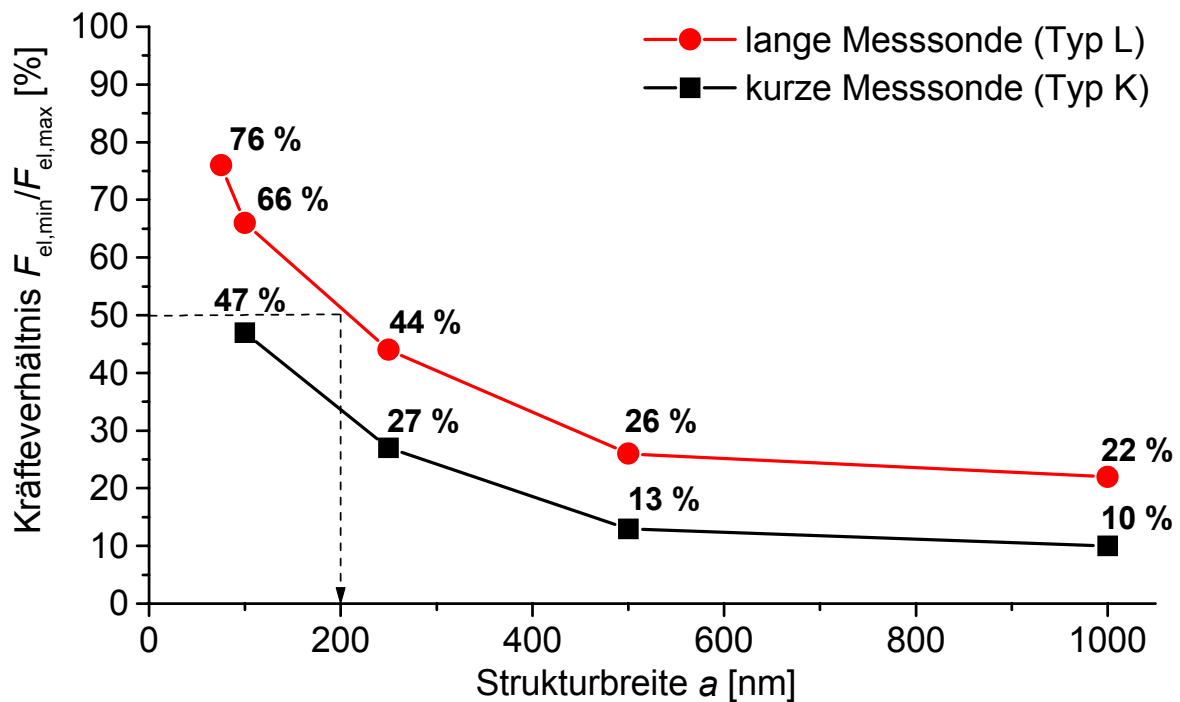


Bild 4.4-9: Verlauf des Kräfteverhältnis $F_{el,min}/F_{el,max}$ in Abhängigkeit von der Strukturbreite a

Dies ändert sich jedoch für Strukturbreiten < 500 nm, wo das Kräfteverhältnis mit sinkender Strukturbreite a sichtlich zunimmt. Da dem EKM-Messsignal immer ein Rauschen $F_{el,rausch}$ überlagert ist, kann ab einem bestimmten Kräfteverhältnis das Kraftminimum $F_{el,min}$ nicht mehr von dem Kraftmaximum $F_{el,max}$ unterschieden werden. In diesem Fall ist die Grenze der elektrischen Ortsauflösung erreicht. Legt man als maximal zulässiges Kräfteverhältnis einen Wert von 50% fest, so ergibt sich für die lange Messsonde eine elektrische Ortsauflösung von ca. 200 nm und für die kurze Messsonde ein Wert leicht unterhalb der 100 nm Grenze. Der 50% Wert ist hier willkürlich gewählt worden. Bei Messungen mit Probenspannungsamplituden, die deutlich über der minimal detektierbaren Spannungsamplitude $\hat{u}_{p,min}$ liegen, können auch noch wesentlich größere Kräfteverhältnisse aufgelöst werden. So sind bei der in Bild 4.4-10 präsentierten Messung an der 100 nm Teststruktur die einzelnen Peaks im EKM-Messsignalverlauf trotz eines Kräfteverhältnisses von 66 % noch deutlich voneinander zu unterscheiden. Hier wurde mit einer Probenspannungsamplitude \hat{u}_p von 500 mV gemessen. Diese liegt deutlich über der in Kapitel 4.4.2. ermittelten minimal detektierbaren Spannungsamplitude $\hat{u}_{p,min}$ von 29 mV.

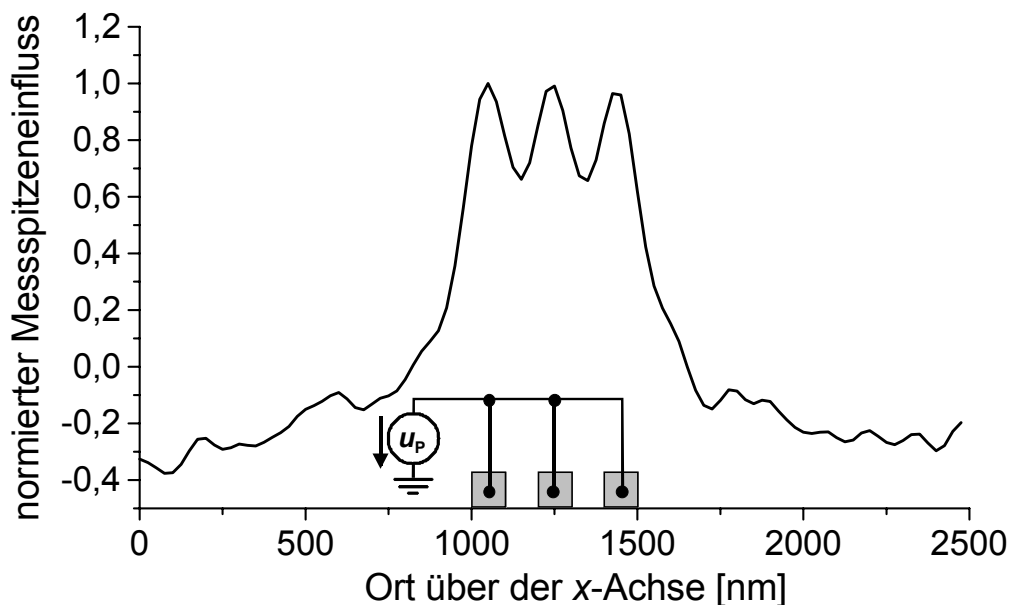


Bild 4.4-10: An der 100 nm Teststruktur aufgenommener, vom Hebelarmeinfluss befreiter und anschließend normierter Messsignalverlauf

Die unterschiedliche elektrische Ortsauflösung der beiden Messsondentypen (siehe Bild 4.4-9) kann mit unterschiedlichen Messspitzen-Probenabständen z_0 in den beiden Messreihen begründet werden. Mit der kürzeren Messsonde wurde offensichtlich etwas näher an der Probenoberfläche gemessen als mit der langen, wodurch eine bessere elektrische Ortsauflösung erreicht werden konnte.

Nachdem nun die Abhängigkeit der EKM-Spannungsauflösung von der Strukturbreite a sowie die elektrische Ortsauflösung der EKM experimentell ermittelt

worden sind, wird im nächsten Schritt untersucht, inwiefern diese beiden Leistungsparameter durch eine Optimierung der Messspitzengeometrie verbessert werden können.

4.5. Untersuchungen zur Optimierung der Messspitzengeometrie

Bereits heute werden bei den integrierten Schaltungen Strukturbreiten von 130 nm prozessiert [Stiller 2001]. Wie die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4.4. gezeigt haben, ist damit die Grenze des elektrischen Ortsauflösungsvermögens der EKM bei Verwendung von Standardmesssonden bald erreicht. Da in Zukunft auch weiterhin mit sinkenden Strukturbreiten zu rechnen ist [ITRS 2001], muss die elektrische Ortsauflösung der EKM verbessert werden, um auch zukünftig aktuelle Strukturbreiten auflösen zu können.

Für die elektrische Ortsauflösung der EKM ist der Geometriefaktor der elektrischen Kraft zwischen der Messspitze und der Probe verantwortlich (siehe Kapitel 4.2.). Eine Optimierung der elektrischen Ortsauflösung ist somit über die Variation der Messspitzengeometrie möglich. Allerdings ist dabei zu beachten, dass auch die EKM-Spannungsauflösung von der Form der Messspitze abhängig ist. Diese nimmt bei sehr kleinen Strukturen mit sinkender Strukturbreite immer stärker ab (siehe Kapitel 4.3. und Kapitel 4.4.). Bei der Optimierung der Messspitzengeometrie in Hinblick auf eine verbesserte elektrische Ortsauflösung ist daher zu berücksichtigen, dass sich die Spannungsauflösung dadurch nicht unzulässig verringern darf.

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der elektrischen Ortsauflösung und der Spannungsauflösung der EKM von der Messspitzengeometrie wird im Folgenden ein neues Simulationsverfahren entwickelt. Dieses basiert zwar auf einem bereits zur Analyse des Hebelarmeinflusses verwendeten Simulationsmodell [Wand 1998, Wittpahl 2000], erfüllt aber wesentlich höhere Anforderungen an die Genauigkeit sowie die Flexibilität bei der Festlegung der Messspitzengeometrie, was für eine genaue Betrachtung der elektrischen Ortsauflösung unerlässlich ist.

4.5.1. Entwicklung einer Simulation zur Berechnung der elektrischen Kraft zwischen der Messspitze und der Probe

Die elektrische Ortsauflösung der EKM sowie der Verlauf der Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite wird durch die Messspitzengeometrie festgelegt. Aus diesem Grund reicht es aus, die elektrische Kraftwechselwirkung zwischen der Messspitze und der Probe zu berechnen.

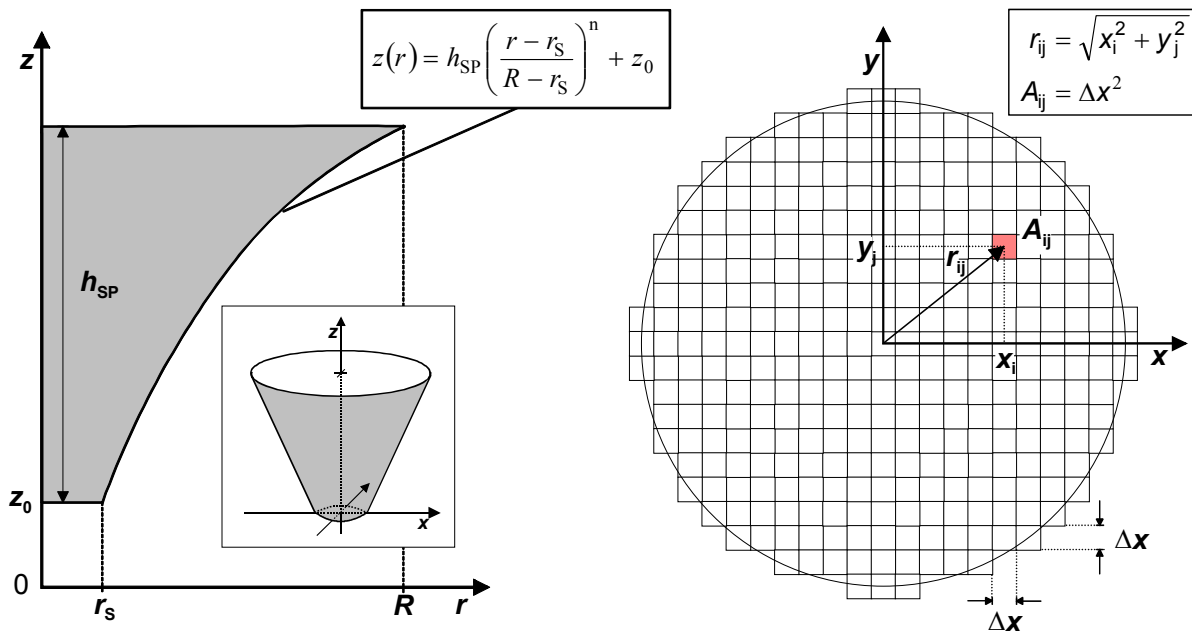


Bild 4.5-1: Modellierung der Messspitzengeometrie in der Simulation

In der Simulation wird vereinfachend von einer zur z -Achse rotationssymmetrischen Messspitze ausgegangen (siehe Bild 4.5-1). Die Randkurve $z(r)$, welche die Form der Messspitze beschreibt, enthält als einstellbare Parameter den Messspitzen-Probenabstand z_0 , den Radius r_s des Plateaus am Messspitzenende, die Länge h_{SP} und den maximalen Radius R der Messspitze sowie den Exponenten n der Randkurve und gehorcht folgendem funktionalen Zusammenhang:

$$z(r) = h_{SP} \left(\frac{r - r_s}{R - r_s} \right)^n + z_0 \quad (4.5-1)$$

Die elektrische Kraftwechselwirkung $\vec{F}_{el,3D}$ zwischen einer signalführenden Leitung und der mit Gl. 4.5-1 festgelegten Messspitze wird auf der Basis des Plattenkondensatormodells (siehe Kapitel 4.2.) berechnet. Dazu zerlegt das Simulationsprogramm die Messspitzenoberfläche in kleine, parallel zur Probenoberfläche ausgerichtete Flächenquadrate A_{ij} der Kantenlänge $\Delta x = 1$ nm (siehe Bild 4.5-2). Die Probenoberfläche wird ebenfalls in Flächenquadrate A_{pij} aufgeteilt, welche sich durch die Projektion der Messspitzenquadrate A_{ij} auf die Probenoberfläche ergeben. Damit kann die Messspitzen-Probenanordnung als eine große Anzahl parallel geschalteter Plattenkondensatoren aufgefasst werden.

Das Simulationsprogramm prüft nun für jedes Flächenelement A_{ij} der Messspitze, ob das zugehörige Flächenelement A_{pij} der Probenoberfläche signalführend ist und berechnet gegebenenfalls mit Hilfe des Plattenkondensatormodells die elektrische Kraft $\vec{F}_{el,ij}$ zwischen den beiden Flächenelementen.

$$\vec{F}_{el,ij} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \Delta x^2 (U_S - U_{Pij})^2}{z_{ij}^2} \vec{e}_z \quad (4.5-2)$$

Der Abstand z_{ij} zwischen den Kondensatorelektroden ergibt sich durch Einsetzen der Position (x_i/y_j) des Flächenelements in die Randkurve $z(r)$:

$$z_{ij} = h_{SP} \left(\frac{r_{ij} - r_S}{R - r_S} \right)^n + z_0 \quad \text{mit: } r_{ij} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2} \quad (4.5-3)$$

Die auf die Messspitze einwirkende elektrische Gesamtkraft $\vec{F}_{el,3D}$ erhält man, indem die den einzelnen Flächenelementen zugeordneten elektrischen Kräfte $\vec{F}_{el,ij}$ addiert werden.

$$\vec{F}_{el,3D} = \sum_i \sum_j \vec{F}_{el,ij} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta x^2 \cdot \sum_i \sum_j \frac{(U_S - U_{Pij})^2}{z_{ij}^2} \vec{e}_z \quad (4.5-4)$$

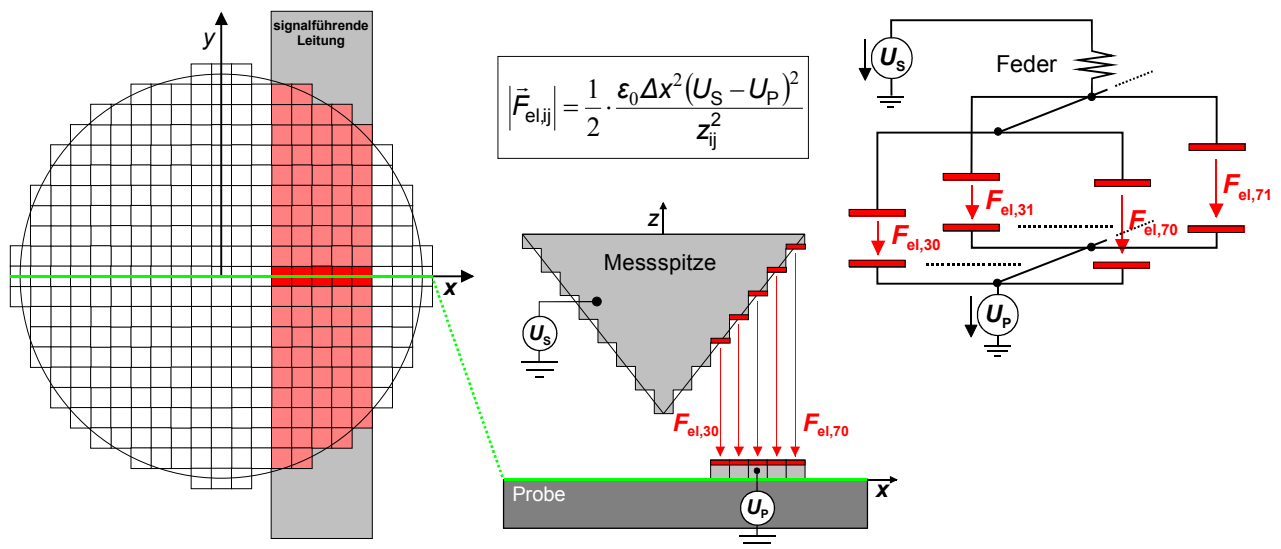


Bild 4.5-2: Berechnung der elektrischen Kraft im Simulationsprogramm

Mit Gl. 4.5-4 wird die elektrische Kraft für eine bestimmte Position der Messspitze über der Probe berechnet. Zur Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung ist jedoch die Bestimmung des elektrischen Kraftverlaufs bei einer Linienrasterung erforderlich. Dazu positioniert das Simulationsprogramm die signalführende Leitung bei $x = -R$ und berechnet die elektrische Kraft $\vec{F}_{el,3D}(x = -R)$. Anschließend wird die Leitung immer wieder um Δx in Richtung der x -Achse verschoben und die zugehörige elektrische Kraft berechnet bis sich die Leitung bei $x = R$ befindet.

4.5.2. Simulationen zur elektrischen Orts- und Spannungsauflösung der EKM

Bevor nun die Simulation zur Untersuchung der Abhängigkeit der Spannungsauflösung sowie elektrischen Ortsauflösung von der Messspitzengeometrie genutzt wird, ist erst noch die Aussagekräftigkeit der Simulationsergebnisse zu betrachten. Dazu werden die in Kapitel 4.4. präsentierten, experimentell ermittelten Verläufe der Spannungsauflösung sowie des Kräfteverhältnisses in Abhängigkeit von der Strukturbreite mit der Simulation nachvollzogen. Mit Hilfe von REM-Aufnahmen (siehe auch Kapitel 3.3.) konnten die bei den Messungen verwendeten Messspitzen vermessen werden. Die Randkurve $z(r)$ der Messspitze im Simulationsprogramm wurde dann auf diesen Abmessungen und dem Messspitzen-Probenabstand basierend entworfen. Dabei ergaben sich für die EKM-Standardmessspitze folgende Parameterwerte:

Messspitzen-Probenabstand: $z_0 = 50$ nm

Radius des Plateaus am Messspitzenende: $r_S = 20$ nm

Messspitzenhöhe: $h_{SP} = 12000$ nm

maximalen Radius der Messspitze: $R = 5250$ nm

Exponent der Randkurve: $n = 1$

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite a wurde für verschiedene Strukturbreiten mit der Simulation die elektrische Kraft berechnet, welche bei genau unter dem Messspitzenende positionierten Leitungsmittelpunkt auf die Messspitze einwirkt. Da bei der heterodynen Mischtechnik und auch der Samplingtechnik die Probenspannungsamplitude \hat{u}_P direkt proportional zur detektierten Kraftamplitude ist, kann aus dem berechneten Kraftverlauf $\vec{F}_{el,3D}(a)$ der relative Verlauf der minimal detektierbaren Probenspannung $\hat{u}_{P,min}$ bestimmt werden. Diese beiden Größen verhalten sich umgekehrt proportional. Verdoppelt sich z.B. zwischen 2 Strukturbreiten die elektrische Kraft, so halbiert sich die minimal detektierbare Probenspannung. Zur Anpassung des mittels der Simulation ermittelten, relativen Verlaufs der minimal detektierbaren Probenspannung $\hat{u}_{P,min}(a)$ an die absoluten Messergebnisse muss der relative Verlauf mit einem Faktor multipliziert werden. Bei dem in Bild 4.5-3 dargestellten Vergleich zwischen Simulation und Messung wurde dieser Faktor so gewählt, dass sich bei einer Strukturbreite a von 100 nm eine Übereinstimmung der beiden Verläufe ergibt.

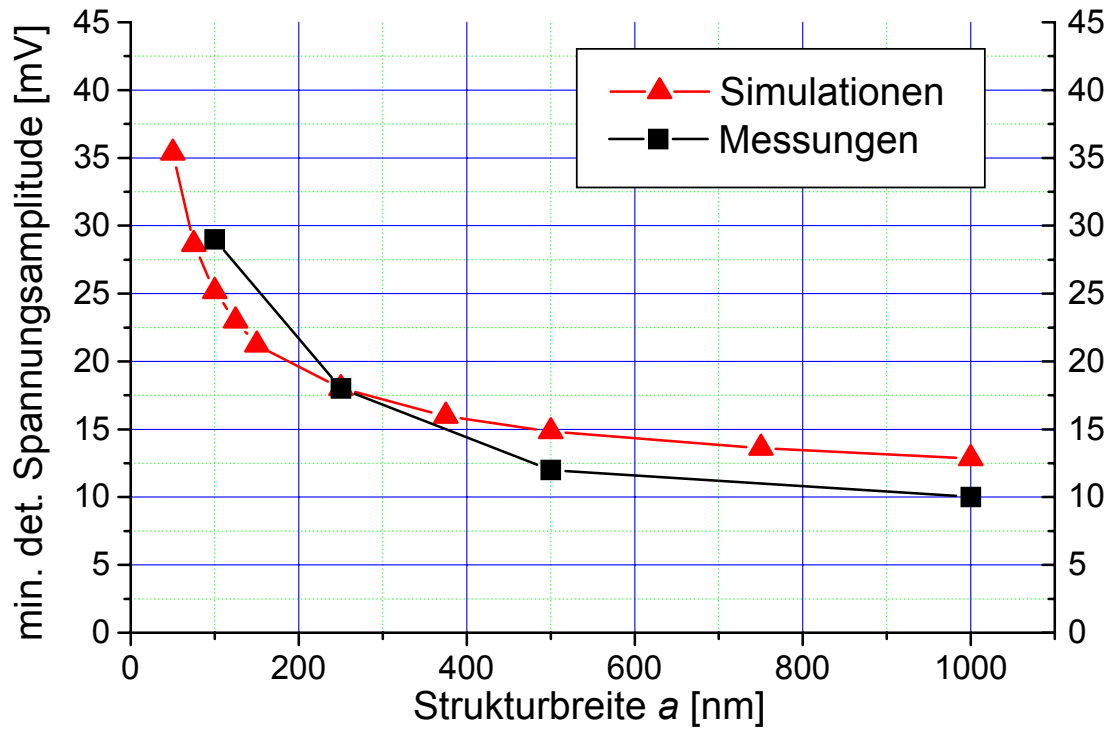


Bild 4.5-3: Vergleich von Simulation und Messung der Abhängigkeit der minimal detektierbaren Spannungsamplitude von der Strukturbreite

Zur Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung der EKM wurden Linienrasterungen über 3 signalführende Leitungen gleicher Spannung simuliert und das Kräfteverhältnis $F_{el,min}/F_{el,max}$ für verschiedene Strukturbreiten ermittelt. Die Resultate der Simulationen werden in Bild 4.5-4 zusammen mit den entsprechenden Messergebnissen aus Kapitel 4.4. präsentiert.

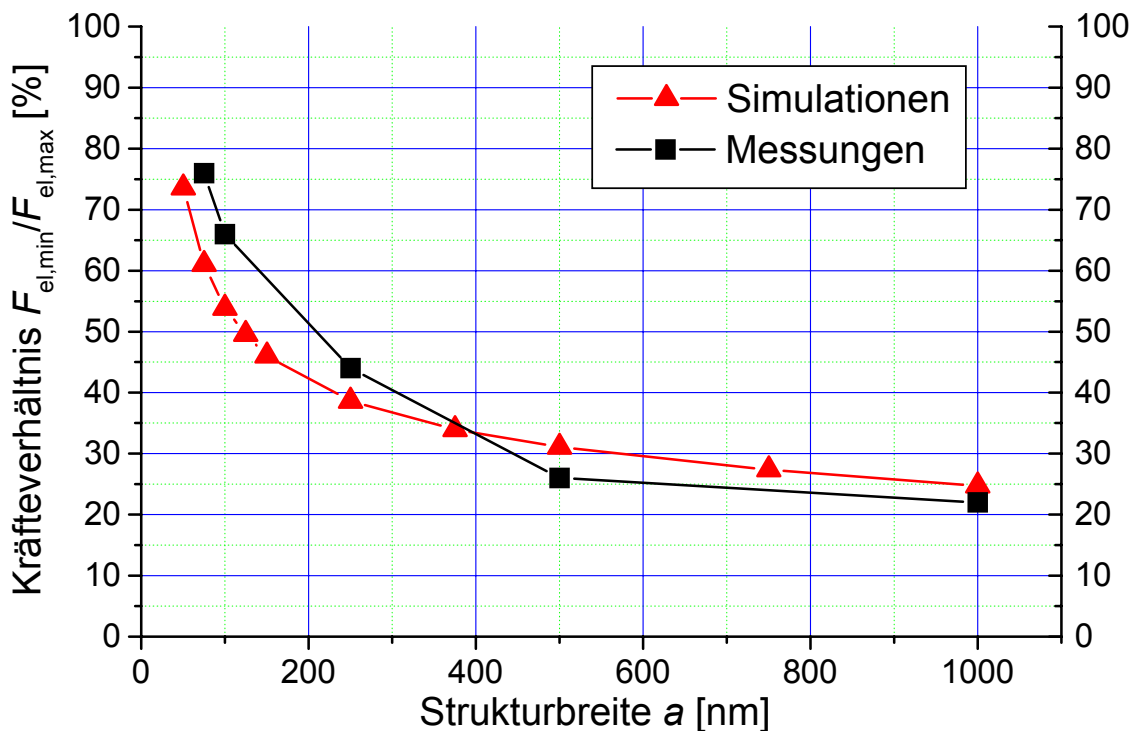


Bild 4.5-4: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Kräfteverhältnissen

Die Vergleiche zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen in Bild 4.5-3 und Bild 4.5-4 zeigen eine gute Übereinstimmung, so dass die Anwendung der Simulation für weitergehende Untersuchungen gerechtfertigt ist. Ursachen für die vorhandenen Abweichungen sind der nicht präzise einstellbare Messspitzen-Probenabstand bei den Messungen, die nicht ganz exakte Nachbildung der realen Messspitzengeometrie sowie die vereinfachte Kraftberechnung über das Plattenkondensatormodell.

4.5.3. Simulationen zur Optimierung der Messspitzengeometrie

Mittels der folgenden Simulationen wird nun untersucht, inwieweit eine Optimierung der Messspitzengeometrie für die Belange der EKM möglich ist. Ein wichtiger Parameter der Messspitzengeometrie ist sicherlich der Radius r_s des Messspitzenendes, da das Plateau am Messspitzenende der Probe am nächsten ist und somit die größte Kraft pro Flächeneinheit auf dieses ausgeübt wird. Zur Ermittlung des Einflusses des Radius r_s auf die Spannungsauflösung und die elektrische Ortsauflösung der EKM wurde für 6 verschiedene Radien die minimal detektierbare Spannungsamplitude $\hat{u}_{P,\min}$ sowie das Kräfteverhältnis $F_{el,\min}/F_{el,\max}$ simuliert. Wie nicht anders zu erwarten, führt eine Vergrößerung des Radius zu einer Abnahme der minimal detektierbaren Spannungsamplitude $\hat{u}_{P,\min}$ und damit zu einer Zunahme der Spannungsauflösung (siehe Bild 4.5-5). Hier kann eine Verbesserung um den Faktor 3 gegenüber Standardmessspitzen erreicht werden. Bei im Verhältnis zur Strukturbreite a der signalführenden Leitung großen Radien r_s bewirkt eine weitere Vergrößerung von r_s allerdings nur noch minimale Verbesserungen.

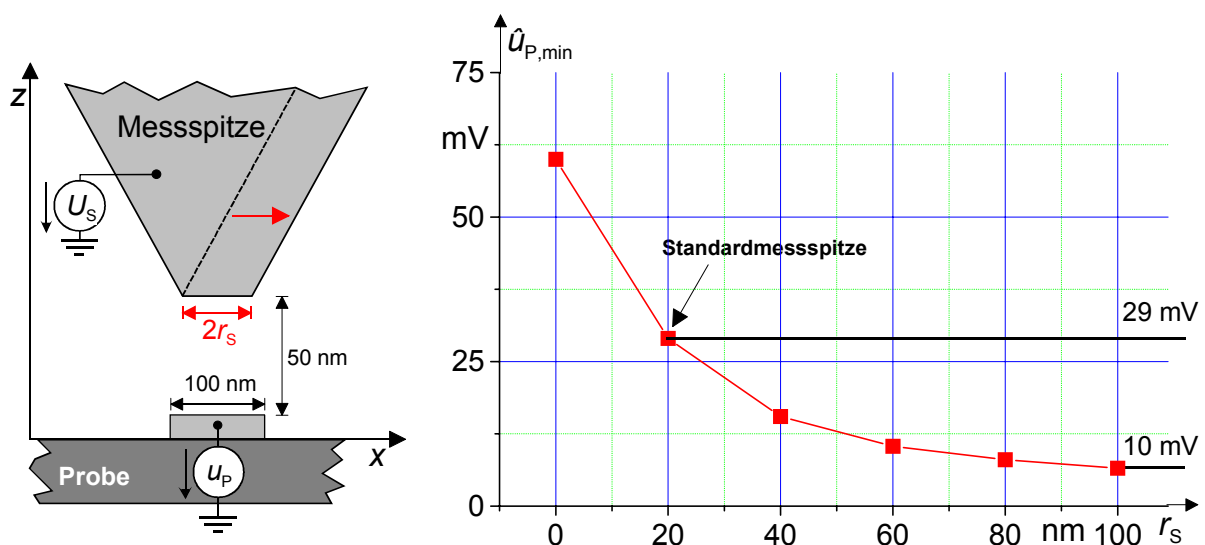


Bild 4.5-5: Simulierte Abhängigkeit der minimal detektierbaren Spannungsamplitude $\hat{u}_{P,\min}$ vom Radius r_s des Messspitzenendes an einer 100 nm Struktur

Betrachtet man den Verlauf des Kräfteverhältnisses in Abhängigkeit vom Radius r_s des Messspitzenendes, wird ersichtlich, dass ein möglichst kleiner Radius nicht unbedingt die beste elektrische Ortsauflösung garantiert (siehe Bild 4.5-6). So existiert für jede Strukturbreite a ein idealer Wert von r_s , bei dem das Kräfteverhältnis minimal wird. Leider ergibt sich für jede Strukturbreite ein unterschiedlicher Idealwert von r_s , so dass eine generelle Optimierung der Messspitzengeometrie über den Radius des Messspitzenendes nicht möglich ist. Da aber gerade die kleinsten Strukturen am kritischsten sind, bietet es sich an, den Radius des Messspitzenendes so zu wählen, dass sich bei der kleinsten in der Messung vorkommenden Struktur das optimale Kräfteverhältnis einstellt.

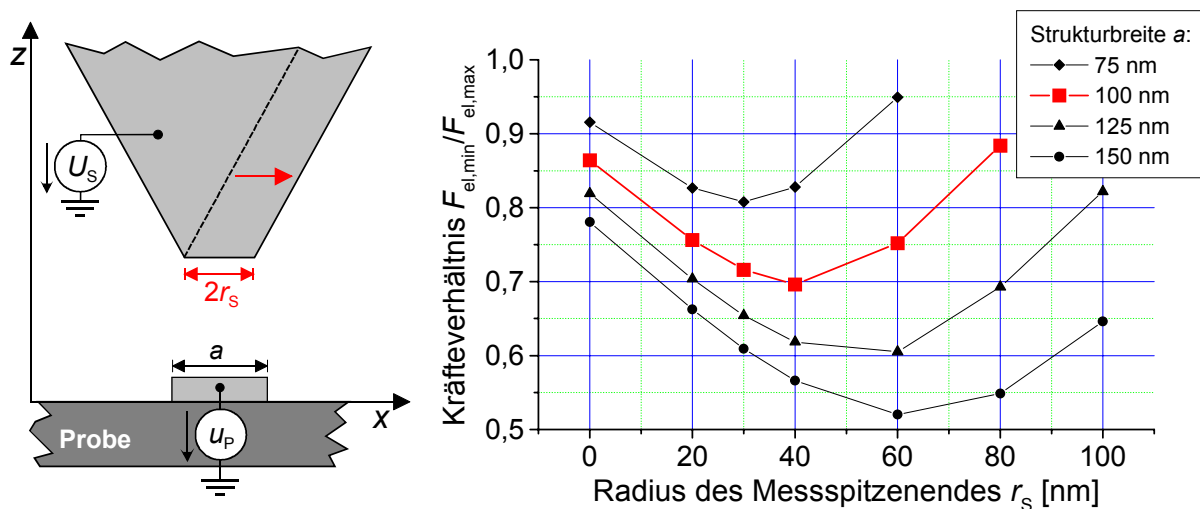


Bild 4.5-6: Simulierte Abhängigkeit des Kräfteverhältnisses vom Radius r_s des Messspitzenendes an verschiedenen Strukturbreiten

Außer dem Radius des Messspitzenendes besitzt noch der Exponent n der Messspitzenrandkurve einen entscheidenden Einfluss auf die Spannungsauflösung und die elektrische Ortsauflösung der EKM. Zur Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten über die Veränderung des Exponenten n der Messspitzenrandkurve wurden Linienrasterungen über eine einzelne sowie über 3 signalführende 100 nm Leitungen simuliert. Als Radius des Messspitzenendes wurde der aus Bild 4.5-6 ermittelte Idealwert von 40 nm verwendet.

Die Linienrasterungen über eine einzelne signalführende Leitung zeigen, dass sich mit steigendem Exponent n die elektrische Kraft auf die Messspitze und damit auch die Spannungsauflösung erhöht (siehe Bild 4.5-7). Allerdings nimmt dabei auch die Breite des Kraftpeaks über der Leitung deutlich zu, so dass eine Verschlechterung der elektrischen Ortsauflösung zu erwarten ist. Bei sehr kleinem Exponenten n ist die Veränderung des Kraftpeaks bei einer Variation von n (siehe Bild 4.5-7 bei $n = 0,6$ und $n = 0,8$) minimal. Hier ist die Randkurve so steil, dass der Hauptanteil der elektrischen Kraft durch das Plateau des Messspitzenendes erzeugt wird.

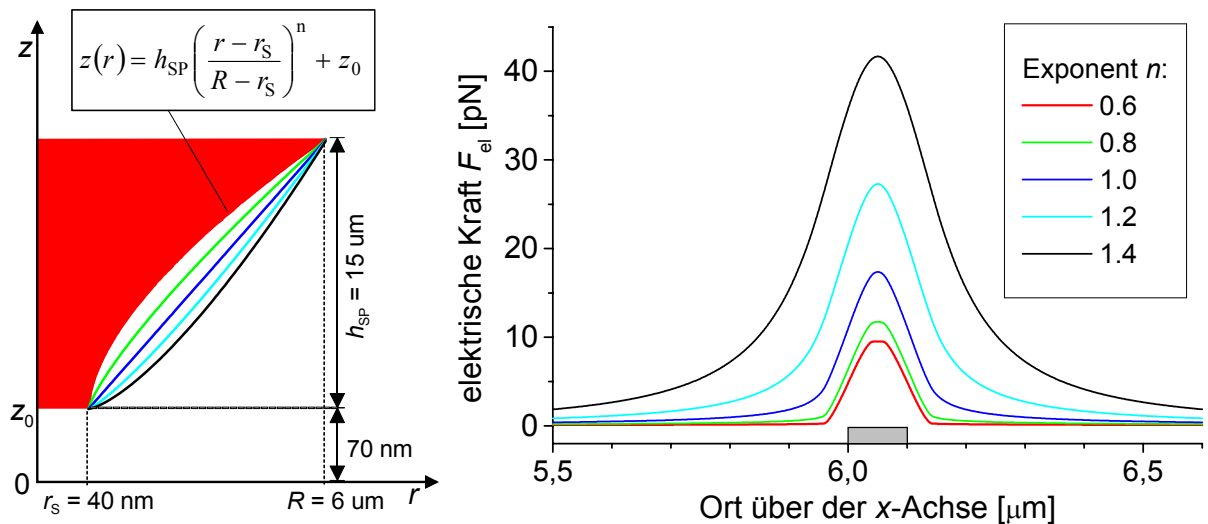


Bild 4.5-7: Simulierte Abhängigkeit der elektrischen Kraft vom Exponenten n der Messspitzenrandkurve an einer einzelnen signalführenden 100 nm Struktur

In Bild 4.5-8 ist deutlich zu erkennen, wie die elektrische Ortsauflösung bei großen Exponenten n stark abnimmt. Stellt man sich den Kraftverlauf mit einem Rauschsignal überlagert vor, so sind die minimalen Einbuchtungen zwischen den signalführenden Leitungen nicht mehr auflösbar. Der Messsignalverlauf ließe in diesem Fall vermuten, dass sich unter der Messspitze eine einzelne 500 nm breite signalführende Leitung befindet.

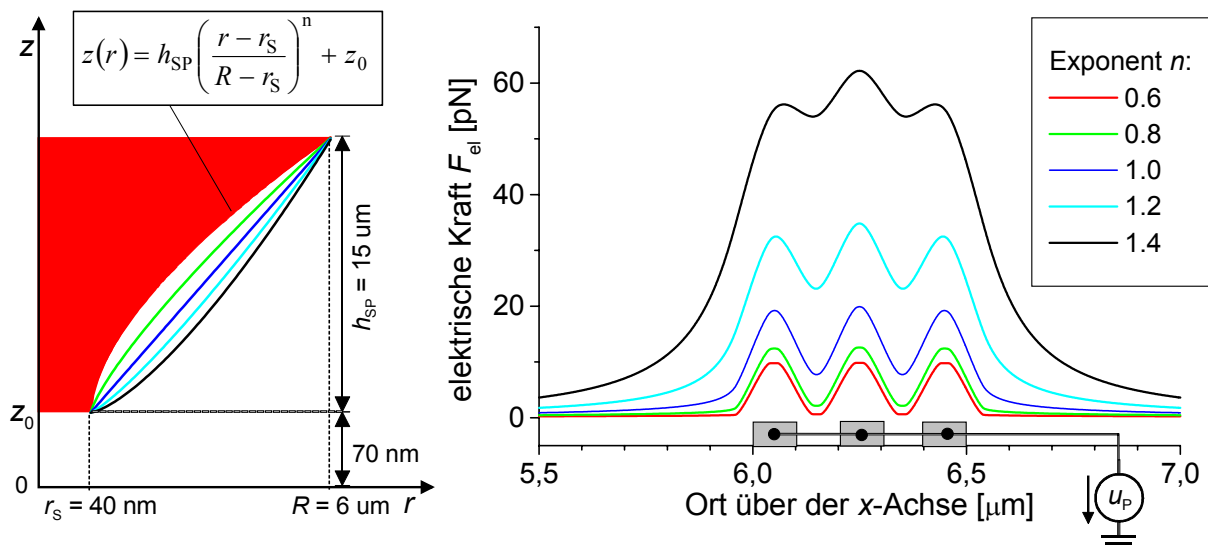


Bild 4.5-8: Simulierte Abhängigkeit der elektrischen Kraft vom Exponenten n der Messspitzenrandkurve an drei signalführenden 100 nm Strukturen

Da die Spannungsauflösung und die elektrische Ortsauflösung der EKM sowohl durch den Radius r_S des Messspitzenendes als auch durch den Exponenten n der Randkurve $z(r)$ gravierend beeinflusst werden können, werden im Folgenden beide Parameter variiert. Die entsprechenden Simulationen wurden mit einer Strukturbreite von 75 nm durchgeführt.

Die in Bild 4.5-9 präsentierten Verläufe des Kräfteverhältnisses zeigen, dass sich über den Exponenten n der Randkurve die Ausprägung des Kräfteverhältnisminimums einstellen lässt. Eine Verringerung des Exponenten erzeugt eine Verbesserung der elektrischen Ortsauflösung, sofern ein Radius des Messspitzenendes in der Nähe des idealen Radius von 40 nm gewählt wird. Allerdings kann der Exponent nicht beliebig verringert werden, da auf diese Weise die Spannungsauflösung abnimmt (Bild 4.5-10).

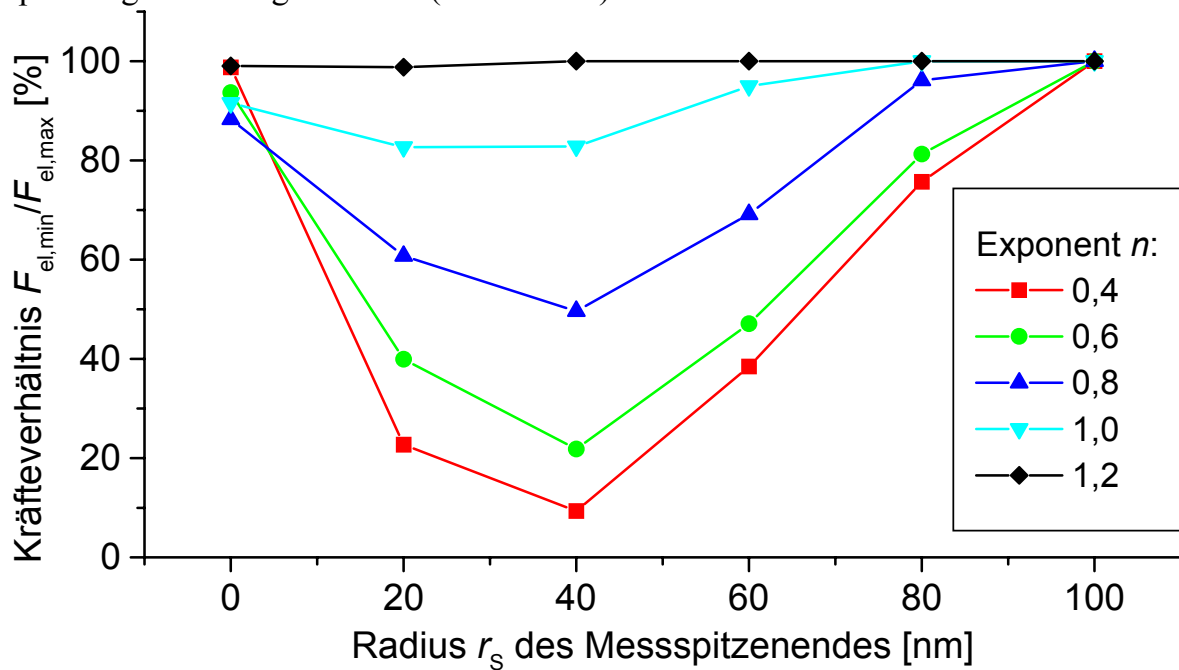


Bild 4.5-9: Abhängigkeit des Kräfteverhältnisses vom Radius des Messspitzenendes r_s für verschiedene Exponenten n der Randkurve; Strukturbreite $a = 75$ nm

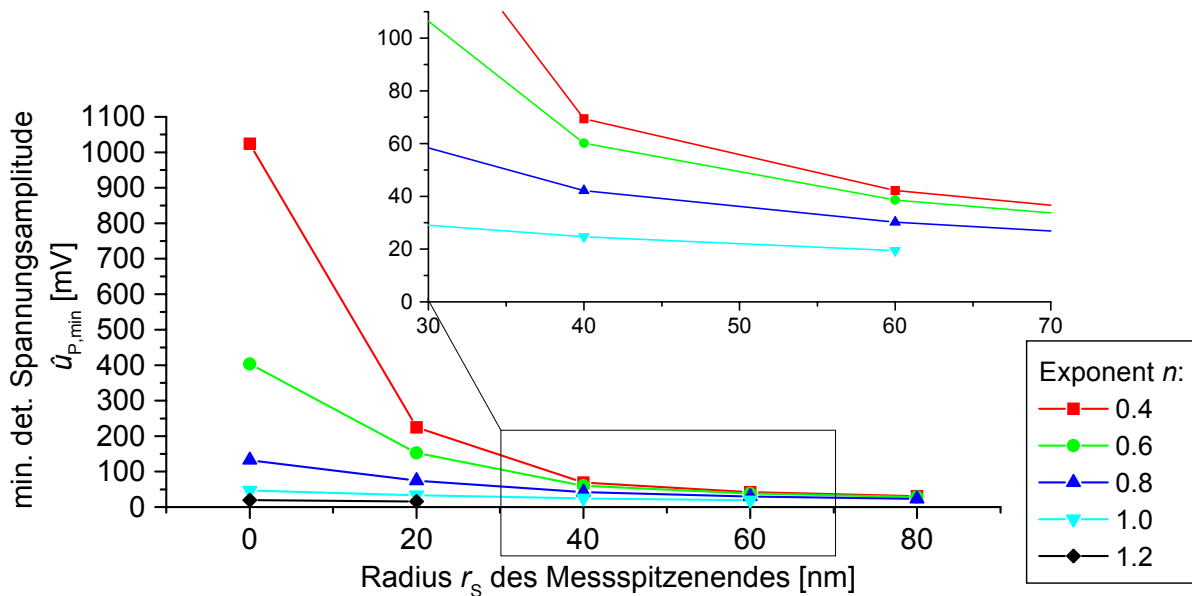


Bild 4.5-10: Abhängigkeit der minimal detektierbaren Spannungsamplitude vom Radius des Messspitzenendes r_s für verschiedene Exponenten n der Randkurve; Strukturbreite $a = 75$ nm

Zur Gestaltung einer idealen Messspitze für EKM-Messungen an 75 nm Strukturen muss bekannt sein, welche Spannungsauflösung erforderlich ist. Es kann dann aus Bild 4.5-10 für verschiedene Exponenten n der minimal notwendige Radius des Messspitzenendes ermittelt werden. Aus Bild 4.5-9 ergeben sich die Kräfteverhältnisse für die auf diese Weise bestimmten Radius-Exponent Kombinationen. Die Radius-Exponent Kombination mit dem geringsten Kräfteverhältnis beschreibt die ideale Messspitzengeometrie. Allerdings gilt diese nur für Messungen an 75 nm Strukturen. Messungen an anderen Strukturbreiten erfordern eine neue Bestimmung der idealen Radius-Exponent Kombination. Dazu müssen die in Bild 4.5-9/10 dargestellten Simulationen für die entsprechende Strukturbreite durchgeführt werden.

Als Ergebnis der Untersuchungen bezüglich der Optimierung der Messspitzengeometrie für die Belange der EKM kann festgehalten werden, dass es keine ideale Messspitzenform gibt, welche für Messungen an beliebigen Strukturen immer die optimale Kombination aus Spannungsauflösung und elektrischer Ortsauflösung bietet. Es ist aber sehr wohl möglich, für EKM-Messungen, bei denen die minimal auftretende Strukturbreite sowie die erforderliche Spannungsauflösung bekannt sind, eine optimierte Messspitze zu entwerfen.

4.6. Diskussion

In der Vergangenheit wurden die Leistungsparameter der EKM als unabhängig von der Strukturbreite der Probe angenommen. Erste Messungen an extrem kleinen Leitungsstrukturen haben jedoch gezeigt, dass diese Annahme nicht in jedem Fall beibehalten werden darf. Aufgrund dessen fand im ersten Teil dieses Kapitels eine Betrachtung der wichtigsten EKM-Leistungsparameter hinsichtlich einer möglichen Abhängigkeit von der Strukturbreite statt. Diese ergab, dass die Spannungsauflösung, die elektrische Ortsauflösung sowie die Bandbreite der EKM prinzipiell eine solche Abhängigkeit aufweisen können. Da die Bandbreite mit Werten im THz-Bereich derart hoch liegt, dass eine experimentelle Betrachtung schwerlich möglich ist, beschränkten sich die weiteren Untersuchungen auf die elektrische Ortsauflösung und die Spannungsauflösung.

Mit Hilfe eines 2-dimensionalen Modells konnte theoretisch nachgewiesen werden, dass die Ortsauflösung der EKM bei hinreichend kleinen Strukturbreiten eine Abhängigkeit von der Strukturbreite aufweist, welche zu kleineren Strukturen hin eine Verbesserung des Auflösungsvermögens bewirkt. Als Ursache für diese Abhängigkeit stellte sich der bei sehr kleinen Strukturen nicht mehr erreichbare maximale Kraftpegel heraus. Der maximale Kraftpegel entspricht der elektrischen Kraft, welche sich dann einstellen würde, wenn sich unter der Messsonde eine unendlich ausgedehnte Ebene mit dem Potenzial der untersuchten Leitung befände. Bei einer Linienrastrung über

eine sehr schmale Leitung wird die 2. Seite der Leitung und damit der 2. Potenzialwechsel erreicht, bevor sich der maximal mögliche Kraftpegel einstellen kann. Dieser Effekt führt auch zu einer Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite. Während die elektrische Ortsauflösung zu kleineren Strukturen hin zunimmt, ergibt sich bei der Spannungsauflösung eine drastische Abnahme. Mit dem Modell konnte ebenfalls gezeigt werden, dass bei relativ großen Strukturen die Abhängigkeit der elektrischen Orts- und Spannungsauflösung von der Strukturbreite vernachlässigbar gering ist. Da aufgrund der Einfachheit des 2-dimensionalen Modells keine quantitativen Aussagen getroffen werden konnten und außerdem eine Verifizierung der Resultate noch ausstand, fanden experimentelle Untersuchungen statt.

Dazu wurde anhand von Messungen an den Submikrometer-Teststrukturen der Verlauf der Spannungsauflösung in Abhängigkeit von der Strukturbreite ermittelt. Hier zeigte sich wie mit dem 2-dimensionalen Modell vorhergesagt, dass bei größeren Strukturbreiten die elektrische Spannungsauflösung als nahezu konstant angenommen werden darf. Für die Verwendung von EKM-Standardmessspitzen wurde als Grenzwert eine Strukturbreite von 500 nm festgestellt. Bei Messungen an kleineren Strukturbreiten muss die Abhängigkeit der Spannungsauflösung von der Strukturbreite mitberücksichtigt werden. Als Richtwert konnte eine Verringerung der Spannungsauflösung um den Faktor 2,4 bei Messung an einer 100 nm breiten Leitung gegenüber Messungen an einer 500 nm breiten Leitung bestimmt werden.

Die elektrische Ortsauflösung wurde ebenfalls anhand von Messungen an den Submikrometer-Teststrukturen untersucht. Dabei wurden alle 3 Leitungen der jeweiligen Teststruktur mit derselben Spannung beschaltet und der Überlappungsgrad zwischen den Peaks, die im EKM-Messsignalverlauf über den einzelnen Leitungen vorhanden sind, betrachtet. Die Messungen mit einem Messspitzen-Probenabstand von ca. 50 nm ergaben für einen Überlappungsgrad von 50% eine zugrunde liegende Strukturbreite zwischen 100 nm und 200 nm. Auch wenn bei Probenspannungen, die deutlich über der EKM-Spannungsauflösungsgrenze liegen, noch höhere Überlappungsgrade ohne Probleme auflösbar sind, wird sich die Grenze des elektrischen Ortsauflösungsvermögens bei Verwendung von Standardmessspitzen nicht signifikant unterhalb der 100 nm-Marke befinden. Da jedoch die aktuellen Strukturbreiten von integrierten Schaltungen bereits dicht oberhalb von 100 nm liegen, können mit heute üblichen EKM-Standardmessspitzen zukünftig aktuelle Strukturen nicht mehr elektrisch aufgelöst werden. Eine Optimierung der Messspitzengeometrie ist somit unbedingt erforderlich. Aus diesem Grund wurde ein 3-dimensionales Simulationsverfahren zur Berechnung von EKM-Messsignalverläufen entwickelt.

Mit diesem Simulationsverfahren konnte die Abhängigkeit der elektrischen Ortsauflösung sowie der Spannungsauflösung von der Messspitzengeometrie

untersucht werden. Hier zeigte sich, dass es keine ideale Messspitzengeometrie gibt, welche für EKM-Messungen an beliebigen Strukturen immer ein optimales Verhältnis zwischen elektrischer Ortsauflösung und Spannungsauflösung erzeugt. Es ist aber sehr wohl möglich für eine gegebene Messanordnung, bei der die notwendige Spannungsauflösung und die erforderliche elektrische Ortsauflösung bekannt sind, eine optimierte Messspitze zu entwerfen. Das Problem bei der Optimierung liegt darin, dass eine Verbesserung der elektrischen Ortsauflösung in der Regel eine Verschlechterung der Spannungsauflösung nach sich zieht. Eine Möglichkeit, diese Problematik etwas zu entschärfen, besteht darin, das Schwingungsverhalten der Messsonde zu verbessern. Auf diese Weise kann die Spannungsauflösung erhöht und so der Verlust an Spannungsauflösung kompensiert werden, der durch die bezüglich elektrischer Ortsauflösung optimierte Messspitzengeometrie entsteht. Dies konnte mit den beiden in Kapitel 3.3. beschriebenen Messsondentypen, welche sich lediglich in der Form ihres Hebelarms unterscheiden, nachgewiesen werden. Hier ergab sich bei Verwendung der längeren Messsonde eine um den Faktor 2,5 bessere Spannungsauflösung gegenüber der kurzen Messsonde.

Da die Spannungsauflösung sowie elektrische Ortsauflösung der EKM wie in Kapitel 4.2. gezeigt, nur vom Geometriefaktor der elektrischen Kraft abhängig sind, gelten die hier mittels einer für die heterodyne Mischtechnik repräsentativen Messanordnung erzielten Ergebnisse auch für alle anderen in Kapitel 2.3. und 2.4. aufgeführten EKM-Messanordnungen. Die Messanordnungen unterscheiden sich nämlich lediglich in der Gestaltung des spannungsabhängigen Terms in der elektrischen Kraft, nicht aber im Geometriefaktor. Qualitativ sollte sich daher bei allen EKM-Messanordnungen derselbe Verlauf für die Abhängigkeit der Spannungsauflösung sowie des Kräfteverhältnisses von der Strukturbreite ergeben. Ausnahme bilden Messungen an Halbleiterproben, da hier der Geometriefaktor nicht mehr unabhängig von der Messspitzen-Probenspannung ist (siehe Kapitel 2.2.).

Die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen bezogen sich alle auf den Messspitzeneinfluss, also der elektrischen Kraftwechselwirkung zwischen der Messspitze und der Probe. Die in Kapitel 4.2. erfolgte Betrachtung des Geometriefaktors hat gezeigt, dass bei Messungen an Submikrometerleitungen der größte Anteil des EKM-Messsignals durch den Hebelarmeinfluss erzeugt wird. Dieser äußert sich in einem ortsunabhängigen Gleichanteil im Messsignal. Durch den Hebelarmeinfluss kann es bei mehreren unter der Messsonde befindlichen signalführenden Leitungen zu einer Verfälschung der Messergebnisse durch Übersprechen kommen. In diesem Fall generiert jede der Leitungen einen ortsunabhängigen Gleichanteil im Messsignal, der sich mit den anderen Gleichanteilen additiv überlagert. Im folgenden Kapitel 5. wird dieser Einfluss des Übersprechens auf das EKM-Messsignal genauer untersucht.

4.7. Messungen mit dem Nadelsensor

Zum Abschluss dieses Kapitels wird noch kurz auf die mögliche Alternative zu den EKM-Standard-Messsonden eingegangen. Wie bereits in Kapitel 3.3. erläutert, erlaubt auch der dort eingehend beschriebene Nadelsensor eine kontaktlose Messung der lokalen elektrischen Spannung innerhalb von integrierten Schaltungen. Der Nadelsensor basiert auf einem quaderförmigen Schwingquarz mit einer daran befestigten, elektrisch leitfähigen Messspitze. Als Messspitzen kommen EKM-Messspitzen oder angespitzte, elektrisch leitfähige Drähte in Frage. Der Hauptvorteil des Nadelsensors gegenüber den EKM-Standard-Messsonden ist der verbesserte Testzugriff auf gehäuste bzw. gebondete integrierte Schaltungen, da kein Hebelarm zur Detektion der elektrischen Kraft benötigt wird. Dies lässt im übrigen auch vermuten, dass die mögliche Verfälschung des Messsignals durch Übersprechen bei dieser Messsonde deutlich geringer ausfällt als bei den EKM-Standard-Messsonden, wo der Hebelarmeinfluss ein großes Problem darstellt (s. Kapitel 5.).

Bei den experimentell durchgeführten Untersuchungen wurde der Schwingquarz bei seiner Resonanzfrequenz von ca. 1 MHz mit einer Wechselspannung u_{ein} zum Schwingen angeregt. Als Messsignal diente die Phasenverschiebung $\Delta\Psi$ zwischen der Anregungsspannung u_{ein} und der zur Quarzschwingung proportionalen Spannung u_{aus} (s. Kap. 3.3. Bild 3.3-3). Alle Messungen erfolgten an der Struktur G des ITG-Testchips (s. Kap. 3.2. Bild 3.2-3) und zwar überwiegend im Bereich der 4 μm breiten Leitungen. Als Messspitzen kamen angespitzte Wolframdrähte sowie komplette EKM-Messsonden zum Einsatz. Über eine elektrisch leitende Verbindung zwischen einer Elektrode des Schwingquarzes und der jeweiligen Messspitze war es wie bei den EKM-Standard-Messsonden möglich, eine externe Spannung u_S an die Messspitze zu legen (s. Kap. 3.3. Bild 3.3-3).

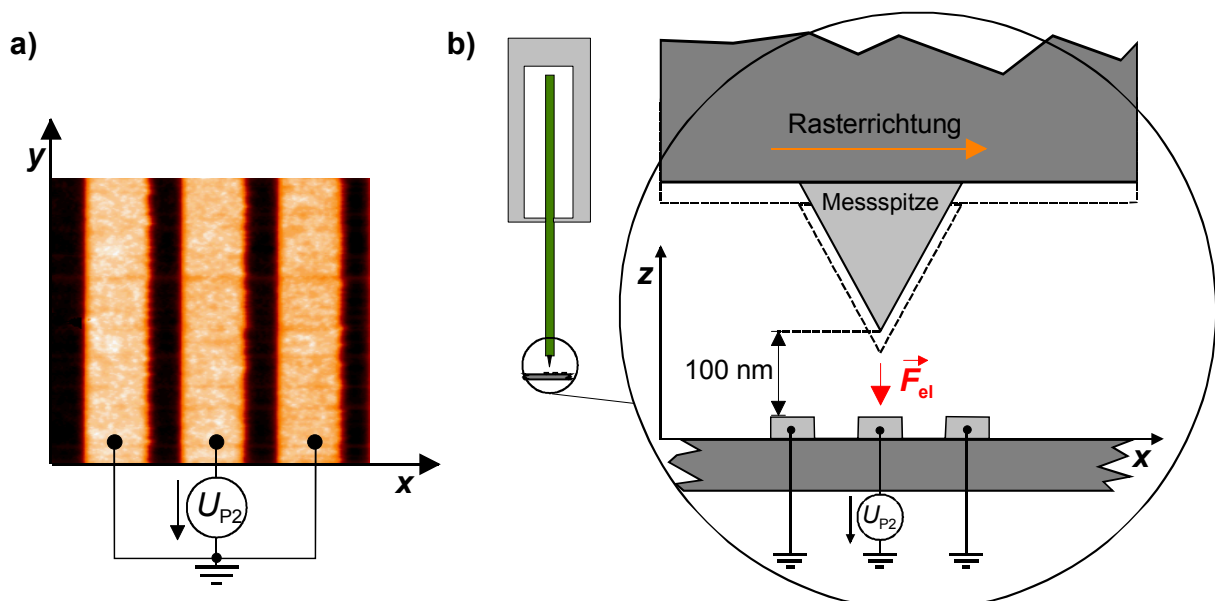


Bild 4.7-1: a) Topographie des Testgebiets und b) verwendete Messanordnung

Die bei den Messungen genutzte Messanordnung ist in Bild 4.7-1 dargestellt. Dabei wurde die Mittelleitung der Teststruktur mit einer Gleichspannung U_{P2} beschaltet, während die beiden Außenleitungen geerdet waren, um eine möglichst einfache Messanordnung mit dementsprechend möglichst wenig Fehlerquellen zu erzielen. Die Messspitzenspannung U_S war ebenfalls eine Gleichspannung und betrug entweder 0V oder $-10V$. Als Messspitzen-Probenabstand z_0 wurde ein Wert von ca. 100 nm eingestellt.

Zur Feststellung, ob mit dem Nadelsensor elektrische Spannungen detektiert werden können, wurde eine Linienraasterung über die Teststruktur mit einer Probenspannung von 30V und einer Messspitzenspannung von 0V durchgeführt. Der Messsignalverlauf zeigte eine deutliche Veränderung der detektierten Phasenverschiebung $\Delta\Psi$ über der spannungsführenden Leitung, so dass der Nadelsensor prinzipiell zur chipinternen, kontaktlosen Spannungsmessung eingesetzt werden kann (siehe Bild 4.7-2). Die Schräge im Messsignalverlauf über der signalführenden Leitung wird durch eine vorhandene Probenverkipfung verursacht. Mit dem bei den Messungen verwendeten Gerät (Twin-Snom der Fa. Omicron; siehe auch Neinhüs 2001), das ursprünglich nur für Topographiemessungen vorgesehen war, konnten solche Probenverkipfungen nur sehr unzulänglich beseitigt werden.

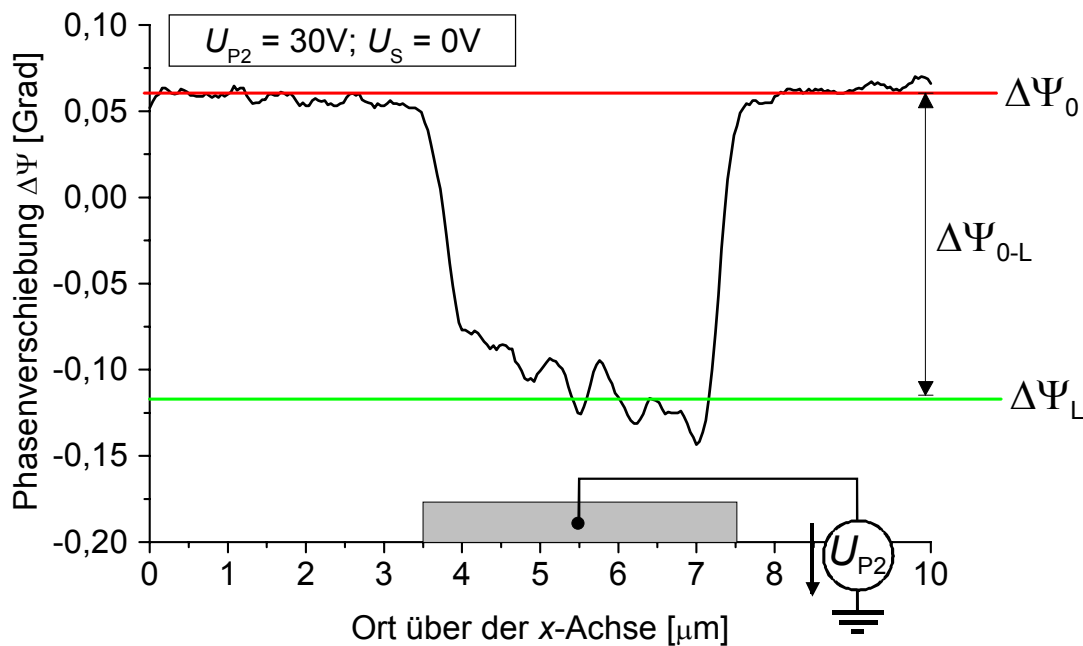


Bild 4.7-2: Verlauf der mit dem Nadelsensor detektierten Phasenverschiebung bei einer Linienraasterung über eine mit 30V beschaltete Signalleitung

Zur Untersuchung der Spannungsauflösung sowie der Abhängigkeit des Messsignals von der Probenspannung wurden zwei Messreihen durchgeführt. Bei beiden Messreihen wurden unterschiedliche Gleichspannungen an die Mittelleitung gelegt und jeweils die Differenz der Phasenverschiebung $\Delta\Psi_{0-L}$ über und neben der signalführenden Leitung ermittelt. Der Unterschied zwischen den Messreihen bestand

in der Beschaltung der Messspitze. So erfolgt die erste Messreihe mit einer Messspitzenspannung von 0V und die 2. Messreihe mit einer Spannung von -10V. Da die elektrische Kraft proportional zum Quadrat der Spannungsdifferenz zwischen Probe und Messspitze ist, sollte sich für die 2. Messreihe ein stärkeres Messsignal bzw. eine verbesserte Spannungsauflösung ergeben. Dies und auch die quadratische Abhängigkeit des Messsignals von der Spannungsdifferenz zeigt sich in den in Bild 4.7-3 präsentierten Signalverläufen. Als minimal detektierbare Spannung ergab sich für die geerdete Messspitze ein Wert von 5V, welcher bei Beschaltung der Messspitze mit einer Spannung von -10V auf einen Wert von 1V gesenkt werden konnte.

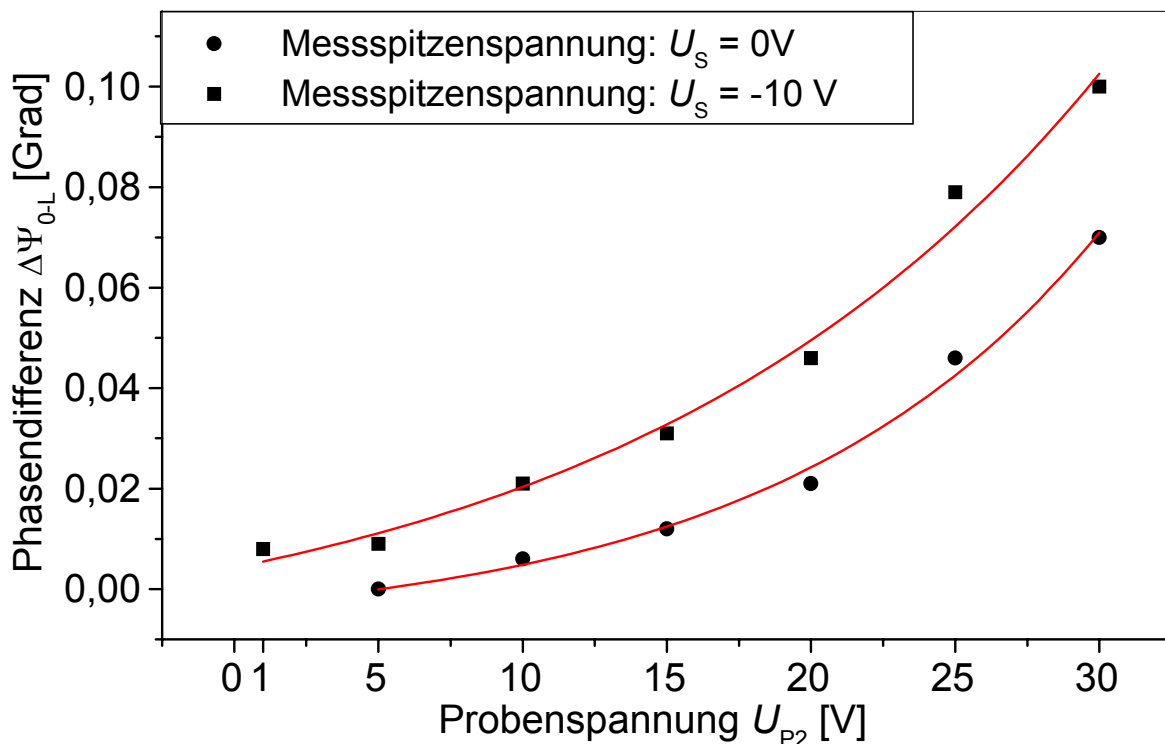


Bild 4.7-3: Untersuchung der Spannungsauflösung des Nadelsensors

Eine weitere Möglichkeit, die Spannungsauflösung des Nadelsensors zu verbessern, besteht darin, den Messspitzen-Probenabstand z_0 zu verringern. Die in Bild 4.7-4 dargestellte Messreihe mit verschiedenen Messspitzen-Probenabständen zeigt, dass eine Verringerung des Messspitzen-Probenabstands z_0 von 100 nm auf 30 nm ungefähr eine Verdopplung der Spannungsauflösung mit sich bringt. Allerdings sind mit dem vorhandenen Gerät Messspitzen-Probenabstände unterhalb von 30 nm nur sehr schwer zu realisieren, da die Probenverkipfung nicht vollständig eliminiert werden kann. Aus diesem Grund ist eine weitere Erhöhung der Spannungsauflösung mittels dieser Maßnahme nicht möglich.

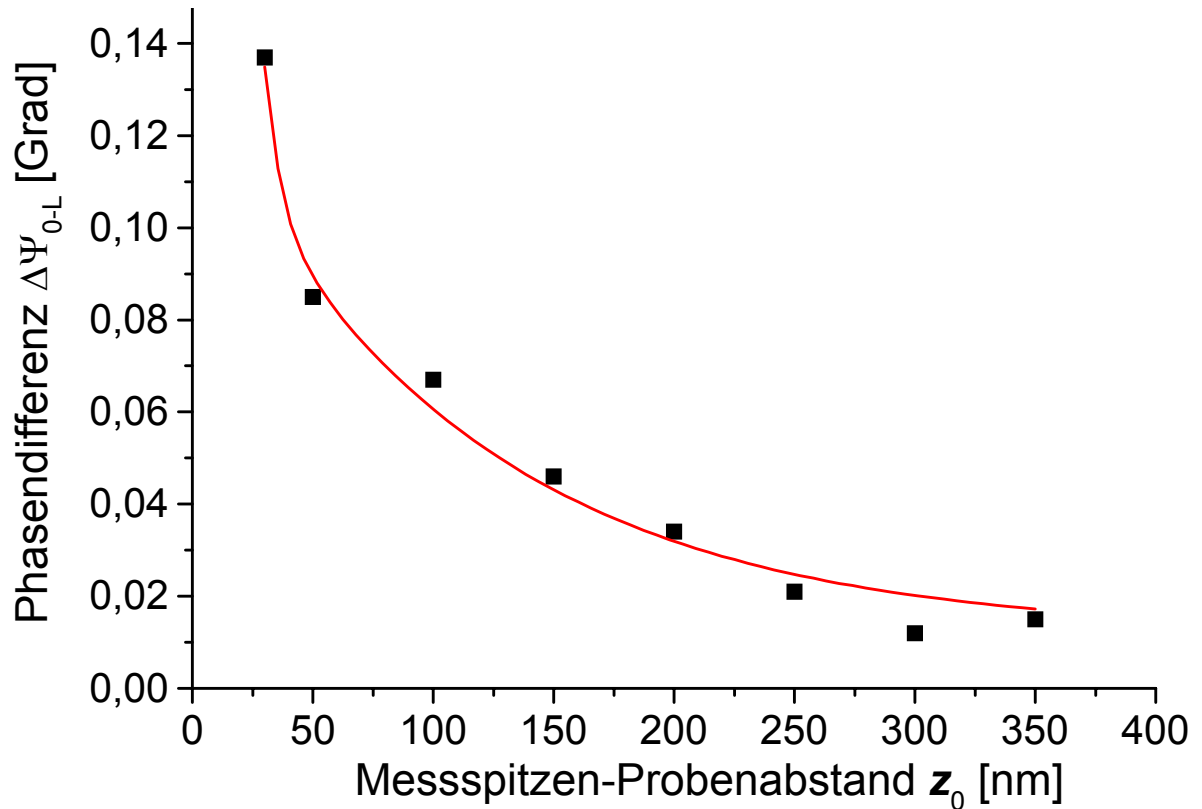


Bild 4.7-4: Abhängigkeit des Messsignals vom Messspitzen-Probenabstand z_0

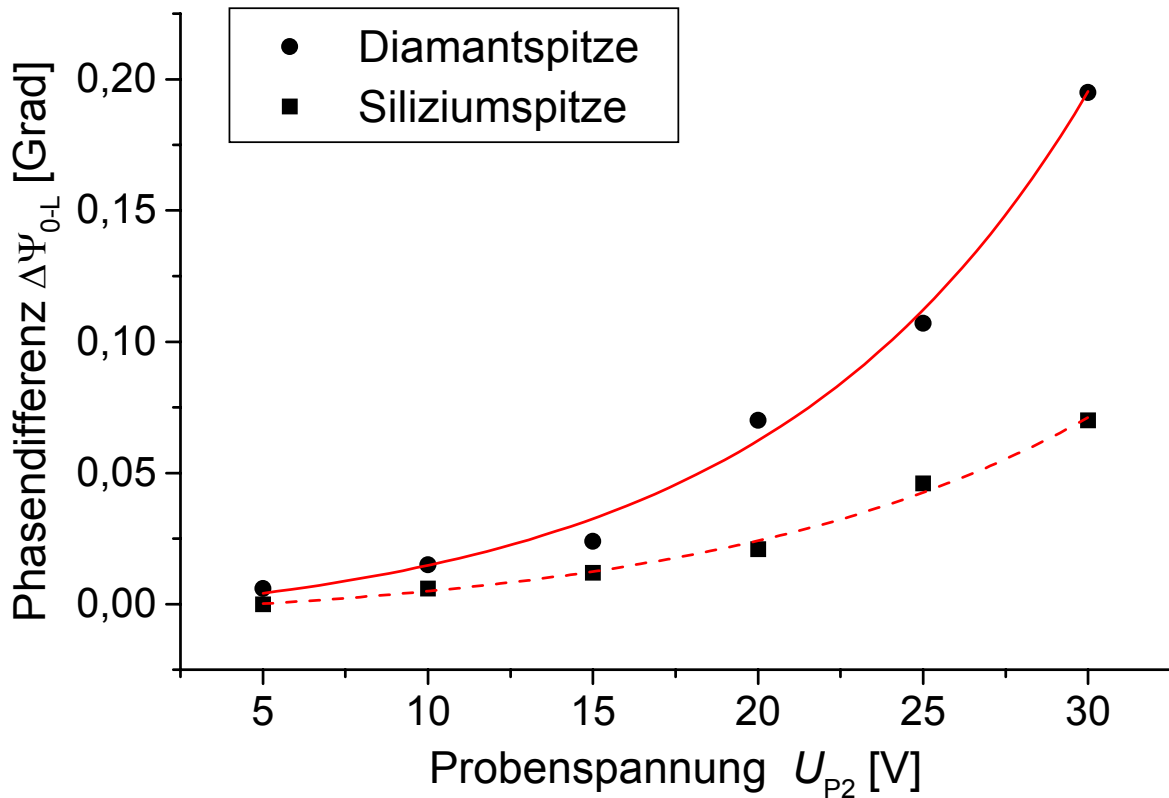


Bild 4.7-5: Untersuchung der Spannungsauflösung des Nadelsensors mit 2 verschiedenen Messspitzenarten

Bei den durchgeführten Messungen setzte der Nadelsensor aufgrund von Regelproblemen des öfteren mit der Messspitze auf der Probenoberfläche auf. Dies führte meist zu einer deformierten, für ortsauflösende Messungen unbrauchbar gewordenen Messspitze. Zur Verringerung des Messspitzenverschleisses wurden daher Messungen mit elektrisch leitfähigen, dotierten Diamantmessspitzen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass mit diesen Messspitzen eine deutlich höhere Spannungsauflösung erreicht werden konnte als mit den Siliziummessspitzen (siehe Bild 4.7-5). Es ist somit eine weitere Optimierung der Spannungsauflösung des Nadelsensors über die Verwendung anderer Materialien möglich.

Zusammenfassung:

Die mit dem Nadelsensor durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass ein Einsatz dieses Sensors zur kontaktlosen Messung elektrischer Spannungen prinzipiell möglich ist. So konnte ein Einfluss der Probenspannung auf die Phasenverschiebung zwischen der Anregungsspannung des Schwingquarzes und der Quarzschwingung nachgewiesen werden. Allerdings ergaben die ersten Untersuchungen eine deutlich schlechtere Spannungsauflösung als mit vergleichbaren EKM-Standard-Messsonden. Hier wurde mit einer geerdeten Messspitze und einem Messspitzen-Probenabstand von 100 nm gerade einmal ein Wert von 5V erreicht. Selbst mit einer zur Erhöhung der elektrischen Kraftwechselwirkung zusätzlich an die Messspitze angelegten Spannung von -10V konnten keine Probenspannungen unterhalb von 1V aufgelöst werden. Eine Erhöhung der Spannungsauflösung ist über die Verringerung des Messspitzen-Probenabstands sowie die Verwendung anderer Messspitzenmaterialien möglich. Jedoch dürfte auch dann eine Spannungsauflösung im Millivoltbereich wie sie bei der KPFM (siehe Kapitel 2.3.) erzielt wird, schwerlich erreichbar sein. Bei diesen Aussagen muss allerdings berücksichtigt werden, dass hier nur prinzipielle Untersuchungen durchgeführt worden sind, die Erforschung des Nadelsensors als Messsonde für elektrische Spannungen also erst am Anfang steht. So ist es sicherlich denkbar, dass über Messanordnungen, welche wie bei der klassischen EKM einen dynamischen elektrischen Kraftterm bei der Resonanzfrequenz des Nadelsensors erzeugen, bessere Leistungsdaten erreicht werden können.