

## Dipolare magnetische Wechselwirkungen in Gittern hartmagnetischer Dots

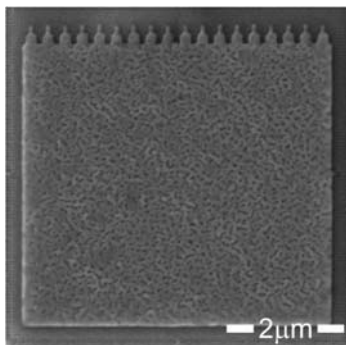
Auf Grund der großen Fortschritte in der Entwicklung hochpräziser Strukturierungs- und Fertigungstechniken wurde der Magnetismus nanoskaliger Strukturen in den letzten Jahren zum Gegenstand intensiver Forschung. Von besonderem technologischen Interesse sind reguläre Anordnungen magnetischer Elemente in einem zweidimensionalen Gitter. Solche Anordnungen sind interessant für die Entwicklung von Speicherelementen (*Patterned Media und MRAM*) und hochintegrierten magnetoelektronischen Bauelementen.

Geht man zu immer kleineren Strukturgrößen über, so vergrößert sich das Verhältnis von Oberfläche zum Volumen, und Oberflächenbeiträge zur magnetischen Anisotropie gewinnen erheblich an Gewicht. Im Falle von benachbarten Elementen kommt außerdem den von den magnetischen Oberflächenpolen erzeugten Streufeldern eine besondere Bedeutung zu.

In solchen Gittern beschränkt sich der Streufeldeinfluss der Oberflächenpole nicht allein auf die magnetische Momentverteilung innerhalb einzelner Elemente, vielmehr vermitteln die Streufelder auch eine magnetostatische Wechselwirkung (MSW). Mit abnehmendem Abstand der benachbarten Elemente gewinnt die MSW zunehmend an Bedeutung, wodurch es zu einem Übergang von einem individuellen Verhalten einzelner Elemente zu einem kollektiven Verhalten des Ensembles kommen kann. Dabei ist die Rolle dieser MSW in Konkurrenz bzw. im Zusammenwirken mit anderen Wechselwirkungen bis heute noch wenig verstanden.

Ein Verständnis der magnetischen Eigenschaften von wechselwirkenden Elementen in Gitteranordnung ist deshalb sowohl aus fundamentalen wie auch aus Anwendungs-Gesichtspunkten von großer Bedeutung. Einige aktuelle Ergebnisse, die zusammen mit der AG Jooß an der Universität Göttingen erzielt wurden, werden im Folgenden vorgestellt.

### Einfluss von Kantenrauigkeiten

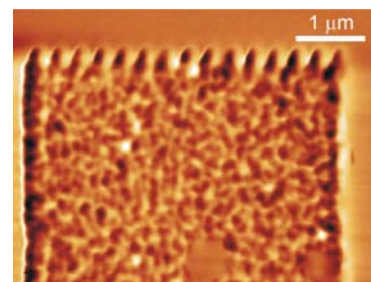


**Abb. 1:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  großen FePt-Struktur mit künstlicher Kantenrauigkeit (FIB, Uni Göttingen).

Bei der Herstellung magnetischer Nanostrukturen lassen sich prozessbedingte Kantenrauigkeiten im Allgemeinen nicht vermeiden. Um die Rolle derartiger Rauigkeiten zu verstehen, wurden hartmagnetische Dünnschichtstrukturen mit künstlichen Kantenrauigkeiten versehen. Dazu wurden FePt-Filme mit einer leichten Achse senkrecht zur Substratebene mittels Sputterdeposition aufgewachsen und anschließend mittels Focused Ion Beam (FIB) strukturiert. Die Streufeldverteilung und das Schaltverhalten wurde mit einer magnetooptischen Indikatorfilmtechnik (MOIF) und Magnetkraftmikroskopie (MFM) untersucht. Durch die hohe magnetokristalline Anisotropie des magnetischen Materials haben die Strukturen auch im remanenten Zustand eine hohe Dichte magnetischer Oberflächenladungen. Dadurch treten signifikante magnetische Streufelder auf. Die vorgestellten Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf den Vergleich der

Entmagnetisierungsfelder im Inneren der Strukturen an Kanten mit und ohne künstliche Sägezahnrauigkeit. Die Entmagnetisierungsfelder wurden mit einer magnetostatischen Simulationssoftware bestimmt. Es zeigt sich, dass die Entmagnetisierungsfelder durch Kantenrauigkeiten beträchtlich verändert werden. Im Bereich der Sägezahnstruktur ist das Entmagnetisierungsfeld herabgesetzt. Legt man jetzt ein zusätzliches äußeres Feld an, so addieren sich Entmagnetisierungsfeld und äußeres Feld. Ummagnetisierungsfelder sind im Bereich der Rauigkeiten deshalb effektiv abgeschwächt. Dies führt dazu, dass die treibenden Kräfte für die Keimbildung von Umkehrdomänen im Bereich der Rauigkeiten niedriger sein sollten als an glatten Kanten und im Innern der Struktur. Dies konnte mit MOIF- und MFM-Untersuchungen bestätigt werden.

Der Ummagnetisierungsprozess in den FePt-Strukturen



**Abb. 2:** MFM-Abbildung eines  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  FePt-Quadrats, bei dem die obere Kante künstlich strukturiert wurde

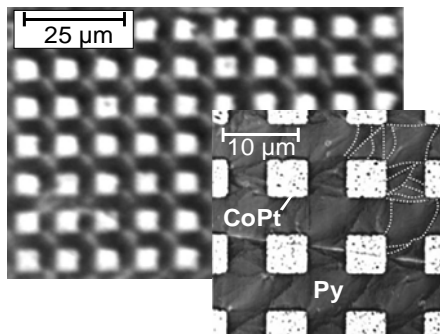
wird durch eine Nukleation von Umkehrdomänen vermittelt. Das MFM-Bild in Abb. 2 wurde im remanenten Zustand der Probe aufgenommen, nachdem die Probe zunächst bis in Sättigung aufmagnetisiert worden war und dann ein Gegenfeld von 1.3 T angelegt wurde. Während im Innern der Struktur und an den nicht gezackten Rändern helle Umkehrdomänen zu erkennen sind, sind die Zackenstrukturen noch im Ausgangszustand (dunkel).

Literatur:

J. Norpoth, S. Dreyer, Ch. Jooss, and S. Sievers, *Manipulating the dipolar magnetic interactions in FePt square arrays: the role of edge roughness*, J. Appl. Phys. **101**, 09F518 (2007)

## Modifikation magnetostatischer Wechselwirkungen in Gittern

Magnetostatische Wechselwirkungen zwischen den Elementen magnetischer Arrays beeinflussen das Schaltverhalten einzelner Elemente und können zu kollektiven Effekten führen. Um solche



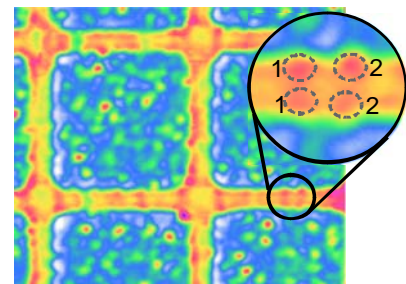
**Abb. 3:** MOIF- (links) und MFM- (rechts) Abbildungen eines Gitters aus CoPt-Quadraten (Elementgröße 5 µm, Abstand 5 µm) nach Sättigung und Anlegen eines Gegenfeldes (400 mT)

Wechselwirkungen zu untersuchen, wurden 2-dimensionale Gitter hartmagnetischer CoPt-Quadrate in eine Permalloy- (Py-) Matrix eingebettet. Die Herstellung erfolgte mittels eines mehrstufigen Elektronenstrahlolithographischen Prozesses. Die Strukturen wurden mit Magnetoptik und Magnetkraftmikroskopie untersucht.

Die hartmagnetischen Quadrate sind untereinander und mit der Matrix nur durch magnetostatische Wechselwirkung (MSW) gekoppelt, eine Austauschkopplung tritt nicht auf. Durch die MSW zwischen Matrix und den hartmagnetischen CoPt-Elementen wird die Domänenstruktur des Permalloy modifiziert. So konnte gezeigt werden, dass nach Aufmagnetisieren der Strukturen und Anlegen von unterschiedlichen Gegenfeldern sich eine

langreichweitige symmetriebrechende Ordnung ausbilden kann. Dies ist in der MOIF-Aufnahme in Abb. 3 zu sehen. Zwischen den CoPt-Quadraten bilden sich in der Py-Matrix diagonale Domänenstrukturen aus, die als weiße Streifen zu erkennen sind. Die hochauflösende MFM-Aufnahme zeigt eine Ausschnittsvergrößerung der in der MOIF-Aufnahme gezeigten Struktur. Die Domänenstruktur wird im Detail aufgelöst. In den Diagonalen zwischen den CoPt-Quadraten lassen sich rautenförmige Domänen erkennen, während horizontal und senkrecht zwischen den Quadraten Streifendomänen auftreten.

Bei kleineren Abständen zwischen den Quadraten wechselwirken diese auch untereinander. Dies führt zu kurzreichweitigen Korrelationen von Kantendomänen benachbarter Quadrate. Abb. 4 zeigt eine MFM-Aufnahme von 5 µm-großen Quadraten mit 1 µm Abstand. Die Strukturen wurden zunächst aufmagnetisiert, was in der gewählten Farbdarstellung einer gleichmäßigen Blaufärbung entspräche. Nach Anlegen eines Gegenfeldes entstehen im Innern und an den Kanten der Strukturen Umkehrdomänen (rot). Die Ausschnittsvergrößerung zeigt exemplarisch, dass solche Domänen sich häufig gegenüberliegen. Weitergehende Korrelationsanalysen zeigen eine signifikante erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine derartige induzierte Keimbildung von Domänenpaaren.



**Abb. 4:** MFM-Abbildungen eines Gitters aus CoPt-Quadraten (Elementgröße 5 µm, Abstand 1 µm) nach Sättigung und Anlegen eines Gegenfeldes von 400 mT

Die dargestellten Untersuchungen sollen zu einem grundlegenden Verständnis der magnetostatischen Wechselwirkungen in nanoskaligen magnetischen Strukturen beitragen. Langfristig kann dies dazu dienen, industrielle Anwender nanostrukturierter magnetischer Materialien in die Lage zu versetzen, funktionale magnetische Materialien maßzuschneidern.

Literatur:

S. Schnittger, S. Dreyer, Ch. Jooss, S. Sievers, and U. Siegner, *Magnetostatic interactions in patterned CoPt films embedded in a permalloy matrix*, Appl. Phys. Lett. **90**, 042506 (2007)