

## **”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 Röntgendifferenzdichroismus (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 Transmissionsmikroskopie 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 Röntgendiffraktion (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> Mebranen 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.

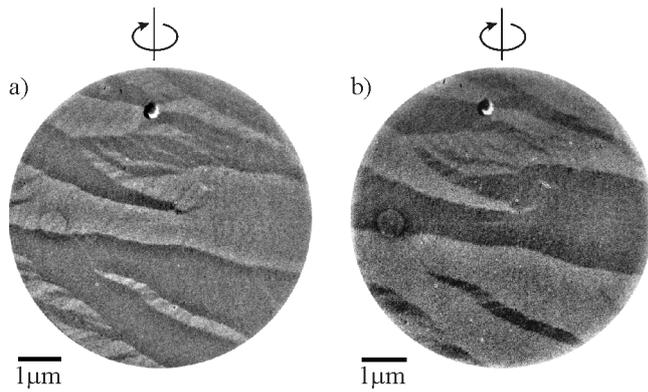


Abbildung 1. M-TXM Aufnahmen an der Fe  $L_3$  Kante von in-plane magnetisierten Fe Schichten.

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)

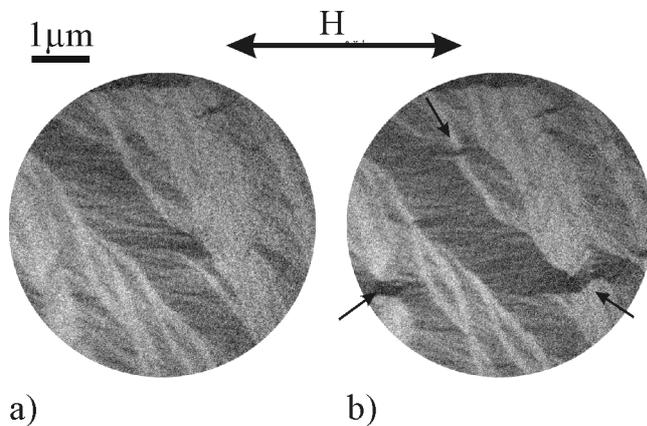


Abbildung 21. M-TXM Aufnahmen an der Fe  $L_3$  Kante von in-plane magnetisierten Fe Schichten in veränderlichen äußeren Feldern.

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 gewachsenenen 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.

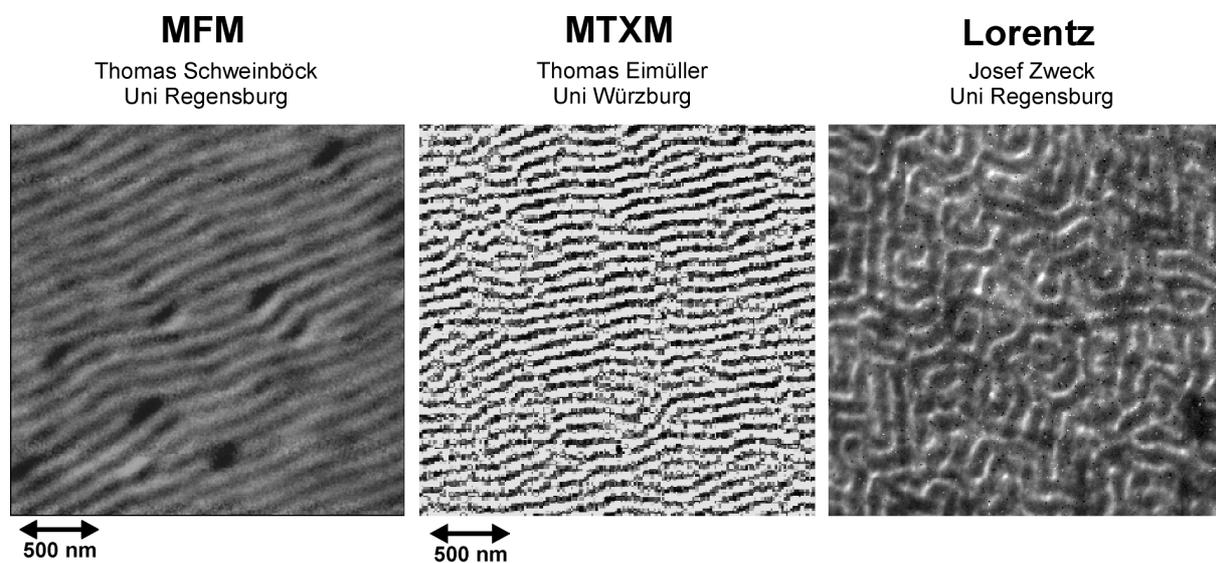


Abb. 3 Vergleich der magnetischen Domänen in einem (1ML Fe/1ML Au) $\times$ 130 Vielschichtsystem aufgenommen mittels Magnetkraftmikroskopie (links), MTXM (mitte), bzw. Lorentzmikroskopie (rechts).

## 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  $L_3$  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.

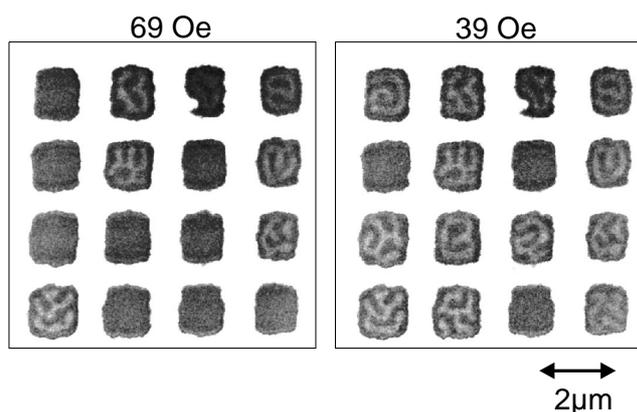


Abbildung 4. M-TXM Aufnahmen an der Fe  $L_3$  Kante von Fe von mikrostrukturierten Fe/Gd "dots" in veränderlichen Magnetfeldern

Umfangreiche Analysen der vorliegenden Daten, konnten die Hysteresekurven der einzelnen Dots aus den Aufnahmen abzuleiten und somit u.a Nukleationsfelder im Detail zu bestimmen, die das Schaltverhalten entscheidend beeinflussen (Abb. 5)

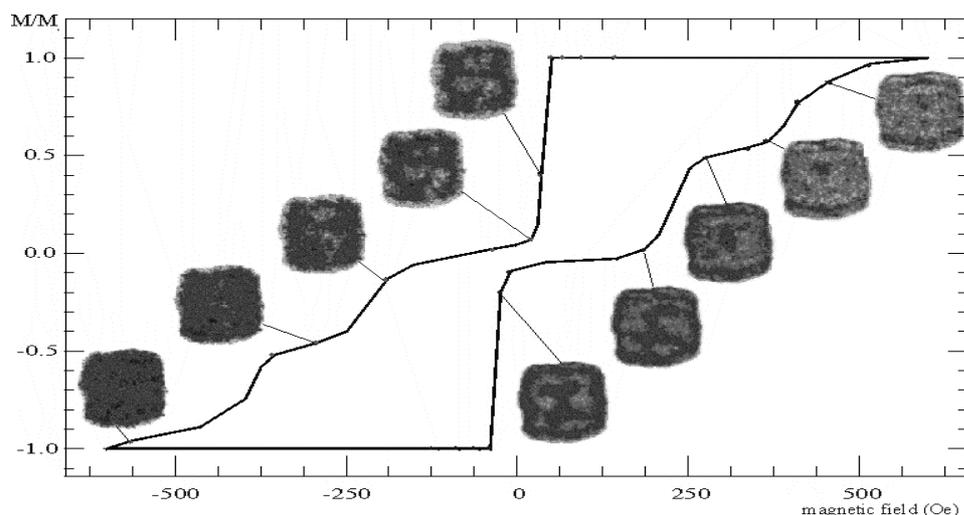


Abbildung 5. Einzelhysterekurve abgeleitet aus den M-TXM Aufnahmen an der Fe  $L_3$  Kante von Fe von mikrostrukturierten Fe/Gd "dots" in veränderlichen Magnetfeldern.

## II.2.1 Strukturierte Permalloy Systeme

Um die Änderungen der magnetischen Bereichsstrukturen insbesondere in Abhängigkeit der Form, der Ausdehnung und des Aspektverhältnisses und das damit verbundene Schaltverhalten (Umschaltprozesse) zu studieren, wurden umfangreiche Aufnahmen an strukturierten Elementen aus Permalloy ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) durchgeführt. Die Aufnahmen wurden sowohl an der Fe als auch an der Ni  $L_3$  Kante durchgeführt. Die Abhängigkeit vom Aspektverhältnis in Remanenz ist in Abb. 6 zu sehen. Die Ergebnisse sind konsistent mit denen anderer Techniken (z.B: SEMPA), die von den anderen beteiligten Gruppen gewonnen werden konnten. Begleitende Mikromagnetische Simulationsrechnungen werden derzeit durchgeführt und stützen ebenfalls die Ergebnisse.

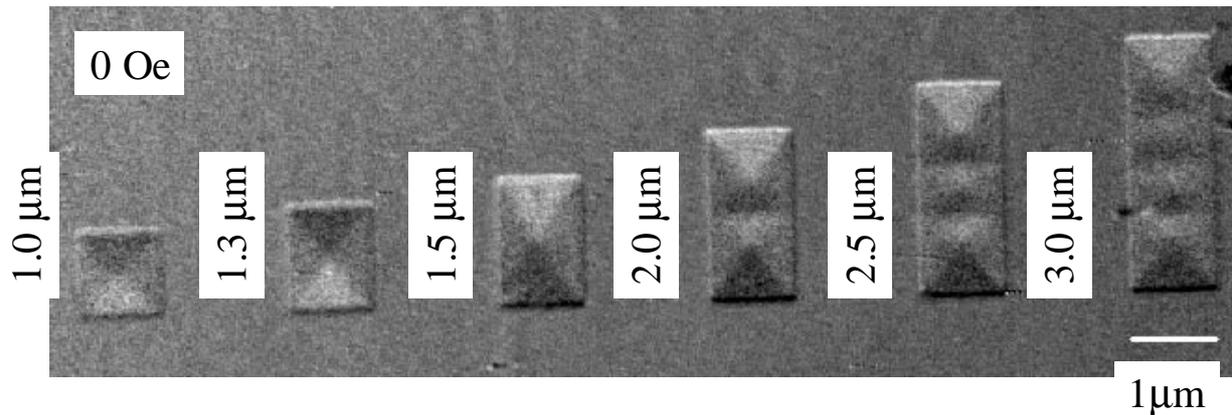


Abbildung 6. Abhängigkeit der Domänenkonfiguration vom Aspektverhältnis in 50nm dünnen rechteckigen Permalloy ( $Ni_{80}Fe_{20}$ ) Elementen. Die M-TXM Aufnahmen wurden an der Ni  $L_3$  Kante durchgeführt.

### II.2.1 Strukturierte Co-Systeme

Neben den Permalloy Systemen wurden analoge Untersuchungen an Co-basierten strukturierten Elementen durchgeführt. Auch diese Systeme werden als Grundbausteine der Magnetelektronik diskutiert. Exemplarisch ist in Abb. 7 das Schaltverhalten eines einzelnen Rechteckelements (35nm Dicke) dargestellt. Neben den einfachen Landaustrukturen (4 Domänen) lässt sich eine komplizierte Struktur während des Hysteresiszyklus erkennen (Abb. 7 rechts).

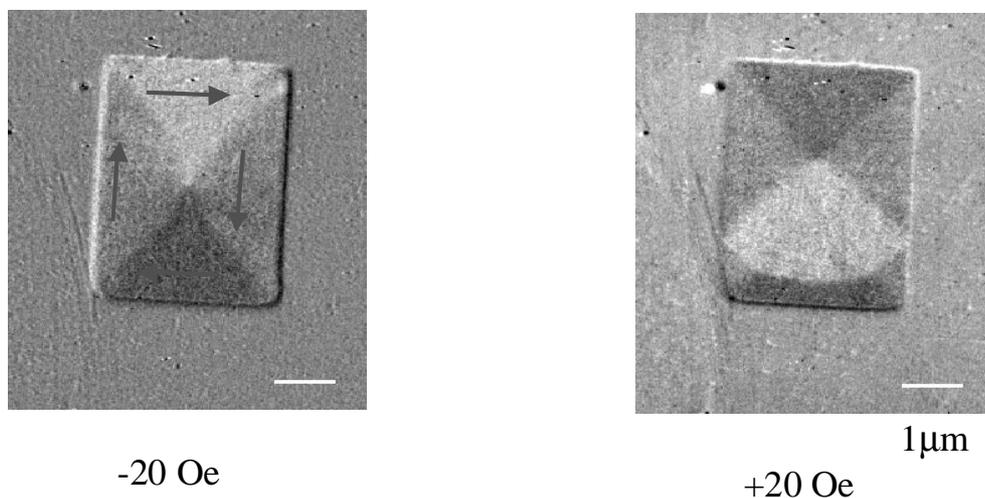


Abbildung 7. Magnetische Bereichstrukturen in einem 35 nm dünnen rechteckigen Co-Element. Die M-TXM Aufnahmen wurden an der Co  $L_3$  Kante durchgeführt.

### II.3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Systematik der gewonnenen Ergebnisse fügt sich in die bisher gefundenen Untersuchungen zu den magnetischen Strukturen nanostrukturierter Ferromagnete, die als Bausteine für die Magnetelektronik diskutiert werden, ein. Der zirkuläre magnetische Röntgendiffraktions und die darauf beruhenden experimentellen Techniken bieten jedoch darüber hinaus weitere Möglichkeiten zu einem tieferen

perimentellen Techniken bieten jedoch darüber hinaus weitere Möglichkeiten zu einem tieferen Verständnis der physikalischen Mechanismen magnetischer Eigenschaften in nanostrukturierten Einfach-Mehrfachschichten zu gelangen. Die herausragenden Eigenschaften zeigen sich in der inherenten Elementspezifität und der Möglichkeit mit hoher lateraler Auflösung magnetische Bereichsstrukturen innerhalb vollständiger Hysteresesyklen abzubilden. Die Frage nach dem spatio-temporalen Schaltverhalten einzelner Schichten in nanostrukturierten Vielfachschichtsystemen wird in Zukunft das zentrale Kriterium sein, um die Funktionstüchtigkeit potentieller Materialien für die Magnetelektronik zu manifestieren. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Frage nach den Modifikationen der chemischen und magnetischen Eigenschaften an den jeweiligen Grenzflächen.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die berichteten Ergebnisse sich gut in die vorgelegte Meilensteinplanung für dieses Teilprojekt einfügen. Die im Rahmen der beteiligten Partnerprojekte gewonnenen Ergebnisse sind konsistent mit den Ergebnissen dieses Teilprojektes. Die enge und auf die gegenseitigen Bedürfnisse eingehenden Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten, die sowohl die Probenpräparation und die Vorcharakterisierung als auch die Mikrostrukturierung geleistet haben, war mitentscheidend für den Erfolg dieses Projektes.

Hinsichtlich der Verwertbarkeit der Ergebnisse ist festzustellen, dass die Experimente mit polarisierter Synchrotronstrahlung unverzichtbare Informationen liefern können. Ein für die industrielle Produktion nicht zu unterschätzendes Hemmnis dürfte aber sein, dass (in der Regel) nur die Experimente nur temporär zugänglich sind. Dies liesse sich nur durch erhöhtes Engagement seitens industrieller Partner beseitigen (industrielle beamlines).

## II.4 Publikationen

1. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, P. Guttman, G. Schmahl, K. Prügl und G. Bayreuther, *Imaging of magnetic domains by transmission X-ray microscopy*, J. Phys. D: Appl. Physics **31**(6) (1998) 649-655
2. T. Eimüller, P. Fischer, G. Schütz, P. Guttman, G. Schmahl, K. Pruegl und G. Bayreuther, *Magnetic transmission X-ray microscopy: Imaging magnetic domains via the X-ray magnetic circular dichroism*, J. of Alloys and Comp. **286** (1999) 20-25
3. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, P. Guttman, G. Schmahl und G. Bayreuther, *Magnetic Domain Imaging with a Transmission X-ray Microscope*, J. of Magn. and Magn. Mat. **198-199** (1999) 624-627
4. P. Fischer, T. Eimüller, R. Kalchgruber, G. Schütz, G. Schmahl, P. Guttman und G. Bayreuther, *X-ray magnetic circular dichroism used to image magnetic domains*, J. of Synchr. Radiation **6** (1999) 688-690
5. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, P. Guttman, G. Schmahl, M. Köhler und G. Bayreuther, *Magnetic Domain Imaging with a Transmission X-ray Microscope*, J. Magn. Soc. Japan **23** suppl. S1 (1999) 205-8
6. M. Köhler, T. Schweinböck, T. Schmidt, J. Zweck, G. Bayreuther, T. Eimüller, P. Fischer, G. Schütz, P. Guttman und G. Schmahl, *Imaging of sub-100nm Magnetic Domains in Atomically Stacked Fe(001)/Au(001) Multilayers*, J. Appl. Phys. **.87 (9)** (2000) 6481-6483

7. T. Eimüller, R. Kalchgruber, P. Fischer, G. Schütz, P. Guttman, G. Schmahl, M. Köhler, K. Prügl, F. Bammes, T. Schweinböck und G. Bayreuther, *Quantitative Imaging of Magnetic Domains in Fe/Gd Multilayers by Magnetic Transmission X-ray Microscopy*, J. Appl. Phys. **87** (9) (2000) 6478-6480
8. A. Pearson, W. Chao, G. Denbeaux, T. Eimüller, P. Fischer, L. Johnson, M. Köhler, C. Larabell, M. Le Gros, D. Yager, D., Attwood, *XM-1, the High Resolution Soft X-ray Microscope at the Advanced Light Source*, Proceedings of SPIE, Vol. 4146, "Soft X-ray and EUV Imaging Systems, Edited by W. M. Kaiser and R. H. Stulen (2000) 54-59
9. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, G. Bayreuther, S. Tsunashima, N. Takagi, G. Denbeaux and D. Attwood, *Magnetic Domains in nanostructured media studied with M-TXM*, J. Synchr. Rad. Vol.8, Part 2 (2001) 325-327
10. G. Denbeaux, E. Anderson, W. Chao, T. Eimüller, L. Johnson, M. Köhler, C. Larabell, M. Legros, P. Fischer, A. Pearson, G. Schütz, D. Yager and D. Attwood, *Soft X-Ray Microscopy to 25 nm with Applications to Biology and Magnetic Materials*, Nucl. Instr. And Methods in Phys. Res. A **467-468** (2001) 841-844
11. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, M. Köhler, G. Bayreuther, G. Denbeaux, D. Attwood, *Study of in-plane magnetic domains with Magnetic Transmission X-ray microscopy*, J. Appl. Phys. **89**(11) (2001) 7159-7161
12. G. Denbeaux, P. Fischer, G. Kusinski, M. LeGros, A. Pearson, D. Attwood, *A full field transmission X-ray microscope as a tool for high resolution magnetic imaging*, IEEE Trans on Magn. **37** (2001) 2764
13. T. Eimüller, M. Scholz, P. Guttman, P. Fischer, M. Köhler, G. Bayreuther, G. Schmahl, G. Schütz, *Magnetization reversal of a multilayered FeGd dot array imaged by Transmission X-ray Microscopy*, J. Appl. Phys. **89** (2001) 7162
14. N. Takagi, P. Fischer, S. Tsunashima, M. Kumazawa, H. Ishida, A. Yamaguchi, H. Noguchi, and M. Kume, *Observation of Thermomagnetically Recorded Magnetic Domains in TbFeCo Films with X-ray Microscopy*, Jap. J. Appl. Phys. **40** (2001) L380-382 part 2 no. 4B
15. P. Fischer, T. Eimüller, S. Glück, G. Schütz, S. Tsunashima, M. Kumazawa, N. Takagi, G. Denbeaux and D. Attwood, *High Resolution Imaging of Magnetic Domains with Magnetic Soft X-ray Microscopy*, J. Magn. Soc. of Japan **25**, 186-191 (2001)
16. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz, G. Denbeaux, A. Lucero, L. Johnson, D. Attwood, S. Tsunashima, M. Kumazawa, N. Takagi, M. Köhler, and G. Bayreuther, *Element-specific imaging of magnetic domains at 25nm spatial resolution using soft X-ray microscopy*, Rev. Sci. Instr. **72**(5) (2001) 2322-24
17. N. Takagi, P. Fischer and S. Tsunashima, *Observation of Thermomagnetically Recorded Domains with high resolution magnetic X-ray Microscopy (in Japanese)*, J. Magn. Soc. of Japan **25**(7) (2001) 1370-1377
18. T. Eimüller, P. Fischer, M. Köhler, M. Scholz, P. Guttman, G. Denbeaux, S. Glück, G. Bayreuther, G. Schmahl, D. Attwood, G. Schütz, *Imaging magnetic domains with Magnetic Transmission X-ray Microscopy*, Appl. Phys. A **73** (2001) 697-701
19. T. Eimüller, M. Scholz, P. Guttman, P. Fischer, M. Köhler, G. Bayreuther, G. Schmahl, G. Schütz, *Undulation instabilities in laterally structured magnetic multilayers*, J. Appl. Phys. (2001) eingereicht
20. P. Fischer, T. Eimüller, G. Schütz und G. Denbeaux, *Imaging magnetic domain structures with Soft X-ray Microscop*, J. Structural Chemistry (2001), eingereicht

### **III Erfolgskontrollbericht**

#### **III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen**

Das vorliegende Projekt war Teil des Vorhabens „**Nanostrukturierte Ferromagnete: Neue Materialien für die Magnetelektronik**“ im Rahmen des Förderschwerpunkts "**Elektronische Korrelation und Magnetismus**" (Ausschreibung vom 28.4.1994) und war dem Themenbereich "Neuartige Ansätze zu magnetischen oder magnetooptischen Speicherverfahren" zugeordnet.

#### **III.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens**

Der zirkulare magnetische Röntgendiffraktionismus und die darauf beruhenden experimentellen Techniken (Spektroskopie und Mikroskopie) sind heutzutage unverzichtbare Werkzeuge bei der magnetischen und strukturellen Charakterisierung funktionaler ferromagnetischer Dünnschichtsysteme, die derzeit im Rahmen der Entwicklung neuer Materialien für die Magnetelektronik diskutiert und weltweit untersucht werden. Neben der inherenten Elementspezifität liefert die Quantifizierbarkeit hinsichtlich lokaler Spin- und Bahnmomente wertvolle Informationen für ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen magnetischer Eigenschaften in lateral nanostrukturierten Einfach- und Mehrschichten. Die technologisch hoch relevante Ausbildung magnetischer Anisotropien ist mit dem Auftreten lokaler Bahnmomente eng verknüpft.

Die hochauflösende Abbildung magnetischer Bereichstrukturen (M-TXM) in Systemen, bei denen die Magnetisierungen sowohl in der Filmebene als auch senkrecht dazu liegen und deren Verhalten innerhalb vollständiger Hysteresiszyklen erlauben Zugang zu wesentlichen Parametern der untersuchten Funktionswerkstoffe. So können u.a. die (statistischen) Verteilungen von Schaltfeldern in kleinsten Elementen experimentell untersucht werden und damit auch eingestellt werden.

Die Frage nach Modifikationen der Eigenschaften an den unweigerlich auftretenden Grenz- und Oberflächen kann, wie sich in jüngster Zeit gezeigt hat, durch Messungen zur magnetischen Reflektometrie ebenfalls aus experimenteller Sicht beantwortet werden. Dies eröffnet zum einen die Möglichkeit, entweder solche Modifikationen gezielt zu vermeiden oder auch gezielt in das System einzubringen, um gewünschte Parameter einzustellen.

Eine vollständige Charakterisierung ist jedoch nur im Verbund der leistungsfähigsten Untersuchungsmethoden (z.B. komplementäre Mikroskopietechniken) zu bewerkstelligen.

#### **III.3 Verwertungsplan**

Die in Deutschland an den verschiedensten Gruppen vorhandenen Expertisen können mit den bereits bestehenden Infrastrukturen an Hochschulen und Forschungseinrichtungen (MPI) dazu beitragen, entscheidende neue Erkenntnisse innerhalb kurzer Zeit auf dem Gebiet des Dünnschichtmagnetismus in funktionalen ferromagnetischen Nanostrukturen zu erreichen. Hinzu kommt, dass auch auf theoretischem Gebiet zahlreiche deutsche Gruppen eine weltweit führende Position einnehmen. Eine Fortset-

zung der in diesem Projekt begonnenen Arbeiten, um z.B. die noch offenen Fragen nach dem Einfluss der Grenzflächeneigenschaften in den jeweiligen magnetischen Schichten zu klären erscheint daher von enormer Wichtigkeit.

#### **III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

entfällt

#### **III.5 Präsentationsmöglichkeiten**

entfällt

#### **III.6 Einhaltung der Ausgaben und Zeitplanung**

Der Ausgaben- und Zeitplan konnte im Wesentlichen eingehalten werden, nicht zuletzt durch die Möglichkeit, am XM-1 der ALS in Berkeley /CA die Experimente zur M-TXM fortzuführen und die größtenteils durch das CXRO gewährten finanziellen Zuschüsse zu den damit verbundenen erheblich erhöhten Reisekosten.