

Logik mit Atomen: Das kleinste „Oder“ der Welt

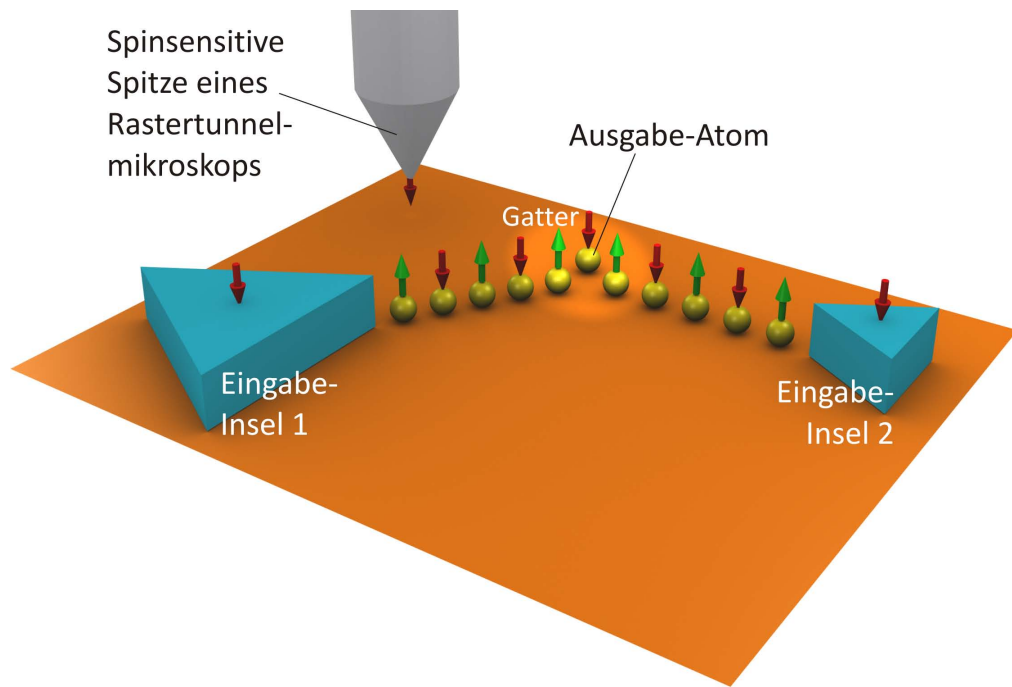


Abb. 1: Die Abbildung zeigt den Aufbau des kleinsten Nano-Spintronik-Logikgatters der Welt. Die dreieckigen Strukturen sind magnetische Kobalt-Iseln mit einer Höhe von zwei Atomlagen und die gelben Kugeln symbolisieren einzelne Eisen-Atome. Die roten und grünen Pfeile zeigen die magnetische Ausrichtung an. Die Größe des eigentlichen logischen Gatters aus drei Eisen-Atomen beträgt ca. 3 Nanometer. (Bild: A. A. Khajetoorians, Universität Hamburg)

Jeder Besitzer eines mobilen Computers kennt das Problem: Den leistungsfähigen Geräten geht oft viel zu schnell die Puste aus, da der Akku wie von Zauberhand schon wieder leer ist. Gerade aktuelle Smartphones sind davon betroffen, denn diese halten oft nur einen Arbeitstag durch, bevor sie wieder dringend an die Steckdose müssen. Schuld daran sind die hellen Displays und die her-

kömmliche Halbleiter-Elektronik, die zur Datenverarbeitung die elektrische Ladung nutzt. Da die Miniaturisierung von Halbleiter-Bauelementen bald an ihre Grenze stößt, wird schon lange nach einem neuen Konzept für Logik-Bauteile auf kleinstmöglicher Skala gesucht.

Einen viel versprechenden Ansatz bietet die Spintronik. In dieser Technologie wird nicht nur die Ladung der

Elektronen genutzt, sondern auch deren „Spin“. Dieser Elektronen-Spin ist eine quantenmechanische Eigenschaft und kann vereinfacht als Drehung der Elektronen um ihre eigene Achse verstanden werden. Diese Drehung erzeugt ein magnetisches Moment und daher kann man ein einzelnes Elektron stark vereinfacht als winzige Kompassnadel ansehen, die, je nachdem wie herum sich das Elektron dreht, nach Norden oder Süden zeigt.

Um das völlig neuartige Nano-Spintronik-Bauteil zu verwirklichen, brachten die Hamburger Physiker um Dr. Alexander Khajetoorians und Dr. Jens Wiebe, aus der Forschergruppe von Prof. Roland Wiesendanger, Kobalt auf eine Kupferoberfläche auf. Dabei entstanden dreieckige Iseln, die aus ca. 100 Kobalt-Atomen bestehen. Anschließend benutzten die Wissenschaftler die atomar scharfe Nadel eines sogenannten Rastertunnelmikroskops als Werkzeug, um zwei der Kobalt-Iseln mit Ketten aus einzelnen Eisen-Atomen zu verbinden (Abb. 1). Wichtig war dabei, dass die Eisen-Atome in definierten Abständen zueinander und zu den Kobalt-Iseln auf der Kupferoberfläche angeordnet wurden.

Die beiden Kobalt-Iseln sind die Eingabe-Einheiten für die zu verarbeitenden magnetischen Informationen. In der Mitte des Spintronik-Bauteils, dort wo die beiden Ketten auf einan-

der treffen, liegt ein einzelnes Eisen-Atom, das als Ausgabe-Einheit dient und in Abhängigkeit von der Eingabe über die Kobalt-Iseln logisch geschaltet wird. Der magnetische Zustand des Ausgabe-Atoms wird mit Hilfe der spinsensitiven Nadel des Rastertunnelmikroskops ausgelesen, die dafür mit einem magnetischen Material beschichtet wurde.

Durch die definierten Abstände der Eisen-Atome zueinander und zu den Kobaltinseln nehmen die Spins der Atome einen anti-parallelen Zustand ein, d.h. die winzigen Kompassnadeln zeigen von Atom zu Atom in entgegengesetzte Richtungen.

Ändert man nun die magnetische Ausrichtung der beiden Eingabe-Iseln, dann richten sich die Spins der Eisen-Atome auch wieder anti-parallel zu den Iseln aus und ähnlich wie bei einem Dominospiel kippen die Kompassnadeln nacheinander um und passen sich der neuen Eingabe an. Das Ausgabe-Atom wird dabei logisch geschaltet (Abb. 4). Wie die Hamburger Wissenschaftler in einer früheren Arbeit bereits festgestellt hatten, erfolgt der Umschaltprozess eines der Spins in einer extrem kurzen Zeit von einem Zehnbillionstel einer Sekunde, was extrem schnelle Schaltfrequenzen der neuartigen Bauteile erwarten lässt (siehe A. A. Khajetoorians et al., Phys. Rev. Lett. 106, 037205 (2011)).

► Weiter auf Seite 2

Eine 3D-Ansicht magnetischer Nanoobjekte

Die Eigenschaften magnetischer Objekte können durch deren Strukturierung maßgeschneidert werden. Daraus ergibt sich eine Vielfalt möglicher Anordnungen der Magnetisierung auf der Nanoskala. Für Anwendungen in so unterschiedlichen Bereichen wie der lokalen Verabreichung von Medikamenten über die Hyperthermie in der Krebstherapie bis hin zu Datenspeichern mit extrem hoher Dichte können die magnetischen Eigenschaften mit Hilfe der Form der Nanostrukturen angepasst werden. Um die spezifischen Anforderungen gezielt erfüllen zu können ist die Abbildung der Magnetisierung der Nanoelemente mit einer Ortsauflösung im Nanometerbereich unverzichtbar. Eine Herausforderung in diesem Gebiet ist die Abbildung der Magnetisierung dreidimensionaler Nanoobjekte.

Wie in der Fachzeitschrift Physical Review B in der Ausgabe vom November 2011 nachzulesen ist, gelang es Judith Kimling und ihren Kollegen von der Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des Helmholtz-Zentrums Berlin für Materialien und Energie Bilder komplexer dreidimensionaler Nanostäbe und -röhren mit einem neuartigen Röntgen-Verfahren abzubilden. Das Verfahren nutzt das Berliner Elektronen Synchrotron BESSY II und basiert auf der konventionell nur oberflächensensitiven Photoemissions-Elektronenmikroskopie. Bei dem neuen Verfahren werden sowohl die Photoelektronen, die direkt aus

der Oberfläche des Nanoobjekts emittiert werden, als auch die Röntgen-Strahlen, die das Nanoobjekt durchdringen, verwendet. Dadurch können Bilder der gesamten Magnetisierung, also von der Oberfläche und aus dem Inneren der Nanostruktur, aufgenommen werden. Das Potential der Methode wird in dieser Fallstudie anhand der Abbildung der Magnetisierung von Eisenoxidröhren, die einen Nickel-Kern enthalten, demonstriert.

Die Möglichkeit in externen Magnetfeldern abzubilden sowie die chemische Sensitivität der Methode und die hohe räumliche Auflösung von wenigen Nanometern sind richtungsweisend für zukünftige Studien auch anderer Nanostrukturen. Die Methode erlaubt zudem eine zeitliche Auflösung bis hinab in den Sub-Nanosekunden-Bereich und eröffnet damit neue Möglichkeiten für das Studium der komplexen Welt dreidimensionaler Nanomagnete.

Die Ergebnisse der Kooperation des Instituts für Angewandte Physik der Universität Hamburg mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie sind in [1] publiziert.

[1] J. Kimling, F. Kronast, S. Martens, T. Böhnert, M. Martens, J. Herrero-Albillos, L. Tati-Bismaths, U. Merkt, K. Nielsch, and G. Meier, „Photoemission electron microscopy of three-dimensional magnetization configurations in core-shell nanostructures“, Editor's Suggestion in Phys. Rev. B **84**, 174406 (2011)

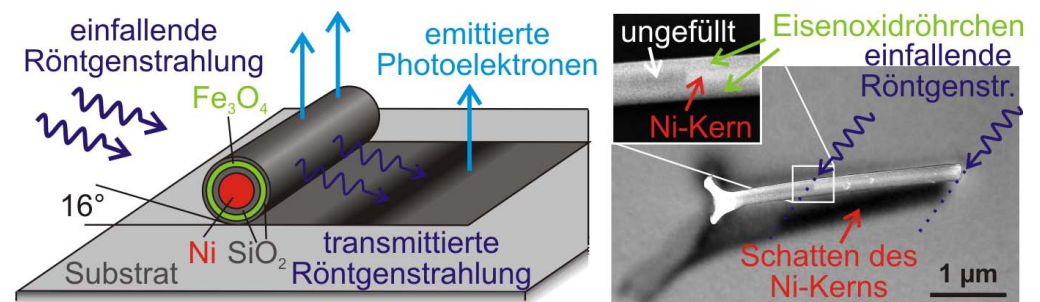


Abb. 2: Modell des Versuchsaufbaus (links). Die einfallenden Röntgen-Strahlen erzeugen Photoelektronen, die von der Oberfläche der Nanostruktur emittiert werden. Ein Teil der Röntgen-Strahlung durchdringt das Nanostäbchen, und führt zur Emission von Photoelektronen im Schattenbereich der Struktur. Rechts: Aufnahme der Nanostruktur aus einem Eisenoxidröhrchen, das teilweise mit einem Nickelkern gefüllt ist. Die Großaufnahme zeigt den Übergang vom gefüllten zum ungefüllten Teil. Der Nickelkern erscheint hell. Auf dem Bild im Hintergrund ist der Schatten des Nickelkerns zu erkennen.

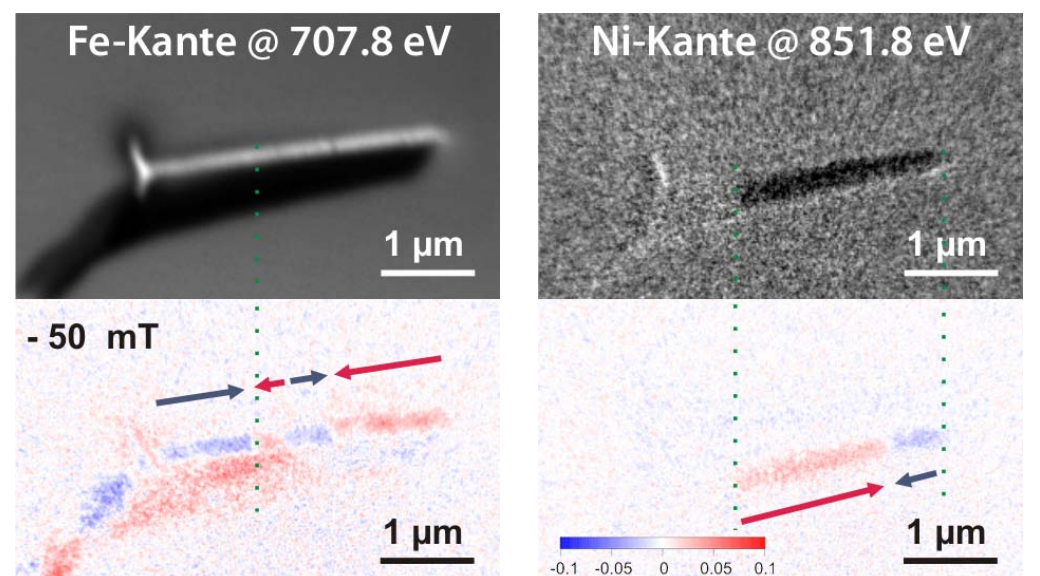
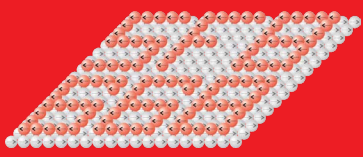


Abb. 3: Bilder eines Eisenoxidröhrchens mit Nickelkern aus dem Photoemissions-Elektronenmikroskop. Die obere Bildreihe zeigt Aufnahmen, in denen die Bereiche zu erkennen sind, die bei spezifischen Energien der Röntgen-Strahlung zum Messsignal beitragen. Wird die Energie auf die Eisenkante (links) gestellt, sind sowohl das Stäbchen selbst als auch sein gesamter Schatten zu erkennen. Auf der Nickeltante hingegen ist nur der Schatten des Nickelkerns zu sehen. Die untere Bildreihe zeigt den magnetischen Kontrast den man erhält, wenn man Bilder, die mit Röntgen-Strahlung unterschiedlicher Polarisation aufgenommen wurden, voneinander abzieht. Im Nickelkern (rechts) ist eine Domänenwand zu erkennen, während das Eisenoxidröhrchen (links) ein unregelmäßiges Magnetisierungsmuster aufweist.



Logik mit Atomen: Das kleinste „Oder“ der Welt

Fortsetzung von Seite 1

Mit ihrer Arbeit konnten die Hamburger Forscher weltweit erstmalig die Vorteile der Nano-Spintronik auf atomarer Skala experimentell demonstrieren:

- **Höhere Energieeffizienz:** Da für das Schalten der Nano-Spintronik-Bauteile kein elektrischer Strom benötigt wird, verbrauchen diese Bauteile erheblich weniger Energie als herkömmliche Halbleiterbauteile. Leistungsfähige Mobilgeräte, die wochenlang nicht aufgeladen werden müssen, sind damit vorstellbar. Angesichts der globalen Verknappung von Energiequellen stellt die Steigerung der Energieeffizienz von Computerprozessoren eine der wesentlichen Herausforderungen des Informationszeitalters dar.
- **Schnellere Bauteile:** Deutlich höhere Taktfrequenzen machen heutigen Halbleiter-Systemen stark zu schaffen, da durch den Ladungstransport bei höheren Frequenzen mehr Abwärme produziert wird, die nicht nur zu einem hohen

Energieverlust führt, sondern den Halbleiterschaltkreis auch zerstören kann. Da in dem von den Hamburger Forschern konzipierten Nano-Spintronik-Bauteil keine Ladung transportiert wird, gibt es keine thermischen Probleme und so sind Taktfrequenzen bis 10.000 Gigahertz vorstellbar.

- **Kleinere Bauteile:** Da Spintronik-Bauteile nach Art der hier demonstrierten logischen Gatter aus wenigen Atomen aufgebaut werden können, sind sowohl deutlich kleinere als auch komplexere Bauteile möglich als mit der herkömmlichen Halbleiter-Technologie.
- **Nichtflüchtiger Speicher:** Die Verwendung des Spins als Übermittler der Information hat einen weiteren Vorteil. Es bleiben alle Informationen auch nach dem Ausschalten eines Bauteils erhalten, da diese magnetisch und nicht elektronisch gespeichert sind. Das würde beim Starten eines Spintronik-Computers den langwierigen Bootvorgang überflüssig machen, das System würde einfach weiter machen, als

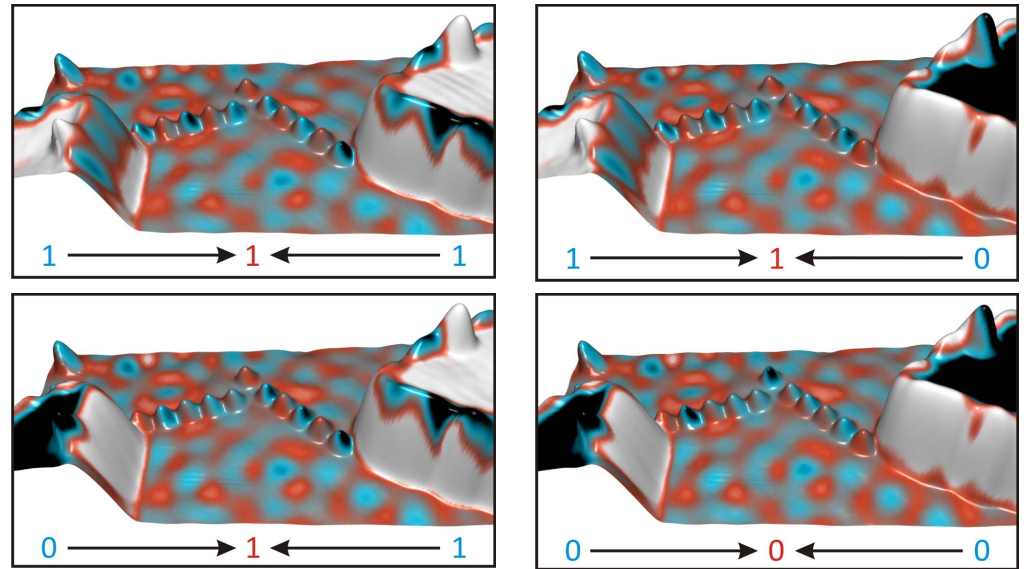


Abb. 4: A Bilder des Nano-Spintronik-Logikgatters, das mit der Nadel eines spinsensitiven Rastertunnelmikroskops ausgelesen wurde. Es handelt sich bei dem Bauteil um ein „Oder-Gatter“, d. h. zeigt der Spin von beiden Eingabe-Inseln nach unten (D), dann zeigt auch der Spin des Ausgabe-Atoms nach unten (blau). Zeigen die Spins einer oder beider Inseln nach oben (A-C), so wird auch der Spin des Ausgabe-Atoms nach oben ausgerichtet (rot). (Bild: A. A. Khajetoorians, Universität Hamburg)

wäre es nie ausgeschaltet worden. Außerdem sind neuartige Hybrid-Bauteile vorstellbar, die Speicher- und Rechenkomponenten enthalten.

[1] A. A. Khajetoorians, J. Wiebe, B. Chilian, and R. Wiesendanger, „Realizing All-Spin-Based Logic Operations Atom by Atom“, *Science* **27** Vol. 332 no. 6033 pp. 1062-1064 (2011)

Zwei Kobaltatome auf Abstand

Ein visionäres Ziel der Miniaturisierung von Speicherelementen ist die Verwendung der Richtungsquantelung atomarer Spins als logische Null und Eins. Diese „Spin-Bits“ könnten etwa auf einem zweidimensionalen Gitter benachbarter Atome gespeichert werden. Hierbei stellt sich sofort die Frage nach der Kopplung der atomaren magnetischen Momente untereinander. Es ist daher naheliegend, an einem einfachen Modellsystem, das aus zwei magnetischen Atomen auf einer metallischen Oberfläche besteht, Wechselwirkungen zwischen ihnen zu untersuchen. Dieser Aufgabe haben sich Experimentatoren und Theoretiker des SFB 668 gemeinsam gestellt und ihre Ergebnisse in der

renommierten Fachzeitschrift *Physical Review Letters* kürzlich publiziert [1]. Die Resultate gehen über die schiere Bestimmung der magnetischen Wechselwirkung zwischen zwei Atomen hinaus. Es wird das Zusammenspiel lokaler magnetischer Wechselwirkungen der Leitungselektronen des Metalls mit dem magnetischen Moment des Atoms einerseits und nichtlokaler Wechselwirkungen zwischen den Atomen andererseits für unterschiedliche Abstände untersucht. Vermutungen nach ist dieser Wettbewerb zwischen lokalen und nichtlokalen Elektronenkorrelationen der Ursprung für magnetische Instabilitäten in Systemen schwerer Fermionen.

Um die magnetische Wechselwir-

kung zwischen zwei Kobaltatomen auch über große Distanzen zu ermöglichen, haben sich die Experimentatoren eines raffinierten Kunstgriffs bedient, der auf einer theoretischen Vorhersage beruht [2]: Ketten aus Kupferatomen, die die Kobaltatome miteinander verbinden, bewirken ein weitaus schwächeres räumliches Abklingen der Wechselwirkung als eine Anordnung ohne diese Ketten. Mit Hilfe der Spitze eines Rastertunnelmikroskops, das im Ultrahochvakuum (10^{-9} Pa) und bei einer Temperatur von -265°C betrieben wird, wurde das Modellsystem Atom für Atom auf einer einkristallinen Kupferoberfläche zusammengesetzt. Abb. 5 A zeigt rastertunnelmikroskopische Aufnahmen der entstandenen linearen Atomketten. Jede Kette enthält zwei Kobaltatome, die an den beiden Enden einer Kupferkette platziert sind. Die Längen der Kupferketten variieren zwischen einem und sechs Kupferatomen. Als Ergebnis erhält man zwei Kobaltatome, die einen mit atomarer Präzision bestimmten Abstand voneinander haben. Für jeden dieser so eingestellten Abstände kann man nun die Wechselwirkung zwischen den Kobaltatomen untersuchen. Hierzu wurde der Umweg über den Kondo-Effekt einzelner magnetischer Atome auf Metalloberflächen gewählt. Dies hat sich als lohnenswert erwiesen, da man nicht nur Aufschluss über die magnetische Wechselwirkung zwischen den Kobaltatomen erhält, sondern auch über das Wechselspiel lokaler und nichtlokaler Elektronenkorrelationen. Abb. 5 B stellt die Situation vereinfacht dar. Die Kobaltatome wechselwirken indirekt über eine durch die Leitungselektronen vermittelte Kopplung. Die zugehörige Wechselwirkungsenergie ist mit J bezeichnet. Die Wechselwirkung der Leitungselektronen mit dem magne-

tischen Moment eines einzelnen Kobaltatoms ist durch die Energie $k_B T_K$ gegeben. Die Kondo-Temperatur (T_K) entnimmt man der Breite der Kondo-Resonanz aus rastertunnel-spektroskopischen Experimenten. Es ergeben sich zwei Fragen. Ist die magnetische Kopplung zwischen den Atomen ferromagnetisch oder antiferromagnetisch? Wie beeinflusst diese Kopplung den Kondo-Effekt eines einzelnen Kobaltatoms?

Überraschenderweise wechselt die Kopplung von ferromagnetisch in CoCuCo -Ketten zu antiferromagnetisch in CoCu_2Co -Ketten. Für längere Ketten (ab CoCu_3Co) oszilliert die Wechselwirkung mit einer Periode von zwei Kupferatomen. Dieser Verlauf der Wechselwirkungen ist im Einklang mit den gemessenen Kondo-Temperaturen (Abb. 5 C), die zunächst nahezu linear ansteigen und dann oszillatorisch mit der berechneten Periode schwanken. Um eine Antwort auf die zweite Fragen zu erhalten, betrachtet man eine Kupferkette, die nur an einem Ende ein Kobaltatom besitzt. Für unterschiedlich lange Ketten wurde eine Kondo-Temperatur dieses Kobaltatoms von 110 K gefunden (gestrichelte Linie in Abb. 5 C). Fügt man nun ein zweites Kobaltatom an das andere Ende der Kupferkette hinzu und schaltet somit die magnetische Wechselwirkung zwischen zwei Atomen ein, dann reduzieren sowohl die ferromagnetische (CoCuCo) als auch die antiferromagnetische (CoCu_2Co) Kopplung die Kondo-Temperatur des einzelnen Kobaltatoms. Für CoCu_3Co - und CoCu_4Co -Ketten ist die magnetische Kopplung so schwach, dass sich die Kondo-Temperatur nicht wesentlich von der des einzelnen Kobaltatoms am Ende einer Kupferkette unterscheidet. Ein Vergleich der relevanten Wechselwirkungsenergien – die experimentell bestimmte ▶

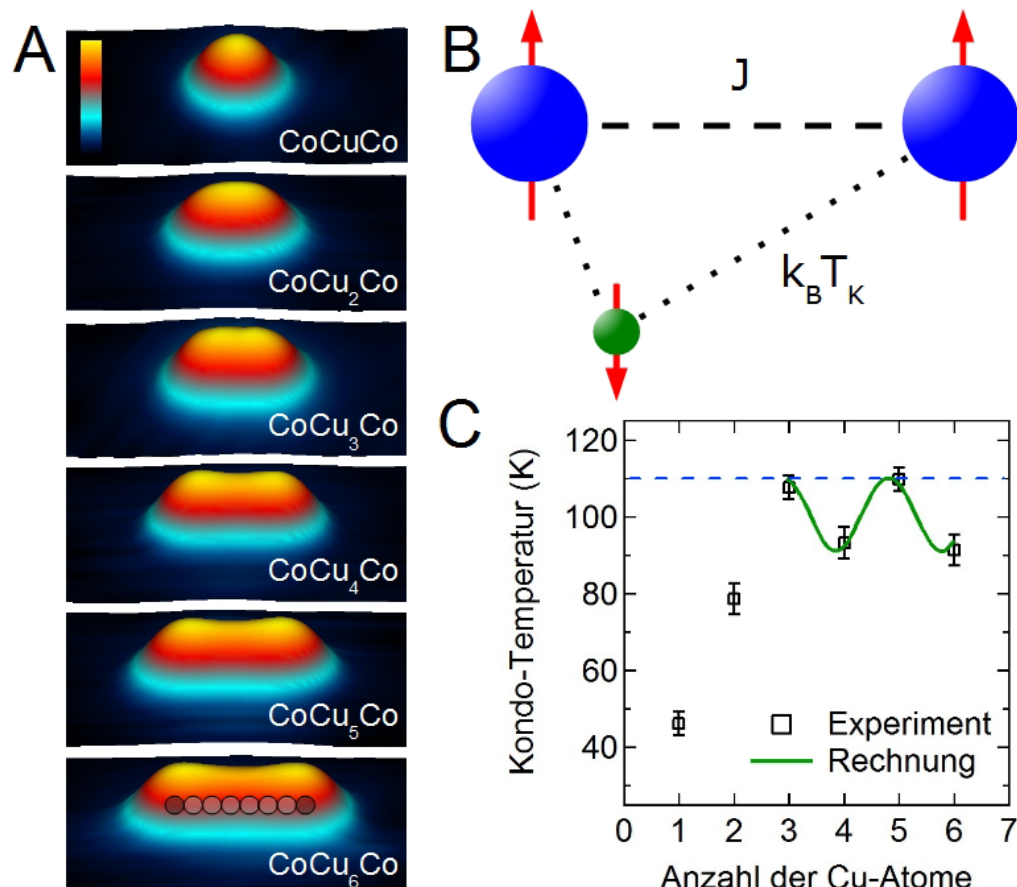
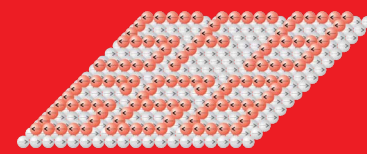


Abb. 5 (Bild: J. Kröger, Universität Kiel)



Fortsetzung von Seite 2

Kondo-Energieskala und die berechnete Austauschkopplung zwischen zwei Kobaltatomen – erklärt das beobachtete Verhalten der Kondo-Temperatur.

Die Bedeutung dieser gemeinsamen experimentellen und theoretischen Arbeit liegt in der Bestimmung magnetischer Wechselwirkungen auf atomarer Skala und der Identifikation der relevanten Energieskalen in

einem großen Abstandsbereich. Die Arbeit zeigt, dass das Studium einfacher Modellsysteme, die sowohl Experimenten als auch Rechnungen zugänglich sind, wichtige neue Erkenntnisse zum Magnetismus auf

der Nanometerskala bringt

[1] N. Néel, R. Berndt, J. Kröger, T. O. Wehling, A. I. Lichtenstein, M. I. Katsnelson, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 106804 (2011)

[2] O. O. Brovko, P. A. Ignatiev, V. S. Stepanyuk, P. Bruno, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 036809 (2008)

Gitter aus magnetischen Wirbeln

Vor ungefähr 50 Jahren fand der theoretische Physiker Tony Skyrme zu seiner Überraschung in quantenmechanischen Feldtheorien stabile und lokalisierte Konfigurationen, die miteinander wechselwirken und sich wie Atome auf einem Gitter anordnen können. Aufgrund dieser Eigenschaften identifizierte er diese wirbelartigen Lösungen als elementare Teilchen. Diese nach ihrem Entdecker benannten Skyrmionen zeigten sich später in vielen unterschiedlichen Gebieten der Physik und entwickelten sich so zu einem wichtigen Konzept. Das mögliche Auftreten von Skyrmionen in magnetischen Materialien wurde bereits vor 20 Jahren vorhergesagt und in Volumenmaterialien auch schon experimentell bestätigt.

Das in Hamburg entdeckte magnetische Skyrmionengitter tritt in einem atomar dünnen Film auf einer Oberfläche auf. Der Durchmesser der Wirbel beträgt nur wenige Atome und ist damit um mindestens eine Größenordnung kleiner als die bisher bekannten magnetischen Skyrmionen. Wie so oft spielte auch bei dieser Entdeckung der Zufall eine große Rolle. „Es ist zwar bekannt, dass Eisen unter Umständen auch ungewöhnliche magnetische Strukturen bilden kann, aber als wir die nahezu quadratische magnetische Struktur im Nanometer-Bereich gefunden haben, die sich eigentlich nicht mit der hexagonalen Anordnung der Eisenatome verträgt, war die Überraschung groß“ sagt Dr. Kirsten von Bergmann aus der experimentellen

Hamburger Forschungsgruppe von Prof. Roland Wiesendanger. Den Doktoranden Matthias Menzel fasziniert die Tatsache, „dass man durch geschicktes Variieren der Versuchsanordnung die Messergebnisse zu der komplizierten magnetischen Struktur zusammensetzen kann“.

Um diese neuartige Spinstruktur und den außergewöhnlichen Symmetriebruch zwischen magnetischer und atomarer Ordnung zu verstehen, mussten die Theoretiker der Universität Kiel und des Forschungszentrums Jülich ein Modell für die Spinanordnung entwickeln und aufwendige quantenmechanische Rechnungen auf Supercomputern in Jülich durchführen. Diese brachten aber schließlich die Gewissheit, dass es sich tatsächlich um stabile magnetische Skyrmionen auf einer Metalloberfläche handelt. Prof. Stefan Heinze, Leiter der Kieler Arbeitsgruppe: „Mit Hilfe unseres Modells konnten wir die genaue Spinstruktur im Eisenfilm angeben und als Skyrmionengitter identifizieren. Der Vergleich mit den experimentellen Daten erbrachte schließlich den Beweis für unsere Entdeckung.“

Die Ursache für das Auftreten dieser komplexen Struktur ist ein Zusammenspiel verschiedener magnetischer Wechselwirkungen: Während die Rotation von atomaren Spins mit einem bestimmten Drehsinn durch die antisymmetrische Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung verursacht wird, kann erst die sogenannte 4-Spin-Wechselwirkung unter Beteili-

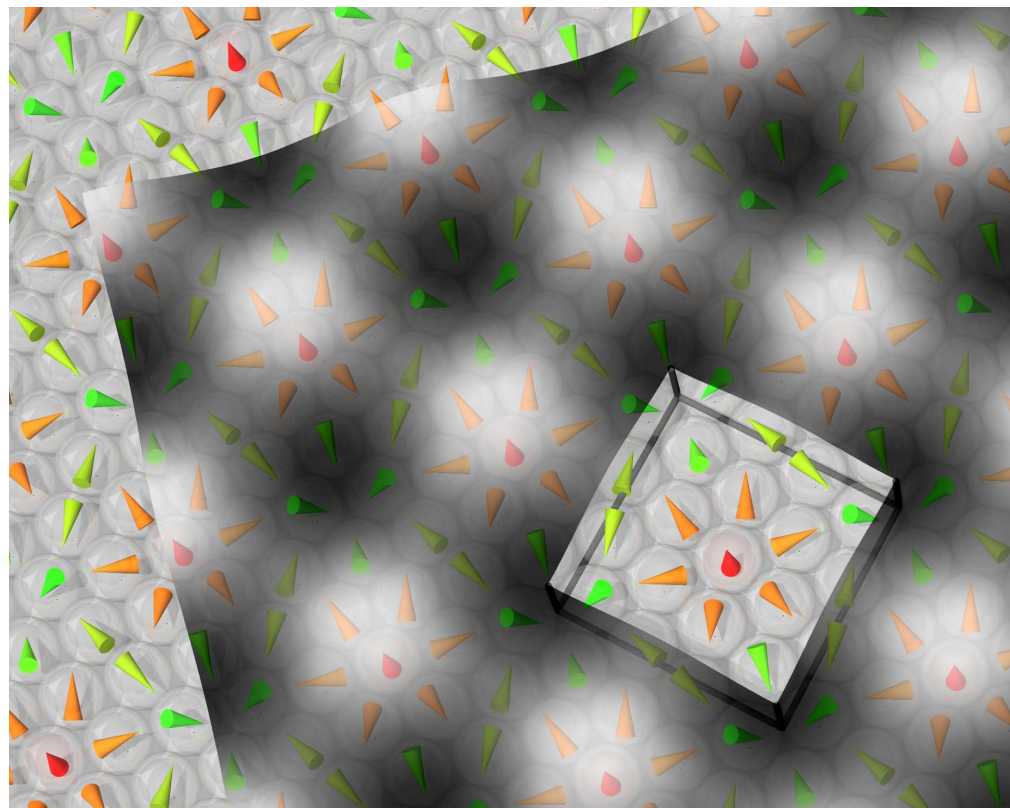


Abb. 6: Die winzigen Wirbel aus nur je etwa 15 Atomen bilden ein regelmäßiges nahezu quadratisches Gitter. Die Grafik zeigt im rechten Bereich die magnetische Messung mithilfe spinpolarisierter Rastertunnelmikroskopie als Graustufenbild. Das herausgeschnittene Quadrat markiert ein einzelnes Skyrmion. Die farbigen Kegel zeigen die Orientierung der magnetischen Ausrichtung der einzelnen hexagonal angeordneten Eisenatome des Metallfilms an. (Bild: M. Menzel, Universität Hamburg)

gung von vier magnetischen Atomen die hier gefundenen Skyrmionen erzeugen.

Für zukünftige Anwendungen zum Beispiel im Bereich der Spintronik eröffnen die gefundenen magnetischen Skyrmionen völlig neue Möglichkeiten, werfen gleichzeitig aber auch neue Fragen auf: Wie wirkt elekt-

rischer Strom auf die Skyrmionen und lassen sich die magnetischen Wirbel vielleicht sogar gezielt bewegen?

[1] S. Heinze, K. von Bergmann, M. Menzel, J. Brede, A. Kubetzka, R. Wiesendanger, G. Bihlmayer, and S. Blügel, „Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions“, *Nature Physics* **7**, 713–718 (2011)

Aus 80 Atomen: Ein Thermometer für die Nanowelt

Wir kennen es aus alltäglichen Anwendungen wie z.B. dem Tauchsieder: Fließen Elektronen durch einen Draht, so erwärmt sich dieser.

Wie die Zeitschrift *Physical Review Letters* berichtet, ist es Forschern vom Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg nun gelungen,

diese Entstehung von Wärme auf atomarer Skala zu untersuchen. Hierfür beobachteten die Wissenschaftler um Prof. Roland Wiesendanger das thermische Hin- und Herschalten eines aus lediglich 80 Eisenatomen bestehenden Nanomagneten und verwendeten ihn so als Thermometer.

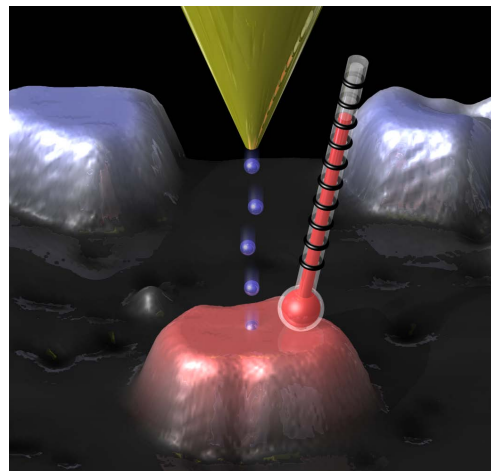
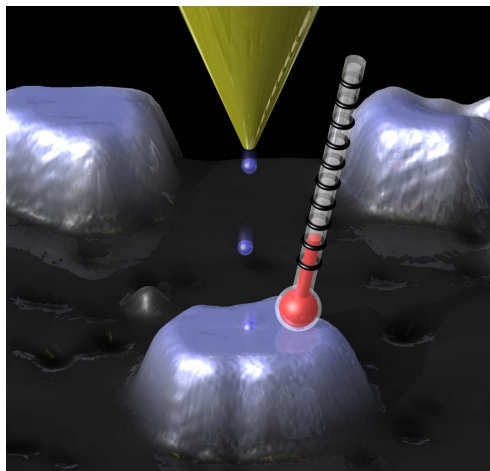


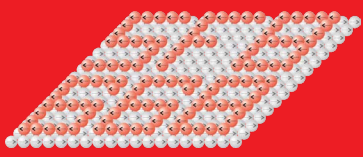
Abb. 7: Prinzip des Aufheizens eines Nanomagneten durch einen Tunnelstrom: Elektronen (blau) tunneln von der Nadelspitze eines Rastertunnelmikroskops (gelb) in den Nanomagneten. Aus der Frequenz des magnetischen Schaltens wird dann die Temperatur bestimmt – hier symbolisiert durch ein Thermometer. Bei niedrigem Strom besitzt der Nanomagnet die Temperatur seiner Umgebung (links). Wird der Strom erhöht, so heizen die Elektronen den Nanomagneten auf (rechts). (Bild: S. Krause, Universität Hamburg)

Dabei nutzten sie das Prinzip des Tunnelns: Positioniert man eine magnetische Nadelspitze sehr nah über dem Magneten und legt eine elektrische Spannung an, so fließt ein sogenannter Tunnelstrom. Je näher sich dabei die Nadel über dem Magneten befindet, desto größer ist der fließende Strom. Es zeigte sich, dass analog zum Tauchsieder der Tunnelstrom zu einer Erwärmung des Magneten führt. Mit einem sogenannten spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop im Ultrahochvakuum untersuchten die Forscher die Schaltfrequenz des Nanomagneten bei verschiedenen Stromstärken. Aus der jeweils gemessenen Frequenz gelang es, direkt die entsprechende Temperatur des Magneten zu bestimmen. Dabei zeigte sich, dass bereits ein Strom von einem Mikroampere ausreicht, um den Magneten um 1° C zu erwärmen, während seine unmittelbare Umgebung vom Strom unbeeinflusst blieb. Zusätzlich fanden die Forscher heraus, dass der Tunnelstrom den Nanomagneten in eine Vorzugsrichtung zwingt: Er schaltet nicht mehr

gleichmäßig zwischen zwei Orientierungen hin und her, sondern bevorzugt eine Orientierung, die der Magnetisierungsrichtung der Nadel entspricht. Die Experimente ergaben, dass dieses Spinstromschalten mit einem Rastertunnelmikroskop um Größenordnungen effektiver ist als mit Techniken, bei denen der zu schaltende Magnet in ein Schichtsystem eingebettet ist.

Die Experimente erlauben den Forschern einen detaillierten Einblick in die elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Materie auf atomarer Skala. Mögliche zukünftige Anwendungen dieser Technik sind z.B. kleinste thermisch schaltende Nanomagnete, die als Sensoren oder Manipulatoren in industriellen Fertigungsprozessen eingesetzt werden, um hoch präzise lokale Temperaturen zu messen.

[1] S. Krause, G. Herzog, A. Schlenhoff, A. Sonntag, and R. Wiesendanger, „Joule Heating and Spin-Transfer Torque Investigated on the Atomic Scale Using a Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscope“, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 186601 (2011)



Impressum

Herausgeber:

Sonderforschungsbereich 668
Universität Hamburg
Jungiusstr. 11 A
20355 Hamburg

Redaktion:

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

Konzept und Gestaltung:

Dipl.-Chem. Heiko Fuchs

Sonderforschungsbereiche (SFB)

sind langfristige, auf die Dauervon 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 Anfang 2006 seine Arbeit aufgenommen und wird zunächst für einen Zeitraum von acht Jahren Forschungsmittel in Höhe von insgesamt ca. 20 Millionen Euro erhalten. 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: **12 der 25 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](mailto:hfuhs@physnet.uni-hamburg.de)

www.sfb668.de

Abbildung und Manipulation atomarer Spins

Der Magnetismus gehört zu den ältesten bekannten physikalischen Phänomenen und ist dennoch eines der aktuell spannendsten Forschungsgebiete. Neue Messtechniken erlauben dabei einen Einblick in die grundlegenden Wechselwirkungen, die die Eigenschaften magnetischer Strukturen auf der atomaren Skala bestimmen. Die treibende Kraft ist dabei der Wunsch nach höheren Speicherdichten auf Computerfestplatten und die damit einhergehende Miniaturisierung der schreib- und lesbaren Informationseinheiten.

Das digitale Alphabet besteht nur aus zwei Zeichen, „0“ und „1“, und ist daher ideal zur magnetischen Kodierung in Nord- und Südpol geeignet. Auf aktuellen Festplatten kann man sich die kleinsten Dateneinheiten – die Bits – wie winzige Kompassnadeln vorstellen: je nachdem, ob die Magnetisierungsrichtung nach Norden oder Süden zeigt, können Datenbits die Werte „0“ oder „1“ annehmen. Der Schreib-Lese-Kopf einer Festplatte kann die Bits beliebig auf Nord- oder Südpol ausrichten oder deren Ausrichtung einfach abfragen.

Das ultimative Ziel ist die Speicherung eines Bits als Magnetisierungsrichtung eines einzelnen Atoms. Bei dieser Miniaturisierung bestehen jedoch zwei Grundprobleme: i. Die Energiebarriere zwischen den Zuständen „0“ und „1“ nimmt mit der Strukturgröße ab, so dass thermische Fluktuationen zu Datenverlust führen können. ii. Die magnetischen Eigenschaften atomarer Strukturen lassen sich kaum vorhersagen: Ein einzelnes magnetisches Atom verhält sich eben nicht wie der Magnet, der eine Notiz am Kühlschrank festhält.

Bei den in Hamburg durchgeführten Experimenten wurden Kobaltatome auf eine Manganoberfläche aufgebracht. Die Manganatome ordnen sich magnetisch in

Form einer Spirale. Diese Oberfläche wurde aus zwei Gründen gewählt: i. Thermische Fluktuationen der magnetischen Momente („Spins“) der Kobaltatome werden durch die sogenannte Austauschkopplung unterbunden und ii. die Kobaltatome haben, durch die Manganoberfläche vorgegebene, ortsabhängig variierende Spinrichtungen, was eine systematische Untersuchung ermöglicht. Als Messtechnik wurde spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie (SP-RTM) eingesetzt. Dabei tastet eine magnetische Spitze in einem Abstand von einigen Zehntel Nanometern einen Oberflächenbereich ab. Der gemessene Tunnelstrom ermöglicht ein Abbild der Elektronendichte und der lokalen Spinrichtung mit extrem hoher Ortsauflösung.

Überraschenderweise ist nicht nur die gemessene Höhe der Kobaltatome, sondern auch deren Form im SP-RTM Bild von der Spinrichtung abhängig. Mit Hilfe von parameterfreien Elektronenstrukturechnungen konnten theoretische Physiker der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel zeigen, dass hierfür spinabhängige orbitale Symmetrien der

Kobaltelektronen verantwortlich sind. Dies hat zur Folge, dass jeder Spinrichtung eine spezifische Form zugeordnet werden kann und daher pro Atom im Prinzip mehr als nur ein Bit auslesbar ist. Durch Expertise in atomarer Manipulation, die im Rahmen einer Gastprofessur aus Ohio (USA) nach Hamburg gebracht wurde, konnte man experimentell noch einen Schritt weiter gehen: Die Kobaltatome können mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops beliebig positioniert werden und richten ihren Spin jeweils parallel zu den nächsten Nachbaratomen der Manganoberfläche aus. Dadurch kann die Spin-Richtung einzelner Atome gezielt eingestellt werden.

Die in dieser Arbeit erstmals demonstrierte Kombination von Spinsensitivität und atomarer Manipulation eröffnet neue Perspektiven bei der Herstellung und Charakterisierung atomarer magnetischer Strukturen.

[1] D. Serrate, P. Ferriani, Y. Yoshida, S.-W. Hla, M. Menzel, K. von Bergmann, S. Heinze, A. Kubetzka and R. Wiesendanger, „Imaging and Manipulating the Spin Direction of Individual Atoms“, *Nature Nanotechnology* **5**, 350 - 353 (2010)

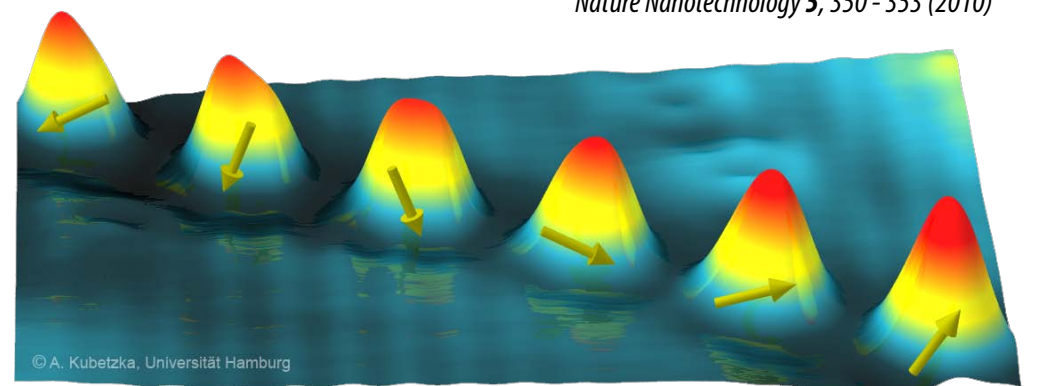


Abb. 8: Durch laterale Manipulation mit der Tunnelspitze hergestellte Kette aus sechs Kobaltatomen. Die einzelnen Kobaltatome koppeln magnetisch parallel zu den nächsten Manganatomen des Substrats. Die mit einer magnetischen Spitze gemessene Form der Atome hängt von deren Spinrichtung (Pfeile) ab, die sich von Atom zu Atom um etwa 42° ändert. Das Experiment wurde im Ultrahochvakuum bei $T = 10$ K durchgeführt. (Bildbereich: etwa 8 nm x 5 nm – Bild: A. Kubetzka, Universität Hamburg)

Die vierte Nacht des Wissen in Hamburg



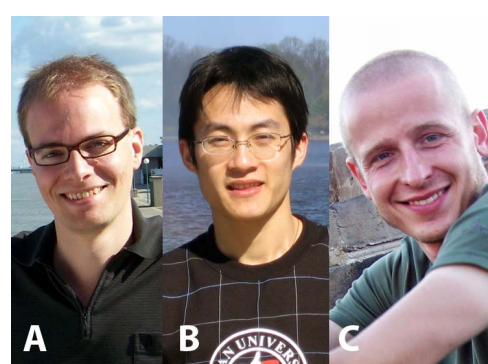
Abb. 9: Auch in der vierten Hamburger Nacht des Wissens herrschte in der hell erleuchteten Jungiusstraße vor und in den Laboren des SFBs ein reger Besucherandrang (Fotos: H. Fuchs, Universität Hamburg)



In der Nacht des 29. Oktober 2011 öffneten wieder über 45 wissenschaftliche Einrichtungen aus ganz Hamburg ihre Türen und präsentierten ihre Laboreinrichtungen.

Der SFB 668 beteiligte sich an der Nacht des Wissens 2011 mit einem STM- und einem AFM-Labor sowie mit einer kleinen Nanotechnologie-Ausstellung. In die hell erleuchtete Jungiusstraße kamen über 250 Besucher und verweilten dort zum Teil sehr lange in den Laboren des SFBs.

Preise für Nachwuchswissenschaftler des SFB 668



Der Hamburger Physiker Dr. Stefan Krause [A] wurde im Juni 2010 für seine herausragenden Forschungsleistungen mit dem Jürgen-Geiger-Preis ausgezeichnet und konnte im Dezember 2010 in der Endausscheidung „Verständliche Wissenschaft 2010“ des Helmholtz-Zentrums Geesthacht den ersten Platz erringen.

Im April 2011 erhielt der Physiker Dr. Lihui Zhou [B] für seine Promoti-

onsarbeit den „Chinese Government Award for Outstanding PhD Students Abroad“.

Auf der 28. European Conference on Surface Science wurde der Physiker Dr. Matthias Menzel [C] im September 2011 für die Präsentation seiner Forschungsarbeiten an atomar dünnen Eisenketten auf einer Iridium-Oberfläche mit dem ECOSS-Preis 2011 ausgezeichnet.