

MAGNETISMUS

Magnetische Nanowelt

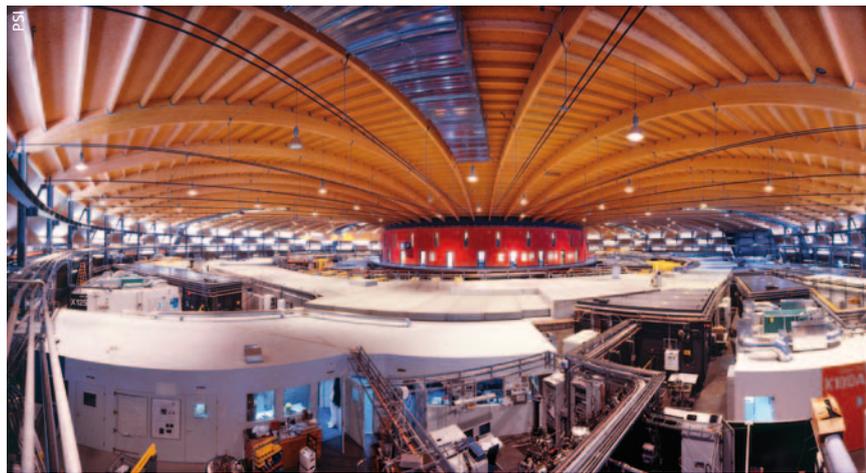
Mikroskopie mit Synchrotronstrahlung ermöglicht eine Reise in die faszinierende Welt der Nanomagnete.

Armin Kleibert und Frithjof Nolting

Magnete mit Abmessungen im Nanometerbereich zeigen nicht nur spannende Physik, sondern bieten auch ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Eine besondere Rolle bei diesen magnetischen Zwergen nimmt das so genannte superparamagnetische Verhalten ein, sei es als gewünschter Effekt bei der Verwendung in der Medizin oder als limitierender Faktor bei der voranschreitenden Miniaturisierung in der Datenspeicherung. Neue Methoden erlauben es, das Verhalten von einzelnen Nanomagneten zu untersuchen und deren Eigenschaften gezielt zu beeinflussen.

Ohne magnetische Materialien würde unsere Welt anders aussehen, denn obwohl wir uns im Alltag nicht immer dessen bewusst sind, spielen Magnete und ihre Felder eine wichtige Rolle für das Leben. So schützt das Erdmagnetfeld uns und die Atmosphäre vor kosmischer Strahlung und ermöglicht die Orientierung. Magnete erleichtern auch unser Leben, beispielsweise als einfache Permanentmagnete am Kühlschrank oder als High-Tech-Magnete mit optimierten Eigenschaften in Transformatoren, Motoren und Generatoren. Daneben nimmt die Bedeutung von Nanomagneten in der Technologie zu [1, 2]. So werden in Festplatten die Informationen in magnetischen Dünnschichtsystemen gespeichert und mittels magnetischer Sensoren ausgelesen.

Der Bedarf an magnetischen Datenspeichern nimmt wegen des rapide wachsenden Internetverkehrs und Cloud-Computings weiterhin zu, obwohl alternative Flash-Speicher bereits weit verbreitet sind. Deshalb wird intensiv nach neuen magnetischen Materialien geforscht, die eine höhere Speicherdichte erlauben. Allerdings reichen bei hinreichend kleinen Strukturen schließlich thermische Fluktuationen aus, um die Magnetisierung spontan zu ändern, sodass eine dauerhafte Speicherung von Informationen nicht mehr möglich ist. Dieses superparamagnetische Verhalten gilt es daher zu überlisten. Anders sieht es in der Medizin aus. Hier wird an Methoden geforscht, Krebstumore mittels magnetischer Wechselfelder zu zerstören (Hyperthermie). Dafür eignen sich magnetische Nanopartikel mit funktionalisierter Oberfläche, die sich nur an den Krebszellen anlagern. Ein elektromagnetisches Wechselfeld regt die Magnetisierung der Nanoteilchen zu Schwingungen an, und die dabei erzeugte Wärme



Blick in die Experimentierhalle der Synchrotron-Lichtquelle Schweiz (SLS) am Paul-Scherrer-Institut (PSI). Synchrotron-

strahlung ermöglicht es, verborgene Details von Nanomagneten sichtbar zu machen.

zerstört gezielt den Krebstumor. Hierbei sind nun superparamagnetische Teilchen erwünscht, da diese sich mit vergleichsweise kleinen Feldstärken und hochfrequent ummagnetisieren lassen. Außerdem unterdrücken die Fluktuationen die Anziehung zwischen den Partikeln, die somit nicht verklumpen.

Für die verschiedensten Anwendungen von Nanomagneten ist es wichtig, ihr Verhalten zu verstehen, insbesondere weil sich ihre materialspezifischen Eigenschaften von denjenigen in makroskopischen Festkörpern unterscheiden. Dabei gilt es auch, die Wechselwirkung der Teilchen miteinander und mit ihrer Umgebung zu berücksichtigen. Außerdem wollen wir das Verhalten nicht nur verstehen, sondern es gezielt beeinflussen. Wir konzentrieren uns daher auf einzelne

KOMPAKT

- Magnetische Materialien sind unverzichtbare Bestandteile unserer Technik. Bei Reduktion der Abmessungen können sich die Materialeigenschaften in komplexer Weise ändern.
- In Nanomagneten lassen sich eindomänige Zustände und superparamagnetisches Verhalten erzeugen.
- Das Verhalten einzelner Nanomagnete lässt sich mittels Synchrotronstrahlung untersuchen und Erkenntnisse über ihre Wechselwirkung mit der Umgebung gewinnen. Dies ist wichtig für die Entwicklung von neuen Materialien.

Dr. Armin Kleibert, Prof. Dr. Frithjof Nolting, Paul Scherrer Institut (PSI), 5232 Villigen, Schweiz

Juri Honegger, PSI

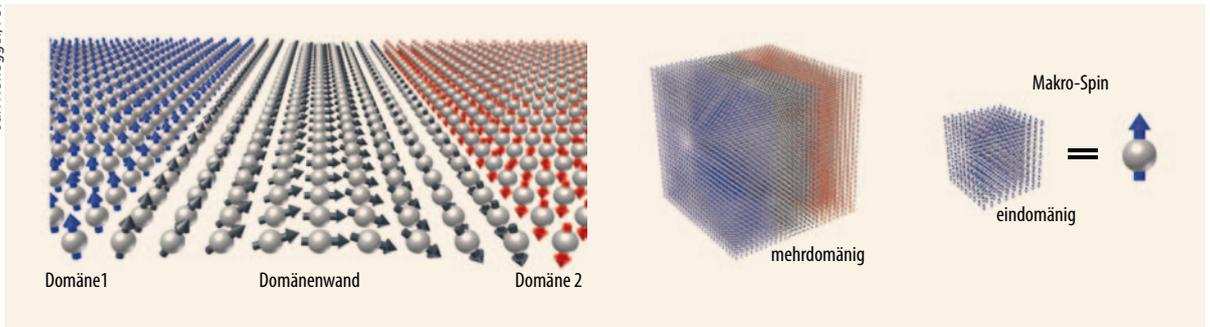


Abb. 1 Zwischen Bereichen mit gleicher Ausrichtung der atomaren magnetischen Momente (Domänen; hier blau bzw. rot für Magnetisierung nach oben bzw. unten) bildet sich eine Domänenwand aus, in der sich die Magnetisierungsrichtung quasi-kontinuierlich ändert. Der Wettbewerb zwischen magnetischer Anisotropieenergie und Austauschwechselwirkung be-

stimmt die Breite der Wand. In einem Nanomagneten mit Abmessungen, die kleiner als die Domänenwandbreite sind, bildet sich ein eindomäniger Zustand aus, der zur Beschreibung des magnetischen Verhaltens als ein einzelner Makro-Spin aufgefasst werden kann.

Nanostrukturen und untersuchen die Korrelationen von Struktur, Größe und Magnetismus, die dabei auftreten.

Domänen und Superparamagnetismus

Makroskopische Ferromagnete sind im Allgemeinen nicht homogen magnetisiert, da dieser Zustand mit einer hohen magnetostatischen Energie verbunden ist, die im Feld des Magneten gespeichert ist. Eine Reduktion dieser Energie ist möglich, wenn sich magnetische Domänen mit einer Magnetisierung entlang Vorzugsrichtungen ausbilden (Abb. 1) [3]. Letztere lassen sich durch die magnetische Anisotropieenergie quantifizieren, die Auskunft über die notwendige Energie gibt, um die Magnetisierung eines Ferromagneten entlang einer bestimmten Richtung auszurichten. Die Nukleation von Domänenwänden und deren Verschiebbarkeit bestimmen dann das Magnetisierungsverhalten.

Die Domänenwandbreite typischer ferromagnetischer Metalle wie Eisen liegt bei einigen zehn

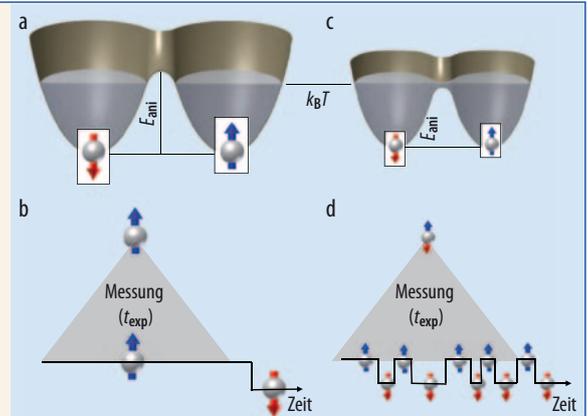
Nanometern. Dies legt nahe, dass in hinreichend kleinen Magneten kein mehrdomäniger Zustand mehr möglich ist. Tatsächlich kann sich dann ein stabiler eindomäniger Zustand einstellen, der in Eisen bei einer Teilchengröße unter 12 nm erwartet wird. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Materialeigenschaften nanoskaliger Systeme stark von denen des makroskopischen Festkörpers abweichen können, sodass sich der tatsächliche Übergang zum eindomänen Zustand nur bedingt vorhersagen lässt.

Ist der eindomänige Zustand jedoch erreicht, bestimmt eine gleichförmige, kohärente Reaktion aller parallel orientierten, atomaren magnetischen Momente das Magnetisierungsverhalten. Das Verhalten solcher Nanomagnete kann daher erfolgreich mit Hilfe eines Makro-Spin-Modells beschrieben werden, in dem ein einziges magnetisches Moment entsprechender Größe die große Zahl atomarer magnetischer Momente ersetzt (Abb. 1). Mit der Reduktion der Abmessungen eines Magneten geht jedoch auch eine Reduktion der magnetischen Anisotropieenergie einher. Ist die Höhe der resultierenden Energiebarrieren vergleichbar mit

SUPERPARAMAGNETISMUS

In einem Nanomagneten mit einer uniaxialen magnetischen Anisotropie gibt es zwei magnetische Grundzustände – Magnetisierung nach oben bzw. unten –, die eine Energiebarriere E_{ani} voneinander trennt. Materialeigenschaften, Volumen und Form des Teilchens bestimmen die Höhe der Barriere. Ist die thermische Energie $k_B T$, dargestellt durch den grauen See in (Abb. a), viel kleiner als die Energiebarriere, dann ist die Wahrscheinlichkeit für eine spontane Ummagnetisierung gering. Kommt es während einer Messzeit t_{exp} nicht zum Umschalten, so wird ein konstantes magnetisches Moment gemessen (Abb. b). Bei kleineren Partikeln sinkt die Energiebarriere mit dem Volumen (Abb. c), und die Häufigkeit spontaner Ummagnetisierungen steigt exponentiell an (Abb. d). Kommt es während der Messzeit häufig zum Umschalten, mittelt sich das gemessene magnetische Moment zu null.

Bei fester Partikelgröße lässt sich derselbe Effekt durch eine höhere Temperatur erreichen. Ein großes Ensemble solcher Partikel verhält sich ähnlich wie die ungekoppelten Spins in einem paramagnetischen Material. In Analogie dazu wird dieser Zustand daher als **Superparamagnetismus** bezeichnet. Die temperaturabhängige, mittlere Umschaltfre-



quenz ist ein entscheidendes Kriterium für viele Anwendungen von Nanomagneten. In der magnetischen Datenspeicherung gelten derzeit beispielsweise etwa zehn Jahre als ausreichend bzw. äquivalent zu dauerhaft. Bei Raumtemperatur entspricht dies einer erforderlichen Energiebarriere von rund 1,2 eV.

Juri Honegger, PSI

der thermischen Energie bei gegebener Temperatur, sind spontane Fluktuationen der Magnetisierung möglich (Infokasten „Superparamagnetismus“). Wichtig dabei ist, dass die ferromagnetische Kopplung der atomaren Momente des Nanomagneten im Allgemeinen nicht verloren geht und sich die Fluktuationen daher weiterhin im Makro-Spin-Modell verstehen lassen, was die Beschreibung solcher Phänomene wesentlich vereinfacht.

Vermessene Nanoteilchen

Eine weit verbreitete Methode, um die magnetische Anisotropieenergie von Nanopartikeln zu bestimmen, besteht darin, die sog. Blocking-Temperatur großer Ensembles zu messen, ein Maß für die Umschaltfrequenz. Allerdings reflektieren solche Messungen nur die gemittelten Eigenschaften vieler Nanoteilchen. Techniken, die Messungen an einzelnen Teilchen erlauben, können hier aufschlussreiche Informationen über die Streuung von Eigenschaften und deren Ursache liefern. So erlaubt es die spin-polarisierte Rastertunnelmikroskopie, gleichzeitig magnetische und elektronische Eigenschaften mit der atomar aufgelösten Struktur von Nanomagneten zu korrelieren. Solche Rastersondenverfahren zeigen ihre Stärke vor allem bei niederdimensionalen Objekten wie dünnen Filmen, flachen Inseln bis hinunter zu einzelnen Atomen auf geordneten Oberflächen [4]. Für Einzelpartikelmessungen an dreidimensionalen Objekten existieren neue Techniken, beispielsweise micro-SQUIDs, mit denen sich das magnetische Umschaltverhalten von einzelnen Partikeln untersuchen lässt. Darüber hinaus sind magnetische Untersuchungen an Einzelpartikeln mittels Lorentz-Mikroskopie gelungen. Jüngere Ansätze versuchen, mit chiralen Elektronenstrahlen magnetische Empfindlichkeit in atomar auflösender Transmissionselektronenmikroskopie zu erreichen.

Große Quelle, kleine Magnete

Bei unseren Arbeiten nutzen wir die resonante Absorption polarisierter Synchrotronstrahlung, die große Speicherringe wie BESSY in Berlin oder SLS in Villigen (Schweiz) erzeugen. Für magnetische Untersuchungen eignet sich besonders der zirkulare magnetische Röntgendifferenzismus [5], der ausnutzt, dass die Absorption zirkular polarisierter Röntgenstrahlung von der Magnetisierung der Probe abhängt. Dieser Effekt, im Englischen X-ray Magnetic Circular Dichroism (XMCD) genannt, erlaubt es, den Magnetismus selbst atomarer Strukturen zu untersuchen [6]. Neben spektroskopischen Methoden wurden Mikroskopieverfahren entwickelt, die den XMCD-Effekt als Kontrastmechanismus ausnutzen, um räumlich aufgelöste Informationen beispielsweise über magnetische Domänen zu erhalten [1]. So nutzen wir an einem Strahlrohr der SLS ein Pho-

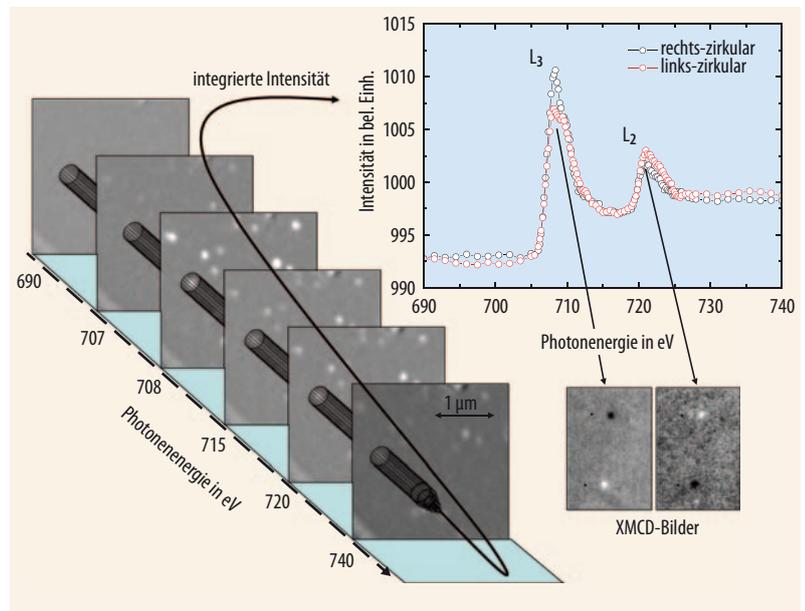


Abb. 2 Absorptionsspektren von einzelnen Nanopartikeln, hier 9 nm kleinen Eisenpartikeln, erhält man, indem man Bilder mit variabler Photonenergie aufnimmt und die über die Fläche der Nanopartikel integrierte Intensität als Funktion der Energie auswertet. Die Spektren an den $L_{2,3}$ -Absorptionskanten zeigen klar die energieabhängige Intensität der Partikel in der Bildserie.¹⁾ Die maximale Intensität wird an der L_3 -Absorptionskante von Eisen erreicht. Wegen der starken Spin-Bahn-Wechsel-

wirkung, die die Aufspaltung der L_2 - und L_3 -Kante verursacht, kehrt sich die Spinpolarisation bei Anregung der beiden Kanten jeweils um. Aus Bildserien mit rechts- und links-zirkular polarisierter Strahlung lassen sich XMCD-Spektren einzelner Partikel ermitteln. Der typische Vorzeichenwechsel des XMCD-Effekts beim Übergang von der L_3 - zur L_2 -Kante ist durch einen invertierten Kontrast in den entsprechenden XMCD-Bildern zu erkennen (rechts unten).

toemissions-Elektronenmikroskop (PEEM), um mit Hilfe des XMCD-Effekts spektroskopische und magnetische Untersuchungen an Nanostrukturen durchzuführen (Infokasten „PEEM und XMCD“). Die hohe Empfindlichkeit der Methode erlaubt es sogar, die Eigenschaften einzelner Nanopartikel zu untersuchen, wie sich an Eisennanopartikeln zeigen lässt (Abb. 2). Allerdings sind Details wie die Form oder interne Spinstruktur bei Nanomagneten mit Abmessungen unterhalb der typischen Ortsauflösung von derzeit 20 bis 100 nm nicht direkt im PEEM zugänglich. Dafür sind komplementäre Mikroskopietechniken wie Rasterelektronen- und Atomkraftmikroskopie erforderlich, mit denen sich die Form bzw. die Partikelgröße bestimmen lassen. Referenzstrukturen aus Gold, mit Elektronenstrahlolithographie auf die Probensubstrate aufgebracht, ermöglichen es, dieselben Partikel in verschiedenen Mikroskopen zu identifizieren und somit magnetische und strukturelle Eigenschaften einzelner Partikel in unseren Experimenten zu korrelieren.

Ein Beispiel für die Anwendung von PEEM ist die Messung des zeitabhängigen, magnetischen Kontrastes von Nanopartikeln aus einer Eisen-Kobalt-Legierung auf einem Silizium-Wafer (Abb. 3). Die Elementspezifität der Methode erlaubt es, die Magnetisierung beider Elemente unabhängig voneinander zu studieren. Die meisten Partikel zeigen einen zeitlich unveränderlichen magnetischen Kontrast. Dieser hat im Eisen- und Ko-

1) In magnetischen Übergangsmetallen sind die $L_{2,3}$ -Kanten Folge einer resonanten Anregung von $2p_{1/2}$ und $2p_{3/2}$ -Rumpfelektronen in die spin-polarisierten $3d$ -Zustände. Wird zirkular polarisierte Röntgenstrahlung absorbiert, sind die angeregten Rumpfelektronen spinpolarisiert und können nur in die entsprechenden freien spin-polarisierten $3d$ -Zustände angeregt werden.

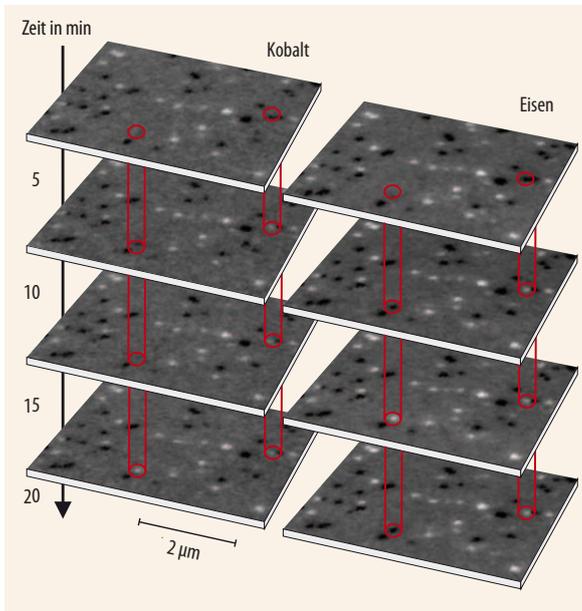


Abb. 3 Für Nanopartikel einer $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$ -Legierung wird der Eisenanteil an der L_3 -Absorptionskante bei einer Photonenenergie von 708 eV, der Kobaltanteil bei 778 eV sichtbar. Die jeweils über drei Minuten integrierten Bilder wurden bei Raumtemperatur abwechselnd aufgenommen, beginnend mit Kobalt. Bei den beiden hervorgehobenen Nanopartikeln ändert sich die Magnetisierungsrichtung spontan mit der Zeit.

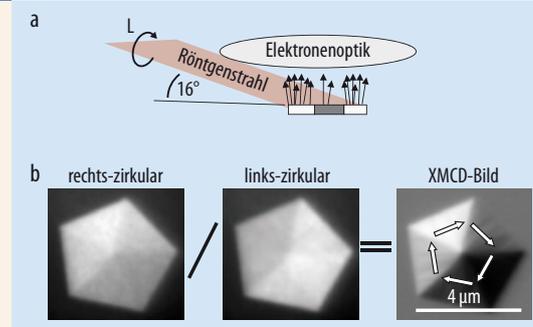
baltanteil der Partikel das gleiche Vorzeichen, wie von der bekannten ferromagnetischen Kopplung beider Elemente in dieser Legierung zu erwarten. Wie sowohl am Eisen- als auch am Kobaltanteil zu beobachten ist, klappt im Laufe der Zeit bei einigen Partikeln die Magnetisierung spontan um. Dies zeigt das Einsetzen superparamagnetischer Fluktuationen an. Die Rate der Schaltereignisse erlaubt Rückschlüsse auf die beteiligten Energiebarrieren. Außerdem ist es möglich, die bevorzugten Magnetisierungsrichtungen abzuleiten, da sich die Magnetisierung statistisch häufiger entlang dieser Richtungen orientiert. Das Auftreten von stabilen und fluktuierenden Partikeln in einem Ensemble zeigt, dass die magnetischen Eigenschaften von Partikel

zu Partikel stark variieren. Dieses Phänomen ist mit Ensemble-Messungen nur schlecht zugänglich, da in typischen Ensembles neben Größen- und Formvariationen eine Vielzahl von Wechselwirkungen mit der Umgebung oder der Partikel untereinander gleichzeitig auftreten können [7]. Im vorliegenden Fall können die unterschiedlichen Eigenschaften einerseits aus der verbleibenden Größenverteilung innerhalb der Probe resultieren, wobei die größeren Partikel magnetisch stabil sein sollten, während die kleineren superparamagnetisch wären. Weitere Experimente zeigen jedoch, dass sogar die Koexistenz von superparamagnetischen und ferromagnetischen Partikeln bei gleicher Größe möglich ist. Denkbare Ursache dafür sind beispielsweise Defekte oder grenzflächen-induzierte Verspannungen, die Gegenstand aktueller Untersuchungen sind.

Die Kombination von Modellbildung und Experiment erlaubt sogar Einblicke in die interne magnetische Struktur von Nanopartikeln. Dies zeigt das Beispiel von Eisenpartikeln auf einem ferromagnetischen Kobaltsubstrat (Abb. 4) [8]. Die starke, aber kurzreichweitige Austauschwechselwirkung zwischen beiden metallischen Systemen lässt einerseits eine ferromagnetische Kopplung zwischen ihnen vermuten. Andererseits besitzen die Partikel eine Anisotropie mit individueller Vorzugsachse. Die resultierende Magnetisierung wird also durch den Wettbewerb von Austauschwechselwirkung und Anisotropieenergie bestimmt. Im Experiment lässt sich beobachten, dass die Magnetisierung der Partikel im Allgemeinen tatsächlich nicht parallel zur jeweils darunter liegenden Domäne der Kobaltschicht ausgerichtet ist. Korreliert man die Abweichung der Magnetisierungsrichtungen mit der Partikelgröße, zeigt sich, dass nur Partikel mit einer Größe unterhalb von etwa 6 nm eine parallele Kopplung aufweisen. Dieses Verhalten lässt sich mit Hilfe von numerischen Simulationen nachvollziehen. Dabei wird angenommen, dass die atomaren magnetischen Momente im Nanopartikel an der Grenzfläche fest an die Magnetisierung des Substrates gekoppelt sind. Weiter von der Grenzfläche entfernt, können die

PEEM UND XMCD

Das Photoemissions-Elektronenmikroskop (PEEM) nutzt den XMCD-Effekt zur Untersuchung magnetischer Nanostrukturen. Dabei werden die Proben mit polarisierter Synchrotronstrahlung beleuchtet und für die Abbildung die durch die Absorption der Röntgenstrahlung emittierten Elektronen verwendet (Abb. a). Der Kontrast im Bild ist dabei im Wesentlichen proportional zum lokalen Röntgenabsorptionsquerschnitt. Nimmt man Bilder mit einer resonanten Photonenenergie auf – z. B. bei 708 eV an der L_3 -Absorptionskante (siehe Abb. 2) von Eisen –, lassen sich ferromagnetische Domänen element-spezifisch abbilden. Dazu sind zwei Bilder nötig, eines mit rechts-zirkular und eines mit links-zirkular polarisierter Strahlung (Abb. b). In einem entsprechenden XMCD-Kontrast-Bild heben sich nicht-magnetischen Anteile auf (z. B. die Topographie), wohingegen sich die magnetischen Anteile verstärken. So zeigen die beiden Einzelbilder einer flachen, fünfeckigen Insel aus einer Eisen-Nickel-Legierung (Permalloy) vorwiegend die Topographie



der Insel. Erst durch pixelweise Division beider Einzelbilder wird der magnetische Kontrast deutlich sichtbar. Die Pfeile kennzeichnen die Orientierung der fünf Domänen der Insel. Bei Verwendung von linear polarisierter Strahlung lassen sich auch antiferromagnetische oder ferroelektrische Domänen in entsprechenden Materialien abbilden.

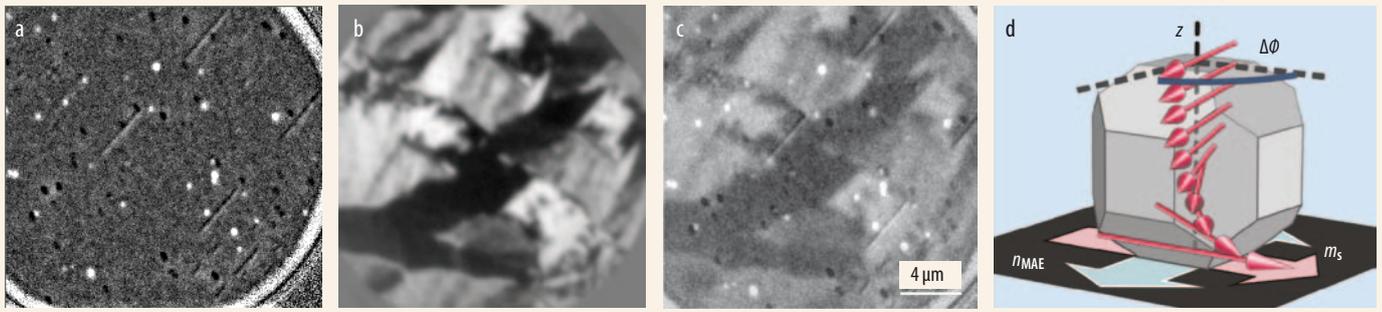


Abb. 4 Elementspezifische magnetische Kontrastbilder zeigen Eisennanopartikel (a) auf einer Kobaltschicht mit ihrer komplexen Domänenstruktur (b) an der gleichen Stelle. Bei einer Überlagerung beider Bilder (c) wäre zu erwarten, dass an einer Stelle mit hellen XMCD-Kon-

trast im Kobalt auch ein Eisenpartikel mit hellem XMCD-Kontrast liegt. Bei vielen Teilchen ist das aber nicht der Fall, weil z. B. ein Fe-Partikel mit schwarzem Kontrast auf einer hellen Co-Domäne liegt. Dies lässt sich mithilfe einer Spinspirale im Fe-Teilchen erklären, die durch den

Wettbewerb zwischen der Austauschkopplung an die Magnetisierungsrichtung der Kobaltschicht (m_s) und der intrinsischen magnetischen Anisotropie (η_{MAE}) des Eisenpartikels entsteht (d).

Momente sich jedoch in die Vorzugsachse des Partikels „eindrehen“, um die Gesamtenergie des Systems zu minimieren. Die Eigenschaften der resultierenden Spinspirale sind durch die Anisotropieenergie und die Austauschwechselwirkung bestimmt. Tatsächlich zeigen die Rechnungen, dass solche Spinspiralen nur oberhalb einer kritischen Partikelgröße stabil sind, während kleinere Partikel eine kollineare Magnetisierung parallel zum Substrat bevorzugen. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Wechselwirkung eines Nanopartikels mit seinem Substrat zu Abweichungen vom Makro-Spin-Modell führen kann und daher in entsprechenden Untersuchungen berücksichtigt werden muss.

Unter Laserbeschuss

Nanomagnete mit thermisch stabiler Magnetisierungsrichtung sind eine wichtige Voraussetzung für die zukünftige Datenspeicherung. Gleichzeitig wird nach alternativen Möglichkeiten zur Manipulation des Magnetisierungszustands gesucht. Sehr interessant sind dabei ultrakurze Laserpulse [9]. In Zusammenarbeit mit den Universitäten Nijmegen und York sowie weiterer Forschungsgruppen konnten wir zeigen, dass ein linear polarisierter, 50 fs kurzer Laserpuls die Magnetisierung in einer Gadolinium-Eisen-Kobalt-Schicht (GdFeCo) reproduzierbar umschalten kann (Abb. 5) [10]. Dabei kommt es nicht auf die Polarisierung des Laserpulses an, sondern nur auf den schnellen Energieeintrag. Wie kann ein isotroper Heizpuls die Magnetisierungsrichtung ändern? Das Geheimnis liegt in der schnellen Anregung und dem Drehimpulsaustausch zwischen den Untergittern. GdFeCo besteht aus zwei magnetischen Untergittern, für Gd und FeCo, die antiparallel miteinander koppeln. Ihre Magnetisierung ist nicht gleich groß, sodass ein resultierendes magnetisches Gesamtmoment bleibt. Der Heizpuls des Lasers ist so kurz, dass das System nicht im thermischen Gleichgewicht ist. Durch den kurzen Laserpuls steigt die Temperatur des Elektronensystems schlagartig auf etwa 1400 K an, und die beiden Untergitter verlieren

ihr magnetisches Moment. Allerdings geschieht dies unterschiedlich schnell: bei FeCo schneller als bei Gd, wie zeitaufgelöste Messungen auf der Femtosekunda-skala gezeigt haben [11]. Das FeCo-Untergitter ändert sogar seine Magnetisierungsrichtung und ist kurzzeitig parallel zum Gd-Untergitter. Während nun das magnetische Moment vom FeCo-Untergitter beim Abkühlen des Systems bereits wieder zunimmt, geht das Moment vom Gd-Untergitter noch weiter zurück, bis es seine Richtung ändert und wieder zunimmt. Nach einigen Pikosekunden hat sich die Gesamtmagnetisierung umgekehrt. Dieser erstaunliche Effekt erlaubt eine neue Sichtweise auf die Manipulation von magnetischen Domänen, denn er ist sehr schnell und kommt ohne externes Magnetfeld aus. Weitere Forschungsprojekte werden zeigen, ob sich damit sogar neue Wege für Sensoren, Logik-Elemente oder für die magnetische Datenspeicherung ergeben.

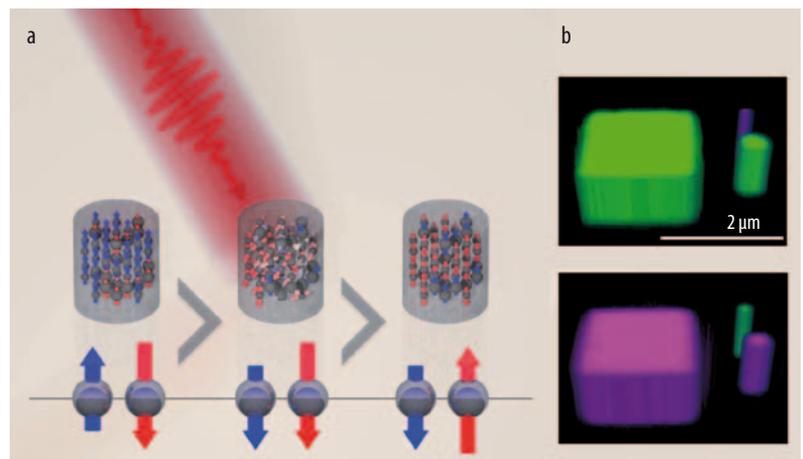


Abb. 5 a) Ausgehend von antiparallel zueinander ausgerichteten Untergittern von FeCo (blau, vereinfacht als Fe-Untergitter dargestellt) und Gd (rot) heizt der Laserpuls das Elektronensystem sehr schnell auf, sodass ein Übergangszustand mit paralleler Ausrichtung entsteht. Nach dem Abkühlen sind die Momente wieder antiparallel zueinander ausgerichtet, nun aber mit umgekehrter

Richtung. b) In dieser 3D-Visualisierung der mit PEEM gemessenen XMCD-Bilder entspricht die kleine Fläche einer Domänengröße von 200 nm; grün entspricht einer Magnetisierungsrichtung aus der Ebene, lila in die Ebene. Mit dem Laserpuls lässt sich die Magnetisierungsrichtung in den einzelnen Strukturen reproduzierbar umkehren.

Richard Evans, University of York

Ausblick

Eine weitere wichtige Aufgabe für die Zukunft wird die gezielte Kontrolle der Eigenschaften von Nanomagneteten sein [12]. So lassen sich bereits heute durch Nanostrukturierung magnetische Kopplungen beeinflussen, durch chemische Liganden magnetischen Momente ein- und ausschalten [13] oder die magnetische Anisotropie in geordneten Systemen einstellen [14]. Ziel ist es, neue Materialien zu entwerfen, die mehrere Funktionalitäten in sich vereinen, oder ganz neue Arten der Kontrolle der Magnetisierung erlauben. Seit kurzem wird außerdem intensiv daran geforscht, ferroelektrisches Verhalten mit magnetischem Verhalten zu kombinieren. Dies würde es ermöglichen, die Magnetisierung mittels elektrischer Felder zu schalten. Neben intrinsischen multiferroischen Materialien werden auch Heterostrukturen untersucht, in denen eine ferromagnetische Schicht an ein ferroelektrisches Material koppelt [15]. Die Kopplung zwischen den Materialien vermitteln entweder piezoelektrische Spannungen oder die ferroelektrische Polarität. So ist es möglich, die magnetische Anisotropie im Ferromagneten mittels einer elektrischen Spannung zu manipulieren. Nanomagnete lassen auch in diesem Feld spannende neue Erkenntnisse erwarten.

Danksagung

Wir danken all unseren Kolleginnen und Kollegen, die an den gezeigten Forschungsergebnissen beteiligt waren, insbesondere: A. Balan, A. Fraile Rodríguez, J. Bansmann, K.-H. Meiwes-Broer, L. Le Guyader, S. El Moussaoui, J. Honegger, A. Weber, L. J. Heyderman, R. W. Chantrell, A. Kimel, A. Kirilyuk und Th. Rasing.

Literatur

- [1] J. Stöhr und H. C. Siegmann, *Magnetism: From Fundamentals to Nanoscale Dynamics*, Springer, Heidelberg (2006)
- [2] A.-H. Lu et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **46**, 1222 (2007)
- [3] A. Hubert und R. Schäfer, *Magnetic Domains*, Springer, Heidelberg (1998)
- [4] M. Bode et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 067201 (2004)
- [5] G. Schütz et al., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 737 (1987)
- [6] P. Gambardella et al., *Science* **300**, 1130 (2003)
- [7] F. Kronast et al., *Nano Lett.* **11**, 1710 (2011)
- [8] A. Fraile Rodríguez et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 127201 (2010)
- [9] A. Kirilyuk et al., *Rep. Prog. Phys.* **76**, 2731 (2013)
- [10] T. A. Ostler et al., *Nat. Comm.* **3**, 666 (2012)
- [11] I. Radu et al., *Nature* **472**, 205 (2011)
- [12] C. Antoniak et al., *Nat. Comm.* **2**, 528 (2011)
- [13] C. Wückerlin et al., *Nat. Comm.* **1**, 61 (2010)
- [14] T. R. Umbach et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 267207 (2012)
- [15] R. Ramesh und N. A. Spaldin, *Nature Mater.* **6**, 21 (2007)

DIE AUTOREN

Armin Kleibert (FV Oberflächenphysik) studierte an der Universität Rostock und promovierte 2005 über magneto-optische Verfahren im weichen Röntgenbereich und die Eigenschaften magnetischer Nanopartikel auf Oberflächen. 2008 wechselte er an die SLS am Paul Scherrer Institut (PSI) und ist seit 2010 verantwortlicher Wissenschaftler an der SIM-Strahllinie.



Frithjof Nolting (FV Magnetismus) studierte an der TU Braunschweig und promovierte 1998 an der Universität Zürich über die Vermessung der Gravitationskonstante. Sein Forschungsaufenthalt an der ALS in Berkeley und der SSRL in Stanford führte ihn zur Erforschung von magnetischen Materialien mit Synchrotronstrahlung. 2001 wechselte er an das PSI, wo er seit 2013 das Labor Kondensierte Materie an der SLS leitet. Seit 2009 ist er auch Titularprofessor an der Universität Basel.



Das Standardwerk der Mechanik



FRIEDHELM KUYPERS

Klassische Mechanik

Mit über 300 Beispielen und Aufgaben mit Lösungen • 9., erweiterte Aufl.

ISBN: 978-3-527-40989-1
2010 740 S. mit 348 Abb., davon 16 in Farbe,
und 8 Tab. Broschur € 49,90

mit DVD und Software
„Mechanicus“

Die 9. Auflage dieses modernen Lehrbuchs liefert eine Einführung in die klassische nicht-relativistische Punktmechanik und die Mechanik des starren Körpers. Alle grundlegenden Aussagen werden durch anschau-

liche Beispiele illustrativ verdeutlicht. Die zahlreichen Aufgaben sind eng an den Stoff angelehnt und haben am Ende des Buches detaillierte Lösungen.

Besuchen Sie uns unter
www.wiley-vch.de

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61 • D-69451 Weinheim
Tel. +49 (0) 62 01-60 64 00 • Fax +49 (0) 62 01-60 61 84 • E-mail: service@wiley-vch.de
Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Stand der Daten: November 2012