

## **”Nanostrukturierte Ferromagnete: Neue Materialien für die Magnetelektronik” im Rahmen des Förderschwerpunkts "Elektronische Korrelation und Magnetismus"**

### **Schlussbericht zum Teilprojekt**

”Charakterisierung der magnetischen und strukturellen Eigenschaften mit dem X-MCD Effekt”

### **Projektleiter**

Prof. Dr. Gisela Schütz-Gmeineder  
Max-Planck-Institut für Metallforschung  
Heisenbergstrasse 1  
70569 Stuttgart  
Tel: 0711 689 1950 (-1911 Sekr.)  
Fax: 0711 689 1912  
email: sekr.schuetz@mf.mpg.de

### **I.1 Aufgabenstellung**

Die Aufgabe dieses Teilprojektes bestand in der Bestimmung der Magnetisierungsverteilung auf einer Nanometerskala und die Untersuchung des magnetischen Schaltverhaltens von nanostrukturierten Ferromagneten mit Hilfe des zirkularen magnetischen Röntgendifferenzmagnetismus (X-MCD). Damit sollten neue Einblicke in den Mikromagnetismus dieser Systeme gewonnen werden, die dazu dienen, Materialeigenschaften im Hinblick auf neuartige Anwendungen in der Magnetelektronik zu optimieren.

### **I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Der Antragsteller besaß bereits zu Beginn des Projektes eine langjährige Expertise für Experimente zum X-MCD sowohl im harten als auch weichen Röntgenbereich (Magnetische XANES und EXAFS, Streuung). Die magnetische Transmissionmikroskopie wurde ebenfalls in der AG des Antragstellers erstmals dokumentiert und in der Zwischenzeit als unverzichtbare und leistungsfähige Methode etabliert.

Daneben waren die Expertisen der beteiligten Gruppen (AG Bayreuther, AG Weiss (U Regensburg) und AG Kirschner (MPI Halle)) entscheidende Faktoren, um einen raschen und umfassenden Erfolg des Gesamtprojektes sehr wahrscheinlich erscheinen zu lassen. Insbesondere diese Verdichtung von herausragenden Kompetenzen (Probenpräparation und Charakterisierung mit komplementären Methoden) innerhalb einer zentralen Fragestellung prägten den erfolgreichen Verlauf des Projektes.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Bei der Charakterisierung der magnetischen und strukturellen Eigenschaften mit den X-MCD Effekt wurde besonderer Wert darauf gelegt, das Potenzial der M-TXM zur Abbildung magnetischer Bereichstrukturen in vollem Umfang auszunützen. Die Möglichkeit, während der auch zum jetzigen Zeitpunkt noch andauernden Aufbauphase des dedizierten M-TXM bei BESSY II am XM-1 in Berkeley CA /USA umfangreiche Experimente (größtenteils auch mit großzügiger finanzieller Unterstützung von US Seite) durchzuführen, diente nicht nur dazu, den zu Beginn des Vorhabens ausgesprochenen kassenwirksamen Meilenstein aus dem Weg zu räumen, sondern erlaubte es, weitere Möglichkeiten der M-TXM Methode (größerer Energiebereich, in-plane Messungen, höhere Felder) zu realisieren.

Um eine aussagekräftige Vorcharakterisierung der hergestellten Proben zu gewährleisten, wurde im Rahmen des Projektes eine Kerranlage zur Bestimmung der Hysteresekurven aus Mitteln des Projektträgers aufgebaut. Die Flexibilität des Konzeptes dieses Aufbaus ermöglicht eine Erweiterung zu einem Kerrmikroskop, das ebenfalls für komplementäre Untersuchungen dienen soll. Aus personellen Gründen ist dieser Aufbau derzeit noch nicht abgeschlossen.

In-situ Messungen der Hysterese am Synchrotron sind in der Zwischenzeit auch mit dem X-MCD Effekt an sich möglich geworden und werden umfangreich angewendet.

Die zum Ende des Vorhabens ausserhalb des Projektes in unserer AG gewonnenen Erkenntnisse zur magnetischen Reflektometrie zeigen, dass das methodische Potenzial der Anwendungen des X-MCD-Effekte noch längst nicht ausgeschöpft ist und für zukünftige noch offenen Fragestellungen (Grenzflächencharakterisierungen) berechnete Hoffnungen bestehen, diese experimentell zu beantworten.

### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Forschung zu Beginn des Vorhabens**

Der zirkulare magnetische Röntgenschwächung (X-MCD) hat sich als moderne Methode zur Untersuchung des Magnetismus auf einer Nanometerskala etabliert. Im Rahmen dieses Teilprojektes stand die Charakterisierung der Magnetisierungsverteilung und das magnetische Schaltverhalten von nanostrukturierten Ferromagneten im Vordergrund, was von enormen Interesse bei der Entwicklung mikro- und nanostrukturierter Ferromagnete ist, da deren magnetisches Verhalten in hohem Maße durch die magnetische Feinstruktur auf einer Submikrometerskala bestimmt wird.

Insbesondere an den L-Kanten der technisch bedeutsamen 3d Übergangselemente (TM), an denen magnetische Kontraste von bis zu 50% auftreten, läßt sich mit X-MCD Methoden die lokale magnetische Struktur auf einer atomaren Skala bestimmen, wobei die sog. Summenregeln eine quantitative Information bezüglich der Spin und Bahn polarisation ermöglichen.

In Kombination mit einem hochauflösenden Transmissions-Röntgenmikroskop (Magnetische TXM = M-TXM) (Auflösung derzeit 25nm) kann man element-selektiv (durch Wahl der Photonenenergie) und quantitativ (durch die Relation des Kontrastes zu magnetischen Momenten) das Verhalten magnetischer Domänen insbesondere in angelegten Magnetfeldern abbilden, womit das Schaltverhalten magnetischer Mikrostrukturen im Detail studiert werden kann. Der X-MCD Effekt ist

magnetischer Mikrostrukturen im Detail studiert werden kann. Der X-MCD Effekt ist sensitiv auf die Komponente der Magnetisierungsrichtung entlang der Photonenausbreitungsrichtung und erlaubt daher eine Unterscheidung von in-plane und out-of-plane Komponenten der Magnetisierung. Die Messung in Transmission erfordert auf Grund der begrenzten Durchdringungsfähigkeit weicher Röntgenstrahlung (z.B. Fe L-Kanten bei 706, bzw. 719 eV) eine besonders sorgfältige Wahl der Substrate, auf denen die zu untersuchenden Proben präpariert werden sollten.

Komplementäre Mikroskopietechniken, wie Lorentz-TEM, SEMPA, MFM und Rasterhallmikroskopie, sind daher für eine vollständige Information, bzw. einer Interpretation der gewonnenen Ergebnisse von großer Bedeutung (TP Bayreuther, Kirschner) und standen in den anderen Teilprojekten zur Verfügung. (TP Bayreuther, Weiss).

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Eine enge Zusammenarbeit mit den am Gesamtprojekt beteiligten Arbeitsgruppen war für die erfolgreiche Umsetzung der Arbeitsziele von entscheidender Bedeutung. So wurden die strukturierten Proben zum überwiegenden Teil in der AG Bayreuther und AG Weiss hergestellt. Die Ergebnisse zu den Bereichsstrukturen, die in der AG Kirschner gewonnen worden sind, wurden in den regelmäßigen Arbeitstreffen intensiv auf Komplementarität mit den eigenen Ergebnissen geprüft.

## **II Darstellung der Ergebnisse im Vergleich mit den Vorhabenszielen**

### **II.1 Ferromagnetische Einzelschichten**

#### **II.1.1 Fe-Schichten**

Durch thermische Verdampfung wurden auf kommerziell erhältlichen 100nm dünnen und 3x3mm<sup>2</sup> großen Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Membranen dünne (35-50nm) Fe-Schichten hergestellt, die zum Korrosionsschutz zwischen 3-6nm dünne Cr Schichten präpariert worden sind. Die M-TXM Messungen wurden an der ALS an den Fe L<sub>3/2</sub> Kanten bei 706 und 719 eV durchgeführt. Zur Detektion der in-plane Komponenten wurde die Probe um 30 Grad senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gedreht. Das erhaltene Domänenmuster zeigt für in-plane Systeme charakteristische Strukturen (s. Abb. 1). Die beobachtete Kontrastumkehr zwischen der L<sub>3</sub> und der L<sub>2</sub> Kante belegt eindeutig den magnetischen Charakter der beobachteten Domänenmuster.

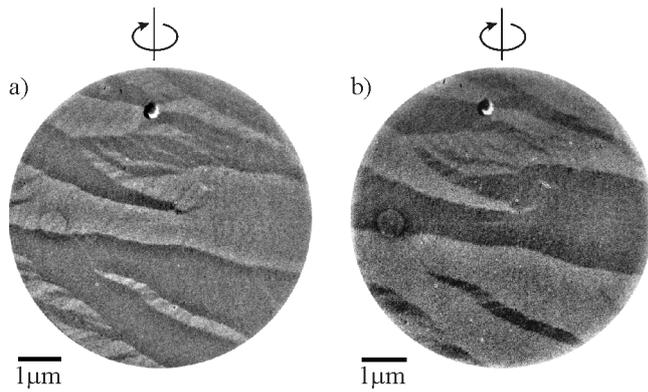


Abbildung 1. M-TXM Aufnahmen an der Fe  $L_3$  Kante von in-plane magnetisierten Fe Schichten.

Messungen in angelegten Magnetfeldern erlauben ein detailliertes Studium des Umschaltverhaltens. So läßt sich aus der Stärke des Signals (Graukontrast = Projektion der Magnetisierung) unterscheiden, ob die sich Magnetisierung dreht oder eine Wandverschiebung stattfindet, um ein Umklappen zu ermöglichen, oder ob eine Kombination beider Prozesse vorliegt. (Abb. 2)

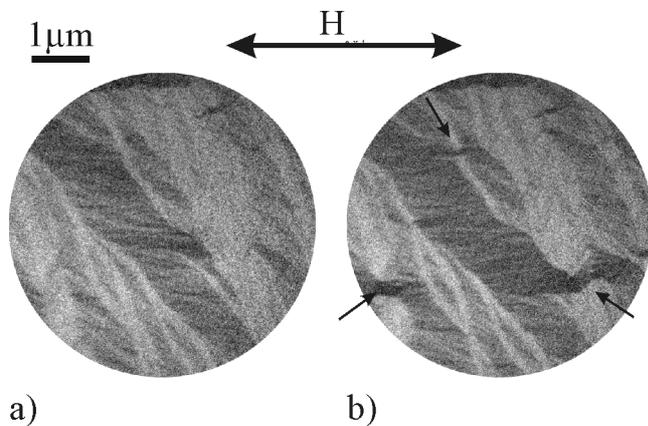


Abbildung 21. M-TXM Aufnahmen an der Fe  $L_3$  Kante von in-plane magnetisierten Fe Schichten in veränderlichen äußeren Feldern.

Mit diesen Untersuchungen konnte demonstriert werden, daß die M-TXM Methode geeignet ist, mit hoher lateraler Auflösung die magnetische Domänenstruktur technologisch aktueller Dünnschichtsysteme abzubilden.

### II.1.2 Fe/Au Systeme

Umfangreiche Messungen fanden an epitaktisch gewachsenen Viellagenschichtsystemen aus Fe und Au (001) statt. Die Herstellung dieser Systeme erfolgte mittels Molekularstrahlepitaxie auf ein  $n^+$  dotiertes GaAs (001) Substrat, auf dem eine 6ML Keimschicht aus Fe sowie eine Pufferschicht aus 20nm Au(001) aufgebracht wurde, bevor 130 Doppellagen aus 1.5MLFe und 1ML Au präpariert wurden. Als Abdeckschicht dienten 14 ML Au(001). Nach der Herstellung dieses Systems wurde durch laserinduziertes Ätzen rückwärts durch das Substrat eine Membran freigelegt, sodaß die Experimente in Transmission durchgeführt werden konnten.

Die M-TXM Aufnahmen wurden wiederum an der Fe  $L_3$  Kante durchgeführt (Abb.3 Mitte). Dabei konnten sehr feine Streifendomänen mit einer Breite von etwa 50nm und einer Periodizität von 127 nm beobachtet werden.

An diesen Systemen konnten auch komplementäre Mikroskopieaufnahmen mittels MFM und Lorentzmikroskopie durchgeführt werden (s. Abb. 3 links bzw. rechts). Während die MFM Bilder ver-

gleichbare Domänenmuster wie die M-TXM Aufnahme zeigen, werden in den korrespondierenden Lorentzaufnahmen abweichende Domänenmuster beobachtet. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, daß beim Einbringen der Probe in das TEM der magnetische Zustand der Probe durch Magnetfelder, die durch die Optik erzeugt werden, derart verändert worden ist, daß er nicht mehr identisch zum magnetischen Zustand unter Präparationsbedingungen ist. Es ist zu bemerken, daß die Aufnahme im Lorentzmikroskop eine Kippung der Probe erforderte, um die Magnetisierungskomponente senkrecht zur Probenoberfläche abzubilden. Diese Ergebnisse verdeutlichen aber weiterhin, daß die komplementären Untersuchungen am M-TXM, Lorentzmikroskop und am MFM mit identisch präparierten Proben untersucht werden können.

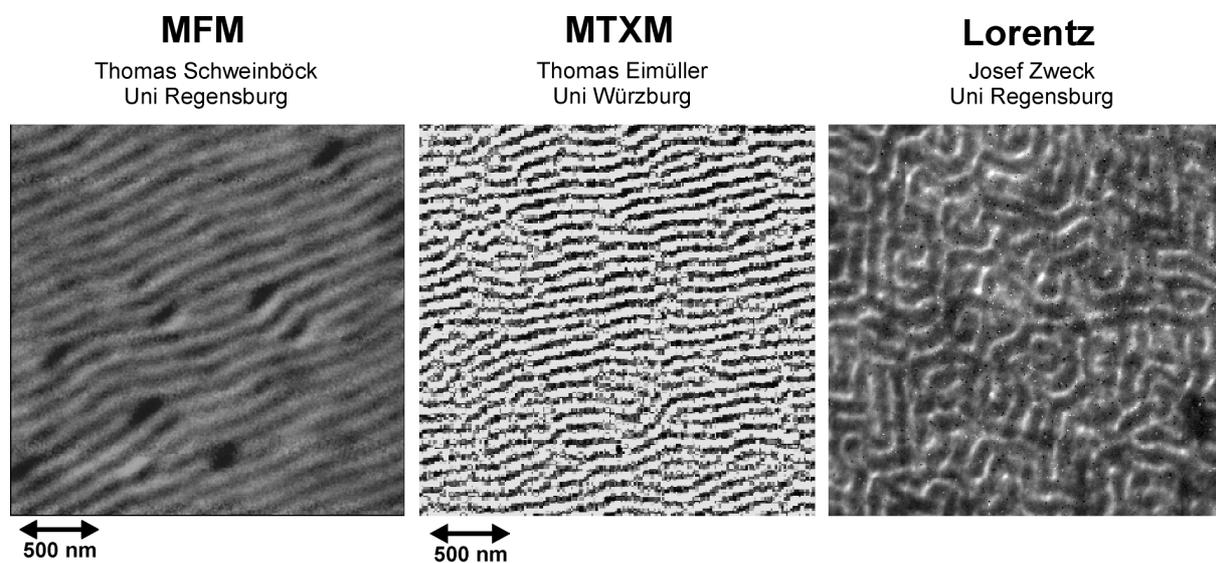


Abb. 3 Vergleich der magnetischen Domänen in einem (1ML Fe/1ML Au) $\times$ 130 Vielschichtsystem aufgenommen mittels Magnetkraftmikroskopie (links), MTXM (mitte), bzw. Lorentzmikroskopie (rechts).

## II.2 Untersuchung der Domänenstruktur in strukturierten Schichtsystemen

### II.2.1 Fe/Gd Systeme

In die mit DC Magnetronspattern hergestellten Schichten aus 75 Doppellagen (0.45nmFe/0.46nmGd) wurden mittels Ionenstrahlätzen Streifen mit 1 $\mu$ m und 2  $\mu$ m Periode, sowie Dots mit einer Periode von 2  $\mu$ m strukturiert. Die magnetische Vorcharakterisierung der unstrukturierten Systeme fand mit einem AGM in Regensburg statt. Die M-TXM Messungen wurden an der Fe L<sub>3</sub> Kante bei 706 eV durchgeführt. In den Dot-Strukturen konnte mit feldabhängigen Messungen erstmals das kollektive Schalten mehrerer Dots beobachtet werden. Darüberhinaus wurde die magnetische Domänenstruktur innerhalb der einzelnen Dots abgebildet. Die folgende Abbildung 4 verdeutlicht dieses interessante Verhalten.