

C. M. Schneider, K. Meinel,
J. Kirschner, M. Neuber,
M. Grunze

Elementspezifische Abbildung magnetischer Mikrostrukturen

Der magnetische Dichroismus in der Elektronenemission läßt sich zur Untersuchung magnetischer Domänen mittels Synchrotronstrahlung nutzen

Die Untersuchung von magnetischen Mikrostrukturen gewinnt durch den Fortschritt in der Datenspeichertechnologie zunehmend an Bedeutung. Die ständig steigende Informationsdichte der magnetischen Datenträger erfordert die Entwicklung neuer Analyseverfahren, mit denen die einzelnen Informationseinheiten (bits), die in Form magnetischer Domänen eingeschrieben werden, untersucht und sichtbar gemacht werden können. Bewährte lichtoptische Verfahren, die auf dem Kerr-Effekt basieren [1], stoßen dabei zunehmend an ihre beugungsbedingten Auflösungsgrenzen und werden durch elektronenmikroskopische Methoden ersetzt, bei denen die Ablenkung transmittierter Elektronen durch die Lorentz-Kraft aufgrund der probeninternen Magnetfelder ausgenutzt wird [2, 3]. Da insbesondere bei Dünnschichtsystemen der Einfluß der Oberfläche immer wichtiger wird, wurden ab ca. 1985 oberflächensensitive Abbildungstechniken mit niederenergetischen Elektronen entwickelt. Beispiele sind das Rasterelektronenmikroskop mit Elektronenspinanalyse [4] sowie eine spin-polarisierte Version des Elektronen-Emissionsmikroskops [5]. Diese Verfahren kombinieren Oberflächenempfindlichkeit mit magnetischer Sensitivität bei einer lateralen Auflösung bis unter 20 nm. Eine hohe Ortsauflösung ist jedoch nur ein, wenn auch wichtiger Aspekt. Heute in der Datenspeicherung eingesetzte Materialien bestehen oft aus Metallverbindungen und -legierungen, die zudem in Dünnschichtstrukturen kombiniert werden. Die Komplexität solcher Kompositssysteme macht zunehmend eine elementspezifische Untersuchung der magnetischen Eigenschaften erforderlich, was jedoch keines der genannten Mikroskopieverfahren leisten kann.

C. M. Schneider, K. Meinel, J. Kirschner, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, D-06120 Halle/Saale. – M. Neuber, M. Grunze, Institut f. Angewandte Physikalische Chemie, Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 253, D-69120 Heidelberg.

Die kürzliche Entdeckung des magnetischen Dichroismus in der Elektronenemission ist ein Meilenstein in der Entwicklung des Gebietes Oberflächenmagnetismus. Durch diesen Effekt werden magnetische Phänomene an Oberflächen und in Dünnschichtsystemen auf einfache Weise mittels elektronenspektroskopischer Methoden charakterisiert. Die Abbildung magnetischer Domänen mit chemischer Selektivität ist insbesondere für die Entwicklung und Optimierung moderner magnetischer Datenspeichermedien von grundlegender Bedeutung.

Magnetischer Zirkulardichroismus in der Elektronenemission

Diese Situation erfuhr erst kürzlich eine entscheidende Wendung durch die Entdeckung "magnetischer Dichroismen" in der Photoabsorption und -emission mit weichem Röntgenlicht. Damit können magnetische Phänomene durch einfache Intensitätsmessungen und – bei Verwendung charakteristischer Niveaus – mit chemischer Selektivität untersucht werden. Eine wesentliche Voraussetzung für diese Entdeckungen war nicht zuletzt die bessere Verfügbarkeit zirkular polarisierter Synchrotronstrahlung. Die verschiedenen Formen insbesondere des zirkularen magnetischen Dichroismus (MCD) in den emittierten Elektronen lassen sich nun zur Abbildung magnetischer Domänenverteilungen an Oberflächen nutzbar machen.

Erste erfolgreiche Versuche in dieser Richtung nutzten den zirkularen magnetischen Dichroismus in der Elektronenausbeute [6]. Dieser tritt an Absorptionskanten mit einer Drehimpulsquantenzahl $l \geq 1$ auf und äußert sich in einem Unterschied des Photoabsorptionsquerschnitts und der dazu proportionalen Elektronenausbeute für rechts- und linkszirkular polarisiertes Licht. Er bildet gleichsam das hochenergetische Analogon zum magneto-optischen Kerr-Effekt. Als abbildende Einheit diente ein Photoemissions-Elektronenmikroskop (PEEM) mit Immersionslinsenoptik [7].

Die starken elektrostatischen Felder in einem PEEM bewirken eine effektive Energie- und Winkelintegration des Photostroms. Der magnetische Kontrast entsteht durch eine räumliche Variation der totalen

Elektronenausbeute entlang der Oberfläche, wenn diese mit zirkular polarisiertem Licht bestrahlt wird. In der Elektronenausbeute dominieren niederenergetische Sekundärelektronen, die als Folge von Energieverlustprozessen entstehen. Eine chemische Unterscheidung ist daher nur über die Wellenlänge der anregenden Strahlung möglich. Unter diesen Umständen ist das magnetische Signal nur schwer quantifizierbar.

Eine deutlich größere Selektivität wird erreicht, wenn statt des niederenergetischen Sekundäranteils Auger-Elektronen detektiert werden [8]. Solche Untersuchungen liefern außerdem ein besseres Verständnis der bildgebenden magnetischen Kontrastmechanismen, erfordern allerdings eine Energieanalyse bei der Abbildung. Dies ist mit einem PEEM zur Zeit noch nicht möglich. Eine Alternative bieten abbildende Elektronenspektrometer, wie z. B. die von Coxon et al. beschriebene Kombination eines hemisphärischen Energieanalysators mit einer speziellen elektrostatischen Eintrittsoptik [9]. Damit wird ein kleiner Teil der Probenoberfläche durch den Energieanalysator hindurch vergrößert auf eine Vielkanalplatte abgebildet. Das Gerät ist gleichermaßen für Abbildungs- und Spektroskopiezwecke geeignet. Die Ortsauflösung von einigen Mikrometern ist, hauptsächlich bedingt durch die chromatische Aberration der Eintrittslinse, allerdings bislang schlechter als bei einem PEEM. Die nachfolgend beschriebenen Experimente verwendeten solch ein abbildendes Spektrometer am Berliner Speicherring BESSY zur elementspezifischen Abbildung magnetischer Domänen.

Domänenabbildung mit Auger-Elektronen

Das Resultat einer solchen Messung zeigt die Domänenverteilung auf der Oberfläche eines Fe(001)-Whiskers (Abb. 1c). Der Energieanalysator war auf eine Elektronenenergie von $E_{kin} = 648$ eV fixiert. Eisen-Whisker sind nadelförmige Einkristalle von einigen 100 μm Dicke mit einer wohldefinierten Domänenstruktur. Der Bildausschnitt gibt einen magnetischen Ring-schluß wieder. Die hellen (dunklen) Bereiche entsprechen Domänen mit einer Magnetisierung parallel (antiparallel) zum Photospin, die durch eine 180° -Wand (ein spezieller Typ von Domänenwand) voneinander getrennt sind. Die rautenförmigen Domänen sind senkrecht zum Photospin orientiert und erscheinen deshalb einheitlich in einem mittleren Grauton, obwohl sie entgegengesetzte Magnetisierungsvektoren aufweisen. Letzteres wird sichtbar, wenn die Probe gegenüber dem einfallenden Lichtstrahl gedreht wird, so daß eine Parallel-Komponente der Magnetisierung mit der Richtung des Photospins auftritt. Das Verfahren ist mithin empfindlich auf Domänen, deren Magnetisierungsvektoren eine Komponente parallel zur Richtung des einfallenden Lichts haben.

Der spektrale Verlauf des magnetischen Zirkulardichroismus, der die Grundlage für den magnetischen Kontrast in Abb. 1c bildet, ist in Abb. 1a,b dargestellt. Eine Variation der Photonenenergie über den Bereich der $L_{2,3}$ -Absorptionskanten zeigt eine resonanzartige Überhöhung der Auger-Elektronenausbeute ($E_{kin} = 648$ eV) direkt an den Kanten. Die genaue Form des Spektrums hängt nun von der relativen Orientierung der Probenmagnetisierung und des Photospins ab. Im Experiment werden im wesentlichen eine parallele und antiparallele Konfiguration beider Größen gemessen, und die auftretenden Unterschiede quantitativ als sogenannte spektrale Intensitätsasymmetrie $A(E)$ in Abb. 1b ausgedrückt:

$$A(E) = \frac{I^{||}(E) - I^{\perp}(E)}{I^{||}(E) + I^{\perp}(E)}$$

$A(E)$ nimmt extremale Werte von bis zu $\pm 15\%$ in der Nähe der Absorptionskanten an, wobei die Signale an der $L_{2,3}$ -Kante entgegengesetztes Vorzeichen aufweisen. Letzteres resultiert aus der gegenphasigen Kopplung der Spin- und Bahndrehimpulse in den beiden 2p-Niveaus. Im Rahmen eines Zwei-Stufen-Modells wird der MCD in der Auger-Elektronenemission als eine direkte Folge des Dichroismus im Anregungsschritt interpretiert. Die Absorption von zirkular polarisiertem

Licht führt zu einer Anregung von Elektronen aus kernnahen Niveaus (hier 2p) in den unbesetzten Teil der spinaufgespaltenen Zustandsdichte unterhalb des Vakuumniveaus. Die Übergangsraten sind abhängig von der Probenmagnetisierung und der Helizität des anregenden Lichts.

Mit den Übergangsraten variiert auch die Anzahl der erzeugten Löcher, die im nachfolgenden Auger-Prozeß wieder besetzt werden können. Folglich zeigt auch die Auger-Elektronenausbeute ein magnetodichroisches Signal. Aus der Definition der Asymmetrie $A(E)$ ist auch unmittelbar

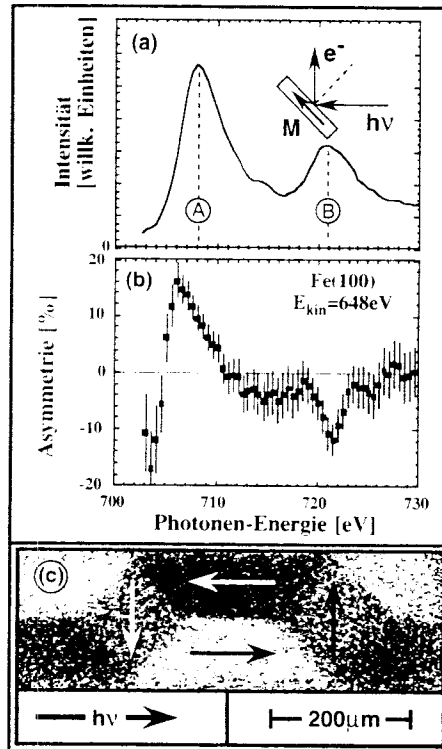


Abb. 1: Magnetischer Zirkular-Dichroismus in der Auger-Elektronenemission: Bestrahlt man eine Fe(100)-Oberfläche im vollständig magnetisch ausgerichteten Zustand abwechselnd mit links- und rechtszirkular polarisierter Synchrotronstrahlung und beobachtet die emittierten Auger-Elektronen als Funktion der Photonenenergie (Abb. 1a), so zeigen die beteiligten Zustände (A bzw. B) unterschiedliche Anregungswahrscheinlichkeiten. Dieses Phänomen tritt nur in magnetischem Material auf und wird als „magnetischer Dichroismus“ bezeichnet. Der Unterschied der Spektren zu entgegengesetzter Lichtzirkularität wird oft als dimensionslose Intensitätsasymmetrie (Abb. 1b) dargestellt. Darunter versteht man die Differenz der Spektren normiert auf ihre Summe. Abbildung 1a entspricht der Summe aus den Spektren zu entgegengesetzter Zirkularität und ist daher direkt vergleichbar zu einem konventionellen Experiment mit unpolarisierter Strahlung. Ein äquivalentes Resultat erhält man, wenn man die Zirkularität des Lichts fixiert und statt dessen die Magnetisierung der Probe umklappt. Stärke und Vorzeichen des magnetischen Dichroismus sind ein Maß für die Lage des Magnetisierungsvektors bezüglich der Lichteinfallrichtung. Die Methode gestattet daher, die magnetische Orientierung in einem oberflächennahen Bereich, bestimmt durch die Informationstiefe der verwendeten Elektronen, sichtbar zu machen. Abbildung 1c zeigt eine mit Hilfe dieses Effekts sichtbare magnetische Domänenstruktur einer Fe(100)-Oberfläche. Die Graustufung kennzeichnet Domänen mit unterschiedlicher Orientierung der Magnetisierung, deren räumliche Lage durch die Pfeile angedeutet ist.

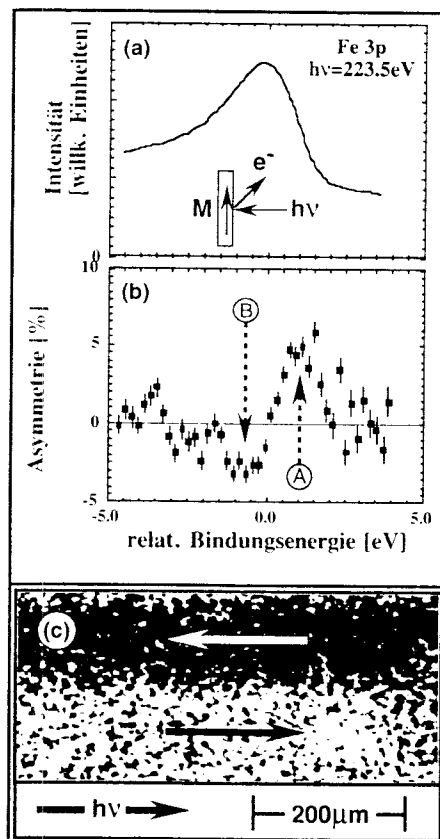


Abb. 2: Magnetischer Zirkular-Dichroismus in der Rumpfniveau-Photoemission: Vergleicht man winkelaufgelöste Rumpfniveau-Photoelektronenspektren einer magnetisch eindomänigen Fe(100) (Abb. 2a), die mit monochromatischem Synchrotronlicht einer festen Helizität aufgenommen wurden, findet man Änderungen in der Form und Struktur des Spektrums als Funktion der Orientierung der Magnetisierung. Diese Form des magnetischen Dichroismus wird auch als „magnetischer Zirkulardichroismus in der Winkelverteilung der Photoelektronen“ bezeichnet. Die spektralen Unterschiede bei einer Umkehrung der Magnetisierung werden wieder als Intensitätsasymmetrie dargestellt. (Abb. 2b). Für eine feste kinetische Energie der Photoelektronen (z. B. die mit A und B markierten Punkte) dient der Wert der Intensitätsasymmetrie (Stärke und Vorzeichen) als ein Maß für die Orientierung der Magnetisierung in der Oberfläche. Abb. 2c zeigt eine magnetische Domänenverteilung auf einer Fe(100)-Oberfläche, die mit Hilfe dieses Effektes beobachtet wurde. Die beiden unterschiedlichen Graustufen geben die entgegengesetzte Orientierung der Magnetisierung (Pfeile) wieder.

ersichtlich, daß eine Umkehrung der Magnetisierung bei Festhalten aller anderen experimentellen Parameter, insbesondere der Lichthelizität, zu einem Vorzeichenwechsel in der Asymmetriefunktion führen muß. Dies ist die Grundlage für den magnetischen Kontrast in Abb. 1c, denn eine magnetische Domänenstruktur erzeugt eine entlang der Probenoberfläche variierenden lokalen Asymmetrie $A(x,y)$. $A(x,y)$ erhält man analog der spektralen Asymmetrie durch die Verknüpfung von zwei Einzelbildern $I(x,y)$ der Probenoberfläche bei umgekehrter Helizität

$$A(x, y) = \frac{I^{\uparrow}(x, y) - I^{\downarrow}(x, y)}{I^{\uparrow}(x, y) + I^{\downarrow}(x, y)}$$

Jedes Einzelbild enthält neben der magnetischen Information auch Beiträge aus chemischen und Topographiekontrasten. Diese verschiedenen Informationen lassen sich durch die Asymmetriebildung voneinander separieren und getrennt interpretieren. Die besondere spektralen Abhängigkeit des MCD in der Auger-Elektronenemission ermöglicht verschiedene Weisen der magnetischen Abbildung. Neben der Ermittlung von $A(x,y)$ aus zwei Einzelbildern zu entgegengesetzter Lichthelizität, wird die gleiche Information aus zwei Bildern zu unterschiedlicher Photonenenergie (Markierungen A u. B in Abb. 1a) erhalten. Im Ergebnis erweisen sich beide Verfahren als äquivalent. Unsere Experimente zeigen außerdem, daß durch die Verwendung charakteristischer Auger-Elektronen die Domänenstruktur durch eine Deckschicht hindurch (sei sie magnetisch oder unmagnetisch) sichtbar gemacht werden kann. Dies ist insbesondere für die Untersuchung magnetisch gekoppelter Systeme von großer Bedeutung.

Kontrastmechanismen unter Verwendung von Photoelektronen

Eine weitere Form des magnetischen Zirkulardichroismus tritt in der Winkelverteilung der emittierten Photoelektronen auf (Magnetic Circular Dichroism in Angular Distribution). Zu seiner Beobachtung sind daher nicht nur Energie-, sondern auch Winkelauflösung vonnöten. Im Unterschied zum vorgenannten MCD wird MCDAD durch die magnetische Wechselwirkung in den besetzten elektronischen Zustände dominiert. Ein Beispiel für die Photoemission aus den 3p-Niveaus des Eisens, bei der man sich die Austauschspaltung in den Rumpfniveaus zunutze macht, zeigt Abb. 2a,b. Auch hier führt ein Wechsel der Magnetisierungsrichtung oder der Lichthelizität zu einer ausgeprägten Intensitätsasymmetrie mit einem charakteristischen einfachen Plus/Minus-Wechsel in der Größenordnung von $\pm 5\%$.

Bedingt durch seine spezielle Winkelabhängigkeit erreicht der Effekt maximale Werte sogar für senkrecht einfallendes Licht [10]. Durch Berechnung einer Asymmetrieverteilung $A(x,y)$ aus Bildern, die mit Elektronen zweier unterschiedlicher kinetischer Energien (A u. B) aufgenommen wurden, wird die magnetische Information extrahiert. Eine entsprechende Domänenabbildung in Abb. 2c zeigt eine andere Stelle auf dem Fe-Whisker, bei der zwei ausgedehnte Domänen durch eine 180°-Wand getrennt werden. Der Schwarzweiß-Kontrast entspricht dem entgegengesetzten Magnetisierungsvektor in beiden Domänen. Dabei ist zu beachten, daß die experimentelle Geometrie aus technischen Gründen der in Abb. 1a gezeigten entspricht, also nicht den bevorzugten senkrechten Lichteinfall benutzt. Dadurch sinkt die effektive Intensitätsasymmetrie auf etwa $\pm 2\%$ ab. Diese etwas ungünstigen Verhältnisse sind auch der Grund für das schlechtere Signal/Rausch-Verhältnis in Abb. 2c.

Zukünftige Entwicklungen

Mit der vorgestellten Methode lassen sich magnetische Phänomene an Oberflächen und in Dünnschichtsystemen untersuchen, wobei die Verwendung von elementcharakteristischen Elektronen auch Aussagen über vergrabene Schichten ermöglicht. Eine Kombination der verschiedenen Kontrastmechanismen und Variation der Elektronenenergie bietet eine zusätzliche Tiefenselektivität. Die vorgestellte magnetische Abbildungstechnik bietet noch einen weiten Raum für Weiterentwicklungen. Hier wäre zunächst eine Steigerung der räumlichen Auflösung zu nennen. Eine Optimierung der Elektronenoptik in abbil-

denden Spektrometern verspricht eine Verbesserung um etwa eine Größenordnung (Submikron-Bereich). Der entscheidende Schritt besteht jedoch in der Implementierung eines geeigneten Energiefilters in ein PEEM, wodurch eine Auflösungsgrenze von 10 – 50 nm erreichbar sein sollte, bei gleichzeitiger Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses. Damit verknüpft ist die Nutzung von hochbrillanten Synchrotronstrahlungsquellen der nächsten Generation (BESSY II, ESRF), die eine erhebliche Reduktion der Akkumulationszeiten mit sich bringen wird, möglicherweise sogar Echtzeit-Experimente erlaubt.

Auf der Suche nach neuen magnetischen Kontrastmechanismen wird geprüft, ob sich weitere magneto-dichroische Effekte eignen, die bei Anregung mit linearem [11] und sogar unpolarisiertem Licht [12] auftreten. Letzterer Effekt eröffnet zwar eine Perspektive, elementspezifische Untersuchungen magnetischer Materialien in einem gewissen Umfang mit Laborlichtquellen durchführen zu können, wird allerdings aus Intensitätsgründen auf spektroskopische Anwendungen beschränkt bleiben. Die hier vorgestellte elementspezifische Abbildung magnetischer Mikrostrukturen mittels magnetischer Dichroismen ist weltweit Gegenstand intensiver Forschung, deren Fortschritt und Erfolg entscheidend an die Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Synchrotronstrahlungsquellen gekoppelt ist.

*

Das Projekt wird vom Bundesminister für Forschung und Technologie gefördert.

Literatur

- [1] J. Kranz u. A. Hubert, Z. Angew. Physik **15**, 220 (1963).
- [2] E. Fuchs, Naturwiss. **47**, 392 (1960).
- [3] J. N. Chapman, J. Phys. **D 17**, 623 (1984).
- [4] K. Koike u. K. Hayakawa, Jpn. J. Appl. Phys. **23**, L187 (1984).
- [5] M. S. Altmann et al., Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **232**, 125 (1991).
- [6] J. Stöhr, Y. Wu et al., Science, **259**, 658 (1993).
- [7] H. Bethge et al., Ultramicroscopy **17**, 21 (1985).
- [8] C. M. Schneider, Appl. Phys. Lett. **63**, 2432 (1993).
- [9] P. Coxon, et al., J. Electron Spectr. & Rel. Phen. **51/52**, 821 (1990).
- [10] D. Venus et al., J. Phys. **5**, 1239 (1993).
- [11] C. Roth et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 3479 (1993).
- [12] F. U. Hillebrecht u. W.-D. Herberg, Z. Phys. **B 93**, 299 (1994).

Titelbild

Magnetische Domänenverteilung auf einem „L“-förmigen Fe(100)-Whisker, aufgenommen mit Auger-Elektronen des Eisens bei einer kinetischen Energie von 703 eV. Die Auger-Elektronen wurden durch Bestrahlung der Probe mit monochromatischem, zirkular polarisiertem Synchrotronlicht angeregt und mit einem abbildenden Elektronenspektrometer orts aufgelöst nachgewiesen. Das Domänenbild stellt die normierte Differenz zweier Einzelbilder dar, die mit unterschiedlichen Photonenenergien (abgestimmt auf die L2- und L3-Absorptionskante des Eisens) aufgenommen wurden. Die Falschfarbendarstellung kodiert die räumliche Orientierung des Magnetisierungsvektors (angedeutet durch die Pfeile) in den einzelnen Domänen. Entsprechend den Symmetrieeigenschaften einer (100)-Oberfläche eines kubischen Kristalls werden vier orthogonale Ausrichtungen der Magnetisierung beobachtet.