

## 4 Evaluation geeigneter Messsonden

Zur Strommessung mit dem Magnetkraftmikroskop wurden in der Vergangenheit ausschließlich speziell angefertigte Messsonden aus ferromagnetischem Vollmaterial an der Messspitze, siehe Kap. 2.4.2, benutzt [Campbell 1994]. In dieser Arbeit kommen erstmals kommerziell hergestellte MKM-Messsonden zur Strommessung zum Einsatz. Ihre unterschiedliche Geometrie, die verschiedenen Materialien, sowie die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit werden in diesem Kapitel präsentiert.

### 4.1 Messsonden

Folgende kommerzielle Messsondentypen wurden untersucht:

Messsondentyp	Länge $l$ / Breite $b$ / Dicke $d$ in $\mu\text{m}$	Beschichtung Material/Dicke in nm	Resonanzfrequenz in kHz	Besonderheiten
Nanosensors MFM	$l=225$ / $b=28$ / $d=3$	CrCo /50	75	-
MDT CSC17	$l=460$ / $b=50$ / $d=2$	Co /15	8-12	-
MDT NSC15Co	$l=125$ / $b=35$ / $d=4$	Co /15	325	-
MDT NSC15Ni	$l=125$ / $b=35$ / $d=4$	Ni /15-Au /5	325	nur Messspitze beschichtet
MDT CSC12Co	$l=350$ / $b=35$ / $d=2$ $l=300$ / $b=35$ / $d=2$ $l=250$ / $b=35$ / $d=2$ $l=130$ / $b=35$ / $d=2$ $l=110$ / $b=35$ / $d=2$ $l=90$ / $b=35$ / $d=2$	Co /15	21 28 41 150 210 315	-
MDT CSC12Ni	s.o. (CSC12Co)	Ni /15	s.o.	-

Tabelle 4.1: Aufstellung der untersuchten Messsondentypen

Im Rahmen der Arbeit wurden weitere Messsonden in Kooperation mit der Firma Anfatec an der Universität Chemnitz auf Basis des Sondenrohlings NCS17 der Firma MikroMasch entwickelt. Ziel war es, Störeinflüsse, wie in Kap. 7 beschrieben, zu unterbinden. Die entwickelten Messsonden, sowie erste Messergebnisse werden in Kap. 7.2 und Kap. 7.3 vorgestellt.

### Messsonde des Typs Nanosensors MFM

Von der MFM-Messsonde der Firma Nanosensors [Nanosensors 2001] sind lediglich die Hauptbestandteile der magnetischen Schicht der Legierung, Kobalt und Chrom, nicht aber deren Zusammensetzung bekannt. Die Form der Sonde ist in Bild 4.1 zu sehen.

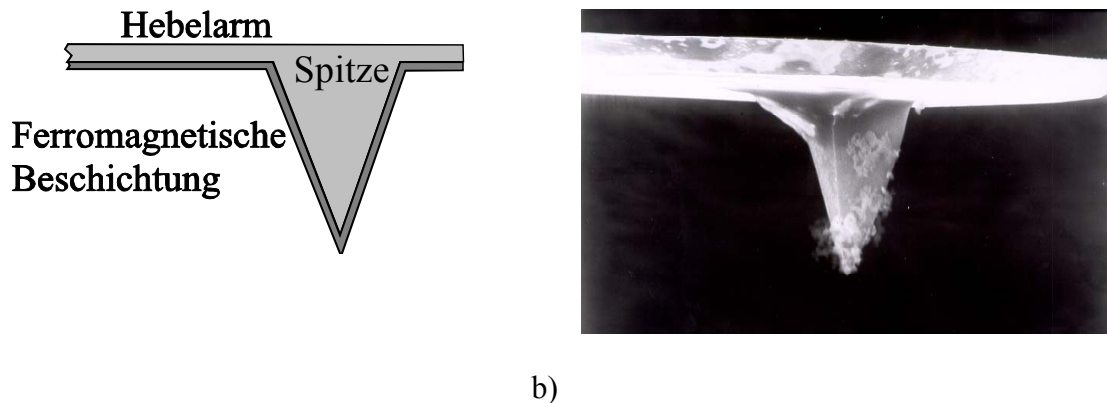


Bild 4.1: *MKM-Messsonde der Firma Nanosensors*  
 a) *Schematischer Aufbau*  
 b) *REM-Aufnahme: Das Bild wurde nach dem Gebrauch aufgenommen. Die Verschmutzungen der Sonde durch den Messvorgang sind deutlich zu erkennen*

Die Messsonde hat eine Länge von  $l=225 \mu\text{m}$ , eine Breite von  $b=28 \mu\text{m}$  und ihre Dicke beträgt etwa  $d=3 \mu\text{m}$ . Aus der allgemeinen Gleichung für die Resonanzfrequenz einer Messsonde [Nanosensors 2001]

$$f = 0,162 \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{d}{l^2} \quad (4.1)$$

ergibt sich diese mit den oben genannten Größen zu  $f=75 \text{ kHz}$ . Wobei in dieser Gleichung  $E$  dem Elastizitätsmodul und  $\rho$  der Dichte des Siliziums entspricht.

Die Federrate  $c$  dieses Messsondentyps kann mit [Nanosensors 2001]

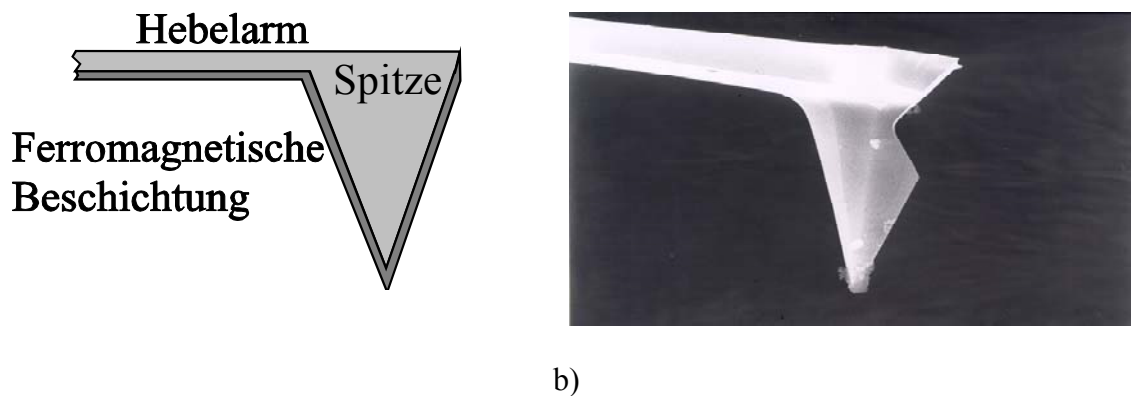
$$c = \frac{E \cdot b \cdot d^3}{4 \cdot l^3} \quad (4.2)$$

zu  $c=2,8 \text{ N/m}$  bestimmt werden. Die Dicke der magnetischen Schicht beträgt ca.  $d_{\text{mag}}=50 \text{ nm}$ .

### Messsonden der Firma MDT

Alle Messsonden der Firma MDT, die in dieser Arbeit Verwendung finden, weisen den gleichen Aufbau auf und bestehen aus Silizium als Basismaterial. Sie differieren lediglich in der Geometrie, d.h. Länge und Dicke des Hebelarms, sowie in ihrer ferromagnetischen Beschichtung.

Die Messsonden unterscheiden sich in ihrem Aufbau deutlich von der oben genannten Messsonde der Firma Nanosensors.



*Bild 4.2: MKM-Messsonde der Firma MDT*  
*a) Schematischer Aufbau*  
*b) REM-Aufnahme*

Deutlich ist zu sehen, dass sich die Messspitze dieser Messsonden unmittelbar am Ende des Hebelarms befindet. Im Gegensatz dazu weist der Hebelarm der Messsonde der Firma Nanosensors einen Überhang von ca.  $l_{\text{ü}}=20\ \mu\text{m}$  auf.

### Typ CSC17 der Firma MDT

Die Messsonde des Typs CSC17 der Firma MDT [MDT 1999] hat eine Länge von  $l=460\ \mu\text{m}$  und eine Breite von  $b=50\ \mu\text{m}$ . Ihre Dicke wird mit ca.  $d=2\ \mu\text{m}$  angegeben, was durch Gleichung 4.1 zu einer Resonanzfrequenz von ca.  $f=12\ \text{kHz}$  und einer Federrate von  $c=0,15\ \text{N/m}$  führt. Die Dicke des magnetisch aktiven Materials, bei dieser Messsonde Kobalt, beträgt ca.  $d_{\text{mag}}=15\ \text{nm}$ .

### Typ NSC15Co der Firma MDT

Die Messsonde des Typs NSC15Co der Firma MDT hat eine Länge von  $l=125\ \mu\text{m}$  und eine Breite von  $b=35\ \mu\text{m}$ . Ihre Dicke wird mit ca.  $d=4\ \mu\text{m}$  angegeben, woraus sich eine Resonanzfrequenz von ca.  $f=325\ \text{kHz}$  und eine Federrate von  $c=40\ \text{N/m}$  ergibt. Der magnetische Film auf der Messsonde besteht aus Kobalt in einer Stärke von  $d_{\text{mag}}=15\ \text{nm}$ .

### Typ NSC15Ni der Firma MDT

Die Messsonde des Typs NSC15Ni der Firma MDT entspricht in ihren Maßen der vorherigen; der Unterschied liegt in der ferromagnetischen Beschichtung. Die Schichtdicke des Nickels beträgt  $d_{\text{mag}}=15\ \text{nm}$  und ist von einer  $d_{\text{mag,schutz}}=5\ \text{nm}$  dicken Goldschicht überzogen. Dies hat keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf die Messung, da Gold paramagnetisch ist. Bei dieser Messsonde wurde ein spezielles Aufdampfverfahren erprobt, das es ermöglicht, nur den vorderen Teil der Messsonde zu bedampfen.

### Typ CSC12Co der Firma MDT

Dieser sogenannte Multilever-Chip integriert sechs verschieden lange Messsonden auf einem Trägerchip.



Bild 4.3: Schematische Abbildung eines Multilever-Chips

Die sechs Hebelarme sind jeweils  $b=35\ \mu\text{m}$  breit und  $d=2\ \mu\text{m}$  dick. Die Dicke der Beschichtung aus Kobalt beträgt je ca.  $d_{\text{mag}}=15\text{-}20\ \text{nm}$ .

An der einen Seite des Multilever-Chips befinden sich sehr lange Hebelarme. Sie messen  $l=350\ \mu\text{m}$  ( $f=21\ \text{kHz}$  /  $c=0,30\ \text{N/m}$ ),  $l=300\ \mu\text{m}$  ( $f=28\ \text{kHz}$  /  $c=0,35\ \text{N/m}$ ) und  $l=250\ \mu\text{m}$  ( $f=41\ \text{kHz}$  /  $c=0,65\ \text{N/m}$ ). Die Hebelarme an der anderen Seite sind  $l=130\ \mu\text{m}$  ( $f=150\ \text{kHz}$  /  $c=4,5\ \text{N/m}$ ),  $l=110\ \mu\text{m}$  ( $f=210\ \text{kHz}$  /  $c=7,5\ \text{N/m}$ ) und  $l=90\ \mu\text{m}$  ( $f=315\ \text{kHz}$  /  $c=14\ \text{N/m}$ ) lang.

Damit stehen für die Untersuchungen jeweils drei, bis auf die Hebelarmlänge identische Messsonden zur Verfügung, ohne dass ein Umbau notwendig ist. Der Multilever-Chip ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der Hebelarmlänge auf die Strommesstechnik. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in Kap. 7.1 vorgestellt.

### **Typ CSC12Ni der Firma MDT**

Dieser Multilever-Chip entspricht in seinen Abmessungen und physikalischen Eigenschaften dem oben beschriebenen Multilever-Chip Typ CSC12Co der Firma MDT. Lediglich das Beschichtungsmaterial, hier Nickel, ist unterschiedlich.

## **4.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse**

Mit jedem Messsondentyp werden zunächst an der in Kap. 3 vorgestellten ITG-Teststruktur Ströme an unterschiedlichen Leiterbahnbreiten gemessen. Ermittelt wird der Messsignalpegel bei einem Strom von  $I=1\text{mA}$  an Leiterbahnen zwischen  $b_L=2\ \mu\text{m}$  und  $b_L=16\ \mu\text{m}$  Breite. Ebenfalls wird der kleinste noch zu detektierende Strom verglichen und die Ortsauflösung bei zwei nebeneinander liegenden stromführenden Leiterbahnen untersucht.

### **Ergebnisse zu den Messsonden des Typs NSC15Co und NSC15Ni der Firma MDT**

Beide Messsondentypen basieren auf dem gleichen Sonden-Rohling und unterscheiden sich nur in der Art der Bedampfung und dem dazu verwendeten Material. Die Messsonde des Typs NSC15Co ist mit Kobalt über den gesamten vorderen Teil des Hebelarms in einer Stärke von ca.  $d_{\text{mag}}=15\ \text{nm}$  bedampft, die Messsonde des Typs NSC15Ni mit einer Nickelbeschichtung in einer Dicke von ca.  $d_{\text{mag}}=15\ \text{nm}$  nur auf der eigentlichen Messspitze. Bei beiden Messsonden ist die resultierende Kraft im Verhältnis zur sehr hohen Federrate von  $c=40\ \text{N/m}$  sehr gering und verursacht nur minimale Biegemomente. Da die Verbiegung des Hebelarms zur Auswertung detektiert wird, ist die Auflösungsgrenze äußerst gering. Es können nur Ströme in Größenordnungen von einigen  $I=10\ \text{mA}$  detektiert werden.

Das Ziel der selektiven Bedampfung der Messsonde des Typs NSC15Ni ist die Erhöhung der Ortsauflösung bei der Stromdetektion. Da der Umstand, dass nur die eigentliche Spitze des Hebelarms mit einer dünnen Schicht Nickel überzogen ist, ein um Größenordnungen

geringeres Wechselwirkungsvolumen ermöglicht, sind die entsprechenden Ergebnisse nicht mehr detektierbar. So kann man für beide Messsonden davon ausgehen, dass sie in keiner Weise für die angestrebte Strommesstechnik kleinster Ströme und an kleinsten Strukturen geeignet sind.

### **Multilever-Chip Messsonden Typ CSC12Co und CSC12Ni der Firma MDT**

Aufgrund gleicher Abmessungen verhalten sich die Messsonden der beiden Multilever-Chips im Anwendungsbereich der Topografie identisch. Bei der MKM-Messung, die der Strommessung zugrunde liegt, zeigt der Multilever-Chip CSC12Ni mit seiner nur  $d_{\text{mag}}=12\text{ nm}$ - $d_{\text{mag}}=15\text{ nm}$  dicken Nickelbeschichtung eine geringere Auflösungsgrenze als der kobaltbeschichtete Multilever-Chip CSC12Co. Eine Ursache der schlechten Ergebnisse der nickelbeschichteten Messsonde kann im unterschiedlichen magnetischen Verhalten von Kobalt und Nickel liegen. Dies kann sich auch auf die jeweils resultierende Kraft auswirken und so unterschiedliche Auflösungsgrenzen erklären.

Eine Untersuchung des Einflusses der Hebelarmlänge  $l$  und somit der Federrate  $c$  auf die Messempfindlichkeit wird in Kap. 7.1 vorgestellt.

### **Ergebnisse zu den Messsondentypen MFM der Firma Nanosensors und CSC17 der Firma MDT**

Die topografische Auflösung beider Messsonden ist nahezu gleich.

Hinsichtlich der Strommessung eignen sich diese beiden Messsondentypen am besten. Die Unterschiede bei den Messergebnissen zeigen die folgenden Messungen. Die Messung in Bild 4.4 zeigt die Ergebnisse einer Strommessung an einer  $b_L=2\text{ }\mu\text{m}$  breiten Leiterbahn mit  $I=1\text{ mA}$ ,  $I=0,75\text{ mA}$ ,  $I=0,5\text{ mA}$  und  $I=0,25\text{ mA}$  Stromfluss.

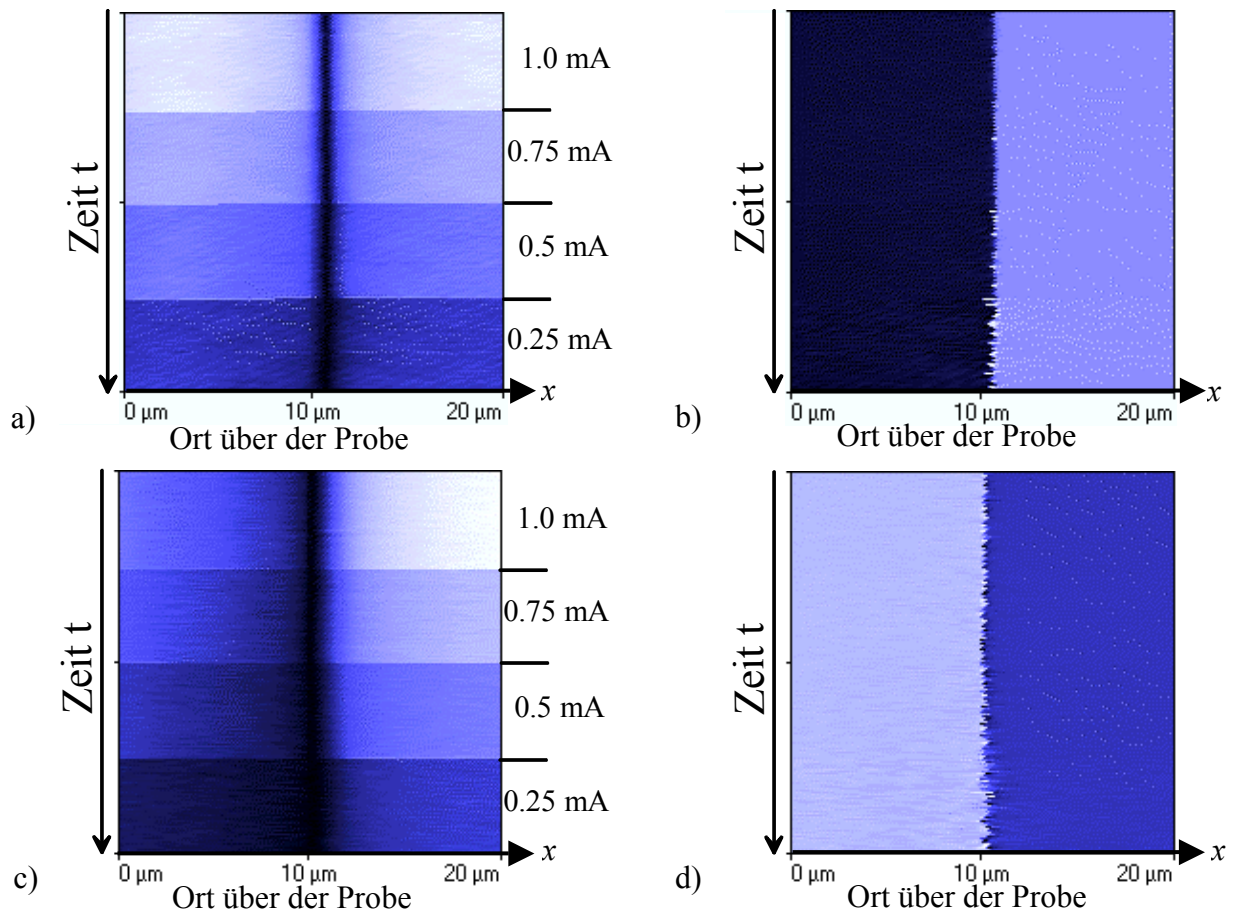


Bild 4.4: *Linienrasterungen mit Strömen von  $I=1$ ;  $I=0,75$ ;  $I=0,5$  und  $I=0,25$  mA (von oben nach unten)*  
*a) Amplitude und b) Phase der Nanosensors-Messsonde*  
*c) Amplitude und d) Phase der MDT-Messsonde*

Wie in Bild 4.4 zu sehen, ist die Ortsauflösung der MFM-Messsonde der Firma Nanosensors deutlich besser, als die der CSC17 Messsonde der Firma MDT. Dies liegt vermutlich an dem kleineren mittleren Arbeitsabstand, bedingt durch eine kleinere Auslenkung der kürzeren Nanosensors Messsonde bei gleicher Kraft.

Auch die Ortsauflösung des Messsondentyps MFM der Firma Nanosensors bei zwei nebeneinander liegenden stromdurchflossenen Leiterbahnen ist deutlich besser, als bei den langen Messsonden der Firma MDT.

Bei der Untersuchung und Detektion kleiner Ströme erweist sich jedoch die MDT-Messsonde als überlegen. Die Strommessung in Bild 4.5 zeigt eine Strommessung an der  $b_L=2 \mu\text{m}$  breiten Leiterbahn der ITG-Teststruktur mit einem Strom von  $I=25 \mu\text{A}$ . Während der Strommessung wurde zwischen den einzelnen Leiterbahnen umgeschaltet.

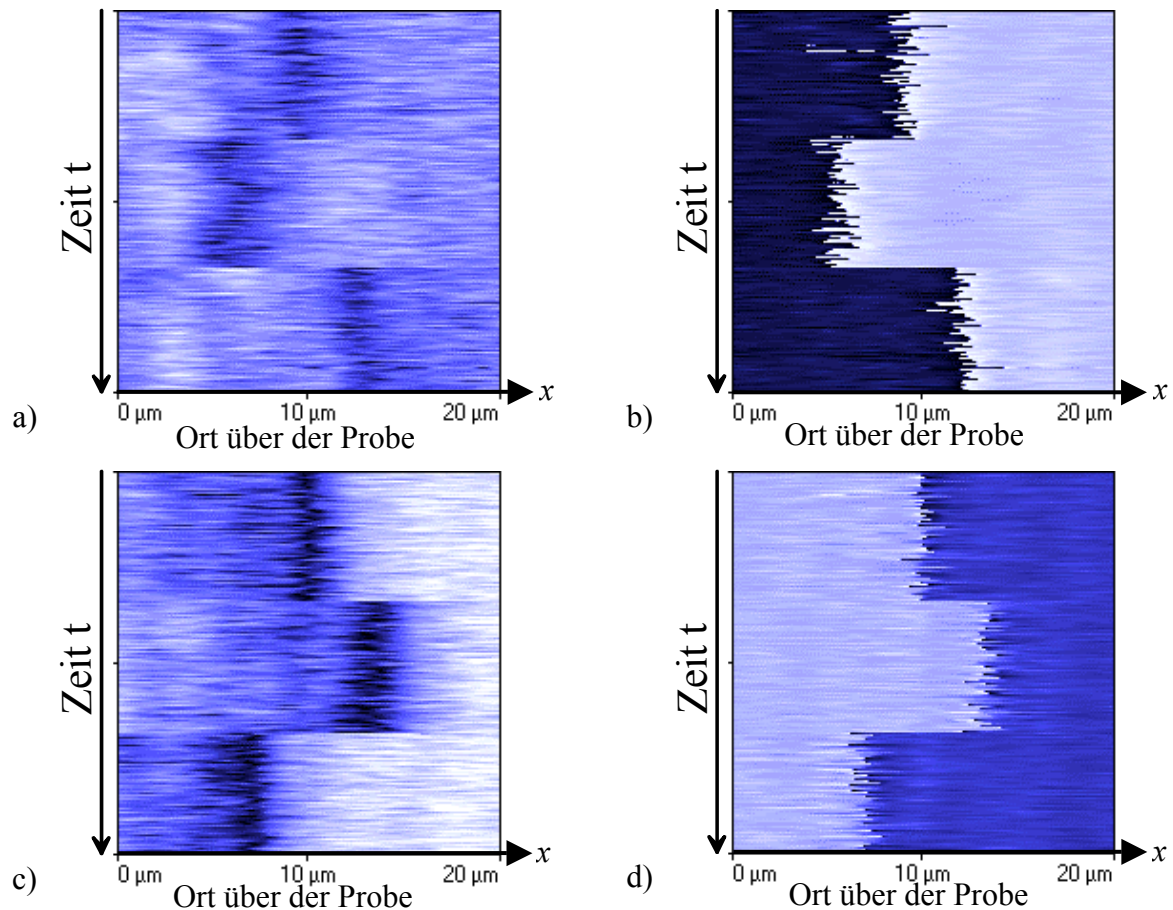


Bild 4.5: *Linienrasterung mit  $I=25 \mu\text{A}$ . Während der Messung wurde zwischen den einzelnen Leiterbahnen umgeschaltet.*  
 a) Amplitude und b) Phase der Nanosensors-Messsonde  
 c) Amplitude und d) Phase der MDT-Messsonde

Wie in Bild 4.5 zu sehen, ist mit der MDT-Messsonde ein deutlicheres Messergebnis zu erzielen.

Für die Messung von Strömen außerhalb der Resonanzfrequenz der Messsonde, wie sie in Kap. 6 vorgestellt wird, erwiesen sich alle getesteten Messsonden, mit Ausnahme der Nanosensors MFM und der MDT CSC17, als ungeeignet. Zur Strommessung der in Bild 4.6 dargestellten Ergebnisse wird, wie in Kap. 6 ausführlich vorgestellt, ein amplitudenmodulierter Strom von 10 MHz verwendet.



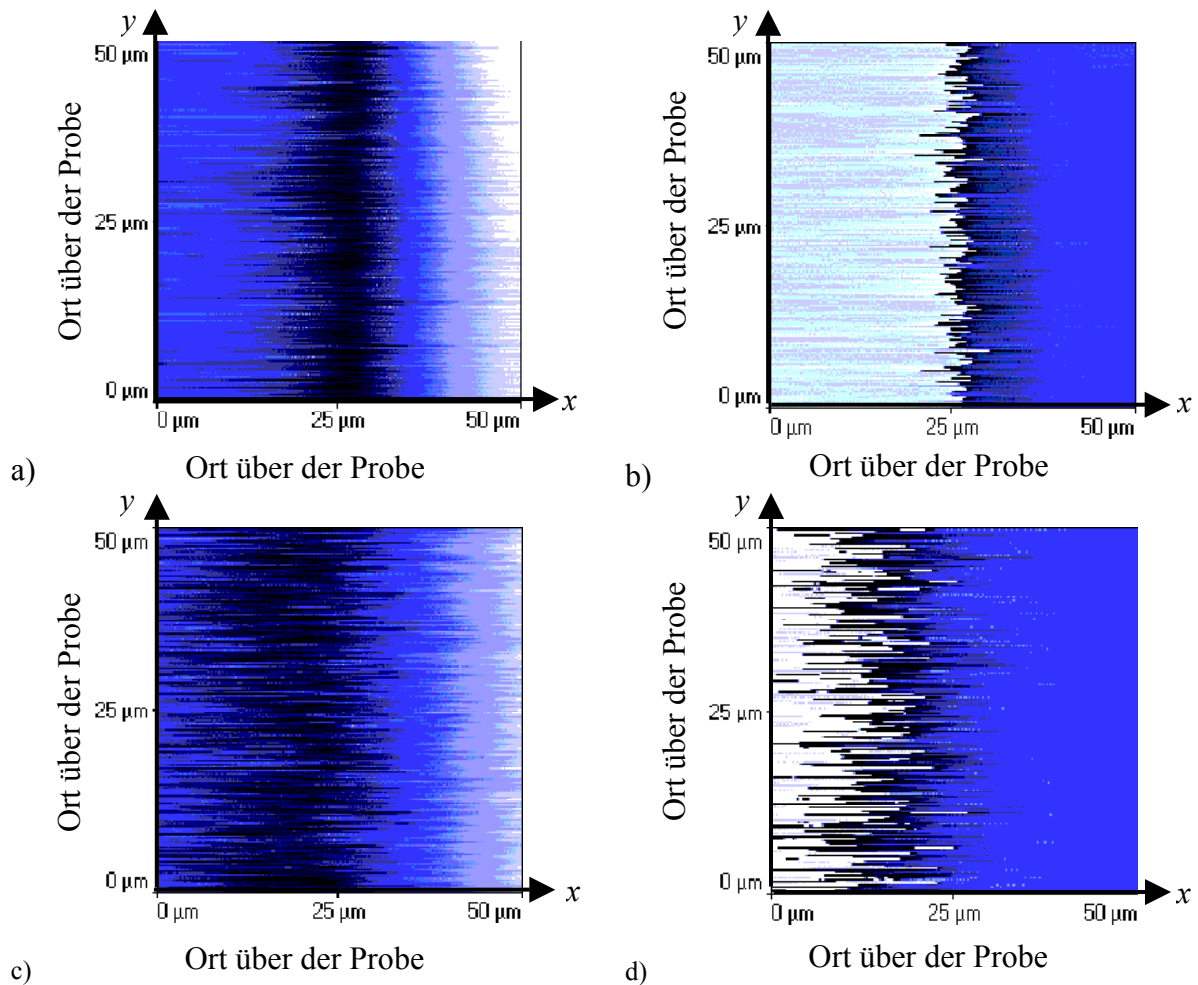


Bild 4.6: *Strommessung mit  $f=10$  MHz amplitudenmoduliertem Strom*  
 a) Amplitude und b) Phase der Nanosensors-Messsonde  
 c) Amplitude und d) Phase der MDT-Messsonde (stark verrauschtes Signal)

Es ist zu erkennen, dass die Messsonde der Firma Nanosensors bei dieser Strommessung die bedeutend bessere Leistungsfähigkeit bietet. Sie weist einen größeren Signalpegel und einen deutlich stabileren Phasensprung auf.

### 4.3 Zusammenfassung

Eine optimale Messsonde existiert derzeit nicht. Die Messsonde des Typs CSC17 der Firma MDT zeigt aufgrund ihres langen Hebelarms mit Abstand die größte Auflösungsgrenze. Mit ihr konnten selbst Ströme von nur  $I=1,8 \mu\text{A}$  auf einer  $b_L=2 \mu\text{m}$  breiten Leiterbahn, wie in Kap. 8 demonstriert, detektiert werden. Große Nachteile zeigt diese Messsonde bezüglich der Ortsauflösung. So konnten beispielsweise bei einer Messung an zwei beschalteten Leiterbahnen nur noch die  $b_L=4 \mu\text{m}$  breiten Leiterbahnen mit einem Abstand von  $a_L=2 \mu\text{m}$

einzelnen aufgelöst werden. Bei kleineren Strukturen wurde lediglich ein gesamter Stromfluss gemessen. Die Detektion eines Stromflusses bei Frequenzen oberhalb der Resonanz der Messsonde war nur schlecht möglich.

Die Messsonde der Firma Nanosensors ist bezüglich der Ortsauflösung die geeignetste. Ihre Auflösungsgrenze liegt jedoch deutlich unter der der MDT Messsonde. Bei den in Kap. 6 vorgestellten Messtechniken außerhalb der Resonanzfrequenz zeigte dieser Messsondentyp die besten Ergebnisse.

Zu erwarten ist, dass durch ständige Abweichungen im Herstellungsprozess der Messsonden die oben getroffenen Aussagen zunächst nur für die entsprechende, im Test verwendete Charge von Messsonden gültig sind. Messungen zeigten, dass einzelne Chargen der MFM-Messsonde von Nanosensors z.B. nicht hochfrequent messen konnten. Nähere Untersuchungen der Herstellparameter und ihre Auswirkungen auf die Strommessungen sollten in Zukunft vorgenommen werden.