



Auf der Titelseite von Science: Atomare Bits im Blick

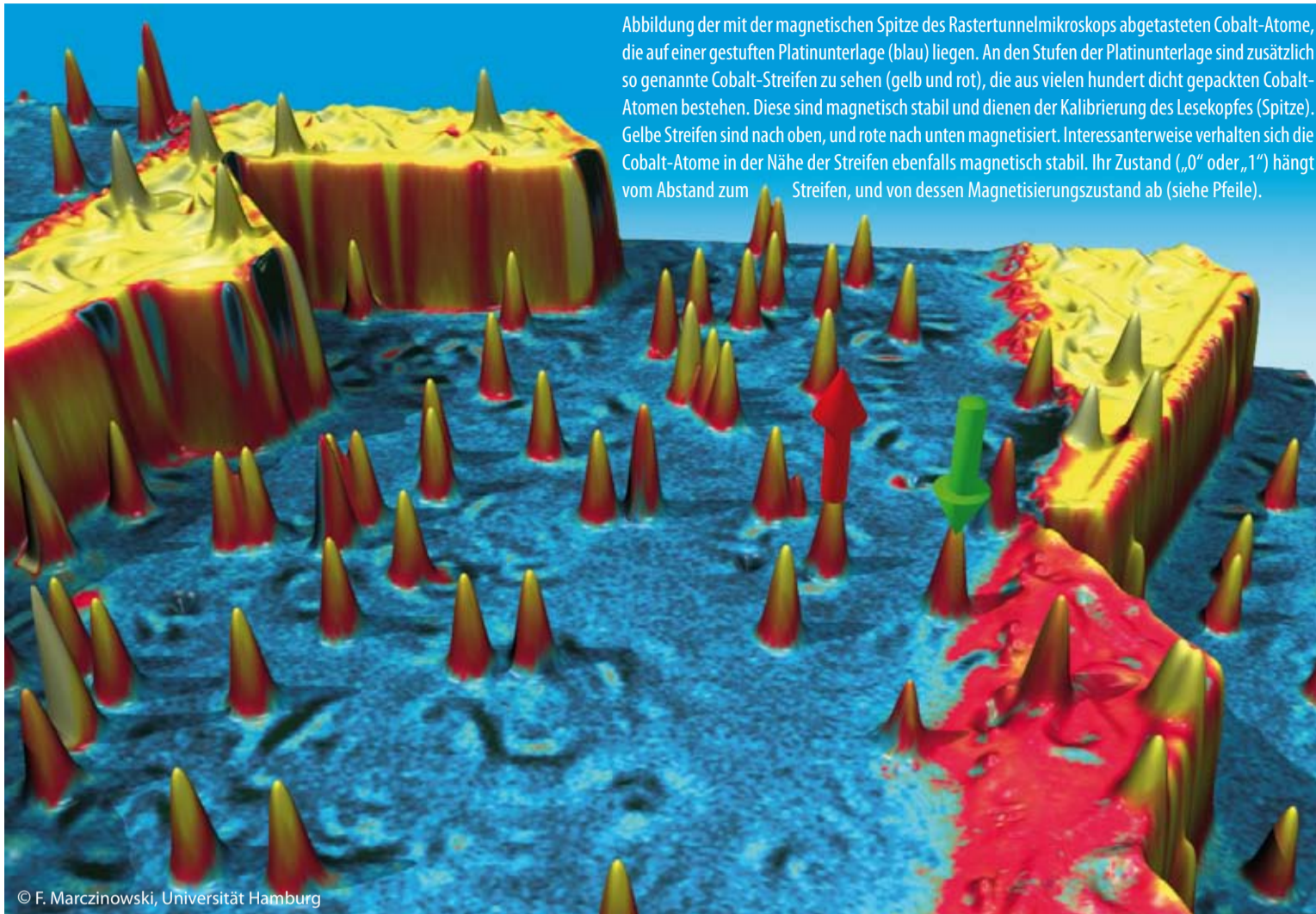


Abbildung der mit der magnetischen Spitze des Rastertunnelmikroskops abgetasteten Cobalt-Atome, die auf einer gestuften Platinunterlage (blau) liegen. An den Stufen der Platinunterlage sind zusätzlich so genannte Cobalt-Streifen zu sehen (gelb und rot), die aus vielen hundert dicht gepackten Cobalt-Atomen bestehen. Diese sind magnetisch stabil und dienen der Kalibrierung des Lesekopfes (Spitze). Gelbe Streifen sind nach oben, und rote nach unten magnetisiert. Interessanterweise verhalten sich die Cobalt-Atome in der Nähe der Streifen ebenfalls magnetisch stabil. Ihr Zustand („0“ oder „1“) hängt vom Abstand zum Streifen, und von dessen Magnetisierungszustand ab (siehe Pfeile).

© F. Marczinowski, Universität Hamburg

Die stetig zunehmende Miniaturisierung heute üblicher elektronischer Geräte wie Mobiltelefone, oder Digitalkameras erfordert immer leistungsfähigere Speicher, welche die Flut der Daten auf kleinstem Raum erfassen können. Daher gab es in den letzten Jahrzehnten einen dramatischen Anstieg der Speicherdichte von magnetischen Datenspeichern, der im Wesentlichen durch die stetige Verkleinerung der Grundbausteine solcher Speicher, der Bits, erreicht wurde. Solche Bits sind voneinander isolierte magnetische Einheiten, deren Magnetisierung nach oben („1“) oder nach unten („0“) ausgerichtet werden kann, um Information zu speichern. Der Magnetisierungszustand des Bits kann anschließend mittels eines geeigneten Lesekopfes wieder ausgelesen werden, um auf die Information zuzugreifen. Wäre man nun in der Lage, Bits aus einzelnen Atomen herzustellen, so ergäben sich immens hohe Speicherdichten. Es gibt bereits Ideen, solche atomaren Bits, bei denen die quantenmechanischen

Eigenschaften zutage treten (so genannte Qubits), für völlig neuartige Rechenverfahren zu nutzen, um in so genannten Quantencomputern die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen. Die wichtigste Voraussetzung für solche Technologien ist, dass der Magnetisierungszustand solch eines Qubits überhaupt ausgelesen werden kann.

Wie die renommierte US-Fachzeitschrift „Science“ im April 2008 berichtete ist es Wissenschaftlern des SFB 668 gelungen, den Magnetisierungszustand des kleinstdenkbaren Bits, eines einzelnen magnetischen Atoms, das auf einer nichtmagnetischen Unterlage liegt, auszulesen. Dazu benutzten sie Cobalt-Atome, die auf eine Platinunterlage aufgebracht wurden. Als Lesekopf dient die magnetisch beschichtete Spitze eines Rastertunnelmikroskops, mit deren Hilfe die Atome berührungslos in einem Abstand von wenigen Atomdurchmessern abgetastet werden. Bevor allerdings mithilfe solcher Strukturen funktionierende Speichermedien gebaut werden können, sind noch

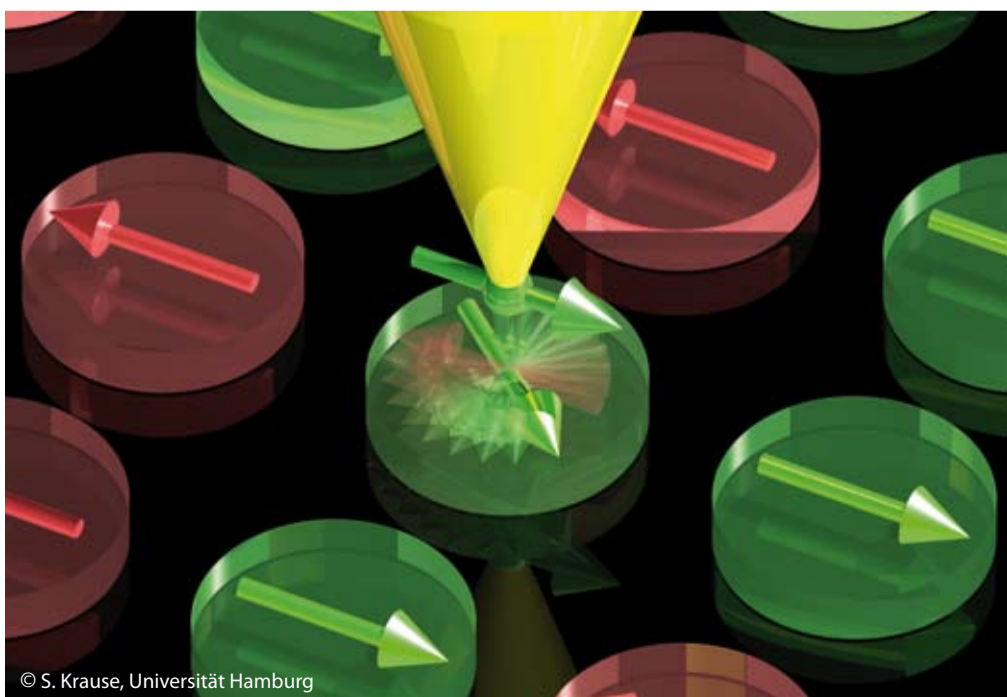
große Herausforderungen zu überwinden. Bei magnetischen Speichern ist essentiell, dass die Magnetisierung der Bits nicht von selbst von „1“ nach „0“ schaltet, da sonst die Information verloren gehen würde. Die Bits müssen also bei Raumtemperatur „magnetisch stabil“ sein. Wie die Hamburger Forschergruppe festgestellt hat, ist dies für die von ihnen untersuchten Cobalt-Atome selbst bei extrem tiefen Temperaturen von -273 °C nahe dem absoluten Nullpunkt nicht der Fall: Die Cobalt-Atome schalten statistisch zwischen „1“ und „0“ und können nur mithilfe eines von außen angelegten Magnetfeldes in einen bevorzugten Zustand gezwungen werden. Gegenwärtig werden andere Materialkombinationen erforscht, welche stabile magnetische Zustände auch auf Einzelatomebene ermöglichen sollten.

F. Meier, L. Zhou, J. Wiebe, and R. Wiesendanger,

Revealing magnetic interactions from single-atom magnetization curves

Science 320, 82-86 (2008)

Magnetische Datenspeichertechnik der Zukunft



© S. Krause, Universität Hamburg

Wissenschaftler des SFB 668 haben ein völlig neues Verfahren zur magnetischen Speicherung von digitalen Informationen vorgestellt, das komplett auf magnetische Felder verzichtet und damit extrem hohe Speicherdichten ermöglicht. Den Hamburger Forschern gelang es weltweit erstmalig, die Magnetisierung von winzigen Nanoinseln durch den Einsatz von Spinströmen gezielt und berührungsfrei zu schalten.

In der Abbildung symbolisieren die grünen und roten Scheiben die Nanoinseln, deren magnetische Ausrichtung durch die Farbgebung und Pfeilrichtung gekennzeichnet sind. Der von der gelben Spitze des spinpolarisierten Rastertunnelmikroskops fließende Tunnelstrom zwingt die magnetische Ausrichtung der Nanoinseln in eine bestimmte Richtung. Durch gleichzeitige Variation der angelegten Spannung kann die Magnetisierung so gezielt in die Bitzustände „0“ und „1“ geschaltet werden. [⇒ Weiter auf Seite 2](#)

Der SFB 668

Der Magnetismus ist eines der am längsten bekannten Phänomene in Festkörpern und hat schon seit Jahrtausenden die Faszination der Menschheit hervorgerufen. Bereits seit Jahrhunderten sind wichtige technologische Anwendungen, wie etwa die Kompassnadel, bekannt. Umso erstaunlicher ist es, dass gerade in jüngster Zeit der Magnetismus wieder zu einem der am intensivsten untersuchten Festkörperphänomene geworden ist. Dies ist einerseits eng verknüpft mit neuen Möglichkeiten der experimentellen Herstellung, Synthese und Charakterisierung sowie der theoretischen Behandlung nanoskaliger magnetischer Systeme bis zur Ebene von Einzelatomen, was grundlegende Untersuchungen magnetischer Wechselwirkungen auf einer zuvor nicht zugänglichen Längenskala erlaubt. Andererseits ergeben sich auf Grund der fortschreitenden Miniaturisierung im Bereich der magnetischen Datenspeichertechnik interessante Fragen, wie beispielsweise diejenige nach den kleinsten Einheiten, die noch eine zeitlich stabile magnetische Ausrichtung aufweisen und somit grundsätzlich zur magnetischen Datenspeicherung nutzbar sind, oder die Frage nach den zeitlich kürzesten Ummagnetisierungsprozessen in nanoskaligen magnetischen Systemen, die ein schnellstmögliches Einschreiben der magnetischen Information erlauben.

Das Ziel des SFB 668 ist es, zu einem grundlegenden Verständnis des statischen und dynamischen magnetischen Verhaltens von Atomen, Molekülen, Clustern, Nanoteilchen, Nanodrähten und lateral strukturierten Nanosystemen in Kontakt mit Substratoberflächen beizutragen. Darauf basierend soll längerfristig eine gezielte Kontrolle magnetischer Eigenschaften bis hin zur atomaren Skala bzw. bis hin zum einzelnen Spin ermöglicht werden. Dies würde gleichzeitig die Grundlage für neue Generationen magnetischer Datenspeicher schaffen, die mindestens tausendfach leistungsfähiger sein könnten als derzeitige magnetische Massenspeicher.

Auf dem Weg zu diesem visionären Ziel müssen viele fundamentale Fragen angegangen werden, wie beispielsweise der Einfluss der Bindungsabstände der Atome untereinander und zum Substrat sowie der Hybridisierung von Elektronenzuständen zwischen Atomen, Molekülen, Clustern, Nanostrukturen und der Substratoberfläche auf die magnetischen Eigenschaften, insbesondere auf die Ausbildung und die Stabilität einer magnetischen Vorzugsrichtung und auf die Art der magnetischen Kopplung. Ebenso müssen grundlegende Fragen im Zusammenhang mit dem Transport von Elektronen in Wechselwirkung mit nanoskaligen magnetischen Systemen, bis hin zum Einzelspin, bearbeitet sowie das dynamische Verhalten nanoskaliger magnetischer Systeme mit höchstmöglicher zeitlicher Auflösung untersucht werden. Aufbauend auf einem besseren Verständnis magnetischer Phänomene auf der Nanometerskala soll dann der Frage nachgegangen werden, wie die magnetischen Zustände von Nanoobjekten gezielt manipuliert werden können, etwa durch Spinströme oder mit polarisiertem Laserlicht.

Um diese anspruchsvollen Aufgaben zu lösen, werden innovative experimentelle und theoretische Verfahren benutzt. Hierzu zählen insbesondere die spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie und -spektroskopie, welche erstmals den Zugang zur Untersuchung von Spinstrukturen bis zur atomaren Skala geschaffen hat, sowie die zeitlich hochauflösenden Laserspektroskopietechniken, die neuerdings den Bereich bis zur Attosekunderskala erschließen. Schließlich werden in der Theorie neue Konzepte und Verfahren zur Behandlung der spinabhängigen Elektronenstruktur und des Transports in nanoskaligen Systemen, insbesondere unter Berücksichtigung elektronischer Korrelationseffekte, entwickelt und eingesetzt.



© S. Krause, Universität Hamburg

Zukünftige magnetische Datenspeichertechnik

Fortsetzung von Seite 1

Das heutige Informationszeitalter ist geprägt von immer größeren Datenfluten. Komplette Fotoalben, Videos und Musiksammlungen werden heute wie selbstverständlich auf Handys und Medien-Playern verstaut, die in jede Hosentasche passen. Immer mehr Daten werden auf immer kleinerem Raum gespeichert. Doch diese stetige Miniaturisierung erfordert immer ausgeklügeltere Technologien, will sie nicht irgendwann an ihre physikalischen Grenzen stoßen.

Ein gutes Beispiel hierfür ist die Festplatte: Das seit Jahrzehnten fortschreitende Wachstum der Festplattenkapazitäten ist nur möglich durch die ständige Erhöhung der Speicherdichte und damit der Miniaturisierung jedes einzelnen Bits, der kleinsten Informationseinheit. In konventionellen Festplatten wird das Schreiben von Informationen über magnetische Felder realisiert. Wird die Datendichte jedoch zu hoch, beeinflusst das Magnetfeld beim Schreiben eines Bits auch benachbarte Bits, was unweigerlich zum Datenverlust führt.

Wie die Zeitschrift „Science“ im September 2007 berichtete, haben Forscher des SFB 668 am Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg nun ein neues Verfahren zum Schreiben von Informationen vorgestellt, das komplett auf magnetische Felder verzichtet und gleichzeitig höchste Speicherdichten ermöglicht. Hierfür wird ein Werkzeug aus der Nanotechnologie genutzt - das sogenannte spinpolarisierte Rastertunnelmikroskop, bei dem durch Verwendung einer metallischen Sondenspitze mittels Tunnelstrom berührungsfrei eine magnetische Oberfläche lokal untersucht werden kann. Dieses Verfahren ermöglicht eine extrem hohe Auflösung bis hin zur Abbildung der magnetischen Eigenschaften einzelner Atome.

Erstmals gelang es nun den Forschern die magnetischen Zustände nicht nur atomgenau abzubilden, sondern auch gezielt auf der Nanometerskala zu schalten. Die Wissenschaftler untersuchten dafür kleinste Nanoinseln, die aus gerade mal einhundert Atomen bestehen. Während bei niedrigen

Tunnelströmen von einigen Nanoampere zwischen Sondenspitze und Insel die untersuchten Nanoinseln thermisch schalten, ermöglicht ein tausendfach erhöhter Strom, die Inseln mit derselben Sondenspitze in eine bestimmte Magnetisierungsrichtung zu zwingen. Durch gleichzeitige Variation der angelegten Spannung kann die Magnetisierung dann gezielt in die Bitzustände „0“ und „1“ geschaltet werden.

Dieses „strominduzierte Schalten der Magnetisierung“ könnte in absehbarer Zukunft das Speichern und Auslesen von Informationen in einzelne magnetische Atome ermöglichen und zu neuen, revolutionären Festplattentechnologien führen, deren Speicherdichte bis zu zehntausendfach höher ist als die heutiger Festplatten.

S. Krause, L. Berbil-Bautista, G. Herzog, M. Bode, and R. Wiesendanger

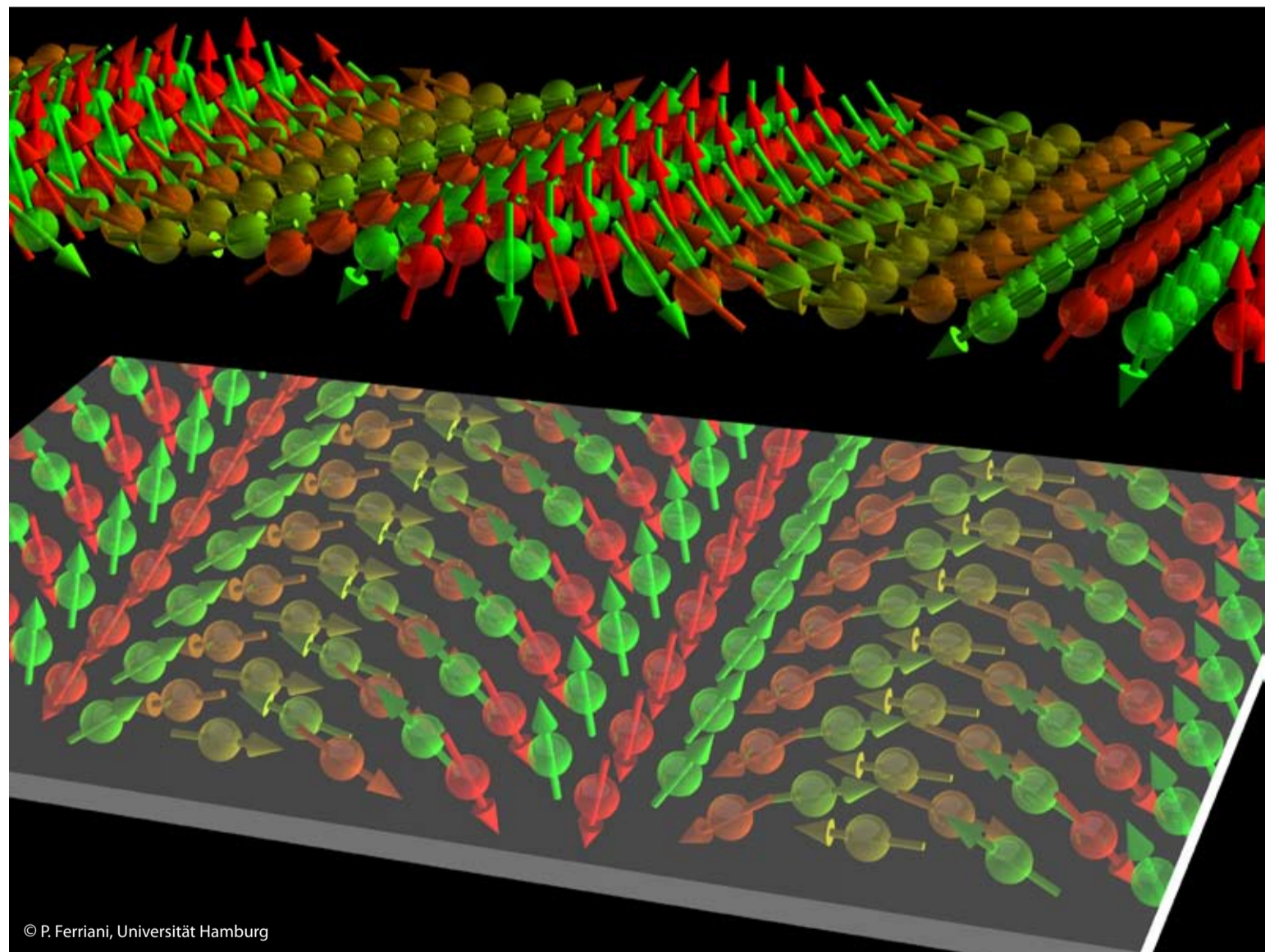
Current-Induced Magnetization Switching with a Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscope
Science **317**, 1537 - 1540 (2007)

Magnetischer Drehsinn im Nanokosmos

Hamburger und Jülicher Wissenschaftler konnten erstmals nachweisen, dass rechts- und linkshändige Drehung bei magnetischen Schichten auf atomarer Ebene nicht immer gleichwertig sind. Diese Auswahl des Drehsinns, eine so genannte Chiralität, bei magnetischen Strukturen wurde an der Universität Hamburg mithilfe der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie experimentell gefunden und der Mechanismus durch aufwändige Computerberechnungen in Hamburg sowie im Forschungszentrum Jülich aufgeklärt. Wie die Fachzeitschrift „Nature“ im Mai 2007 berichtete, könnten diese neuen außergewöhnlichen Erkenntnisse ein wichtiger Meilenstein bei der Entwicklung völlig neuartiger Computersysteme sein, die auf der so genannten „Spintronik“ basieren.

Schon lange weiß man um die große Bedeutung von Bild und Spiegelbild in der Natur. Beide sehen sich zwar sehr ähnlich, sind aber nicht identisch, da das Spiegelbild durch Drehung nicht mit dem Original zur Deckung gebracht werden kann. Solche Systeme nennt man in der Wissenschaft „chiral“. Einschlägige Beispiele aus der makroskopischen Welt sind die rechte und linke Hand oder rechts- bzw. linksgewundene Schneckenhäuser. Auch im Nanokosmos findet man viele chirale Moleküle wie Zucker und Aminosäuren nur in einer der zwei möglichen Formen vor. Dies erklärt auch die außerordentliche Bedeutung der Chiralität bei Wirkstoffen in der Medizin. Auch bei der DNA-Doppelhelix, auf der alles Leben basiert, hat die Natur entschieden, sie nur in einer der beiden möglichen chiralen Formen vorkommen zu lassen.

Wie „Nature“ berichtete, fanden Wissenschaftler des SFB 668 bei der Untersuchung einer einzelnen atomaren Manganschicht auf Wolfram mit einem spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop eine komplexe magnetische Struktur: statt einer parallelen oder antiparallelen Ausrichtung benachbarter magnetischer Momente - wie es bereits in ähnlichen Systemen beobachtet wurde - zeigen die Messungen eine Spiralstruktur, bei der das magnetische Moment jedes Atoms gegenüber dem seines Nachbarn verdreht ist. Bei genauerer Untersuchung



© P. Ferriani, Universität Hamburg

Abbildung: Die magnetischen Momente der einzelnen Mangan-Atome bilden eine gedrehte dreidimensionale Struktur, eine so genannte Spinspirale. In der Abbildung repräsentieren die Pfeile schematisch die magnetischen Momente der Mangan-Atome, die so genannten „Spins“, die man sich als winzige Kompassnadeln vorstellen kann. Oben sieht man den einen Drehsinn, unten im Spiegelbild den anderen.

dieses Phänomens wurde festgestellt, dass der Drehsinn dieser Spirale immer gleich ist, während die andere Drehrichtung nicht beobachtet wurde, die magnetische Struktur ist also chiral.

Um den Mechanismus für die Bildung dieser ungewöhnlichen Magnetstruktur aufzuklären wurden in Hamburg und in Jülich aufwändige Berechnungen durchgeführt, die überhaupt erst in jüngster Zeit durch die Verwendung von Hochleistungscomputern möglich sind. Diese Rechnungen erlauben

Vorhersagen über die Stärke der Drehung sowie über den Drehsinn magnetischer Strukturen. Nur ein Bruch der Symmetrie erlaubt die Auswahl eines Drehsinns: so gibt es nur sehr wenige Kristalle, die im Inneren diese Eigenschaft überhaupt aufweisen können, während diese Bedingung an Oberflächen immer erfüllt ist. Umso erstaunlicher ist es, dass diese chiralen Magnetstrukturen erst jetzt an einer Kristalloberfläche identifiziert wurden. Für Anwendungen im Zukunftsgebiet der „Spintronik“ ergeben sich in sol-

chen chiralen Magnetsystemen neue Möglichkeiten: ein fließender Strom kann einen Drehimpuls auf eine Spinspirale übertragen und diese sogar in Bewegung versetzen.

M. Bode, M. Heide, K. von Bergmann, P. Ferriani, S. Heinze, G. Bihlmayer, A. Kubetzka, O. Pietzsch, S. Blügel, and R. Wiesendanger

Chiral magnetic order at surfaces driven by inversion asymmetry
Nature **447**, 190-193 (2007)



Durchbruch bei der magnetischen Austauschkraftmikroskopie gelungen

Obwohl das Phänomen des Magnetismus bereits Jahrhunderte bekannt war, beschränkte sich die Nutzung bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts auf Kompass zur Navigation auf hoher See. Erst mit der Industrialisierung hat sich das Wissen um den Magnetismus und dessen Nutzung rasant weiterentwickelt. In unserer heutigen Welt sind Anwendungen auf Basis des Magnetismus nicht mehr wegzudenken. Er bildet zum Beispiel die Grundlage für zahlreiche Sensoren im Auto oder die Magnetspinresonanz in der Medizintechnik. Die größte Triebfeder der aktuellen Magnetismusforschung ist jedoch die digitale Datenspeichertechnologie, die eng mit der Nanotechnologie und dem Entstehen der Informationsgesellschaft verknüpft ist. Die Entwicklung magnetischer Speichermedien mit immer höherer Datenkapazität auf immer kleinerem Raum erfordert auch die Entwicklung von Mikroskopietechniken, mit denen diese winzigen magnetischen Strukturen bis zur atomaren Ebene sichtbar gemacht werden können. Denn je weniger Atome ein magnetisches Speicherelement bilden, desto wichtiger sind die magnetischen Eigenschaften jedes einzelnen Atoms.

Wie die Fachzeitschrift „Nature“ im März 2007 berichtete, gelang Wissenschaftlern des SFB 668 die Etablierung einer neuen hochauflösenden und magnetisch sensitiven Mikroskopietechnik – die magnetische Austauschkraftmikroskopie. Uwe Kaiser, Alexander Schwarz und Roland Wiesendanger benutzten ein selbst

entwickeltes Rasterkraftmikroskop, um mittels einer magnetisch sensitiven Sonde nicht nur die atomare Struktur, sondern auch die Anordnung der atomaren magnetischen Momente (Spins) auf der Oberfläche des Nichtleiters Nickeloxid abzubilden. Die Rasterkraftmikroskopie, auf der das neue Verfahren basiert, ist eine etablierte Technik, die mittels einer atomar scharfen Sonde die Anordnung von Atomen auf Oberflächen abtastet. Die Idee, diese Methode zur magnetischen Austauschkraftmikroskopie weiterzuentwickeln, um so auch die Anordnung atomarer Spins auf Oberflächen abzubilden, existiert schon seit Anfang der neunziger Jahre. Allerdings sind die magnetischen Austauschkräfte relativ schwach und deshalb schwierig zu detektieren. Weltweit gibt es bisher nur sehr wenige Rasterkraftmikroskope, die die Stabilität, hohe Auflösung und exzellente Kraftsensitivität erreichen, wie das der Hamburger Wissenschaftler.

Diese neue Methode stellt einen erheblichen Fortschritt auf dem Gebiet der hochauflösenden magnetischen Abbildungsverfahren dar. Anders als die spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie, mit der bereits im Jahr 2000 in der gleichen Arbeitsgruppe der Universität Hamburg zum ersten Mal die magnetische Struktur mit atomarer Auflösung auf Metallen abgebildet werden konnte, ist sie nicht auf leitfähige Oberflächen beschränkt, sondern für alle Materialien gleichermaßen geeignet. Dazu zählen insbesondere auch technisch relevante nichtleitende ferromagnetische und anti-

ferromagnetische Oberflächen, aber auch magnetische Einzelatome und magnetische Moleküle auf nichtleitenden Oberflächen, deren magnetische Eigenschaften bisher nicht auf atomarer Ebene zugänglich waren und die jetzt nicht nur Atom für Atom, sondern auch Spin für Spin untersucht werden können.

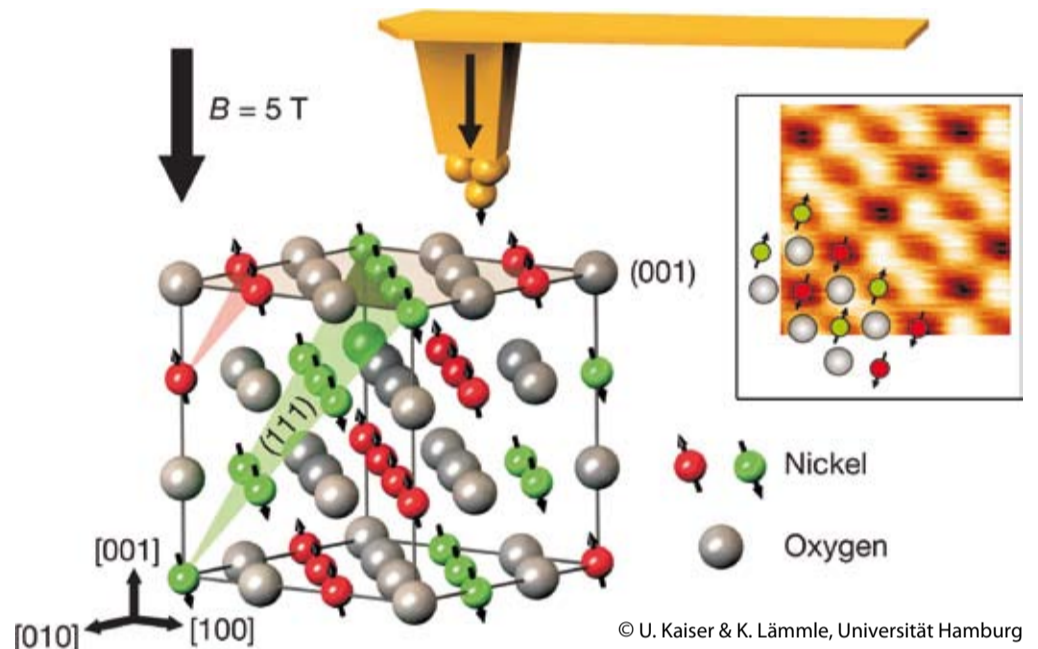
Mit dieser neu entwickelten Mikroskopiemethode können die magnetischen Eigen-

schaften einzelner magnetischer Atome und Moleküle sowie die immer kleiner werdenden magnetischen Bauelemente in der Sensor- und Datenspeichertechnologie untersucht werden.

U. Kaiser, A. Schwarz, and R. Wiesendanger

Magnetic exchange force microscopy with atomic resolution

Nature **446**, 522-525 (2007)



© U. Kaiser & K. Lämmle, Universität Hamburg

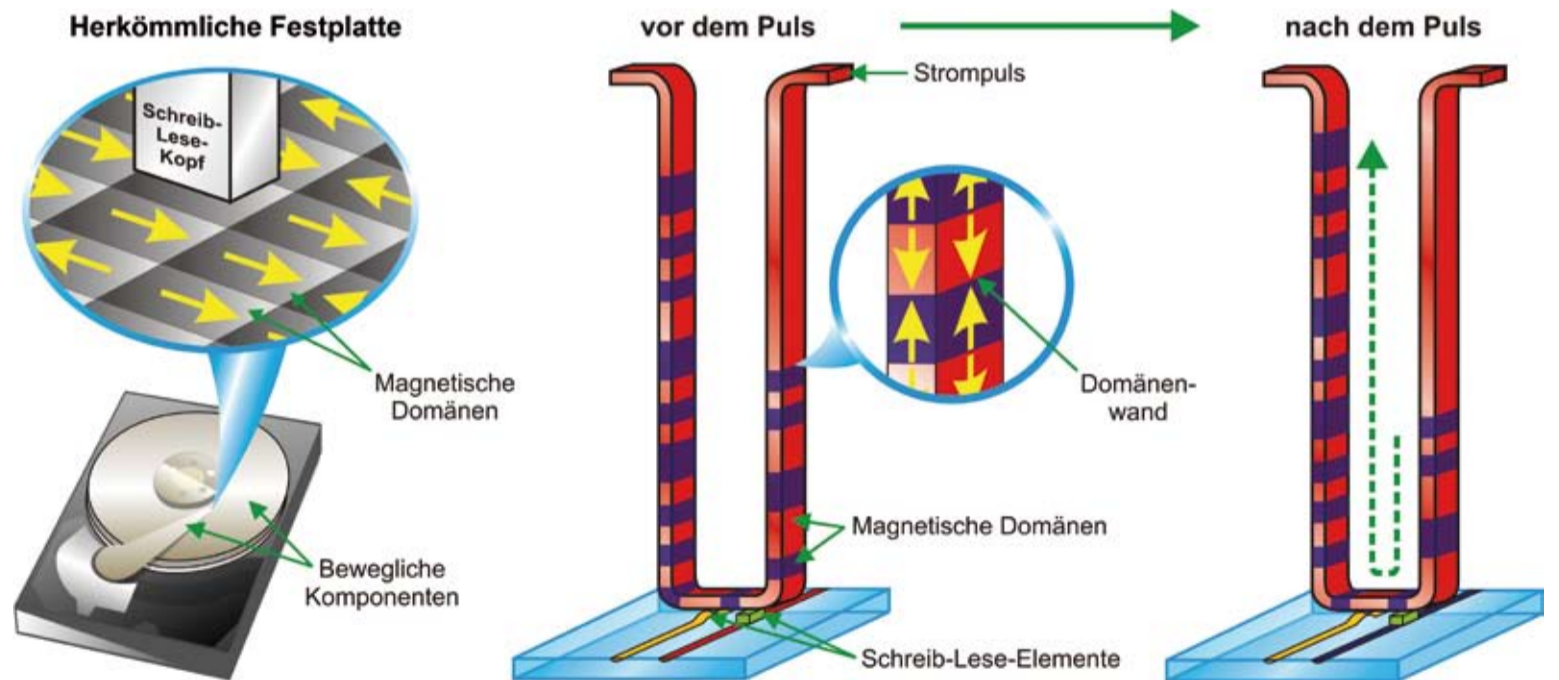
Die Abbildung zeigt das Prinzip der magnetischen Austauschkraftmikroskopie: Eine magnetisch sensitive Sonde tastet die Ausrichtung der durch Pfeile gekennzeichneten atomaren magnetischen Momente (Spins) auf einer Nickeloxidoberfläche ab. Der Kasten zeigt die Mikroskopaufnahme, deren Helligkeitsunterschiede die atomare Struktur und die Anordnung der magnetischen Momente widerspiegeln.

Mit Strom Wände versetzen

Wie die renommierte Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ berichtete, konnten Wissenschaftler des SFB 668 weltweit erstmalig eine magnetische Domänenwand mit sehr großer Geschwindigkeit durch einen Draht bewegen. Diese neuen, aufsehenerregenden Ergebnisse sind entscheidend für die Entwicklung eines neuartigen und extrem schnellen magnetischen Datenträgers, der Festplatten ersetzen könnte.

Unser heutiges Leben ist digital. Egal ob im Beruf oder im Privatleben: Überall haben kleine elektronische Helfer Einzug gehalten und erleichtern unser Leben oder eröffnen uns völlig neue Möglichkeiten. Dabei haben diese Geräte, wie Digicam, MP3-Player oder PDA, eines gemeinsam: sie produzieren Unmengen an digitalen Daten oder wollen mit diesen gefüttert werden. Doch wohin mit dieser Datenflut? Aktuelle Systeme nutzen Festplatten, die zwar mit gigantischen Speicherkapazitäten aufwarten, aber aufgrund ihrer mechanischen Komponenten unzuverlässig, schwer, teuer, langsam und stromhungrig sind. Alternative Speichermedien ohne Mechanik, wie Flash-Speicher, sind deutlich teurer und noch langsamer als herkömmliche Festplatten. Es muss also eine völlig neue Methode zur Datenspeicherung her.

Bereits im Jahr 2004 entwickelten Forscher von IBM das Konzept der magnetischen „Racetracks“. Dabei werden die Trennwände zwischen entgegengesetzt magnetisierten Bereichen mithilfe von Strompulsen ohne jegliche mechanische Bewegung an Schreib-Lese-Elementen vorbei „geschoben“. Wie in „Physical Review Letters“ im Mai 2007 nachzulesen war, gelang es Guido Meier und seinen Kollegen von der Universität



LINKS: Eine herkömmliche Festplatte. Der Schreib-Lese-Kopf fliegt über die rotierende Platte und kann die Ausrichtung der magnetischen Domänen verändern bzw. abfragen.

RECHTS: Das IBM-Konzept eines „Racetracks“. Mit Hilfe von Strompulsen werden die magnetischen Domänen mit sehr großer Geschwindigkeit an den Schreib-Lese-Elementen vorbei „geschoben“, ohne dass es zu einer mechanischen Bewegung kommt. Die Schreib-Lese-Elemente können die Ausrichtung der magnetischen Domänen verändern bzw. abfragen.

Hamburg erstmals, eine magnetische Domänenwand mit einer sehr hohen Geschwindigkeit in einem ferromagnetischen Draht zu verschieben. Die dabei gemessene strominduzierte Geschwindigkeit von 110 m/s ist im Vergleich mit früheren Messungen zwei Größenordnungen höher und liegt damit im Bereich der theoretischen Vorhersagen. Die magnetische Domänenwand legte bei jedem Versuch mit gleichem Strompuls eine unterschiedliche Strecke zurück, was vermutlich in Unregelmäßigkeiten innerhalb der kristallinen Struktur des verwendeten Materials begründet ist.

Die Messungen der Forscher beweisen, dass das Konzept der magnetischen „Racetracks“ sehr vielversprechend ist. Für die Verwendung im Alltag muss noch viel Arbeit investiert werden, um die Domänenwandbewegung zuverlässig und reproduzierbar zu machen und so Daten sicher in Domänenwänden zu speichern.

Wenn es gelingt, diese Herausforderungen zu bewältigen, dann wäre ein magnetischer Datenspeicher verfügbar, der ohne mechanisch bewegte Teile auskommt, extrem hohe Lese- und Schreibgeschwindigkeiten hätte und als hochintegriertes Bauelement sehr

kostengünstig hergestellt werden könnte. Außerdem wäre ein magnetischer „Racetrack“ ein nichtflüchtiger Datenspeicher, d. h. der Speicher würde seine Daten auch ohne Stromzufuhr nicht verlieren. Lange Zeiten für das Hochfahren eines Computers und Datenverlust durch einen Absturz wären dann endgültig Geschichte.

G. Meier, M. Bolte, R. Eisele, B. Krüger, D.-H. Kim, and P. Fischer,

Direct Imaging of Stochastic Domain-Wall Motion Driven by Nanosecond Current Pulses

Phys. Rev. Lett. **98** 187202 (2007)



Impressum

Herausgeber:

Sonderforschungsbereich 668
Universität Hamburg
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

Redaktion:

Dipl.-Chem. Heiko Fuchs &
Prof. Dr. Roland Wiesendanger

Konzept und Gestaltung:

Dipl.-Chem. Heiko Fuchs

Sonderforschungsbereiche (SFB) sind langfristige, auf die Dauer von bis zu 12 Jahren angelegte Forschungseinrichtungen der Hochschulen, in denen Wissenschaftler aus mehreren Arbeitsgruppen im Rahmen fächerübergreifender Forschungsprogramme zusammenarbeiten. Die Sonderforschungsbereiche werden von der **Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)** gefördert.

Der SFB 668

Der Sonderforschungsbereich 668 hat am 1. Januar 2006 seine Arbeit aufgenommen und wird zunächst für einen Zeitraum von vier Jahren Forschungsmittel in Höhe von insgesamt 10 Millionen Euro erhalten (DFG und Universität).

Im SFB 668 forschen über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Hamburg und der Universität Kiel in 20 Teilprojekten auf dem Gebiet des „Nanomagnetismus“.

Der SFB 668 ist der größte Sonderforschungsbereich, der zurzeit an der Universität Hamburg etabliert ist. Das Forschungsprogramm umfasst experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Magnetismus einzelner Atome, Moleküle und Nanoteilchen. Bei der personellen Struktur des Sonderforschungsbereichs wird stark auf die Nachwuchsförderung gesetzt: **15 der 28 Teilprojektleiter sind Nachwuchswissenschaftler.**

Sprecher des SFB 668

Prof. Dr. Roland Wiesendanger
Institut für Angewandte Physik
Universität Hamburg
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg

Telefon: +49-40-42838 5244
Telefax: +49-40-42838 6188

E-Mail: wiesendanger@physnet.uni-hamburg.de

Sekretariat

Andrea Beese
Institut für Angewandte Physik
Universität Hamburg
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg
Telefon: +49-40-42838 3203
Telefax: +49-40-42838 6188
E-Mail: abeese@physnet.uni-hamburg.de

Öffentlichkeitsarbeit

Dipl.-Chem. Heiko Fuchs
Institut für Angewandte Physik
Universität Hamburg
Jungiusstr. 11
20355 Hamburg
Telefon: +49-40-42838 6959
Telefax: +49-40-42838 2409
E-Mail: hfuchs@physnet.uni-hamburg.de

www.sfb668.de

Der Dreh mit dem Wirbel

Magnetische Festplattenspeicher sind heutzutage in fast jedem Haushalt vorhanden und finden sogar in Videokameras, Hard-disk-Video-Rekordern und Set-Top-Boxen Gebrauch. Das jahrzehntelange Wachstum der Speicherdichte auf heute über eine Milliarde Bits pro Quadratmillimeter droht in den nächsten Jahren an das Limit zu stoßen; die kleinsten magnetischen Bits sind nämlich bei Raumtemperaturen nicht mehr stabil, sondern verlieren ihr „Gedächtnis“. Aus diesem Grund machen sich bereits jetzt Forscher in aller Welt Gedanken über mögliche Nachfolger zu herkömmlichen Datenspeichermethoden. Als erfolgversprechende Alternative sind Konzepte im Gespräch, in denen Festkörperspeicher mit Hilfe von Spinströmen ausgelesen oder geschrieben werden. Spinströme nutzen eine weitere, bisher weitgehend unbeachtete Größe von Elektronen: Ihr Eigendrehmoment oder Spin. Mithilfe von Spinströmen lässt sich die Magnetisierung sehr kleiner Strukturen punktgenau auslesen und auch verändern, indem die Elektronen ihre Spinausrichtung auf die Magnetisierung übertragen. Dieser Prozess wird „Spin-Transfer“ genannt. Für die Entdeckung eines verwandten Mechanismus, den sogenannten Riesenmagnetowiderstand, erhielten Peter Grünberg und Albert Fert letztes Jahr den Physiknobelpreis. Durch das punktgenaue Lesen und Schreiben mit dem Spin-Transfer-Effekt lassen sich in Zukunft eventuell noch kleinere magnetische Bits schalten als bisher.

Wie die renommierten US-Fachzeitschriften „Physical Review Letters“ und „Science“ (Online-Ausgabe vom 23. Mai 2008) im Mai 2008 berichteten, gelang es Forschern des SFB 668, mit Hilfe von zeitauflösender Röntgen-Mikroskopie, die Dynamik der Magnetisierung von kleinen ferromagnetischen Elementen, die durch Spinströme zum Schwingen angeregt wurden, zu beobachten. Den Einfluss von Spinströmen auf die Magnetisierung haben Markus Bolte und Mitarbeiter des Instituts für Angewandte Physik der Universität Hamburg nun in Zusammenarbeit mit dem I. Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg, dem Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart, der Universität Ghent in Belgien und der Lawrence Berkeley Laboratories in Berkeley, Kalifornien untersucht. Zum ersten Mal

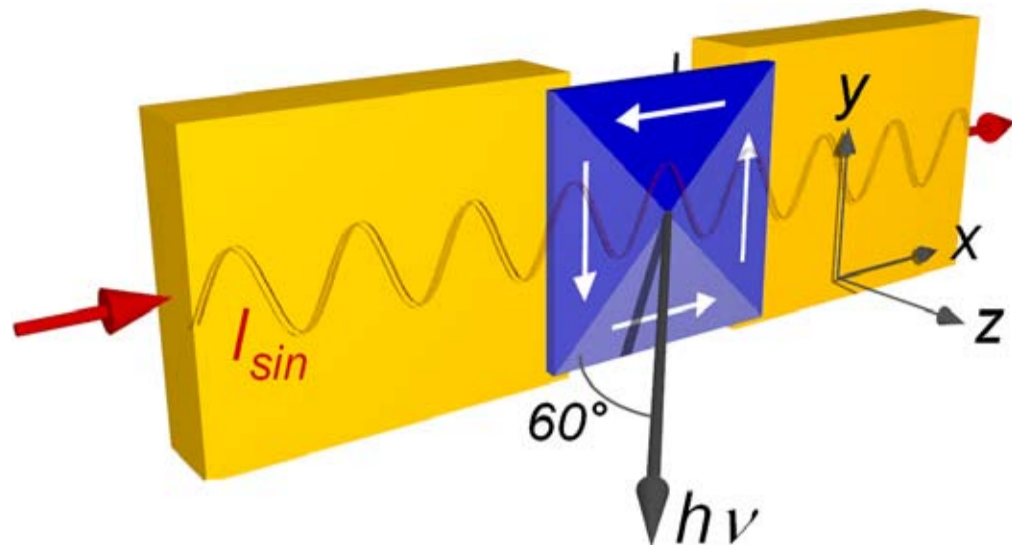


Abbildung 1: Von Spinströmen angeregte Magnetisierung in einem ferromagnetischen Quadrat.

konnten sie mit einer zeitlichen Auflösung von weniger als einer Milliardstel Sekunde die Wechselwirkung zwischen Spinströmen und Magnetisierung verfolgen.

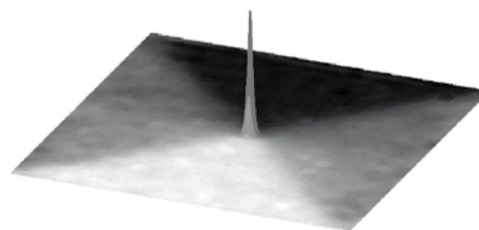


Abbildung 2: Die Magnetisierung eines Quadrates mit dem Vortex in der Mitte.

Als ultraschnelle „Kamera“ wurde dabei das Röntgen-Licht eines Elektronensynchrotrons verwendet. In einem solchen Synchrotron entsteht das Röntgen-Licht, indem Elektronenpakete, die mit Lichtgeschwindigkeit um den Ring fliegen, abgelenkt werden. Das Licht wird dann durch spezielle Linsen auf die magnetischen Strukturen geschickt. Eine besonders schnelle lichtempfindliche Diode misst jedes einzelne Röntgen-Lichtquant und wandelt es in elektrische Signale um. In den untersuchten magnetischen Quadraten (siehe Abb. 1) bildet sich natürlicherweise eine magnetische Singularität, ein sogenannter Vortex aus, bei dem die Magnetisierung aus der Ebene zeigt (siehe Abb. 2). Da der Vortex nur eine von zwei Richtungen annehmen kann, werden Vortizes als mögliche

nichtflüchtige Speichermedien gehandelt. Die Vortizes können durch hochfrequente Wechselströme zum Schwingen und zum Umklappen gebracht werden.

Herr Bolte beschreibt die Ergebnisse der Messungen: „Dank der hervorragenden zeitlichen und örtlichen Auflösung des Mikroskops konnten wir die Bewegung der Vortizes extrem genau verfolgen.“ Er sagt weiter: „Wir konnten zeigen, dass nicht nur der Elektronenspin auf die Magnete wirkt, sondern auch das Magnetfeld, das jeden elektrischen Strom umgibt. Mit unserer Messmethode konnten wir bestehende Vorhersagen über die Wechselwirkung zwischen Spinströmen und Ferromagneten erweitern und besser quantifizieren.“ Diese Entdeckung hat Auswirkungen auf die mögliche Realisierbarkeit solcher nichtflüchtiger Datenspeicher. Die Forschergruppe arbeitet bereits an konkreten Umsetzungsmöglichkeiten. In Zusammenarbeit mit dem Arbeitsbereich TIS des Departments für Informatik entwickeln sie Modelle, die es ihnen erlauben, das Verhalten solcher Strukturen in komplexen Elektronikschaltkreisen vorherzusagen.

M. Bolte, G. Meier, A. Drews, R. Eiselt, L. Bocklage, B. Krüger, S. Bohlens, T. Tyliczszak, A. Vansteenkiste, B. Van Waeyenberge, K. W. Chou, A. Puzic, and H. Stoll

Time-Resolved X-ray Microscopy of Spin-Torque-Induced Magnetic Vortex Gyration
Physical Review Letters **100**, 176601 (2008)

Bürgerdialog „Chancen & Risiken der Nanotechnologie“

Die Nanotechnologie gilt als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Ihre Anwendungen reichen schon heute in viele Lebensbereiche hinein – vom Rostschutz bis zur Badezimmerfliese, vom Deo bis zur Therapie gegen Tumore. Ein verantwortungsvoller Umgang mit dieser neuen Technologieform erfordert jedoch auch, Auswirkungen auf Mensch und Natur wissenschaftlich zu untersuchen und Risiken zu identifizieren.

Informationen über die sichere Herstellung von Nano-Materialien standen im Mittelpunkt eines öffentlichen Bürgerforums, das am 12. April 2008 im Hauptgebäude der Universität Hamburg stattgefunden hat. Auf dem Programm standen Vorträge und Diskussionsrunden mit Unternehmensvertretern und Wissenschaftlern. Der Bürgerdialog wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom VDI durchgeführt. Lokale Organisatoren und Veranstalter in Hamburg waren, neben dem Sonderforschungsbereich 668, die Akade-



Der Publikums magnets des Bürgerdialogs war die mobile Ausstellung „NanoTruck“ des BMBF. Anschauliche Exponate und Experimente boten den zahlreichen Besuchern Nanotechnologie „zum Anfassen“.

mie der Wissenschaften in Hamburg und das Interdisziplinäre Nanowissenschafts-Centrum Hamburg.

Mit dem Bürgerdialog wurden zum einen die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Potenziale der Nanotechnologie insbesondere in der Region Hamburg aufgezeigt,

zugleich aber auch fundiert und verständlich über mögliche Risiken von Nanomaterialien informiert. Hamburger Bürgerinnen und Bürger hatten Gelegenheit, mit Experten aus Wissenschaft und Industrie ins Gespräch zu kommen und die neusten Erkenntnisse aus der Forschung zu diskutieren.