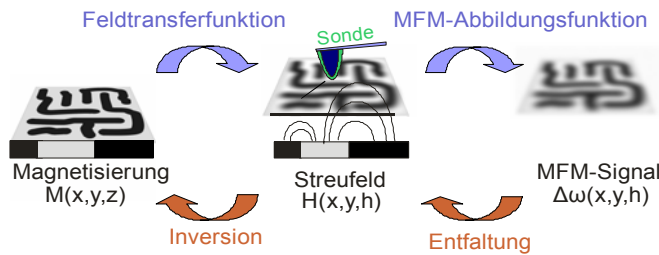


## Quantitative Magnetkraftmikroskopie

Magnetkraftmikroskopie (MFM) ist dank ihrer hohen Ortsauflösung ein wertvolles Werkzeug bei der Abbildung nanoskaliger magnetischer Strukturen. Die Magnetkraftmikroskopie ist streufeldsensitiv und hat eine räumliche Auflösung von ca. 50 nm. Allerdings ist das Verfahren zunächst nicht quantitativ. Die Bestimmung quantitativer Streufeldwerte erfordert eine zusätzliche Inversion der Messdaten. Möchte man auch die Probenmagnetisierung bestimmen, so muss weiterhin eine Inversion der zuvor bestimmten quantitativen Streufeldmessungen erfolgen (Abb. 1).



**Abb. 1:** Abbildungsprozesse bei der Magnetkraftmikroskopie dünner Schichten und Inversionschritte zur Rekonstruktion der Streufeldverteilung und der Probenmagnetisierung

hat eine räumliche Auflösung von ca. 50 nm. Allerdings ist das Verfahren zunächst nicht quantitativ. Die Bestimmung quantitativer Streufeldwerte erfordert eine zusätzliche Inversion der Messdaten. Möchte man auch die Probenmagnetisierung bestimmen, so muss weiterhin eine Inversion der zuvor bestimmten quantitativen Streufeldmessungen erfolgen (Abb. 1).

**Grundlagen der quantitativen Magnetkraftmikroskopie:** Die höchste Messempfindlichkeit des MFM wird bei dynamischen Messungen erreicht, bei denen die Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  oder die Frequenzverschiebung  $\Delta f$  des schwingenden MFM-Cantilevers gemessen wird. Die Frequenzverschiebung  $\Delta f$  ist proportional zu dem Gradienten der Kraft, die auf die Spitze in dem Streufeld der Probe wirkt. Jede reale Spitze hat eine endliche räumliche Ausdehnung und eine über das Spitzenvolumen ausgedehnte Magnetisierungsverteilung. Die Kraft  $\mathbf{F}$  auf die Spitze ergibt sich deshalb nicht aus einer lokalen Wechselwirkung, sondern aus einem Integral über den aktiven Bereich der Spitze. Die Magnetisierung der Spitze kann über ihre Dipolmomentdichte  $\mathbf{M}^{Spitze}$  beschrieben werden. Die verwendeten Koordinatensystem sind der Abb. 2 zu entnehmen,  $h$  ist die Messhöhe. Damit ergibt sich:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, h) = \int_{Spitze} \mathbf{H}_z^{Probe}(\mathbf{r} + \mathbf{r}', h + h') \cdot \nabla \cdot \mathbf{M}^{Spitze}(\mathbf{r}', h') d\mathbf{r}' dh'$$

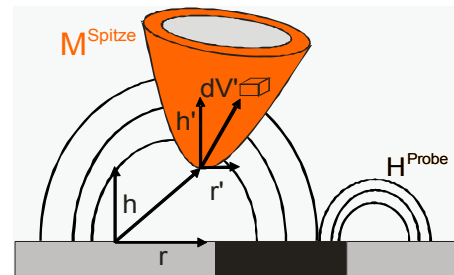
Dieser Zusammenhang stellt ein Fredholm-Integral 1. Ordnung dar. Um quantitative Streufeldmessungen zu bekommen, muss eine Inversion dieses Integrals erfolgen.

Es lässt sich zeigen, dass sich dieser Zusammenhang weiter in eine Faltung des Streufeldgradienten mit einer nur von den Eigenschaften der Spitze abhängigen Funktion überführen lässt. Dazu wird die Faltung durch 2D-Fouriertransformation der Koordinaten in der Messebene,  $(\mathbf{r}, h) \rightarrow (\mathbf{k}, h)$ , in eine Produktform überführt. Man erhält schließlich einen Zusammenhang der Form:

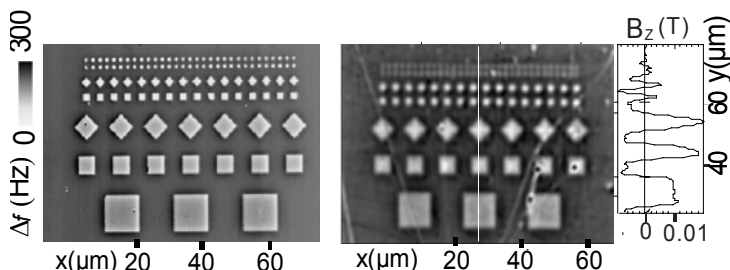
$$\tilde{\mathbf{F}}_z(\mathbf{k}, h) = \text{FTF}(\mathbf{k}) \cdot \tilde{\mathbf{H}}_z^{Probe}(\mathbf{k}, h)$$

wobei FTF, die „Force Transfer Function“, die Abbildungsfunktion darstellt. Diese Funktion lässt sich durch Referenzmessungen an geeigneten Kalibrierproben bestimmen. Sobald die FTF ermittelt wurde, lassen sich beliebige Streufelder quantitativ und ortsaufgelöst vermessen. Die Implementierung des beschriebenen Verfahrens und die Herstellung geeigneter Kalibrierproben sind Bestandteil der aktuellen Arbeiten.

Erste **Kalibrierproben** wurden zusammen mit der Universität Göttingen entwickelt. Dazu wurden hartmagnetische Schichten (FePt, CoPt) mittels Elektronenstrahlolithographie (PTB, AG 2.44) strukturiert. Das Streufeld der Schichten wurde an der Uni Göttingen mit einem Indikatorfilm gestützten magnetooptischen Verfahren (MOIF) quantitativ vermessen [1]. Die MOIF erreicht Ortsauflösungen bis 300 nm. Daraus kann anschließend das Streufeld in der Messhöhe des MFM bestimmt werden.



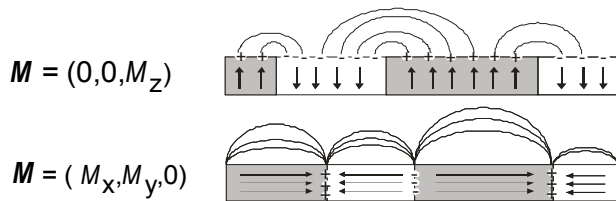
**Abb. 2:** Magnetisch beschichtete Spitze (Magnetisierung  $\mathbf{M}^{Spitze}(\mathbf{r}', h')$ ) im Streufeld der Probe  $\mathbf{H}^{Probe}(\mathbf{r}, h)$



**Abb. 3:** links: Magnetkraftmikroskopisches Bild einer strukturierten FePt-Probe (Schichtdicke 50 nm, Messhöhe 100 nm) rechts: Streufeldverteilung der gleichen Probe, bestimmt aus MOIF-Messungen, ebenfalls für eine Höhe von 100 nm über der Probe

Diese quantitativen Streufelddaten können dann mit der MFM-Abbildung verglichen werden, Abb.3.

Möchte man auch die Magnetisierung der Proben bestimmen, so muss zusätzlich eine **Strefeldinversion** erfolgen: Die Bestimmung von Magnetisierungsverteilungen stellt mathematisch



**Abb. 4:** Schematische Darstellung von senkrecht zur Filmebene und in der Filmebene magnetisierten Schichten und der zugehörigen Streufeldverteilung

ein schlecht gestelltes Inversionsproblem dar, d.h. es ist im Allgemeinen keine eindeutige Lösung anzugeben. Für dünne Schichten lassen sich jedoch in bestimmten Fällen, für bestimmte Randbedingungen, eindeutige Lösungen finden. Bisher war in der Literatur nur für Schichten mit senkrechter Magnetisierung ein Lösungsverfahren bekannt [2]. Jetzt konnte, in Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen, auch für den Fall von Schichten, bei der die Magnetisierung in der Filmebene

liegt, ein Lösungsverfahren angegeben werden. [3]. Die beiden Fälle sind in Abb. 4 verdeutlicht. Voraussetzung für beide Verfahren ist eine senkrecht zur Filmebene homogene Magnetisierung. Diese Bedingung ist für dünne Schichten im Allgemeinen gut erfüllt.

Literatur:

- [1] Ch. Jooss, J. Albrecht, H. Kuhn, H. Kronmüller, and S. Leonhardt, *Magneto-optical studies of current distributions in high Tc superconductor*, Rep. Prog. Phys. **65**, 651 (2002)
- [2] H. J. Hug, B. Stiefel, P. J. A. van Schendel, A. Moser, R. Hofer, S. Martin, and H.-J. Güntherodt, J., *Quantitative magnetic force microscopy on perpendicularly magnetized samples*, Appl. Phys. **83**, 5609 (1998)
- [3] S. Dreyer, J. Norpoth, and C. Jooss, S. Sievers and U. Siegner, V. Neu, T. H. Johansen, *Quantitative imaging of stray fields and magnetization distributions in hard magnetic element arrays*, J. Appl. Phys. **101**, 083905 (2007)