

---

## **8 Demonstration der Leistungsfähigkeit der Messtechnik und des Testsystems**

In diesem Kapitel wird die Leistungsfähigkeit des in Kap. 3 vorgestellten Testsystems demonstriert. Dafür werden beispielhaft die durch Strommessungen im Rahmen der Arbeit erzielten Messwerte vorgestellt. Die Ergebnisse werden mit den nach den hier vorgestellten Modellen zu erwartenden Messergebnissen verglichen. Es wurden in nahezu allen Belangen weltweit unerreichte Messwerte erzielt. Vor allem die neuen Möglichkeiten bezüglich der Hochfrequenztauglichkeit und der Ortsauflösung sind besonders hervorzuheben. Für die relevanten Strommessungen wird ausschließlich das auf dem kommerziellen RKM basierende Testsystem verwendet. Es bietet derzeit die größte Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Das neuentwickelte Testsystem ist dem hier verwendeten zwar in vielen Belangen überlegen, jedoch weist es zur Zeit noch einige Software- und Stabilitätsprobleme auf, die aussagekräftige Reihenuntersuchungen behindern.

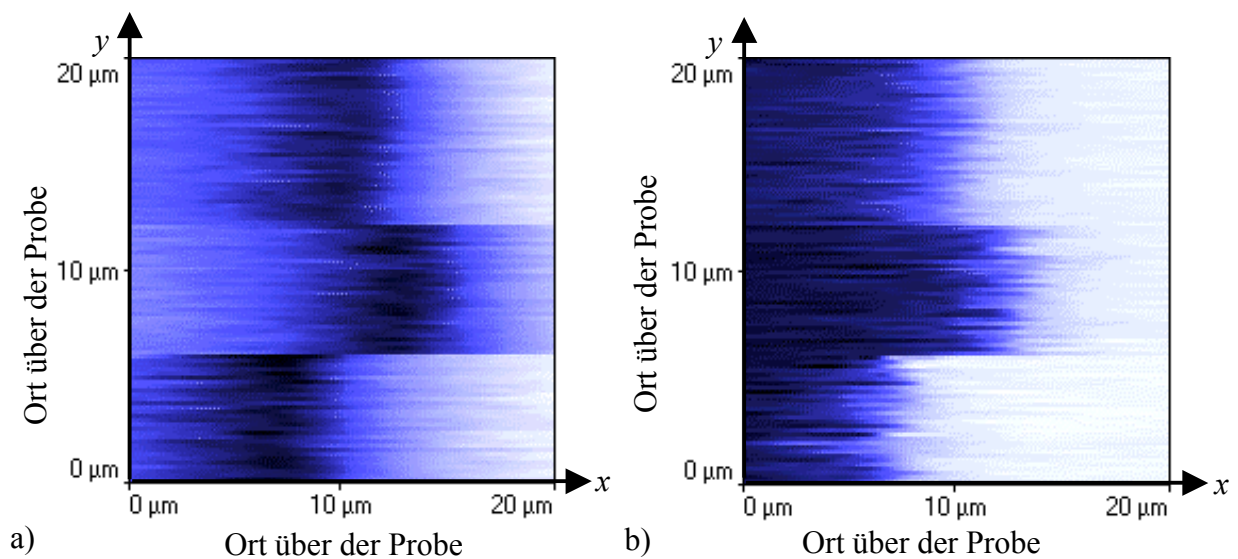
### **8.1 Stromnachweisgrenze und Messdauer**

Die Stromnachweisgrenze dieses Testsystems hängt von vielen Parametern ab. Nach dem, in den Kap. 2 bis Kap. 7 vorgestellten Modell, ist vor allem der effektive Arbeitsabstand  $h$ , die Größe des magnetischen Dipols  $\vec{m}$ , sowie die Federrate  $c$  des Hebelarms relevant. Jedoch sind diese Parameter, wie in Kap. 7 beschrieben, nicht beliebig zu variieren. Setzt man die messsondenspezifischen Parameter ( $\vec{m}$ ,  $c$ ) als gegeben voraus, so bleiben weitere, die einen Einfluss auf die Strommessung haben und bisher noch nicht erwähnt wurden. Zu nennen sind hier die Integrationszeit des Lock-In-Verstärkers, seine Empfindlichkeit, sein Eigenrauschen usw.. Auf die meisten dieser Parameter hat man bei den gegebenen Geräten keinen Einfluss. Lediglich die Wahl des Messbereichs und die Variation der Integrationszeit ist möglich. Der Messbereich wird üblicherweise so klein wie möglich gewählt, um so die maximale Stromnachweisgrenze des Gerätes zu nutzen. Die Integrationszeit ist im Hinblick auf die Stromnachweisgrenze entscheidend. Je größer sie gewählt wird, um so präziser und rauschärmer sind die Ergebnisse. Jedoch ist die Integrationszeit umgekehrt proportional zur Rastergeschwindigkeit und somit proportional zur Messzeit. Ein Anstieg der Messzeit hat noch weitere negative Auswirkungen. Bei langen Messzeiten treten Drifteffekte auf, da sich die Position der Messsonde im Bezug zur Probe und somit auch die Messhöhe ändern kann.

Bei den hier vorgestellten Strommessungen wurden zur Detektion minimaler Ströme neben einer sehr empfindlichen Messsonde (langer Hebelarm  $\rightarrow$  niedrige Federrate) geringere Rastergeschwindigkeiten gewählt.

Die Stromnachweisgrenze kann theoretisch mit Gleichung 2.24 bestimmt werden. Hierfür muss ein effektiver Arbeitsabstand angenommen werden. Nach den Ausführungen in Kap. 2.3 liegt der effektive Arbeitsabstand für Standard-Messsonden bei  $z_h=2,2 \mu\text{m}$ , unter der Annahme einer Leiterbahnhöhe von  $h_l=600 \text{ nm}$ , einem Abstand des im Modell angenommenen Dipols vom Messspitzenende von ca.  $\delta=1800 \text{ nm}$  und einem Arbeitsabstand von  $h=100 \text{ nm}$ . Die Größe des magnetischen Dipols  $\vec{m}$  der Standard-Messsonden liegt bei ca.  $125 \cdot 10^{-15} \text{ Am}^2$  [Hartmann 1994]. Die minimal zu detektierende Kraft  $\vec{F}$  beträgt ohne Berücksichtigung des Rauschens ca.  $F_z=10^{-16} \text{ N}$  [Burnham 1991]. Setzt man diese Werte in Gleichung 2.24 ein und löst nach  $I$  auf, so erhält man einen minimal zu detektierenden Strom von  $I_{\min}=6,34 \mu\text{A}$ . Dies kann nur als grobe Schätzung angesehen werden, da, wie in Kap. 4 vorgestellt, die Parameter der für diese Abschätzung verwendeten Messsonden sehr große Abweichungen zeigten. Die hier angenommenen Werte sind Durchschnittswerte.

Als Testobjekt zur Demonstration der Leistungsfähigkeit dieses Testsystems wird die Struktur G der ITG-Teststruktur aus Kap. 3.2 verwendet. Wird bei einer Integrationszeit von  $t_{\text{int}}=100 \text{ ms}$  und einer Rastergeschwindigkeit von  $v_R=0,25 \text{ Linien/s}$  gemessen, so erreicht man eine Stromnachweisgrenze von ca.  $I_{\min}=10 \mu\text{A}$ . In Bild 8.1 ist eine entsprechende Strompfadverfolgung bei  $I=25 \mu\text{A}$  abgebildet. Eine Strommessung, wie in Bild 8.1 dargestellt, dauert bei 100 mal 100 Bildpunkten (Messpunkten) zwischen 5 und 10 Minuten.



**Bild 8.1:** *Strommessung von  $I=25 \mu\text{A}$  mit Umschaltung der Leiterbahnen an einer  $b_L=2 \mu\text{m}$  breiten Leiterbahnstruktur  
a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung*

Wird die Integrationszeit auf  $t_{\text{int}}=300$  ms erhöht, erfordert dies eine Verringerung der Rastergeschwindigkeit auf  $v_R=0,1$  Linien/s. Die Strommessung dauert doppelt so lange. Mit diesen Einstellungen liegt die Stromnachweisgrenze, wie die Strommessung in Bild 8.2 zeigt, bei  $I_{\text{min}}=1,7$   $\mu\text{A}$ . Man sieht deutlich, wie die Qualität der Messung abnimmt. Es ist zu erkennen, dass die exakte Lage des Minimums über der Leiterbahnmitte nicht bei jeder gemessenen Linie an der gleichen Position liegt. Somit sinkt bei solch empfindlichen Messungen auch, wie in Bild 8.2 zu sehen, die Ortsauflösung.

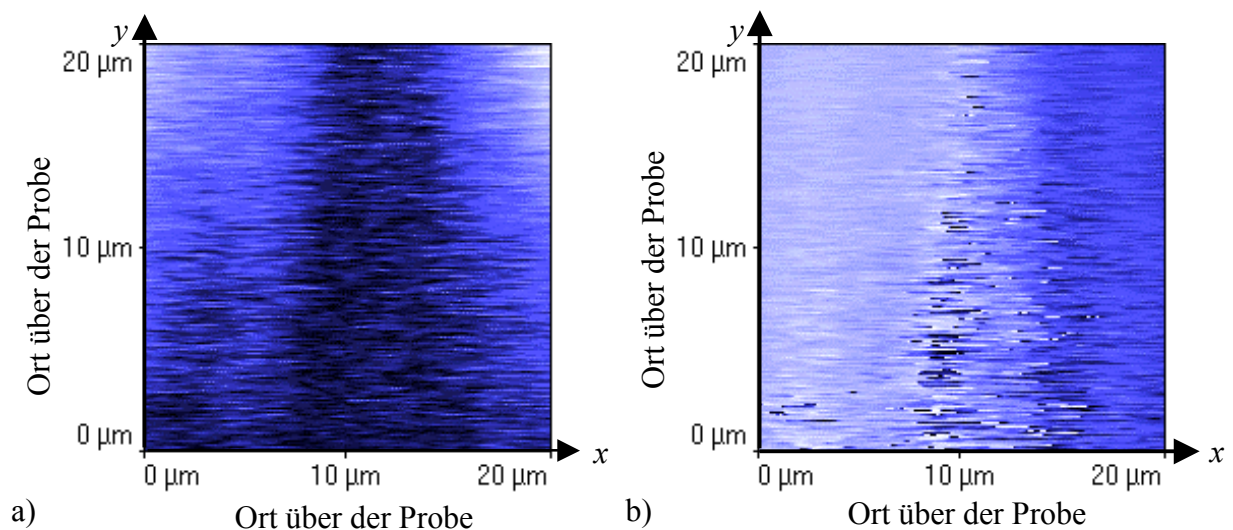


Bild 8.2: *Strommessung von  $I=1,7$   $\mu\text{A}$  an einer  $b_L=2\mu\text{m}$  breiten Leiterbahnstruktur  
a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung*

Eine Steigerung der Empfindlichkeit ist, wie oben erwähnt, über eine Erhöhung der Integrationszeit möglich, jedoch steigt der Zeitbedarf für eine Strommessung erheblich an. Die unzureichende Langzeitstabilität des hier eingesetzten Testsystems macht es unmöglich, die Messzeit weiter zu erhöhen. In dem Ergebnis, das in Bild 8.2 dargestellt ist, ist bereits ein Einfluss der Höhendrift zu erkennen. Man sieht deutlich, wie sich im unteren Bildbereich das Messsignal verschlechtert. Sowohl die Lage des Phasensprungs, als auch die Aufweitung des Minimums in der Amplitudenverteilung ist zu erkennen.

Mit dem vorgestellten Testsystem ist beim Einsatz kommerzieller Messsonden eine maximale Stromnachweisgrenze von  $I_{\text{min}}=1$   $\mu\text{A}$  bis  $I_{\text{min}}=2$   $\mu\text{A}$  festzuhalten.

Verbesserungen an den Messsonden, wie sie in Kap. 4 und Kap. 7 vorgestellt wurden, werden eine höhere Stromnachweisgrenze ermöglichen. Des Weiteren werden Änderungen hinsichtlich der thermischen Drift, der Empfindlichkeit des Detektors, des Signal-Rauschleistungsverhältnisses des Verstärkers, sowie die Verwendung eines empfindlicheren Lock-In-Verstärkers eine Steigerung der Stromnachweisgrenze mit sich bringen.

## 8.2 Ortsauflösung

Die Ortsauflösung ist eines der wichtigsten Kriterien. Die Strukturbreite in den zu untersuchenden Bauteilen sinkt stetig. Die mit der Strommesstechnik 1994 demonstrierte Ortsauflösung von  $A_0=2\ \mu\text{m}$  ist aus heutiger Sicht nicht mehr ausreichend. Die Ortsauflösung des Magnetkraftmikroskops liegt derzeit bei  $A_0=10\ \text{nm}$  [Grütter 1990]. Es kann davon ausgegangen werden, dass Leiterbahnen in dieser Größenordnung, die ein hinreichend großes Magnetfeld erzeugen, mit dieser Messtechnik noch zu untersuchen sind. Wenn die Geometrien der Leiterbahnen derart klein werden, steigt die Stromdichte bei gleichem Strom in der Leiterbahn enorm an. Daher muss man berücksichtigen, dass ein noch zu detektierender Strom (siehe Kap. 8.1) in der Leiterbahn fließt.

Bezüglich der Ortsauflösung wird auf einige differenzierte Aspekte eingegangen. Man muss unterscheiden zwischen den kleinsten noch zu detektierenden Leiterbahnen und dem kleinsten noch zu detektierenden Abstand zweier parallel laufender Leiterbahnen. Ein weiterer Aspekt ist die Auflösung in tieferen Verdrahtungsebenen.

### 8.2.1 Eine beschaltete Leiterbahn

Zur Demonstration werden die in Kap. 3 näher beschriebenen Fraunhofer-Teststrukturen verwendet. Diese stellen die derzeit kleinste verfügbare Teststruktur dar. Bild 8.3 zeigt eine Strompfadverfolgung mit Leitungsumschaltung an einer  $b_L=500\ \text{nm}$  breiten Leiterbahnstruktur. Wie man sieht, ist die Ortsauflösung der Messsonde ausreichend, um die drei verschiedenen Leiterbahnen zu unterscheiden.

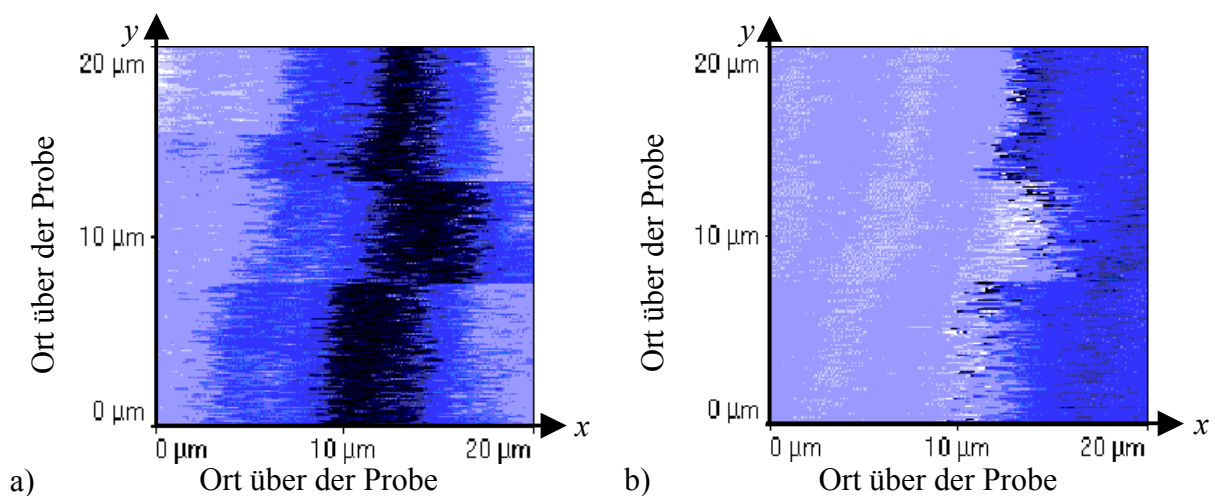
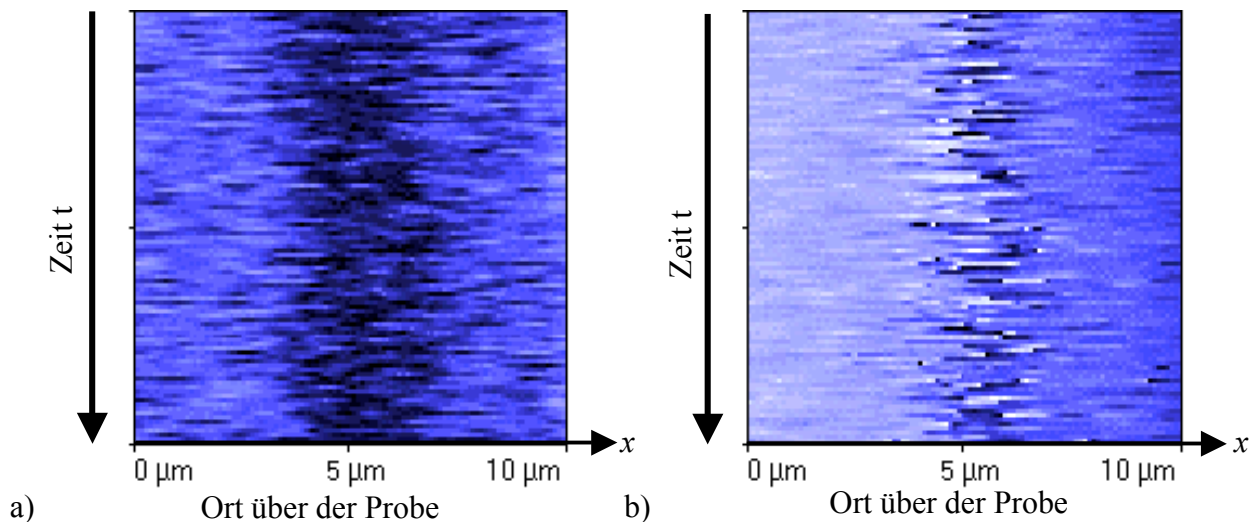


Bild 8.3: Strommessung an einer  $b_L=500\ \text{nm}$  breiten Leiterbahnstruktur mit Leitungsumschaltung (mittlere- $\rightarrow$ rechte- $\rightarrow$ linke Leiterbahn)  
a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung

Bei den Messergebnissen, die in Bild 8.4 dargestellt sind, handelt es sich um eine Strommessung an der  $b_L=100$  nm breiten Leiterbahnstruktur der in Kap. 3 vorgestellten Fraunhofer-Teststruktur mit einem Stromfluss von  $I=70$   $\mu$ A. Eine Umschaltung auf eine andere Leiterbahn ist nicht möglich, da nur eine Leiterbahn dieser Struktur funktionsfähig ist.



**Bild 8.4:** *Strommessung an einer  $b_L=100$  nm breiten Leiterbahnstruktur (Linienrasterung)*  
*a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung*

Diese Strommessungen zeigen, dass die Ortsauflösung des Testsystems die Anforderungen heutiger ICs im vollen Umfang erfüllt. Eine Demonstration an kleineren Leiterbahnen konnte aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Teststrukturen nicht durchgeführt werden.

### 8.2.2 Zwei nebeneinander liegende Leiterbahnen

Ein weiteres großes Problem bezüglich der Ortsauflösung, ist die Auflösung dicht nebeneinander fließender Ströme. Hier stellt vor allem das Design der Messsonden, wie in Kap. 4 beschrieben, ein Hindernis dar, in die sub  $\mu$ m Bereiche vorzustößen. Mit den im Rahmen der Arbeit verwendeten Messsonden konnten zwei gleiche (Amplitude und Phase) Ströme noch getrennt betrachtet werden, wenn eine Leiterbahnbreite von  $b_L=2$   $\mu$ m und ein Abstand von mindestens  $a_L=1$   $\mu$ m vorlagen. Eine entsprechende Strommessung ist in Bild 8.5 dargestellt. Bei dieser Strommessung werden zwei Ströme mit einer Stromstärke von je  $I=100$   $\mu$ A und einer Phasenverschiebung von  $\Delta\varphi=0^\circ$  zueinander an der  $b_L=2$   $\mu$ m breiten Leiterbahnstruktur G der ITG-Teststruktur dargestellt.

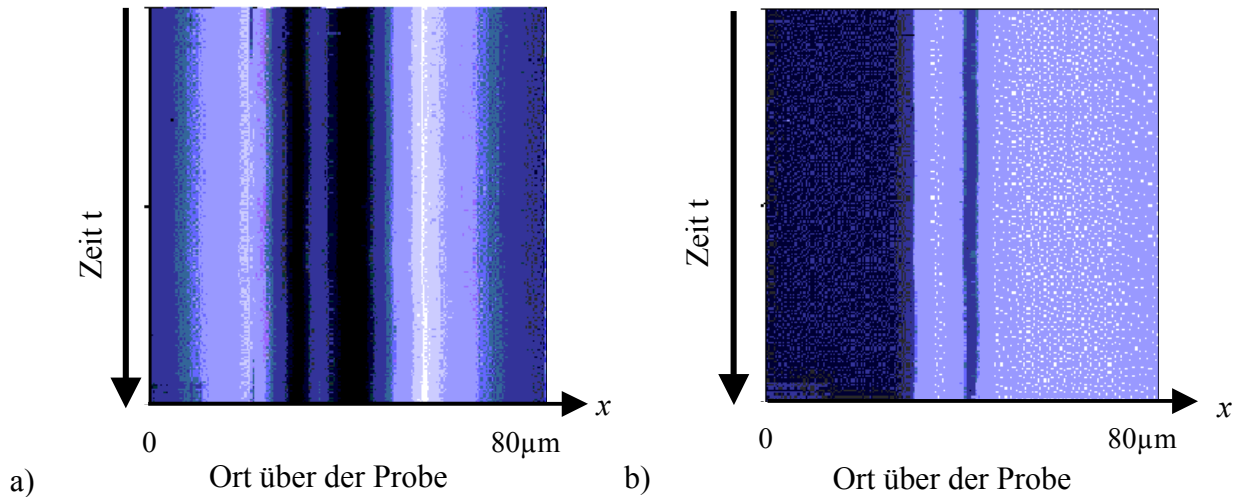


Bild 8.5: *Strommessung an zwei beschalteten Leiterbahnen in gleicher Richtung*  
 a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung

Eine Verbesserung dieser Messwerte hängt vor allem von einem verbesserten Sondendesign ab, das einen geringen effektiven Arbeitsabstand, siehe Kap. 7, ermöglicht. In der Praxis ist diese Einschränkung nicht allzu problematisch, da zwei dicht nebeneinander liegende Ströme nur selten auch Phasengleichheit aufweisen.

Fließen die Ströme nicht in die gleiche Richtung, ist eine Unterscheidung der Einzelströme durch das Phasensignal sehr gut möglich, wie in Bild 8.6 zu sehen. Bei dieser Strommessung auf dem  $b_L=2\ \mu\text{m}$  breiten Leiterbahnstück der Leiterbahn G der ITG-Teststruktur fließen zwei Ströme in entgegengesetzter Richtung bei einer Stromstärke von  $I=100\ \mu\text{A}$ .

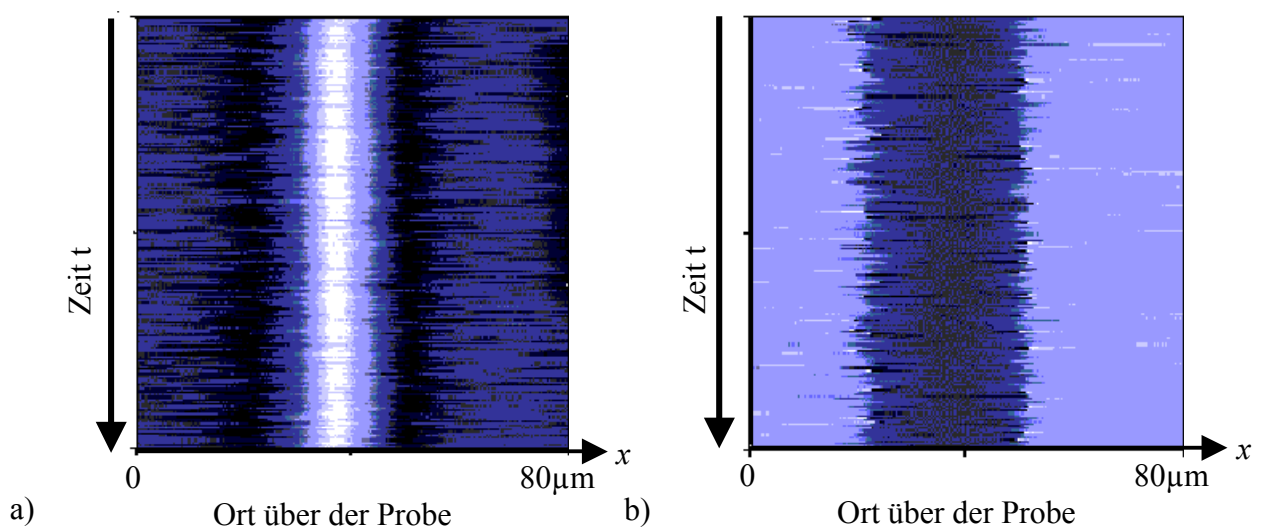


Bild 8.6: *Strommessung an zwei beschalteten Leiterbahnen in entgegengesetzter Richtung*  
 a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung

Der große Abstand der beiden Minima in Bild 8.6 ist bedingt durch den großen effektiven Arbeitsabstand und entspricht den nach dem Dipolmodell aus Kap. 2 erwarteten Messwerten.

### **8.2.3 Unterschiedliche Verdrahtungsebenen**

Die Strommessung in tieferen Verdrahtungsebenen wird durch den zunehmenden Arbeitsabstand immer schwieriger. Außerdem überlagern sich die magnetischen Felder, so dass Strommessungen an übereinander liegenden Leiterbahnen nicht mit befriedigenden Ergebnissen zu realisieren sein werden. Verbesserungen sind hier nur durch sehr ausgereifte Simulationen der zu erwartenden Kraft und den Vergleich mit der gemessenen Kraft möglich.

Die Passivierung der Bauelemente hat keinen Einfluss auf die Messergebnisse, mit Ausnahme des gewachsenen, minimalen Arbeitsabstands. Dies kann anhand der in Kap. 9 vorgestellten Strommessung belegt werden. Hierbei konnten auch Messungen an tieferliegenden Verdrahtungsebenen demonstriert werden.

## **8.3 Zeitauflösung und Bandbreite**

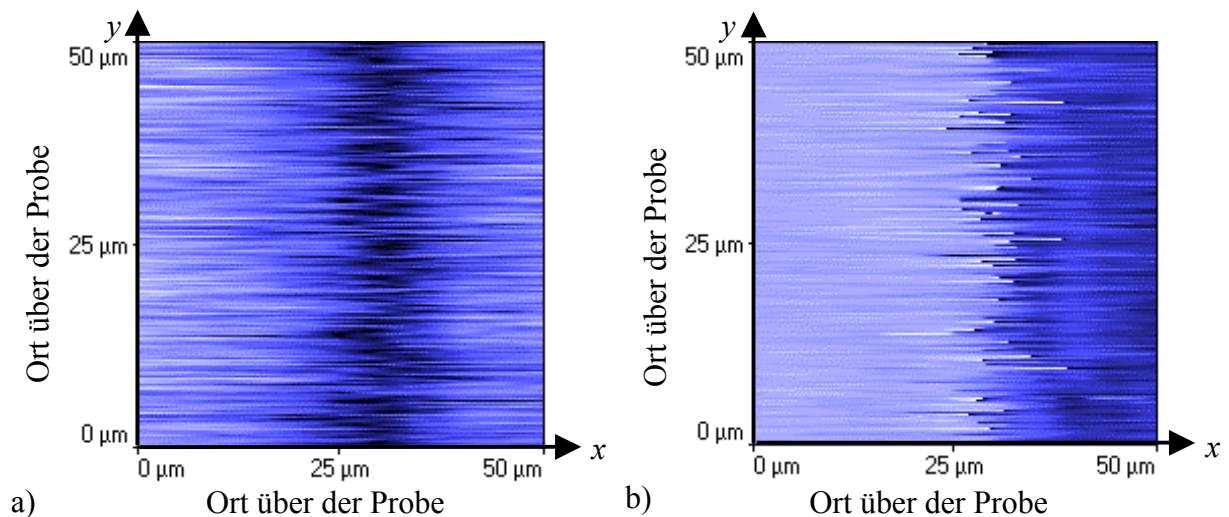
Die Bandbreite dieses Testsystems wird im Folgenden abgeschätzt und messtechnisch evaluiert. Hierbei wird auch auf die unterschiedlichen Empfindlichkeiten bei der Gleichstrommessung und der Hochfrequenzmessung eingegangen. Wie Gleichung 6.8 zu entnehmen ist, tritt eine direkte Begrenzung der Zeitauflösung nicht auf. Praktisch liegt diese in der Größenordnung der technologisch zu realisierenden Signalerzeuger und Signalleiter. In wiefern bereits vorher die frequenzabhängige Kraft  $\vec{F}$  auf die Messspitze derart gering wird, dass sie nicht mehr messbar ist, wurde noch nicht evaluiert.

### **8.3.1 Gleichstrom**

Wie in Kap. 2 bzw. Kap. 5 vorgestellt, hat man unterschiedliche Möglichkeiten, Gleichströme mit dem MKM zu messen. Alle Verfahren sind in der Praxis mit einer Stromauflösungsgrenze

von über  $I=1$  mA zu unempfindlich. Einzige Ausnahme ist die hier entwickelte Testtechnik aus Kap. 5, die es ermöglicht, deutlich kleinere Ströme zu messen. Sie weist jedoch einige Einschränkungen auf. Unter der Annahme, dass die Stromauflösungsgrenze des Testsystems bei der Wechselstrommessung mit Strömen bei der Resonanzfrequenz des Hebelarms bei  $I=2$   $\mu$ A liegt, ergibt sich aus den in Kap. 5 beschriebenen Voraussetzungen (20 % Toleranz der ICs) eine Gleichstromauflösungsgrenze von  $I=10$   $\mu$ A. Selbst bei einem Wechselstromanteil von nur einem Prozent kann ein Gleichstrom von nur  $I=100$   $\mu$ A nachgewiesen werden. Somit liegt die Leistungsfähigkeit dieser Testtechnik bedeutend über der Leistungsfähigkeit der in Kap. 2 vorgestellten Gleichstrommesstechniken.

Zur Verifikation der Leistungsfähigkeit dieses Testsystems wird die in Kap. 5 vorgestellte Probenbeschaltung eingesetzt. Als Testobjekt dient die Leiterbahnstruktur G der ITG-Teststruktur. In Bild 8.7 ist eine Strommessung mit einem Gleichstrom von  $I=30$   $\mu$ A, auf den ein  $I=6$   $\mu$ A Wechselstrom aufmoduliert ist, zu sehen.



*Bild 8.7: Strommessung von  $I=30$   $\mu$ A Gleichstrom an einer  $b_L=2$   $\mu$ m breiten Leiterbahn  
a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung*

Durch Verbesserungen der Empfindlichkeit des Testsystems, sind auch hier Verbesserungen zu erwarten.

#### **8.3.2 Hochfrequenzmessungen**

Die in Kap. 6 vorgestellte hochfrequente Testtechnik ermöglicht erstmals das Messen von Strömen oberhalb der Resonanzfrequenz des Hebelarms. Die Größe der auf die Messspitze wirkenden Kraft  $\vec{F}$  ist nach Gleichung 6.8 frequenzabhängig. Außerdem ist sie um einige



Größenordnungen kleiner als die Kraft, die bei Strommessung in Resonanz zu detektieren ist. Genauere Untersuchungen zur Frequenzabhängigkeit stehen noch aus, so dass zur Zeit keine zuverlässigen Aussagen über die Empfindlichkeit der Hochfrequenzmessungen gemacht werden können. Strommessungen, wie in Bild 6.3 dargestellt, haben jedoch gezeigt, dass bei kleinen Frequenzen von einigen  $f=10$  MHz Strommessungen deutlich unter  $I=1$  mA möglich sind. Wie in Kap. 4 beschrieben, spielt hierbei die Beschichtung der Messsonde eine entscheidende Rolle, die aber noch nicht abschließend untersucht worden ist.

Für die Strommessungen mit Frequenzen über  $f=100$  MHz kann die ITG-Teststruktur aufgrund ihrer hohen Dämpfung bei hohen Frequenzen nicht verwendet werden. Deshalb wird die in Kap. 3 vorgestellte Koplanarleitungs-Teststruktur benutzt. Für die Messungen wird die Ausgangsleistung des HF-Synthesizers mit  $P_{\text{HF}}=15$  dBm, und die Amplitude des zur Modulation verwendeten NF-Signals mit  $U=1,7$  V eingestellt. Diese Grundeinstellungen ermöglichen, Ströme bis zu einer Frequenz von  $f=4,623$  GHz messtechnisch nachzuweisen, wie die Strommessung in Bild 8.8 belegt.

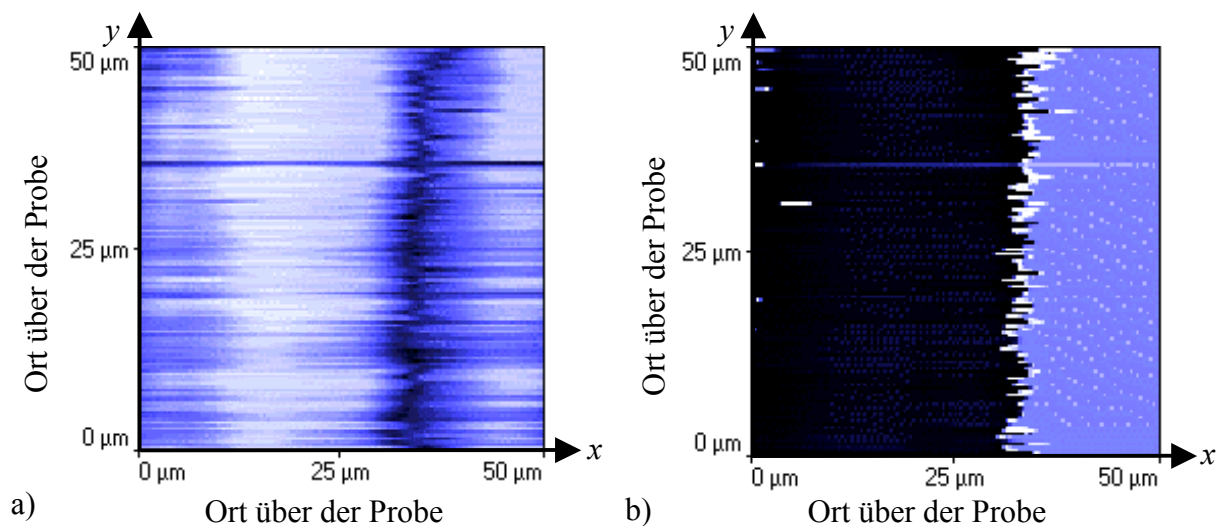


Bild 8.8: *Strommessung mit einer Frequenz von  $f=4,623$  GHz*  
a) Amplitudenverteilung; b) Phasenverteilung

### 8.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Abschätzungen bezüglich der Orts-, Zeit- und Stromauflösung vorgestellt. Man kann davon ausgehen, dass die zur Zeit geltende MKM-Ortsauflösungsgrenze von  $A_{0\text{min}}=10$  nm [Grütter 1990] zu erreichen ist. Die Demonstration

von Strommessungen gelang weltweit erstmalig an Leiterbahnstrukturen mit Breiten von bis zu  $b_L=100$  nm. Die Bandbreite dieser Messtechnik ist theoretisch unbegrenzt. Für die Gleichstrommessung konnte eine neue Messtechnik entwickelt werden, mit der eine Steigerung der Gleichstromauflösungsgrenze um den Faktor 500 gegenüber den Messungen vor Beginn dieser Arbeit zu erreichen ist. Eine Abschätzung, ab welchen Frequenzen Störeinflüsse die Strommessungen zu stark beeinflussen, oder die Größe der Kraft nicht mehr detektierbar ist, ist augenblicklich noch nicht möglich. Messtechnisch konnten hier weltweit erstmalig hochfrequente Strommessungen bis über 4 GHz vorgestellt werden. Auch die Stromauflösungsgrenze dieser Messtechnik, in dieser Arbeit ausschließlich mit kommerziellen Messsonden realisiert, wurde erstmalig mit Messungen im Mikroampere Bereich demonstriert. Noch 1994 galten die hier verwendeten Messsonden als zu unempfindlich für die Strommessung [Campbell 1994].