

Erweiterung des Messverfahrens der Magnetkraftmikroskopie

*J. Körner, T. Mühl, A. Leonhardt, B. Büchner
 Institut für Festkörper- und Werkstofforschung IFW Dresden,
 Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden*

Die Rasterkraftmikroskopie (atomic force microscopy, AFM) ist ein universelles Messverfahren, um die Topographie einer Oberfläche zu erfassen. Darüber hinaus können Kräfte zwischen Messspitze und Probe mit einer hohen Ortsauflösung bestimmt werden. Als eine spezielle Form der AFM untersucht die Magnetkraftmikroskopie (magnetic force microscopy, MFM) das magnetische Streufeld nahe einer Probenoberfläche im Mikro- und Nanometerbereich. Dies findet zum Beispiel Anwendung bei der Untersuchung und Optimierung neuer magnetischer Materialien, insbesondere auch solcher für die Datenspeichertechnik.

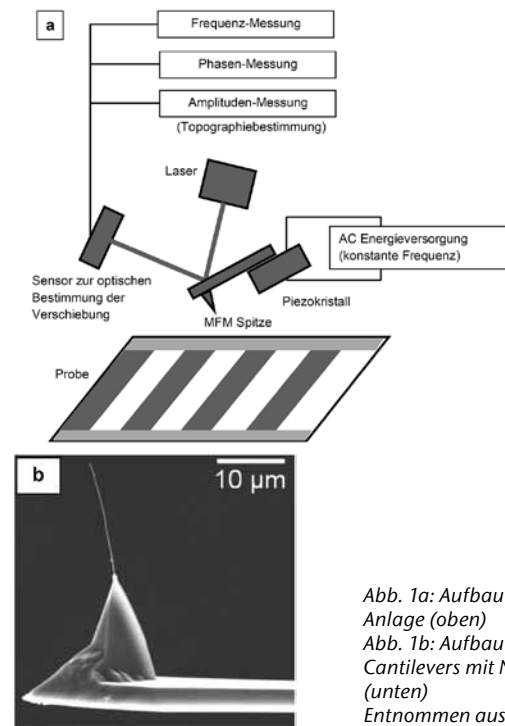
Als Messsonden für die Magnetkraftmikroskopie werden üblicherweise mikro- oder nanoskopische Federbalken (engl.: Cantilever) mit einer ferromagnetisch beschichteten Messspitze am freien Ende eingesetzt. In den vergangenen Jahren wurden alternative MFM-Sonden entwickelt, bei denen die beschichtete Spitze durch Kohlenstoff-Nanoröhren (carbon nanotube, CNT) ersetzt wird. Hierbei werden Nanoröhren verwendet, die mit einem ferromagnetischem Material – beispielsweise Eisen - gefüllt sind. [1] Diese neuartigen Sonden zeichnen sich durch ihre chemische und mechanische Stabilität, durch das definierte magnetische Moment und durch hohe Ortsauflösung aus. Bisher erfolgt die Messung des magnetischen Streufeldes einer Probe meist in z-Richtung (die Richtung senkrecht zur Probenoberfläche), wobei der einseitig eingespannte Cantilever Biegeschwingungen mit Auslenkungen in dieser Richtung ausführt. Wünschenswert ist aber auch eine Erfassung der magnetischen Streufeldkomponenten beziehungsweise von deren Ortsableitungen in der Probenebene, um so eine vollständige Beschreibung der magnetischen Flussdichte zu erreichen. Mit dem hier vorgestellten neuen Sensorkonzept kann genau das realisiert werden. Von Vorteil ist dabei, dass diese Sensoren in herkömmlichen AFM- oder MFM-Anlagen eingesetzt werden können.

Magnetkraftmikroskopie – Messverfahren

Abbildung 1a zeigt den Messaufbau für die Magnetkraftmikroskopie. Der Cantilever wird zu einer vertikalen Biegeschwingung angeregt und zur Aufnahme eines zweidimensionalen Bildes zeilenweise über die Probe geführt. Häufig wird die zeitabhängige Auslenkung des Cantilevers mit Hilfe des Lichtzeigerprinzips gemessen. Dazu wird die Richtung eines von der Rückseite des Cantilevers reflektierten Laserstrahles mit einer Mehrquadrantenphotodiode ausgelesen. Geeignete Auswerteelektronik ermöglicht die Bestimmung von Amplitude, Phasen- und Frequenzverschiebung der Cantilever-Schwingung.

Bei der Magnetkraftmikroskopie werden Messspitzen eingesetzt, die ein magnetisches Moment aufweisen, das mit dem magnetischen Streufeld der Probe interagieren kann. Dies wird zum Beispiel mit einer ferromagnetischen Beschichtung der Messspitze erreicht. Eine andere Möglichkeit

ist die Verwendung von eisengefüllten Kohlenstoff-Nanoröhren (FeCNT), welche sich auf Grund ihrer Eigenschaften (hohes Aspektverhältnis, Schutz der Eisenfüllung durch die Kohlenstoffhülle, monopolartiges Verhalten des magnetischen Momentes) sehr gut für die Messung von magnetischen Streufeldern eignen. [2] Abbildung 1b zeigt einen Cantilever mit einem an der Spitze befestigten FeCNT. Die Schwingungsanregung des Cantilevers erfolgt in vertikaler Richtung und konventionell mit der Frequenz der ersten Eigenschwingung des Biegebalkens. Aus diesem Grund können nur die Ableitungen magnetischer Streufeldkomponenten nach der z-Richtung gemessen werden. Um diese Einschränkung zu beheben und auch Feldgradienten in der Probenebene zu messen, wurde eine modifizierte Messsonde entwickelt. Eine Grundlage dafür sind bestimmte Eigenschaften von Biegeschwingungen höherer Ordnung, die sich unter bestimmten Voraussetzungen mit der Balkentheorie nach Euler-Bernoulli berechnen lassen.[3]



*Abb. 1a: Aufbau einer MFM-Anlage (oben)
 Abb. 1b: Aufbau eines MFM-Cantilevers mit Nanotube (unten)
 Entnommen aus [4] und [1]*

Ein einseitig eingespannter Balken kann zu Biegeschwingungen verschiedener Ordnungen angeregt werden. Damit verbunden sind jeweils unterschiedliche Resonanzfrequenzen. Bisher wird in der Magnetkraftmikroskopie die Biegeschwingung erster Ordnung verwendet. Im Falle einer höheren Biegeschwingungsordnung treten entlang des Balkens sogenannte Knotenpunkte auf. An diesen Punkten erfolgt keine Bewegung in z-Richtung, sondern es bewegt

sich nur die Neigung des Cantilevers – mathematisch ausgedrückt ändert sich im Zeitverlauf periodisch die Ableitung der Auslenkung des Cantilevers nach der Ortskoordinate entlang seiner Länge. Am Knoten führt der Cantilever also nur eine Torsionsschwingung aus. Wird am Ort eines solchen Knotens ein Abstandselement befestigt, transformiert sich die Kippbewegung am Knoten in eine Bewegung des freien Endes des Abstandselementes parallel zur Probenoberfläche (Abbildung 2). Durch Anbringen eines magnetosensitiven Elementes am Abstandselement werden magnetische Messungen ermöglicht.

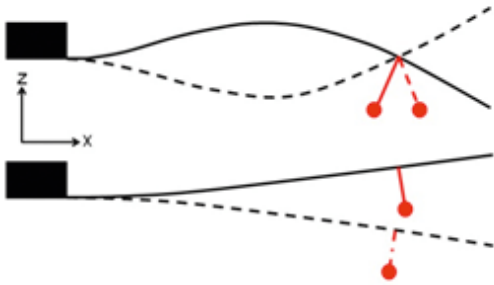


Abb. 2: Anordnung aus Cantilever mit Abstandselement und magnetosensitivem Element. Dargestellt ist die Einhüllende der resonanten Cantileverschwingung; oben: zweite Schwingungsmode; unten: erste Schwingungsmode

Die Herstellung modifizierter Sonden

Als Grundlage für die neuen Messsonden werden handelsübliche Siliziumcantilever ohne Spitze verwendet. Diese besitzen einen trapezförmigen Querschnitt und ein dreieckförmiges freies Ende. Um eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem Modell eines Euler-Bernoulli-Balkens zu erreichen, wird diese dreieckförmige Spitze im fokussierten Ionenstrahl (FIB) entfernt. Anschließend wird durch ionenstrahlunterstützte Abscheidung ein Abstandselement aus Kohlenstoff an der Position des Knotens angebracht. Die zweite Schwingungsmode weist einen Knoten auf, der sich in einem Abstand von etwa 21 % der Cantileverlänge vom freien Ende befindet. Am freien Ende des Abstandselementes wird ein FeCNT angebracht, welches als magnetosensitives Element dient. Das Anbringen wird mit Hilfe eines Mikromanipulatorsystems durchgeführt und das FeCNT mit einer Elektronenstrahl-unterstützten Kohlenstoffabscheidung am Abstandselement befestigt. Anschließend

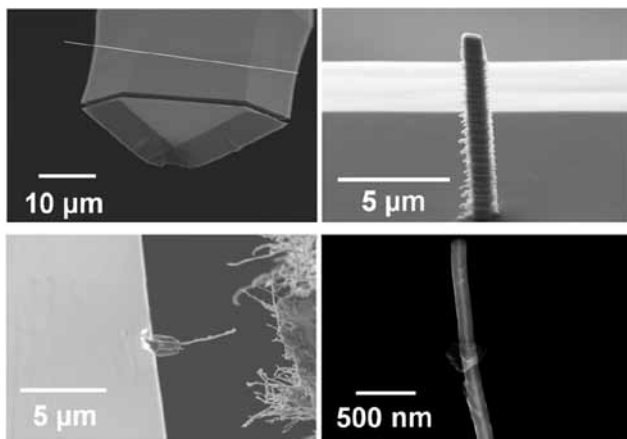


Abb. 3: Herstellung einer modifizierten MFM-Sonde

muss die Eisenfüllung des Nanotubes kontrolliert werden. Es ist wichtig für die Funktion der Sonde, dass die Füllung bis in die Spitze des Nanotubes reicht, damit der effektive Abstand des magnetischen Materials der Sonde zur Probenoberfläche möglichst gering ist. Abbildung 3 zeigt die Herstellungsschritte und Abbildung 4 die modifizierte Messsonde bestehend aus Cantilever, Abstandselement und FeCNT.

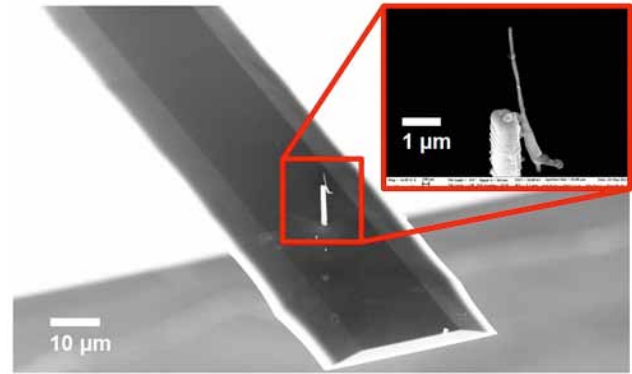


Abb. 4: MFM-Cantilever mit Abstandselement und FeCNT am Ort des Schwingungsknotens der zweiten Mode

Messungen mit der neuen Sonde

Testmessungen in erster und zweiter Schwingungsmode mit der in Abbildung 4 gezeigten Sonde an einer Festplatte (Seagate 5400.6) sind in Abbildung 5 dargestellt. Um zu bestimmen, ob tatsächlich magnetische Streufelder in der Probenebene gemessen werden, werden die Messungen für die Phasenverschiebung mit der ersten und der zweiten Schwingungsmode gegenübergestellt (Abbildung 5).

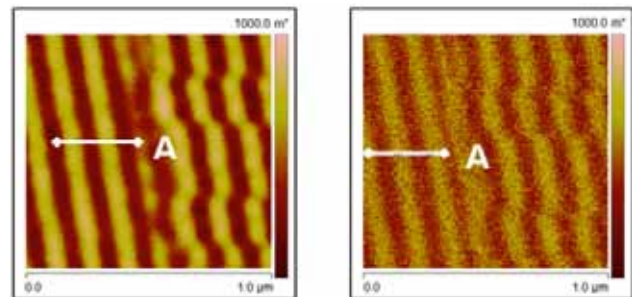


Abb. 5: Phasenverschiebung bei Messung in der ersten Mode (links) und der zweiten Mode (rechts)

Nach der Maxwellgleichung über die Quellenfreiheit der magnetische Flussdichte gilt:

$$\operatorname{div} \vec{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

d.h. wenn die Ableitung der y-Komponente der magnetischen Flussdichte nach der y-Ortskoordinate verschwindet, müssen die Signale in x- und z-Richtung additiv invertiert sein. Die Phasenverschiebung $\Delta\varphi_n$ eines mechanischen Oszillators mit einer daran befestigten monopolarartigen Sonde mit der Polstärke q ist direkt proportional zur Ableitung der magnetischen Flussdichte nach der Ortskoordinate in Schwingungsrichtung:

$$\Delta\varphi_n = \frac{Q_{\text{mode}}}{2 \cdot k_{\text{mode}}} \cdot q \cdot \frac{\partial B_n}{\partial n} \tag{2}$$

Mit n wird die Ortskoordinate entlang der Schwingungsrichtung (z. B. x , y oder z) bezeichnet. Q_{mode} und k_{mode} sind Q-Faktor und effektive Federkonstante, die jeweils abhängig von der Schwingungsmode sind.

Mit der ersten Schwingungsmode wird nun die B-Feld-Ableitung in z -Richtung, mit der zweiten Mode die entsprechende Ableitung in x -Richtung bestimmt. Eine Kalibrierung, d. h. eine Bestimmung von q , k_{mode} und Q_{mode} , erlaubt eine quantitative Messung der entsprechenden B-Feld-Ableitungen. Die Berechnung der modenabhängigen Federkonstanten wird im Rahmen dieses Artikels nicht gezeigt. Sie basiert aber auf der Tatsache, dass die in der elastischen Verformung des Cantilevers gespeicherte mechanische Energie proportional zu dieser Federkonstante und zum Quadrat der Auslenkung des betrachteten Objektes am Schwingungssystem (hier das Ende des Nanotubes) ist.

Eine genauere Betrachtung des in Abbildung 5 untersuchten Probenbereiches zeigt, dass Magnetfeldkomponenten in y -Richtung nur in geringem Maße vorliegen. Anhand der hier nicht gezeigten Topographiebilder wurde für beide Messungen eine Messlinie am selben Probenort ermittelt (A) und die Phasenverschiebung entlang dieser Messlinie bestimmt. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis und es ist deutlich zu erkennen, dass die beiden Signale bis auf einen Vorfaktor additiv invertiert sind. Dies lässt den Schluss zu, dass mit den neuen Sonden tatsächlich Ableitungen der Feldkomponenten in der Probenebene sowie, wie bisher üblich, auch senkrecht dazu messbar sind.

Mit Hilfe von Gleichung (1) kann aus den Messdaten sehr einfach die Ableitung der dritten Komponente der magnetischen Flussdichte bestimmt werden.

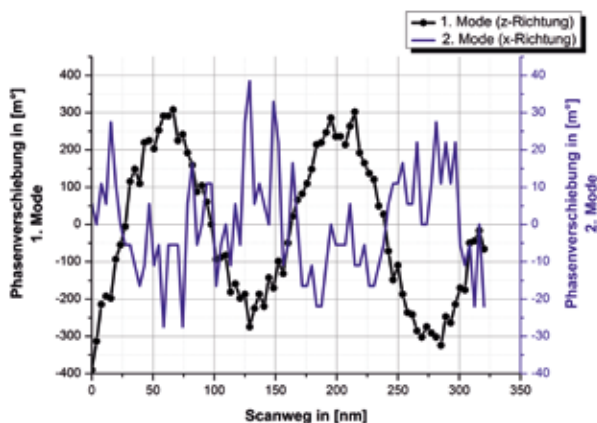


Abb. 6: Phasenverschiebung für Scanlinie A aus Abbildung 5 für die erste und zweite Mode

Die Messungen in Abbildung 6 zeigen außerdem, dass bei Verwendung der in Abbildung 4 gezeigten Sonde die Phasenverschiebung in der zweiten Schwingungsmode um eine Größenordnung kleiner ist als das Signal bei Messung in der ersten Mode. Dies resultiert hauptsächlich aus der höheren Federkonstante, die sich bei Schwingungen höherer Ordnung gegenüber der Federkonstanten der Fundamentalschwingung ergibt. Eine Verringerung der Federkonstanten aller Biegeschwingsordnungen ist möglich durch die Verwendung von längeren Cantilevern sowie Cantilevern mit geringerer Biegesteifigkeit (beispielsweise durch Verringerung von Breite und Höhe). Einen selektiven Einfluss auf die Federkonstante der mit der zweiten Mode verbundenen Schwingung in x -Richtung hat die Länge des Distanzelementes. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Eigenfrequenzen des Abstandselementes über den bei den MFM-Messungen angewandten Frequenzen liegen müssen. Mit anderen Worten, das Abstandselement sollte sich steif verhalten.

Mit der Herstellung der modifizierten MFM-Sonden wird die Möglichkeit eröffnet, magnetische Streufeldableitungen mit derselben Sonde quantitativ in vertikaler und in horizontaler Richtung zu messen.

Die Herstellung dieser neuen Sonden ist aufwendig, aber dennoch beherrschbar. Diese Sonden können in herkömmlichen MFM-Anlagen genutzt werden.

Literatur

[1] F. Wolny, T. Mühl, U. Weissker, K. Lipert, J. Schumann, A. Leonhardt, B. Büchner: *Iron filled carbon nanotubes as novel monopole-like sensors for quantitative magnetic force microscopy*; *Nanotechnology* 21 (2010), 435501

[2] F. Wolny, U. Weissker, T. Mühl, A. Leonhardt, S. Menzel, A. Winkler, B. Büchner: *Iron-filled carbon nanotubes as probes for magnetic force microscopy*; *Journal of Applied Physics* 104 (2008), 064908

[3] Leonard Meirovitch: *Elements of Vibration Analysis*; McGraw-Hill; 1975; S. 206ff

[4] H.Saito, G. Egawa, S. Ishio, Guoqing Li: *Magnetic force microscopy of in-plane magnetic field gradient using transient oscillation*; *Journal of Applied Physics* 103 (2008), 07D921

Julia Körner, eine der Autorinnen dieses Fachbeitrags, erhielt für diese Arbeit den DGZfP-Sonderpreis.

Kontakt:

julia.koerner2k@gmail.com