

## 2 Grundlagen und Stand der Technik der Stromkontrastmessung

Das Rasterkraftmikroskop (RKM) wurde 1986 von Binning u.a. [Binning 1986] vorgestellt. Es ermöglicht eine topografische Abbildung nichtleitender Oberflächen mit atomarer Ortsauflösung [Albrecht 1988]. Das physikalische Prinzip des RKM beruht auf der Auswertung der lokalen Kraftwechselwirkung zwischen Oberflächenkräften der Probe und einer atomar feinen Messspitze. Hierzu wird die Messsonde, in der Regel bestehend aus einer an einem Hebelarm befestigten Messspitze und einem Trägerkörper, zeilenweise über die Probenoberfläche gerastert. An jedem Punkt entlang des Rasterpfades wird die lokale, auf die Messspitze wirkende Kraft aufgenommen.

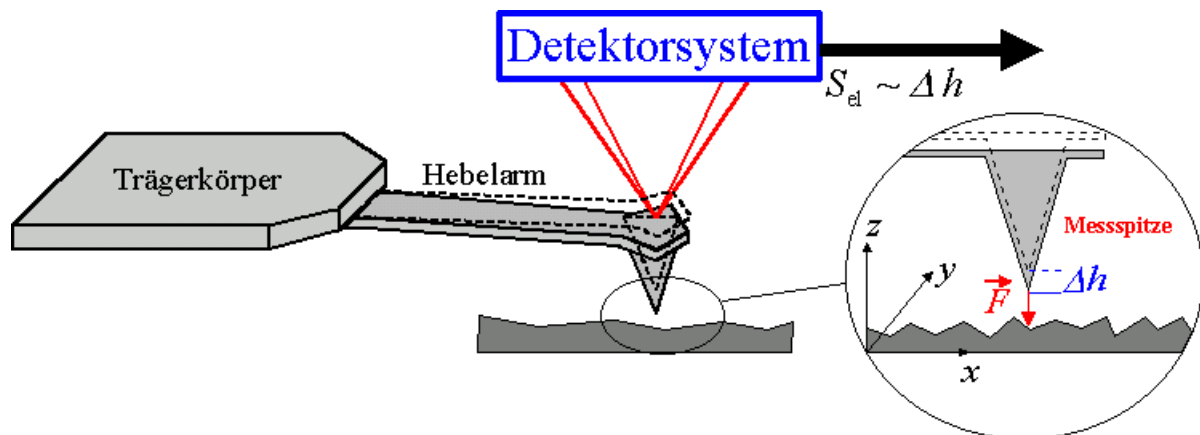


Bild 2.1: Funktionsprinzip des Rasterkraftmikroskops

Die auf die Messspitze wirkende Kraft  $\vec{F}$  führt zu einer Verbiegung  $\Delta \vec{h}$  des Hebelarms. Diese Verbiegung ist nach dem Hookschen Gesetz proportional der wirkenden Kraft [Braun 1990]

$$\vec{F} = c \cdot \Delta \vec{h} . \quad (2.1)$$

Die Größe  $c$  entspricht dabei der Federrate des Hebelarms. Diese lässt sich aus der Geometrie ( $b$  Breite;  $d$  Dicke;  $l$  Länge) und dem Material ( $E$  Elastizitätsmodul) des Hebelarms berechnen [Nanosensors 2000] und ist für einen Rechteckquerschnitt

$$c = \frac{E \cdot b \cdot d^3}{4 \cdot l^3} . \quad (2.2)$$

Durch den Einsatz unterschiedlicher Messsonden und Rasterhöhen können verschiedene Kräfte untersucht werden. Prinzipiell ist es möglich, jede beliebige Kraft zu messen. Bislang werden hauptsächlich die atomaren, die elektrischen [Sarid 1991] und die magnetischen Kräfte [Saurenbach 1990, Löhndorf 1996, Pratzner 2001, Hartmann 1994] für Untersuchungen genutzt. Diese werden kurz vorgestellt.

### **Atomare Kraft**

Beträgt der Abstand der Messspitze zur Probenoberfläche weniger als einige Nanometer, so treten anziehende und abstoßende Kräfte auf, die mit steigendem Abstand sehr stark abnehmen. Sie werden deshalb als „Kräfte im Nahfeld“ bezeichnet. Bereits bei einem Abstand weniger Nanometer sind sie praktisch abgeklungen. Die Ursache der anziehenden Kräfte sind die van-der-Waals-Kräfte [Robrock 1990], welche die Wechselwirkungen zwischen elektrischen Dipolen beschreiben. Ihre Entstehung liegt in der Änderung der Ladungsverteilung begründet [Binnig 1986].

Die abstoßenden Kräfte werden durch die Überlagerung der Elektronenhüllen und der daraus resultierenden quantenmechanischen Effekte, wie der Verletzung des Pauli-Prinzips, generiert [Meyer 1992]. Daneben treten noch weitere Wechselwirkungen, wie die van-der-Waals Kraft, auf. Die resultierende atomare Kraft  $\vec{F}_{\text{res}}$  kann so nach dem Lennard-Jones-Modell [Lennard 1932] berechnet werden zu

$$F_{\text{res}} = -\frac{\delta W_{\text{pot,LJ}}}{\delta h} = \frac{K_{\text{ab}}}{h^{13}} - \frac{K_{\text{an}}}{h^7}. \quad (2.3)$$

In Gleichung 2.3 sind  $K_{\text{ab}}$  und  $K_{\text{an}}$  Proportionalitätsfaktoren für die jeweiligen abstoßenden bzw. anziehenden Kräfte. Der Verlauf der resultierenden Kraft in Abhängigkeit vom Abstand (Bild 2.2) zeigt, dass sich bei einem Abstand der Atomkernmittelpunkte im Subnanometerbereich ein Kräftegleichgewicht zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften einstellt.

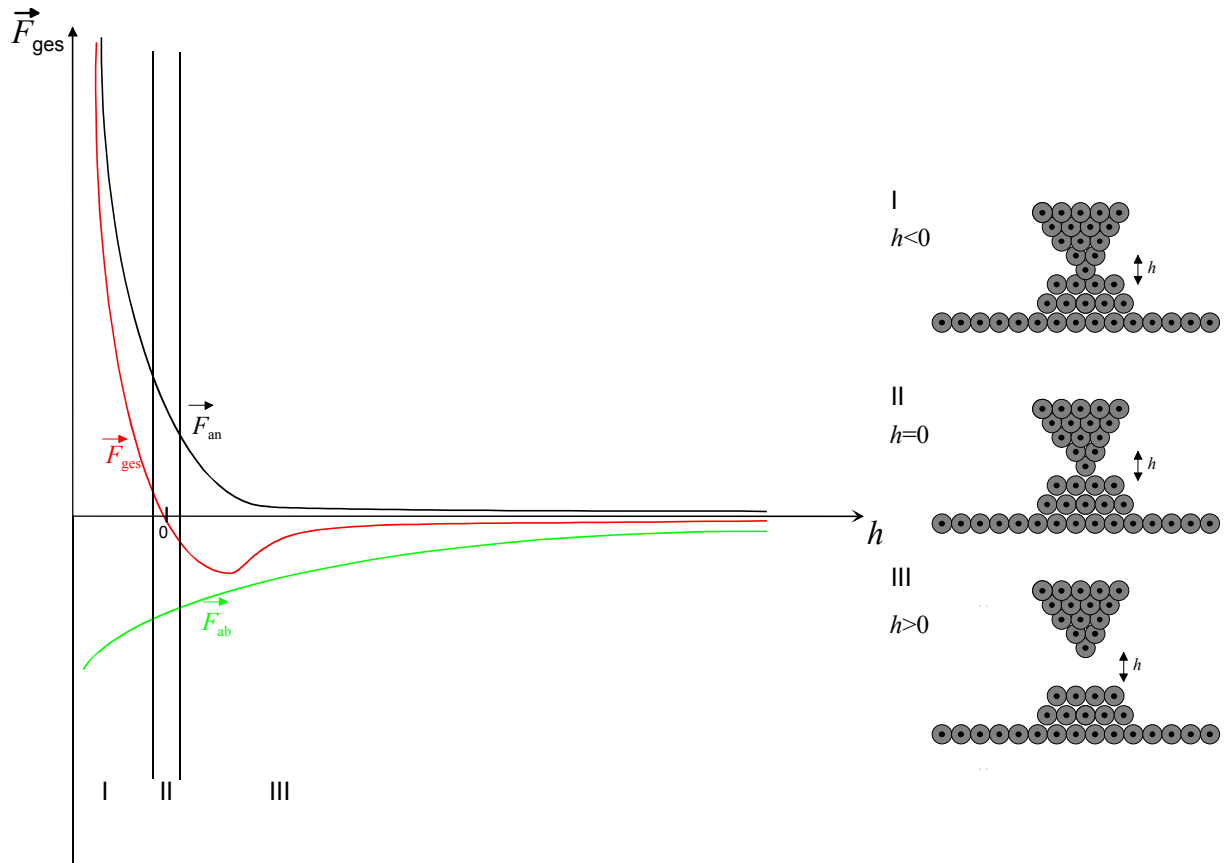


Bild 2.2: Verlauf der resultierenden Kraft  $\vec{F}_{\text{ges}}$  im Nahfeld nach dem Lennard-Jones-Modell.

Befindet sich eine RKM-Messspitze in die Nähe der Probenoberfläche, wird sie idealerweise in den Arbeitspunkt  $h=0$  gezogen, wo die resultierende Kraft  $\vec{F}_{\text{ges}}$  null ist. Beim Rastern der Sonde über die Probenoberfläche führt eine topografische Erhöhung zu einer Verringerung des Abstandes zwischen Messspitze und Probenoberfläche. Dadurch dominieren dann die abstoßenden Kräfte auf die Messspitze, woraus eine messbare Bewegung der Messspitze und somit des Hebelarms resultiert. Bei einer topografischen Vertiefung werden die anziehenden Kräfte auf die Messsonde dominant und ziehen die Messspitze in den Arbeitspunkt. Daraus resultiert eine messbare, entgegengesetzte Verbiegung des Hebelarms. Dabei ist zu erwähnen, dass sowohl die Rückstellkraft des Hebelarms, als auch die Schwerkraft, sowie äußere elektrische oder magnetische Felder eine Verschiebung des Arbeitspunktes bewirken können. Somit ist eine exakte Bestimmung des sich in einer Messung einstellenden Abstandes nicht möglich. Eine wesentlich umfangreichere Beschreibung der vorgestellten Problematik ist in [Sarid 1991, Koutsos 1994, Sokolov 1994] dargestellt.

Wird die Messsonde im Arbeitspunkt über die Oberfläche geführt, bezeichnet man dies als Messung im Kontaktmodus. Er wird zur topografischen Abbildung von Oberflächen mit einer

Auflösung bis in den atomaren Bereich eingesetzt [Schwarz 2000, Ohnesorge 1993]. Daneben existieren weitere topografische Abbildungsverfahren, die später eingehend erläutert werden.

### Elektrische Kraft

Neben der atomaren Kraft kann man durch Verwendung einer leitfähigen Messsonde auch eine elektrische Kraft, die Coulomb-Kraft, zwischen der Probenoberfläche und der Messspitze aufzeichnen. Da die Reichweite der elektrischen Kraft [Sarid 1991] sehr viel größer ist, als die der atomaren Kraft, können in einem Abstand von  $h > 10$  nm die elektrischen Kräfte nahezu beeinflussungsfrei gemessen werden. Aufgrund des größeren Arbeitsabstandes gehört diese Kraft zu den so genannten „Kräften im Fernfeld“.

Das einfachste Modell zur Beschreibung der Kraftwechselwirkung zwischen Messspitze und Probenoberfläche stellt das Plattenkondensatormodell dar [Hou 1992].

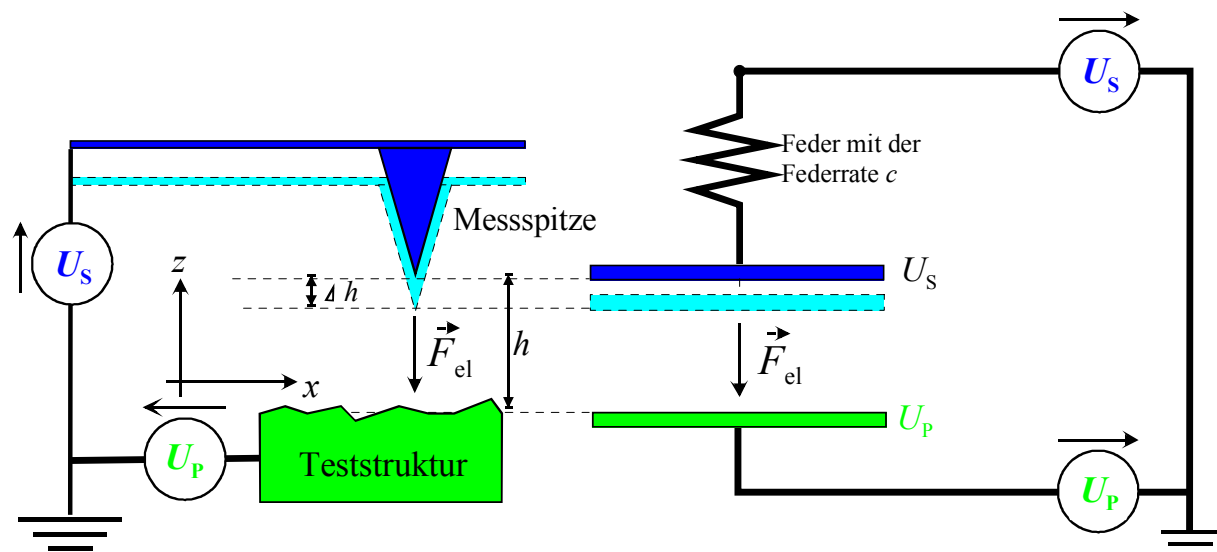


Bild 2.3: Plattenkondensatormodell

Hierbei geht man davon aus, dass der Abstand  $h$  der Messspitze zur Probenoberfläche so gering ist, dass das Messspitzenende mit dem Radius  $R_0$  mit der Probenoberfläche einen Plattenkondensator bildet. Die Spannung  $U_0$  ist die Differenz zwischen der Spannung an der Messspitze  $U_S$  und der Spannung auf der Probe  $U_P$  bezogen zur Masse.

$$U_0 = U_S - U_P \quad (2.4)$$

Die Kraft zwischen Messspitze und Probenoberfläche auf die einzelnen Elektroden mit dem Radius  $R$  und einem Abstand  $h$  kann man mit Hilfe der Maxwellschen Gleichungen [Wolf 1997] zu

$$\vec{F}_{\text{el}} = \frac{\varepsilon \cdot \pi \cdot R_0}{2 \cdot h} \cdot U_0^2 \cdot \vec{e} \quad (2.5)$$

bestimmen ( $\vec{e}$  Einheitsvektor). Hiermit ist es möglich, Dotierstoffkonzentrationen [Isenbart 2001, Born 2000] und Potenzialverteilungen zu untersuchen [Leyk 1998, Bridges 1992, Böhm 1995].

### Magnetische Kraft

Die magnetische Kraft ist neben der elektrischen Kraft die zweite bedeutende Kraft im sogenannten Fernfeld [Hartmann 1994]. Zum Messen dieser Kraft kommen Messsonden zum Einsatz, bei denen sowohl die Messspitze, als auch der Hebelarm aus ferromagnetischem Material bestehen [Lemke 1990, Göddenhenrich 1990], oder mit einem ferromagnetischen Film beschichtet sind [Rugar 1990, Mamin 1989, den Boef 1990, Seneoka 1991]. Da die Reichweite der magnetischen Kräfte ebenfalls größer als die der atomaren Kräfte ist, wird ein Abstand zwischen Messspitze und Probenoberfläche von  $h > 10$  nm gewählt. So können die atomaren Kraftwechselwirkungen vernachlässigt werden [Martin 1987]. Bei Rasterung der Messsonde mit der Magnetisierung  $\vec{M}$  über der Probenoberfläche wird die Messsonde durch das magnetische Feld  $\vec{H}$  angezogen oder abgestoßen.

Die Magnetisierungsenergie der ferromagnetischen Messsonde ergibt sich zu [Hartmann 1989]:

$$W = \mu_0 \cdot \int_{V_{\text{Spitze}}} \vec{H} \cdot \vec{M} dV. \quad (2.6)$$

Die Magnetisierung  $\vec{M}$  ergibt sich nach Gleichung 2.6 als Summe über das Produkt der Dipoldichte  $N_i$  mit dem magnetischen Dipolmoment  $\vec{m}$  jeder Dipolsorte [Kubalek 2000],

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^Z N_i \cdot \vec{m}_i. \quad (2.7)$$

Die Energie  $W$  ist definiert als Kraft  $\vec{F}$  mal Weg  $\vec{s}$  [Stöcker 1998],

$$W = \vec{F} \cdot d\vec{s} . \quad (2.8)$$

Mit dieser Definition ergibt sich für die Kraft als Gradient der Energie  $W$

$$\vec{F} = -\text{grad } W = -\left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z}\right). \quad (2.9)$$

Diese Beschreibung ist aus Gründen ihrer Komplexität für den praktischen Gebrauch nicht geeignet. Ein einfacheres Modell wird in Kapitel 2.2 vorgestellt.

## **2.1 Betriebsarten des Rasterkraftmikroskops**

Das Rasterkraftmikroskop (RKM) kann in zwei verschiedenen Modi, dem bereits zuvor erwähnten Kontaktmodus („Contact Mode“) oder im so genannten Nicht Kontaktmodus („Non Contact Mode“) [Howland 1997] betrieben werden. In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Betriebsmodi und ihre hauptsächlichen Einsatzgebiete vorgestellt.

### **Kontaktmodus („Contact Mode“)**

Zur Messung im Kontaktmodus wird die Messsonde in das Nahfeld der Probenoberfläche gebracht. Dabei wird die Messsonde nach dem Lennard-Jones-Modell in einem stabilen Arbeitspunkt gehalten, in dem sich ein Kräftegleichgewicht einstellt. In diesem Arbeitspunkt wirkt keine resultierende, auslenkende Kraft auf den Hebelarm. Die Spitze der Messsonde befindet sich in einem Abstand von ca.  $h=0,25$  nm über der Probenoberfläche. Wird die Messsonde über die Probe gerastert, folgt die Messspitze, wie oben beschrieben, der Probenoberfläche. Über eine Regelung kann die Verbiegung des Hebelarms, und somit die auf die Messspitze wirkende Kraft, konstant gehalten werden. Die Positionierung der Messsonde im Bezug zur Probenoberfläche erfolgt durch Piezostellglieder. Dadurch wird die Messsonde der Oberfläche nachgeführt und bildet diese ab. Üblicherweise wird nicht die Kraft bzw. das der Kraft proportionale Signal der Detektoreinheit aufgezeichnet, sondern das Regelsignal. Dieses Regelsignal entspricht der Oberflächenstruktur der Probe. Bild 2.4 zeigt schematisch die Funktionsweise dieses Modus. Die Probe ist hellgrau dargestellt, das Nahfeld der Probenoberfläche dunkelgrau und die Position des Messspitzenendes während des

Rastervorgangs rot. Die obere schwarze Linie verdeutlicht die Längenausdehnung des Piezostellgliedes während des Rastervorgangs.

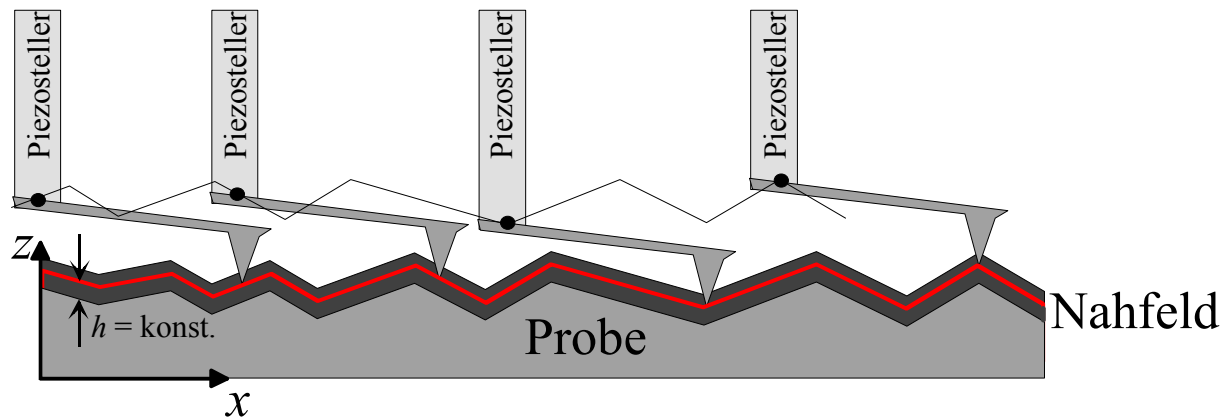


Bild 2.4: Prinzip des Kontaktmodus

### Nicht-Kontaktmodus („Non Contact Mode“)

Bei Messungen im Nicht-Kontaktmodus [DI 1998] nutzt man die Eigenschaft, dass die Messsonde, bestehend aus dem an einem Trägerkörper befestigten Hebelarm mit einer an seinem Ende befindlichen Messspitze, ein schwingungsfähiges System mit hoher mechanischer Güte darstellt [Leyke 1998]. In Bild 2.5 ist die Übertragungsfunktion der Messsonde dargestellt.

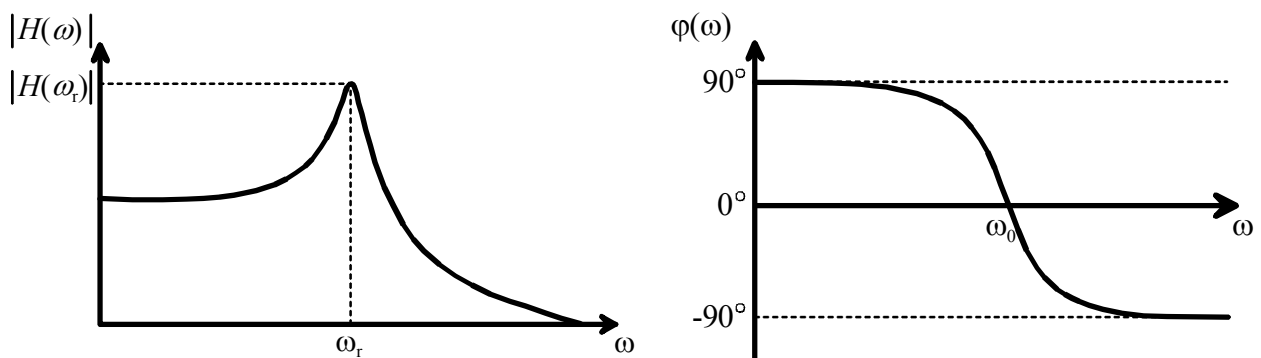


Bild 2.5: Übertragungsfunktion einer RKM-Messsonde  
 $\omega_r$  Resonanzfrequenz;  $\omega_0$  Eigenfrequenz;  $\varphi$  Phase der Auslenkung

Die Resonanzstelle ist in Bild 2.5 deutlich zu erkennen. In diesem Punkt ist bei gleichbleibender Anregung die Schwingungsamplitude  $|H(\omega_r)|$  des Hebelarms am größten. Darüber hinaus weist die Messsonde ein Tiefpassverhalten auf, das in ihrer Massenträgheit

begründet ist. Der Phasenverlauf weist bei der Eigenfrequenz einen Phasensprung von  $\varphi=180^0$  auf.

Aufgrund des Schwingungsverhaltens der Messsonde ergibt sich diese grundlegend andere Art der Topografieabbildung, der so genannte Nicht-Kontaktmodus. Dabei wird die Messsonde über ein Piezostellglied zum Schwingen angeregt. Dies geschieht durch ein, dem Regelsignal überlagertes, niederfrequentes Schwingungssignal, das der Resonanzfrequenz der Messsonde entspricht. Der Abstand zwischen Messsonde und Probenoberfläche vergrößert sich. Im Verlauf der Rasterung taucht, wie in Bild 2.6 dargestellt, die Messspitze immer wieder kurz in den Nahfeldbereich ein, und das Schwingungsverhalten der Messsonde ändert sich mit dem Abstand zur Probenoberfläche. Hierbei ändern sich folgende Parameter: die Resonanzfrequenz, die Amplitude und die Phase der Schwingung. Jede dieser Größen kann zur Regelung verwendet werden. Mit den Piezostellgliedern wird die entsprechende Größe auf einen konstanten Wert geregelt. Üblicherweise wird als Regelsignal das Phasensignal ausgewertet, da hier sowohl der größte Anstieg der Messwerte, als auch ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Kraft  $\vec{F}$  und der Messgröße besteht. Dieses Signal ist dabei proportional dem Gradienten der auf die Messspitze wirkenden Kraft [Sarid 1991]. Bei Betrachtung der Geometrie des Hebelarms mit der mechanischen Güte  $Q$  [Nanosensors 2001, MDT 2000] muss sich auf die  $z$ -Komponente beschränkt werden [Hartmann 1989]. Somit ist die Phasenverschiebung der Hebelarmschwingung:

$$\Delta\varphi = \frac{Q}{c} \cdot \frac{\partial F}{\partial z} . \quad (2.10)$$

Dabei ist es möglich, analog dem Kontaktmodus, über das Regelsignal die Topografie aufzunehmen.

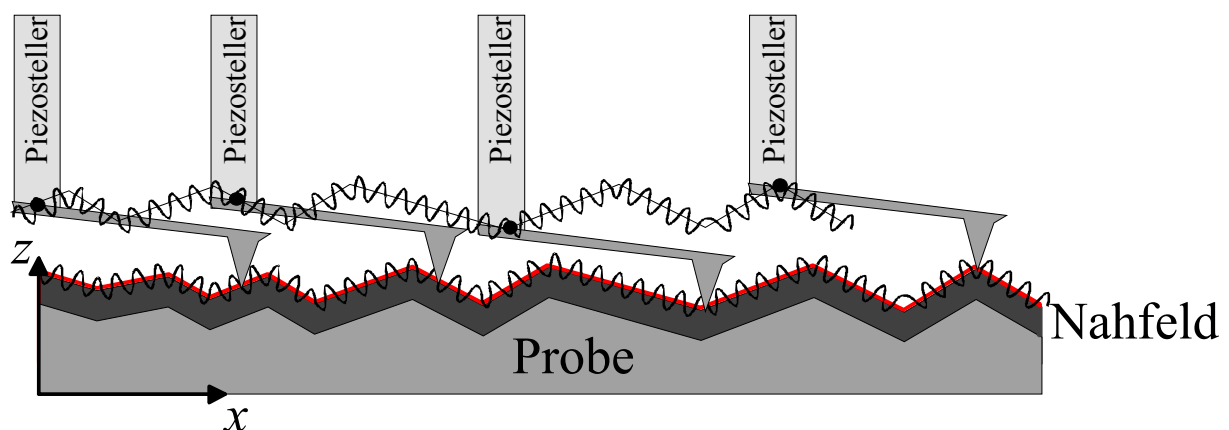


Bild 2.6: Prinzip des Nicht-Kontaktmodus



Neben den zur Topografiemessung eingesetzten Betriebsmodi existieren weitere Betriebsmodi, die speziell zur Detektion der Kräfte im Fernfeld verwendet werden. Sie eignen sich jedoch nicht zur topografischen Abbildung von Oberflächen.

### **Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand und ohne mechanische Anregung der Messsonde**

Messungen im Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand werden überwiegend zur elektrischen [Sarid 1991] und magnetischen [Hartman 1994] Kraftmikroskopie, also zur Detektion langreichweitiger Kräfte eingesetzt. Diese Betriebsart wird als statisch elektrische Kraftmikroskopie bzw. statisch magnetische Kraftmikroskopie bezeichnet.

Die Messsonde wird nicht zum Schwingen angeregt, und es wird keine Regelung vorgenommen. Die Messsonde rastert, wie in Bild 2.7 dargestellt, in konstanter Höhe über die Probe. Dabei muss der Abstand zwischen Probenoberfläche und Messsonde so groß sein, dass keine atomaren Kräfte mehr wirksam sind, d.h. die Messspitze darf während der Messung nicht in das in Bild 2.7 dunkelgrau dargestellte Nahfeld eintauchen.

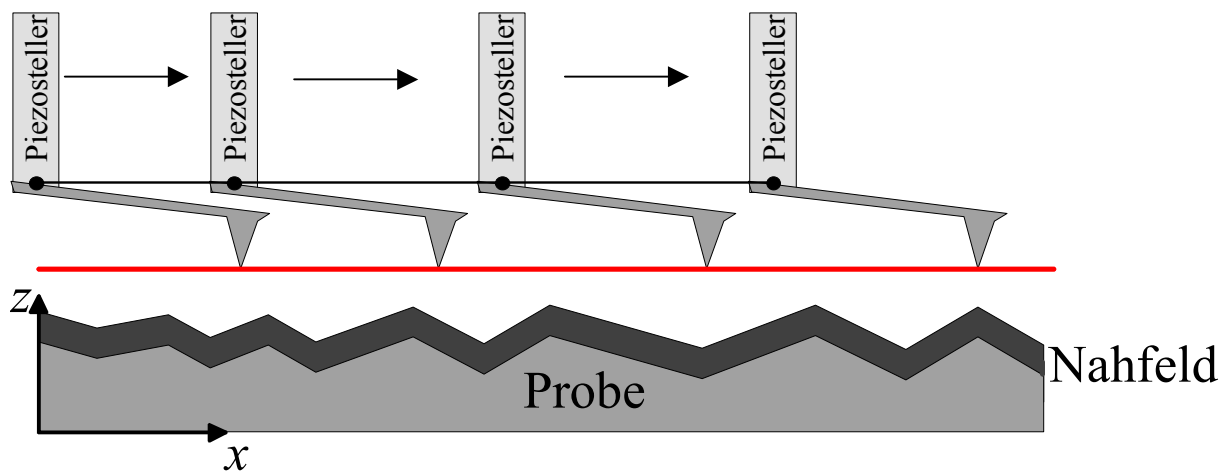


Bild 2.7: Prinzip der statisch elektrischen bzw. statisch magnetischen Kraftmikroskopie

### **Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand und mit mechanischer Anregung der Messsonde**

Messungen im Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand und Anregung der Messsonde stellen die übliche Betriebsart eines MKM dar. Sie wird hauptsächlich zur Untersuchung konstanter Magnetfelder verwendet.

In dieser Betriebsart befindet sich die Messsonde außerhalb des Nahfeldbereichs. Die Messsonde wird analog zum topografieabbildenden Nicht-Kontaktmodus unter Nutzung der Resonanzfrequenz mechanisch zum Schwingen angeregt. Ein großer Vorteil dieser Betriebsart liegt darin, dass man zur Auswertung des gemessenen Signals einen Lock-In-Verstärker verwenden kann. Dieser ermöglicht die Detektion stark verrauschter Signale [Hammer 1975 a,b,c].

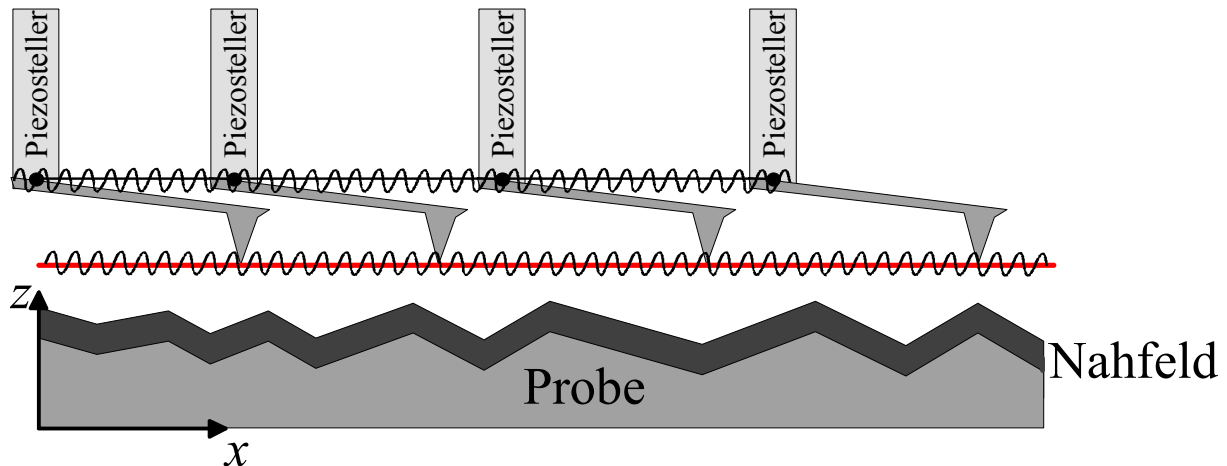


Bild 2.8: *Prinzip der dynamisch elektrischen bzw. dynamisch magnetischen Kraftmikroskopie*

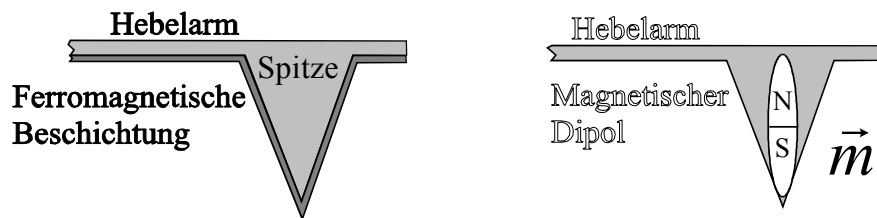
Einige Gerätehersteller haben diesen Modus noch erweitert. Der Abstand der Messsonde zur Probenoberfläche wird nicht in einer bestimmten Höhe, sondern über eine zuvor ermittelte und abgespeicherte Oberflächentopografie konstant gehalten [DI 1998]. Hierbei folgt die Messsonde der abgespeicherten Oberflächentopografie in einem exakten Abstand. Diese Technik setzt eine extrem große Driftstabilität voraus, was von den meisten Geräten nicht geleistet werden kann. Häufig kommt es zu einem ungewollten Kontakt der Messsonde mit der Probenoberfläche, was sowohl die Messergebnisse beeinflussen, als auch die verwendete Messsonde zerstören kann.

## 2.2 Einführung in die Magnetkraftmikroskopie

Das Magnetkraftmikroskop (MKM) ist ein Rasterkraftmikroskop. Mit dem MKM kann man Magnetfelder mit sehr hoher Ortsauflösung von etwa  $A_0=10$  nm messen [Grütter 1990, Hartmann 1999]. Bei der Magnetkraftmikroskopie verwendet man, wie oben erwähnt, spezielle Messsonden. Diese Messsonden bestehen vollständig aus einem ferromagnetischen

Material [Lemke 1990, Göddenhenrich 1990] oder aus einem, mit einer ferromagnetischen Schicht überzogenen Halbleitermaterial [Rugar 1990, Mamin 1989, den Boef 1990, Seneoka 1991]. Letzteres hat den Vorteil, dass Mikrostrukturierungstechniken der Halbleiterindustrie eingesetzt werden können, und so eine hohe Reproduzierbarkeit bei vergleichsweise geringen Kosten erzielt werden kann.

Zur Beschreibung der auf die Messspitze wirkenden Kraft  $\vec{F}$  ist die oben vorgestellte Gleichung 2.9 in vorliegender Form sehr aufwendig. Daher wird zu einer vereinfachten Betrachtungsweise übergegangen. Das in der Literatur am häufigsten verwendete Modell ist das Dipolmodell [Hartman 1989], Bild 2.9 .



Aufbau einer MKM-Messsonde      Modellvorstellung einer MKM-Messsonde

Bild 2.9:      Modellvorstellung einer MKM-Messsonde

Bei dem Modell nimmt man an, dass die gesamte ferromagnetische Beschichtung der Messsonde wie ein einziger magnetischer Dipol der Magnetisierung  $\vec{m}$  wirkt. Er befindet sich im unteren Bereich, jedoch nicht am Ende der Messspitze. Dieses Modell wurde vor allem zur Beschreibung von Wechselwirkungen der Messspitze mit räumlich sehr kleinen Magnetfeldern entwickelt. Zur Beschreibung von Magnetfeldern mit größeren räumlichen Abmessungen, wie sie großflächige Leiterbahnen erzeugen, ist das Modell nicht ausreichend. Hierfür wird in Kap. 7.5 eine Erweiterung des Modells vorgestellt, welche auch die Magnetisierung des Hebelarms berücksichtigt.

Betrachtet man die Geometrie des Hebelarms, an dem die Messspitze befestigt ist, so weist er nur eine Kraftsensitivität in  $z$ -Richtung auf [Sarid 1991]. Aus diesem Grund können alle anderen Komponenten für die weitere Betrachtung vernachlässigt werden. Daraus folgt für die Kraft in  $z$ -Richtung:

$$F_z = -\frac{\partial W}{\partial z}. \quad (2.11)$$

Um die maximale Empfindlichkeit zu erreichen, ist die Beschichtung der Messspitze nur in eine Richtung, im gewählten Koordinatensystem die  $z$ -Richtung, magnetisiert. Da, wie oben erwähnt, die Magnetisierung  $\vec{M}$  der gesamten Spitze im Dipolmodell aus Bild 2.9 als ein einziger, magnetischer Dipol mit dem magnetischen Dipolmoment  $\vec{m}$  angenommen wird, kann man davon ausgehen, dass  $\vec{m}$  nur eine Komponente in  $z$ -Richtung enthält,

$$\vec{m} = m_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Unter diesen Voraussetzungen erhält man folgenden Zusammenhang für die Kraft  $F_{\text{mag},z}$ , die in  $z$ -Richtung auf die Messspitze wirkt:

$$F_{\text{mag},z} = -\frac{\partial W}{\partial z} = |\vec{m}| \cdot \frac{\partial H_z}{\partial z} = m_0 \cdot \frac{\partial H_z}{\partial z}. \quad (2.13)$$

Das heißt, die Kraft ist proportional der ersten Ableitung des magnetischen Feldes  $\vec{H}$  in  $z$ -Richtung sowie der Größe des magnetischen Dipolmoments  $m_0$ .

Nach dem Hookschen Gesetz (Gleichung 2.1) ergibt sich damit eine direkte Proportionalität zwischen dem Gradienten des magnetischen Feldes der Probe und der Auslenkung des Hebelarms, die letztlich gemessen werden kann:

$$\begin{aligned} \Delta h &\sim F_{\text{mag},z} \sim m_0, \\ \Delta h &\sim F_{\text{mag},z} \sim \Delta H. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Zur Steigerung der Messempfindlichkeit wird das MKM dynamisch betrieben. Hierbei wird die Messsonde nahe ihrer Resonanzfrequenz zum Schwingen angeregt und in einem konstanten Abstand über die Probe gerastert (Nicht-Kontaktmodus mit Anregung, Kap 2.1). Gemessen wird die Phasenänderung  $\Delta\varphi$  der Schwingung. Sie ist proportional der 2. Ableitung des magnetischen Feldes  $H_z$  der Probe in  $z$ -Richtung [Löhndorf 1997, Wehner 2001].

$$\Delta\varphi = -\frac{Q \cdot 180}{c \cdot \pi} \cdot m_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} \quad (2.15)$$

$Q$  ist dabei die Güte des Hebelarms [Nanosensors 2001, MDT 2000] mit der Federrate  $c$ .

### 2.3 Strommessung mit dem Magnetkraftmikroskop (MKM)

Zur Messung von Strömen in integrierten Schaltungen wird im Rahmen dieser Arbeit das MKM eingesetzt. Dabei wertet man, wie in Bild 2.10 dargestellt, das vom Stromfluss in einer Leiterbahn erzeugte Magnetfeld mit dem MKM aus.

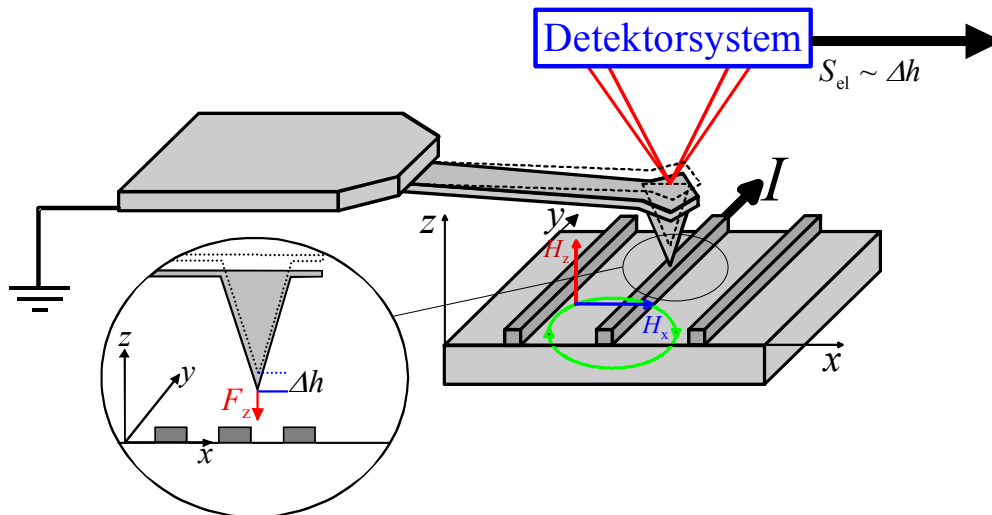


Bild 2.10: Prinzip der Strommessung

Mit einem Detektorsystem, dessen Ausgangssignal  $S_{el}$  proportional der Hebelarmverbiegung  $\Delta h$  ist, wird die auf die Messspitze wirkende Kraft  $F_z$  ausgewertet. Diese Kraft  $F_z$  rührt aus der Interaktion der ferromagnetischen Messspitze mit dem durch den Stromfluss  $I$  erzeugten magnetischen Feld  $H_z$ . Die horizontale Komponente des Magnetfeldes spielt hierbei keine Rolle [Hartmann 1989].

#### 2.3.1 Allgemeine Betrachtung

Zur Betrachtung des durch einen Stromfluss hervorgerufenen Magnetfeldes legt man die 1. Maxwell'sche Gleichung, die als Durchflutungsgesetz bezeichnet wird, zugrunde. Die vollständige Maxwell'sche Gleichung für zeitlich schnell veränderliche Magnetfelder  $\vec{H}$  lautet in Integralform [Wolf 1997]:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{S} \cdot \vec{n} dA + \frac{d}{dt} \iint_A \vec{D} \cdot \vec{n} dA. \quad (2.16)$$

Bei der Untersuchung quasistationärer Felder kann nach Gleichung 2.16 bei Auftreten einer Leitungsstromdichte  $\vec{S}$  der Anteil der Erregungsstromstärke (Verschiebungsstromstärke), dem nach der Zeit abgeleiteten Integral über die elektrische Erregung  $\vec{D}$  zum Gesamtstrom, vernachlässigt werden [Blume 1994].

Das Durchflutungsgesetz lautet in der vereinfachten Form:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} \approx \iint_A \vec{S} \cdot \vec{n} dA. \quad (2.17)$$

Als zeitlich langsam veränderliche Felder, quasistationäre Felder, werden die Felder bezeichnet, deren Wellenlänge immer sehr viel größer ist als die Abmessungen der auftretenden Bauelemente bzw. der betrachteten Feldbereiche [Wolff 1997].

Die Wellenlänge  $\lambda$  lässt sich über die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  im freien Raum unter Ausnutzung der Frequenz  $f$  ermitteln [Stöcker 1998]:

$$c_0 = f \cdot \lambda, \text{ bzw.}, \quad (2.18)$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f}. \quad (2.19)$$

Bei den Messungen in dieser Arbeit wird von quasistationären Feldern ausgegangen, da die Änderungsfrequenz  $f$  der Magnetfelder mit  $f=10$  Hz bis  $f=5$  GHz als niederfrequent im Bezug auf die Bauteilgröße einzustufen ist. Mit der Änderungsfrequenz von beispielsweise  $f=1$  GHz ergibt sich nach der Gleichung 2.19 mit  $c_0 = 2,99792 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$  eine Wellenlänge von  $\lambda=0,299$  m. Da die Abmessungen des Testchips im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen, kann man selbst bei dieser hohen Frequenz noch von quasistationären Feldern ausgehen.

Für das magnetische Feld außerhalb eines kreisförmigen Leiters des Radius  $r_0$ , also für  $r > r_0$ , ergibt sich, unter Berücksichtigung, dass die Integration der Stromdichte über eine Fläche, die den gesamten Leiter einschließt, immer die Gesamtstromstärke  $I$  ist,

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot 2\pi r = \iint_A \vec{S} \cdot \vec{n} dA = I. \quad (2.20)$$

Daraus folgt für das magnetische Feld  $\vec{H}$  [Hütte 1996]:

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \vec{e}_\alpha. \quad (2.21)$$

Durch die Transformation der Gleichung 2.19 in ein kartesisches Koordinatensystem folgt für das magnetische Feld [Bronstein 1997]:

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{x^2 + z^2} \begin{pmatrix} z \\ -x \end{pmatrix}. \quad (2.22)$$

Für die einzelnen Komponenten des magnetischen Feldes in  $x$ - und in  $z$ -Richtung lauten die Gleichungen:

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{z}{x^2 + z^2} \quad \text{und} \quad (2.23)$$

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{-x}{x^2 + z^2} .$$

Bild 2.11 verdeutlicht den Verlauf der Komponenten des magnetischen Feldes  $\vec{H}$  um einen punktförmigen Leiter, der aus den Gleichungen 2.23 resultiert.

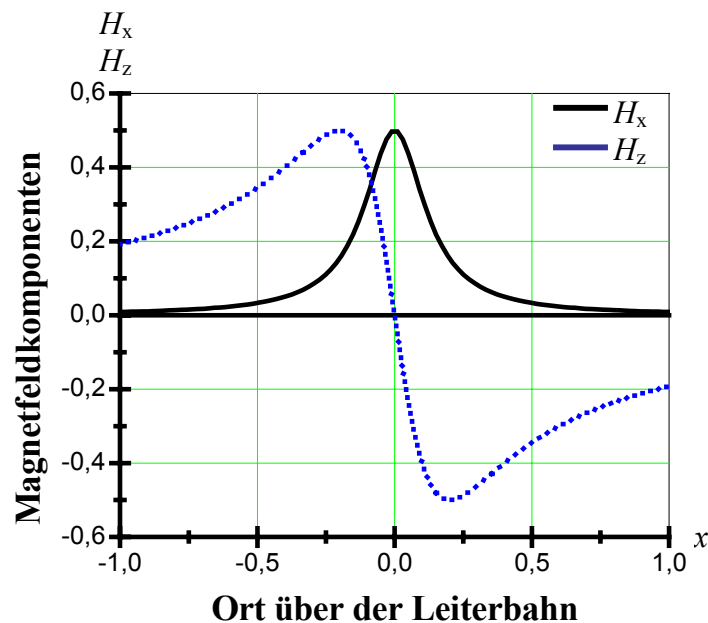


Bild 2.11: Verlauf der Magnetfeldkomponenten  $H_x$  in  $x$ -Richtung und  $H_z$  in  $z$ -Richtung

Nach dem Dipolmodell, Bild 2.9, wird die gesamte Magnetisierung der Messspitze als ein Dipol angesehen. Rastert die Messsonde in einem konstanten Abstand über die Probe, und

kommt die Messspitze dabei in die Nähe des Magnetfeldes, so führt die resultierende magnetische Kraft in z-Richtung zu einer Hebelarmverbiegung. Wird dieses Magnetfeld von einer stromdurchflossenen Leiterbahn auf der Probe erzeugt, so erhält man die resultierende Kraft in z-Richtung aus der Gleichung 2.24:

$$F_z = -\mu_0 |\vec{m}| \frac{\partial H_z}{\partial z} = \mu_0 |\vec{m}| \frac{-x \cdot z \cdot I}{\pi(x^2 + z^2)^2}. \quad (2.24)$$

Für die Kraftkomponenten in z-Richtung ergibt sich nach Gleichung 2.24 der in Bild 2.12 dargestellte Kraftverlauf.

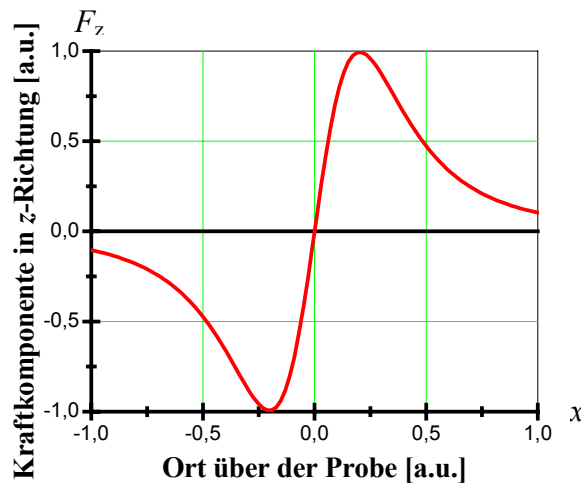


Bild 2.12: Verlauf der magnetischen Kraftkomponente in z-Richtung bei einer stromdurchflossenen Leiterbahn

Betrachtet man reale Leiterbahngeometrien, wie sie in Bild 2.13 dargestellt sind, werden die mathematischen Beschreibungen ungleich aufwendiger.

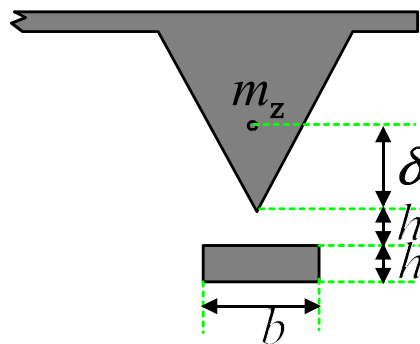


Bild 2.13: Schematische Darstellung der Strommessung an einer rechteckförmigen Leiterbahn



Das magnetische Feld  $\vec{H}$  um einen rechteckförmigen Leiter [Wolf 1997] mit der Breite  $b$  und der Höhe  $h_1$  lässt sich mit der Gleichung 2.25 berechnen:

$$H_z = \frac{I}{2\pi \cdot a \cdot b} \cdot \left[ \frac{z_h + 2a}{2} \cdot \ln \left( \frac{(x + b/2)^2 + (z_h + a/2)^2}{(x - b/2)^2 + (z_h + a/2)^2} \right) - \frac{z - 2a}{2} \cdot \ln \left( \frac{(x + b/2)^2 + (z_h - a/2)^2}{(x - b/2)^2 + (z_h - a/2)^2} \right) + (x + b/2) \cdot \left( \arctan \left( \frac{(z_h + a/2)}{(x + b/2)} \right) - \arctan \left( \frac{(z_h - a/2)}{(x + b/2)} \right) \right) - (x - b/2) \cdot \left( \arctan \left( \frac{(z_h + a/2)}{(x - b/2)} \right) - \arctan \left( \frac{(z_h - a/2)}{(x - b/2)} \right) \right) \right] \quad (2.25)$$

Der effektive Abstand des Dipols, der in Gleichung 2.25 mit  $z_h$  bezeichnet wird, setzt sich aus der Rasterhöhe  $h$ , dem Abstand des Dipols vom Ende der Messspitze  $\delta$ , sowie der halben Leiterbahndicke  $h_1/2$  zusammen. Somit ist  $z_h$  gegeben durch

$$z_h = h + \delta + \frac{h_1}{2} \quad (2.26)$$

Typische Werte sind  $h=50$  nm bis  $h=500$  nm für die Rasterhöhe und  $\delta=200$  nm bis  $\delta=2000$  nm für den Abstand zwischen Messspitzenende und magnetischem Dipol [Wehner 2001].

Betrachtet man diesen recht großen Abstand  $z_h$  vom Leiterbahnmittelpunkt, so kann man zur Evaluierung der Ergebnisse die Näherung aus Gleichung 2.24 verwenden, die deutlich einfacher und übersichtlicher ist [Leutfeld 2002].

### 2.3.2 Messungen von Gleichströmen

Zur Messung von Gleichströmen existieren zwei Alternativen. Diese werden hier kurz vorgestellt.

#### Statische Messung

Die statische Gleichstrommessung basiert auf dem Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand, wie er auch zur Magnetfeldmessung eingesetzt wird. Das Magnetfeld einer

stromdurchflossenen Leiterbahn führt direkt zu einer statischen Kraft, die eine Hebelarmverbiegung hervorruft. Die mit dieser Messtechnik erhaltenen Ergebnisse entsprechen den nach Kapitel 2.3.1 bzw. Bild 2.12 zu erwartenden Ergebnissen. Die Stromauflösungsgrenze dieser Messtechnik ist nicht sehr hoch. Berechnungen [Wehner 2001] zeigten, dass unter Verwendung handelsüblicher Standard-MKM-Messsonden theoretisch ein minimaler Strom von ca.  $I=8,5$  mA gemessen werden kann. Praktisch konnten bislang sogar nur  $I=30$  mA demonstriert werden [Wehner 2001]. Aufgrund ihrer Unempfindlichkeit ist diese Art der Gleichstrommessung nicht für die Messung an integrierten Schaltungen geeignet.

#### **Dynamische Gleichstrommessung**

Die dynamische Gleichstrommessung wurde bereits 1994 vorgestellt [Campbell 1994]. Mit ihr war es möglich, unter Verwendung spezieller Messsonden, die in Kap. 2.4.2 beschrieben werden, Gleichströme von  $I=1$  mA zu messen. Bei den verwendeten Messsonden handelte es sich um einzeln präparierte Unikate, mit denen reproduzierbare Messungen nicht möglich waren. Als Betriebsmodus verwendet man den Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand mit mechanischer Anregung. Diese Technik ist deutlich empfindlicher als die statische Gleichstrommessung, da mit einem Lock-In-Verstärker gearbeitet werden kann, wodurch ein deutlich verbessertes Signal-Rauschleistungs-Verhältnis zu erwarten ist.

Aufgrund der großen Ausdehnung des ferromagnetischen Materials ist nicht damit zu rechnen, dass Leiterbahnen, die einige Mikrometer nebeneinander verlaufen, noch einzeln aufgelöst werden können.

Die theoretisch minimal zu detektierende Stromstärke bei dieser Art der Gleichstrommessung unter Verwendung kommerzieller MKM-Messsonden wird mit  $I=4,5$  mA beziffert [Wehner 2001]. Die derzeit messtechnisch erreichbaren Werte unter Verwendung dieser Messsonden liegen bei etwa  $I=8$  mA [Wehner 2001] und sind somit deutlich besser als die Werte der statischen Gleichstrommessung. Aber auch diese Messtechnik ist für den Einsatz in der Funktions- und Fehleranalyse noch zu unempfindlich.

### 2.3.3 Messungen von Wechselströmen

Bei der dynamischen Messung niederfrequenter Wechselströme wird als Betriebsart der Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand verwendet. Dabei hat der in der Leiterbahn eingeprägte Strom die Frequenz, die der Resonanzfrequenz der Messsonde entspricht. Dies ermöglicht die Verwendung eines Lock-In-Verstärkers zur Messsignalauswertung. Diese Messtechnik wurde ebenfalls bereits 1994 von Campbell [Campbell 1994] vorgestellt. Dabei wurden die in Kap. 2.4.2 ausführlich beschriebenen, sonderangefertigten Messsonden verwendet, mit denen eine Stromauflösungsgrenze von  $I=1 \mu\text{A}$  demonstriert werden konnte. Die oben dargelegten Probleme bei der Auflösung dicht nebeneinander fließender Ströme treten, bedingt durch die verwendeten Messsonden, auch bei dieser Messtechnik auf.

Durch die Auswertung mit einem Lock-In-Verstärker ist man nicht mehr in der Lage, die der Kraft proportionale Verbiegung des Hebelarms zu messen. Stattdessen werden die Amplitude und die Phasenlage der Hebelarmschwingung im Bezug zu einem Referenzsignal gemessen. Die Amplitude ist dabei dem Betrag der auf die Messspitze wirkenden Kraft proportional, der Phasensprung über der Leiterbahn entspricht dem Vorzeichenwechsel der Kraft. Da diese Phase nur relativ ausgewertet werden kann, sind die absoluten Werte wenig aussagekräftig. Jedoch ändert die magnetische Kraft in z-Richtung, wie in Bild 2.12 dargestellt, über der Leiterbahn ihr Vorzeichen, so dass ein Phasensprung von  $180^\circ$  gemessen werden kann. Bild 2.14 zeigt den Verlauf der magnetischen Kraft, sowie des vom Lock-In-Verstärker ausgegebenen Signals für die Amplitude und die Phase.

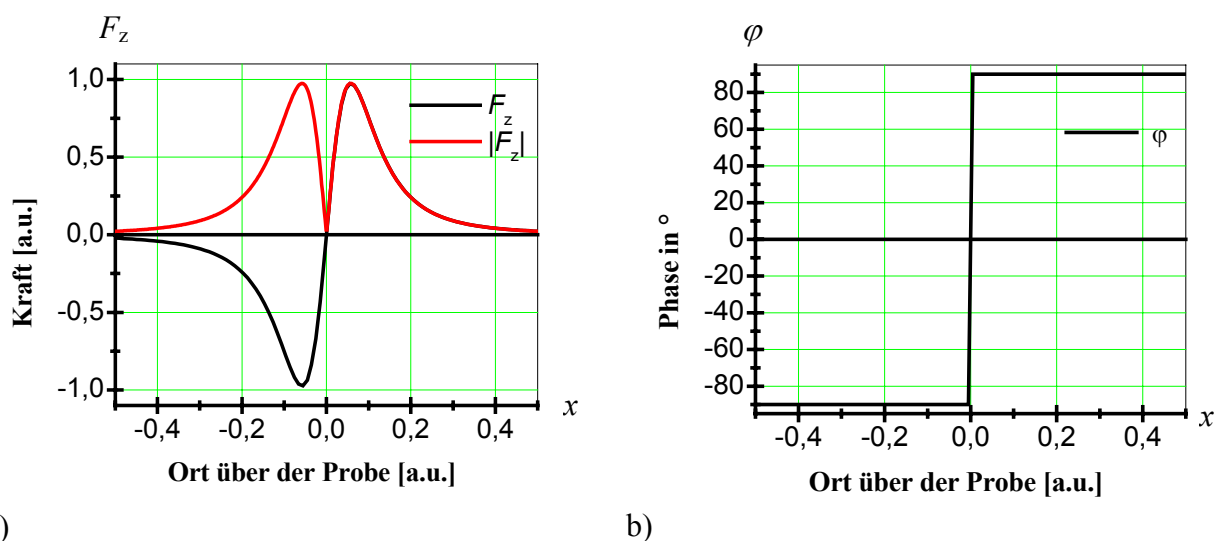


Bild 2.14: Verlauf der z-Komponente der magnetischen Kraft, sowie die von einem Lock-In-Verstärker gemessenen Verläufe, die dem Betrag der magnetischen Kraft entsprechen und deren Phase

## 2.4 Apparative Grundlagen eines Magnetkraftmikroskops

Dieser Abschnitt befasst sich mit den apparativen Grundlagen des Magnetkraftmikroskops. Zunächst wird ein Überblick über den prinzipiellen Aufbau des MKM gegeben. Eine ausführliche Vorstellung entscheidender Details, wie die verwendeten Messsonden, das Detektorsystem und die Rastereinrichtung, schließt sich an.

### 2.4.1 Prinzipieller Aufbau eines Magnetkraftmikroskops

Grundsätzlich besteht ein MKM aus einer Messsonde, deren Verbiegung aufgrund der auf die Messspitze wirkenden magnetischen Kraft mittels eines Detektorsystems gemessen wird. Diese Anordnung wird mit einem Rastersystem über die Probenoberfläche bewegt. Bild 2.15 zeigt den schematischen Aufbau des MKM.

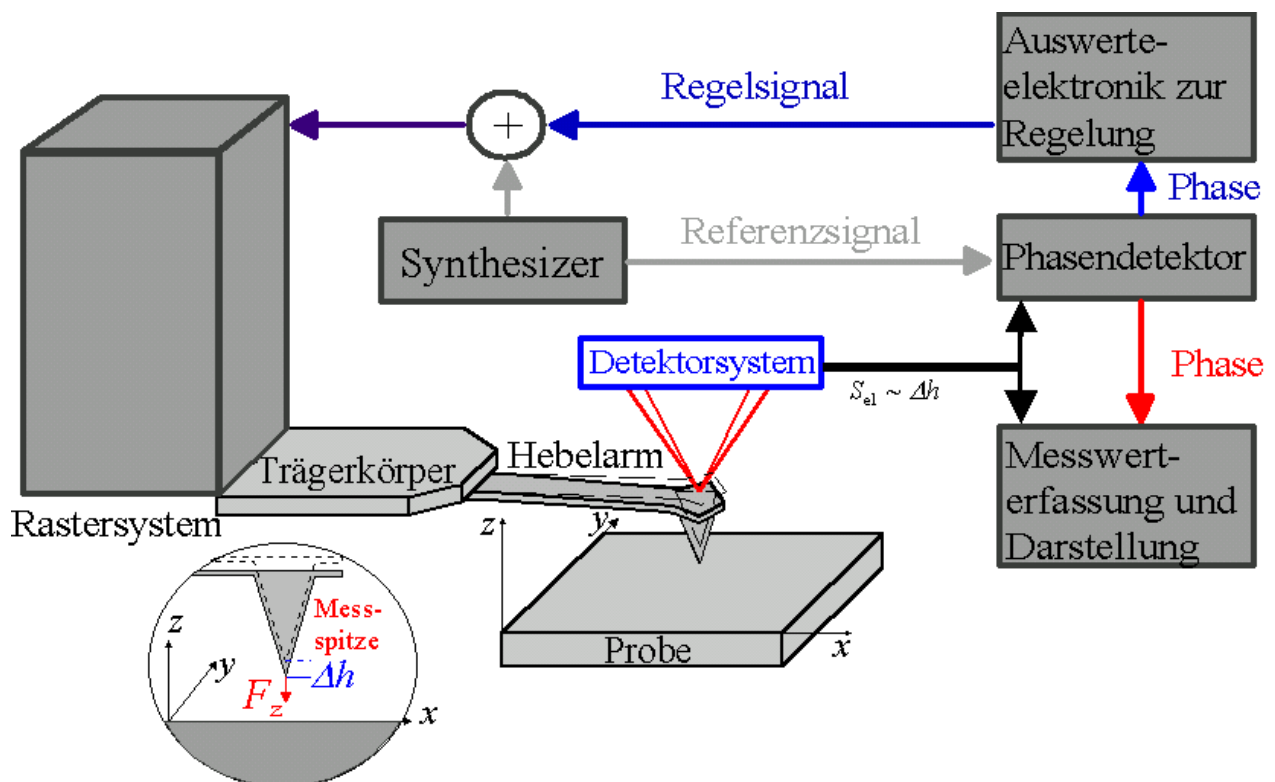


Bild 2.15: Prinzipieller Aufbau eines MKM

Das MKM ist zur Detektion statischer Magnetfelder konzipiert. Zur Strommessung nutzt man die in Kap. 2.2 vorgestellte Betriebsart Nicht-Kontaktmodus mit konstantem Abstand mit

mechanischer Anregung. Hierfür besitzt das MKM einen integrierten Phasendetektor, sowie einen integrierten Synthesizer zur Anregung der Messsonde.

### 2.4.2 Messsonden

Die Messsonde ist die entscheidende Komponente des MKM. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die möglichen alternativen Messsonden, die für das MKM zur Verfügung stehen, gegeben.

#### RKM-Messsonde mit ferromagnetischer Beschichtung

Als MKM-Messsonde kann nahezu jede RKM-Messsonde verwendet werden, vorausgesetzt, sie ist mit einem ferromagnetischen Film überzogen [MDT 2001] (siehe Bild 2.9). Diese Art der MKM-Messsonde wird standardmäßig in reproduzierbarer Qualität von unterschiedlichen Herstellern angeboten. Die Messsonden überzeugen vor allem durch ihre hohe mechanische Güte  $Q$  [Nanosensors 2000] und die extrem kleinen Messspitzenradien von weniger als  $R_0 < 10$  nm. Die Rohlinge können in relativ großen Stückzahlen und somit preisgünstig durch Mikrostrukturierungsverfahren der Halbleitertechnik hergestellt werden. Durch das Aufbringen eines ferromagnetischen Films verschlechtern sich die Messspitzenradien auf  $R_0 > 10$  nm (z.B.  $R_0 = 30$  nm).

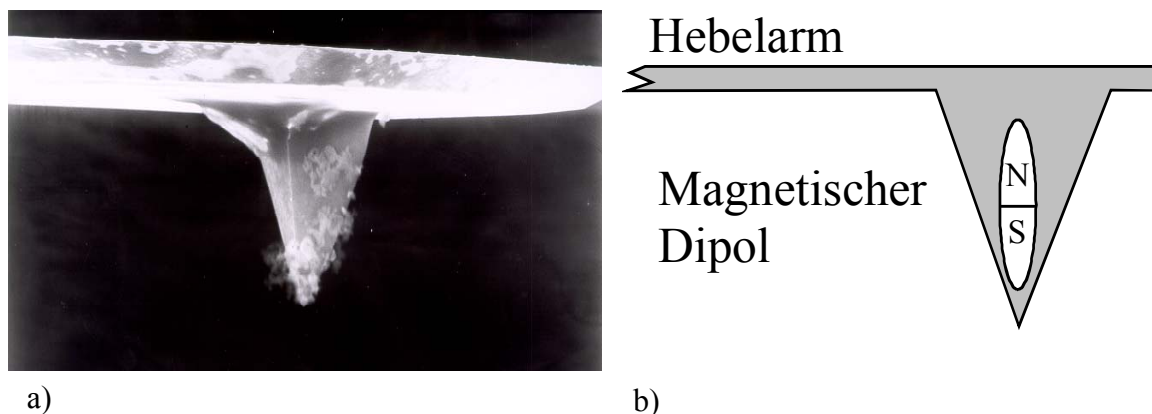


Bild 2.16: Ferromagnetisch beschichtete Messsonde a) Foto; b) Modell mit magnetischem Dipol in der Spitze

### RKM-Messsonde mit ferromagnetischem Vollmaterial an der Messspitze

Anstelle des oben erwähnten Aufdampfens eines ferromagnetischen Films besteht auch die Möglichkeit, die Messspitze in eine Schmelze aus ferromagnetischem Material einzutauchen. Der Aufbau dieser Messsonden ist in Bild 2.17 dargestellt.

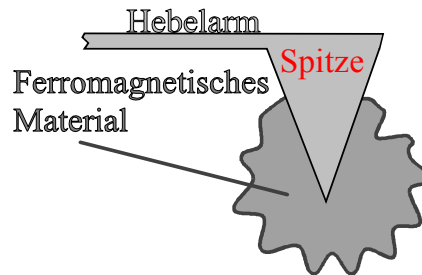


Bild 2.17: Aufbau einer speziell für die Strommessung präparierten MKM-Messsonde

Die exakte Menge des an der Spitze haftenden Materials ist unbekannt. Durch das im Gegensatz zu den Standard-Messsonden große Volumen des ferromagnetischen Materials, und der daraus im Dipolmodell (siehe Kap. 2.1) resultierenden Größe des magnetischen Dipols  $\vec{m}$ , ist bei gleichbleibendem Magnetfeld nach Gleichung 2.24 mit einer deutlich erhöhten Kraftereinwirkung auf die Spitze zu rechnen. Aufgrund ihres extrem großen Wechselwirkungsvolumens sind diese Messsonden sehr empfindlich. Ihre Nachteile sind jedoch erheblich. Eine topografische Abbildung der Oberfläche zur exakten Positionierung der Messsonde über dem zu untersuchenden Testgebiet ist aufgrund der Größe des ferromagnetischen Materials nahezu unmöglich. Diese Messsonden werden nicht kommerziell angeboten, sondern von einigen MKM-Anwendern manuell präpariert [Campbell 1994]. Dies hat zur Folge, dass sie nicht in einer reproduzierbaren Qualität hergestellt werden können, und somit sind die einzelnen Messergebnisse nicht vergleichbar. Aus dem Grund spielen diese Messsonden praktisch keine Rolle in der Magnetkraftmikroskopie. Bei der Strommessung mit dem MKM konnten jedoch die bisher empfindlichsten Messungen mit den o.g. Messsonden durchgeführt werden [Campbell 1994].

### RKM-Messsonde aus einem ferromagnetischen Draht

Eine weitere Möglichkeit, MKM-Messsonden herzustellen, besteht darin, ferromagnetisches Vollmaterial, wie z.B. Draht, durch geeignete Mikrostrukturierungsverfahren für die Messung zu präparieren. Schematisch ist eine solche MKM-Messsonde in Bild 2.18 dargestellt.

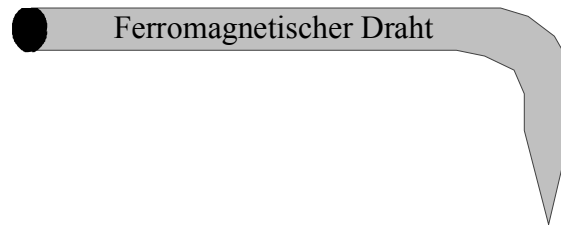


Bild 2.18: Schematischer Aufbau einer MKM-Messsonde aus ferromagnetischem Vollmaterial

Der Vorteil dieser Messsonde liegt in dem deutlich größeren Wechselwirkungsvolumen im Vergleich zu den beschichteten Messsonden [Lemke 1990]. Sie ist jedoch aufgrund ihres Aufbaus deutlich instabiler bezüglich der Spitzenradien. Bestehen die RKM-Messsonden-Rohlinge aus Silizium, also einem sehr harten Material, so sind Drähte aus Nickel- oder Kobaltlegierungen eher als weiches Material einzustufen. Das heißt, dass bei leichtem Kontakt mit der Probenoberfläche starke Deformationen die Folge sind, und somit ist die erzielbare Ortsauflösung gering. Außerdem ist ihr Schwingungsverhalten nicht wie bei den üblichen Hebelarmgeometrien auf die  $z$ -Richtung beschränkt, sondern aufgrund der Geometrie (runder Querschnitt) mindestens in  $y$ - und  $z$ -Richtung gleichstark ausgeprägt, was eine Interpretation der Ergebnisse deutlich erschwert. Das Ätzen geeigneter Messspitzen stellt ebenfalls ein großes Problem dar, da die Spitze des Drahtes, wie in Bild 2.18 zu sehen ist, abgeknickt sein muss.

Sondenart	Vorteile	Nachteile
<b>RKM-Messsonde mit ferromagnetischer Beschichtung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe mechanische Güte</li> <li>• einfache Herstellung</li> <li>• kommerziell erhältlich</li> <li>• hohe Reproduzierbarkeit</li> <li>• hohe Ortsauflösung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringes magnetisches Volumen</li> </ul>
<b>RKM-Messsonde mit ferromagnetischem Vollmaterial an der Messspitze</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr großes magnetisches Volumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• schlechte Ortsauflösung</li> <li>• geringe mechanische Güte</li> <li>• manuelle Präparation</li> <li>• nicht reproduzierbar</li> <li>• schlechte Stabilität</li> </ul>
<b>RKM-Messsonde aus einem ferromagnetischen Draht</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• großes magnetisches Volumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe mechanische Güte</li> <li>• manuelle Präparation</li> <li>• schlecht reproduzierbar</li> <li>• schlechte Stabilität</li> <li>• schlechtes Schwingungsverhalten</li> </ul>

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile der einzelnen Messsondenarten

### 2.4.3 Detektionseinheiten

Die Aufgabe der Detektionseinheit besteht darin, die Auslenkung des Hebelarms, hervorgerufen durch die auf die Messspitze wirkende Kraft, zu messen. Hierfür existieren unterschiedliche Konzepte [Sarid 1991, Hartman 1994, Burnham 1991]. Das Problem liegt darin, die je nach Federrate des Hebelarms sehr geringen Auslenkungen mit  $\Delta h < 1$  nm zu messen. Eine erste Unterscheidung kann zwischen optischen und elektrischen Detektionskonzepten getroffen werden. Diese werden im Einzelnen kurz vorgestellt, und ihre Vor- und Nachteile im Hinblick auf die Stromkontrastmessung diskutiert.

#### a) Optische Detektoren

##### Laserinterferometer

Die Laserinterferometrie ist ein optisches Verfahren zur Auswertung der Hebelarmauslenkung, bei dem ein Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufgeteilt wird. Einer dieser Teilstrahlen wird als so genannter Referenzstrahl verwendet und von einem ortsfesten Spiegel reflektiert. Der zweite Teilstrahl, der so genannte Messstrahl, wird auf den Hebelarm gerichtet, der mit einer Reflexschicht beschichtet ist und von dort aus reflektiert. Die beiden Teilstrahlen werden in einem Punkt zur Interferenz gebracht, wobei es zu Auslöschungen bzw. zur Verstärkung des resultierenden Laserlichtes kommt. Dessen Intensität ist proportional der Hebelarmauslenkung und kann mit einem Fotodetektor gemessen werden.

Es besteht die Möglichkeit, ein solches Interferometer durch Glasfasern mit geeigneten Kopplern aufzubauen und somit die Positionierung auf dem Hebelarm zu realisieren. Bild 2.19 zeigt den schematischen Aufbau eines Interferometers [Bludau 1998].



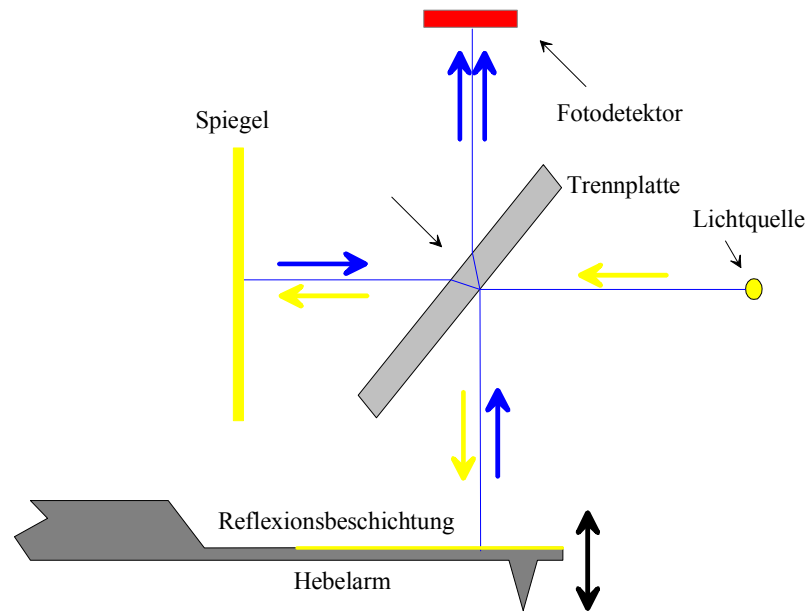


Bild 2.19: Beispiel eines Interferometers. Aufbau eines „Michelson“ Zweistrahlinterferometers

Mit diesem Aufbau lassen sich Hebelarmauslenkungen von  $\Delta h=20$  nm messen [Brockhaus1996]. Durch einige Modifikationen [Bludau 1998], auf die nicht näher eingegangen wird, können erheblich kleinere Weglängen gemessen werden. Das zur Zeit empfindlichste interferometrische Prinzip stellt das Fabry-Perot-Interferometer dar, bei dem die einzelnen Strahlen mehrfach interferieren, und so die Detektion einer Hebelarmauslenkung im subatomaren Bereich möglich wird [Bludau 1998]. Die Anwendung der Laserinterferometrie stellt sehr hohe Ansprüche an die thermischen Verhältnisse in der Arbeitsumgebung, da dieses Verfahren extrem anfällig gegen Temperaturdrift ist. Außerdem werden Laser mit extrem langen Wellenzügen benötigt, die wiederum einen hohen Kostenfaktor darstellen. Aus diesem Grund wird das Laserinterferometer trotz seiner sehr hohen Empfindlichkeit vorwiegend im Vakuum eingesetzt, während an Luft betriebene Rasterkraftmikroskope andere Detektionsverfahren bevorzugen.

### Lasertriangulie

Bei der Lasertriangulie handelt es sich ebenfalls um ein optisches Auswertungsverfahren. Es zeichnet sich durch seine geringen Kosten, einfache Justage, sowie mit einer minimal zu detektierenden Hebelarmauslenkung von ca.  $\Delta h=100$  pm aus. Dieses Detektionsverfahren wird heute überwiegend in kommerziellen Rasterkraftmikroskopen verwendet. Auch das in dieser Arbeit eingesetzte RKM verfügt über einen solchen Detektor [Topometrix 1997]. Die Funktionsweise der Lasertriangulie basiert auf der Detektion der Strahlablenkung eines auf

den Hebelarm fokussierten Laserstrahls. Die Ablenkung des Laserstrahls in Folge der Hebelarmverbiegung wird mittels eines positionssensitiven Detektors gemessen. Hierfür werden hauptsächlich Vierquadrantendioden oder Flächendioden verwendet.

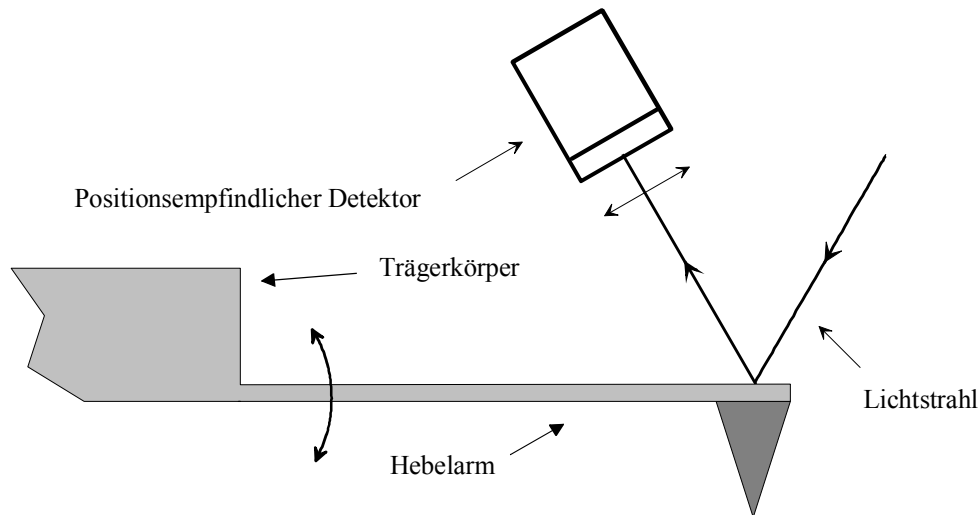


Bild 2.20: Prinzip der Lasertriangulie

[Hartmann 2000]

Die Strahlablenkung kann sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung gemessen werden. Somit bietet die Lasertriangulie die Möglichkeit, neben den Verbiegungen des Hebelarms in  $z$ -Richtung auch dessen Torsion zu messen.

Der segmentierte, optische Positionsdetektor, hier in Form der Vierquadrantendiode, besteht aus mehreren, in diesem Fall vier einzelnen Dioden. Trifft ein Lichtstrahl auf diesen Detektor, so generiert er einen Stromfluss in den beleuchteten Segmenten. Dieser ist proportional der einfallenden Lichtmenge. Die bei diesem Detektionsverfahren eingesetzten Laserdioden besitzen eine über den Leuchtpunkt gleichmäßig verteilte Lichtintensität, so dass die einfallende Lichtmenge proportional der beschienenen Fläche auf der jeweiligen Diode ist. Bewegt sich dieser Leuchtpunkt über den Detektor, so ändern sich die einzelnen Fotoströme in den Dioden.

Durch eine nachgeschaltete Elektronik [Hartmann 2000] kann ein Quotient gebildet werden, welcher der Bewegung in  $x$ - und  $y$ -Richtung auf dem Detektor proportional ist.

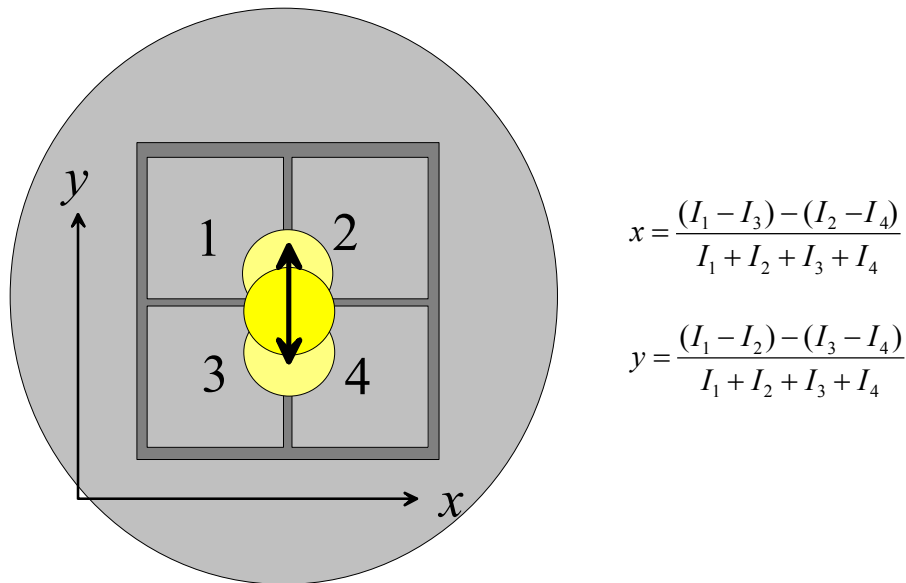


Bild 2.21: Prinzip der Vierquadrantendiode

Der positionssensitive Detektor kann auch durch eine Flächendiode realisiert werden. Der Aufbau dieser Detektoren besteht aus einer großflächigen Fotodiode, die an den Kanten der Oberseite vier Elektroden besitzt. Eine weitere Versorgungselektrode befindet sich auf der Rückseite. Bei Auftreffen eines Lichtstrahls teilt sich der durch das Licht generierte Fotostrom auf die einzelnen Elektroden auf der Oberfläche auf. Je näher eine Elektrode dem Leuchtpunkt ist, desto geringer ist der Widerstand, und umso größer ist der fließende Fotostrom. Bild 2.22 zeigt schematisch die zweidimensionale Betrachtung des Aufbaus eines solchen Detektors.

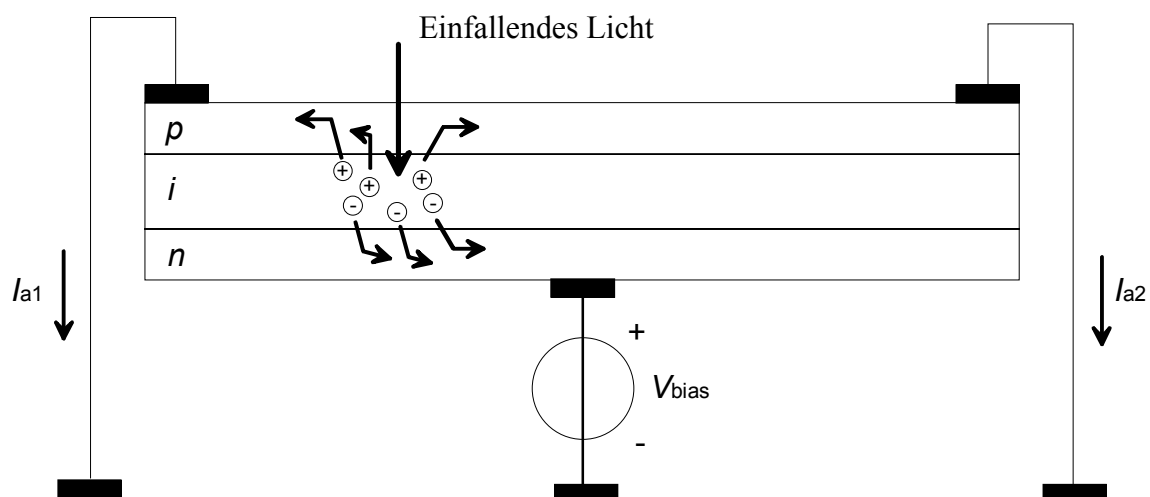


Bild 2.22: Prinzip einer positionssensitiven Flächendiode

[Hartmann 2000]

### **Laserdiodenrückkoppelung**

Bei der Laserdiodenrückkoppelung wird ebenfalls ein reflektierender Hebelarm verwendet. Das reflektierte Licht wird in den Strahlengang der Laserdiode zurückgekoppelt, was dort zu einer messbaren Störung führt. Da dieser Effekt in der Regel nichtlinear ist, gestaltet sich die Auswertung sehr aufwendig. Eine große technische Bedeutung besitzt dieser Detektor daher nicht.

### **b) Elektrische Detektoren**

#### **Resistiver Sensor im Hebelarm**

Bei diesem Detektionsverfahren befindet sich ein piezoresistiver Widerstand in dem Hebelarm [Itoh 1996, Minne 1995]. Bei Verbiegung des Hebelarms verändert sich der Widerstandswert. Zur Verbesserung der Auflösung im Bezug auf die Hebelarmauslenkung  $\Delta h$  und zur Vermeidung von Temperatureinflüssen werden diese Widerstände auch in Form von Brücken ausgeführt [Gotszalk 1998, Lindemann 1995]. Ihre Realisierung erfolgt durch etablierte Halbleitertechnologien und ist so mit hoher Güte und Präzision durchführbar. Die Kontaktierung des Hebelarms erfolgt über den Trägerkörper und darin integrierte Zuleitungen. Dieses System ist sehr einfach zu verwenden, da keine Justage erforderlich ist. Zur Zeit wird eine breite Anwendung durch Patentrechte verhindert [Aussage Dr. Rangelaw]. Erste Labormuster scheinen vielversprechend zu sein, jedoch ist die Reproduzierbarkeit dieser Muster zur Zeit ungeklärt.

#### **Tunnelstrom-Detektor**

Der Tunnelstrom-Detektor stellt die älteste Methode der Auswertung der Hebelarmverbiegung dar. Hierbei befindet sich eine Tunnelstrommessspitze über dem leitenden Hebelarm einer RKM-Messsonde [Lindemann 1995]. Zwischen beide Spitzen wird eine Spannung angelegt, und der Tunnelstrom zwischen ihnen wird als Maß für die Verbiegung des Hebelarms ausgewertet. Dieses Detektionsverfahren ist sehr aufwendig, da die Tunnelstrommessspitze sehr exakt über dem Hebelarm positioniert werden muss und zum Tunneln ein Vakuum erforderlich ist. Damit kann dieses Detektionsverfahren nicht für die Magnetkraftmikroskopie an Luft verwendet werden.

### Kapazitiver Detektor

Der kapazitive Detektor besitzt eine zweite leitende Fläche über der leitenden Fläche des Hebelarms als Kapazität. Als Messsignal wird die Kapazitätsänderung verwendet. Diese entsteht in Folge der Hebelarmverbiegung, und somit der Veränderung des Plattenabstandes. Üblicherweise wird zur Kapazitätsmessung ein Wechsellspannungssignal verwendet. Durch die Beschaltung können die Messergebnisse aufgrund der elektrischen Kraftwechselwirkung stark beeinträchtigt werden.

Die Werte für die dynamische Auflösungsgrenze bei der Detektion von Hebelarmauslenkungen in Tabelle 2.2 wurden auf 1/Hz normiert, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Detektionsverfahren	Auflösungsgrenze	Bemerkung
<b>Laserinterferometer</b>	Statisch: 20 pm Dynamisch: 0,05 pm/Hz <sup>1/2</sup>	aufwendig, teuer, stör anfällig
<b>Lasertriangulie</b>	Statisch: 100 pm Dynamisch: 3 pm/Hz <sup>1/2</sup>	einfach, aufwendige Justage
<b>Laserdiodenrückkoppelung</b>	Dynamisch: 3 pm/Hz <sup>1/2</sup>	stör anfällig, aufwendig
<b>Tunnelstrom-Detektor</b>	Statisch: 5 pm	aufwendig, benötigt Vakuum
<b>Kapazitiver Detektor</b>	Statisch: 100 pm	beeinflusst die Messung, da der Hebelarm beschaltet ist
<b>Resistiver Sensor</b>	Statisch: 10 pm	aufwendige Herstellung der Messsonden, patentrechtlich geschützt → keine kommerziellen MKM-Messsonden

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Detektionssysteme eines Rasterkraftmikroskops [Sarid 1991, Burnham 1991]

Alle diese Detektionsverfahren haben ihre Vor- und Nachteile. Für das MKM eignen sich unter Normalbedingungen aus den oben genannten Gründen nur die Lasertriangulie und die kapazitiven oder resistiven Detektoren.

Beachtet man, dass das MKM zur Strommessung eingesetzt wird, so fallen alle Verfahren, die eine Beschaltung der Messsonde erfordern weg, da sie eine unnötige Beeinflussung des Testobjektes mit sich bringen. Somit steht nur die Lasertriangulie zur Verfügung. Die Laserinterferometrie ist zwar deutlich empfindlicher, jedoch auch sehr anfällig gegen kleinste Temperaturschwankungen.

### ***2.4.4 Rastersystem für das Rasterkraftmikroskop***

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten, die Messsonde relativ zur Probenoberfläche zu bewegen. Diese werden kurz vorgestellt. Grundsätzlich kann sowohl die Probe, als auch die Messsonde bewegt werden.

#### **Feststehende Probe - bewegte Messsonde**

Bei Messungen mit einer bewegten Messsonde liegt der Vorteil darin, dass die Probe ortsfest, und somit mechanisch und elektrisch gut zu erreichen ist. Das bedeutet, dass Nadelprober oder elektrische Tester ohne großen Aufwand angeschlossen, und so die zu untersuchende Schaltung betrieben werden kann.

Der Nachteil besteht darin, dass sowohl die Messsonde, als auch die Detektionseinheit bewegt werden müssen. Die relativ große Masse führt zu enormen Beschleunigungskräften auf den Messkopf und dessen Halterung. Außerdem können die Messwerte durch die auf die Messsonde wirkenden Beschleunigungskräfte im Bereich des Umkehrpunktes verfälscht werden. Es ist darauf zu achten, dass der zu untersuchende Bereich kleiner als der Rasterbereich ist, um eine Verfälschung der Messung durch die Kräfte im Umkehrpunkt zu vermeiden.

#### **Bewegte Probe - feststehende Messsonde**

Das Bewegen der Probe hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Beschleunigungskräfte auf die Messspitze und die Detektionseinheit wirken. Allerdings eignet sich dieses Verfahren nicht für Proben, die eine aufwendige Kontaktierung erfordern. Ein Aufbau mit Nadel- oder Hochfrequenzproben ist nahezu unmöglich, da im Umkehrpunkt extrem große

Beschleunigungskräfte wirken. Dies könnte zu einer Bewegung der einzelnen Prober relativ zur Probe führen.

Man kann festhalten, dass es für die Anwendung im Funktions- und Fehleranalyselabor nur sinnvoll ist, die Sonde über der Probe zu bewegen. Andernfalls müsste die maximale Rastergeschwindigkeit derart gering gewählt werden, dass eine Messung mehrere Stunden dauern würde.

Mit herkömmlichen mechanischen Positioniereinrichtungen können die erforderlichen Genauigkeiten nicht mehr erreicht werden. Deshalb werden für diese Aufgabe Piezorastereinheiten verwendet. Piezoelektrische Werkstoffe sind Werkstoffe mit einem nicht zentralsymmetrischen Kristallsystem. Bei ihnen bewirkt eine angelegte elektrische Spannung eine mechanische Ausdehnung, die nahezu direkt proportional dem angelegten elektrischen Feld ist. Somit hat man die Möglichkeit, bei einer ausreichenden Spannungsgenauigkeit eine hochgenaue Ausdehnung des Werkstoffes zu erreichen. Um diese Eigenschaft für eine Rastereinrichtung in alle drei Raumrichtungen zu nutzen, können unterschiedliche, je nach erforderlichem Rasterbereich aufgebaute Systeme verwendet werden. Prinzipiell lassen sich zwei Piezorastersysteme unterscheiden.

### Röhrenscanner

Der Röhrenscanner wird für kleinere Rasterbereiche von unter  $s_{r,z}=20$  nm lateral und bis  $s_{r,x}=1$   $\mu\text{m}$  bzw.  $s_{r,y}=1$   $\mu\text{m}$  in  $xy$ -Richtung eingesetzt. Der Aufbau eines solchen Piezorastersystems ist in Bild 2.23 zu sehen.

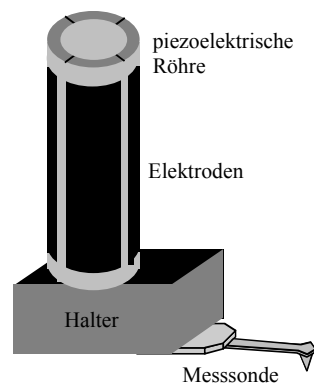


Bild 2.23: Schematischer Aufbau eines Piezorastersystems (Röhrenscanner)

Wie in Bild 2.23 dargestellt, besteht ein Röhrenscanner aus einem rohrförmigen, piezoelektrischen Werkstoff, an dem drei oder vier Elektroden angebracht sind. Diese

Elektroden werden angesteuert, um eine Bewegung in  $x$ - und  $y$ -Richtung zu erreichen. Eine Bewegung in  $z$ -Richtung erzielt man durch ein gleichzeitiges Ansteuern aller Elektroden. Mit dieser Piezorastereinrichtung sind Positioniergenauigkeiten von  $\Delta s < 1$  nm möglich.

### Piezostapel in jeder Raumrichtung

Für größere Rasterbereiche bis  $s_r > 200$   $\mu\text{m}$  werden Piezorastersysteme mit jeweils einem Piezostapel in jede Raumrichtung eingesetzt. Die maximal zur Verfügung stehende Betriebsspannung, bei der die Piezostapel eingesetzt werden können, unterscheidet sich nicht von der Betriebsspannung der Röhrenscanner und liegt bei einigen hundert Volt. Daher ist auch die Auflösung der Rastersysteme, basierend auf Piezostapeln, schlechter als die der Röhrenscanner. Die Auflösung des Piezorastersystems ist in der Regel durch die Genauigkeit, mit der die Betriebsspannung gesteuert werden kann, limitiert. Die maximale Auflösung der Piezostapel nimmt somit etwa um den Faktor ab, mit dem der Rasterbereich größer wird. Bild 2.24 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Rastersystems.

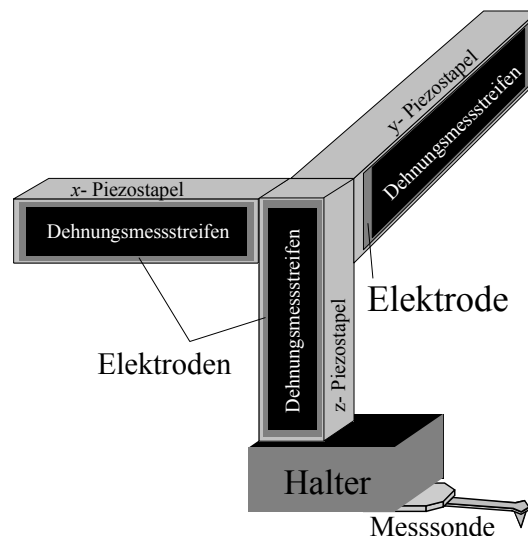


Bild 2.24: Schematischer Aufbau eines Piezorastersystems mit Piezostapeln

Ein weiterer Nachteil dieses Piezorastersystems besteht darin, dass aufgrund seines Aufbaus Nichtlinearitäten und eine Hysterese auftreten. Die Hersteller dieser Piezorastersysteme versuchen, die Verzerrungen durch Rückkoppelungen zu verhindern. Eine Möglichkeit besteht darin, Dehnungsmessstreifen an die Piezostapel anzubringen und so die Nichtlinearität auszuregulieren [Topometrix 1997]. Eine weitere, etwas exaktere Möglichkeit bietet eine kapazitive Messeinrichtung für die Rückkoppelung [PI 2001]. Rastereinrichtungen mit dieser



Technik können mit einer Wiederholgenauigkeit von  $s_w=7,5$  nm bei einem Rasterbereich von  $s_r=200$   $\mu\text{m}$  realisiert werden.

Diese Piezorastersysteme sind je nach Aufbau in der Lage, Lasten von einigen Kilogramm zu bewegen. Dies ermöglicht das Rastern komplexer Aufbauten. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei einem schnellen Rastervorgang extrem große Kräfte aufgrund der sehr kurzen Brems- und Beschleunigungswege von wenigen Mikrometern auftreten.

### **2.5 Stand der Technik bei der Strommesstechnik mit dem MKM**

Zusammenfassend wird hier der Stand der Technik zur Strommessung mit dem MKM dargestellt. Mit dieser Technik ist es bereits möglich, Ströme an Leiterbahngeometrien  $b_L$  von einigen wenigen Mikrometern zu messen. Die von [Campbell 1994] verwendeten Proben wiesen eine Breite von  $b_L=2$   $\mu\text{m}$  auf. Die Empfindlichkeit der Technik ist für die Untersuchung niederfrequenter Wechselströme unter Verwendung spezieller Messsonden (siehe Kap. 2.4.2 RKM-Messsonde mit ferromagnetischem Vollmaterial an der Messspitze) mit  $I=1$   $\mu\text{A}$  als ausreichend anzusehen. Die Empfindlichkeit bei Standard-Messsonden, die in großer Stückzahl zu fertigen sind, wird als ungenügend bewertet [Campbell 1994].

Hochfrequente Ströme konnten bisher noch nicht gemessen werden.

Die Gleichstrommessung mit den o.g. Messsonden ist mit  $I=1$  mA zu unempfindlich. Inwieweit hier mit Standard-Messsonden Verbesserungen oder Verschlechterungen zu erwarten sind, war bei Beginn dieser Arbeit noch nicht untersucht worden.

In der folgenden Tabelle sind stichpunktartig die wichtigsten Größen aufgeführt.

Größe	Wert	Bemerkung
Hochfrequente Wechselströme	-	zur Zeit nicht möglich
Niederfrequente Wechselströme bis 270 kHz	1 $\mu$ A	ausreichend, jedoch nur durch die in Kap. 2.4.2 vorgestellten Messsonden mit Vollmaterial an der Spitze erreichbar.
Gleichstrommessung	1 mA	nicht ausreichend; auch unter Verwendung der o.g. Messsonden mit Vollmaterial
Verdrahtungsebenen	2	wegen Störfelder in oberen Leiterbahnen kaum zu verbessern
Ortsauflösung (Leiterbahngeometrie)	2 $\mu$ m	heute nicht mehr ausreichend

*Tabelle 2.3: Strommessungen mit dem Magnetkraftmikroskop*

Zeitgleich mit dieser Arbeit wurde an der Universität Hamburg die Gleichstrommessung mit reproduzierbar herstellbaren Messsonden untersucht. Es wurde eine theoretische Auflösungsgrenze von  $I=4,5$  mA für Standard-Messsonden ermittelt. Messtechnisch konnten jedoch nur  $I=8$  mA erzielt werden [Wehner 2001].