



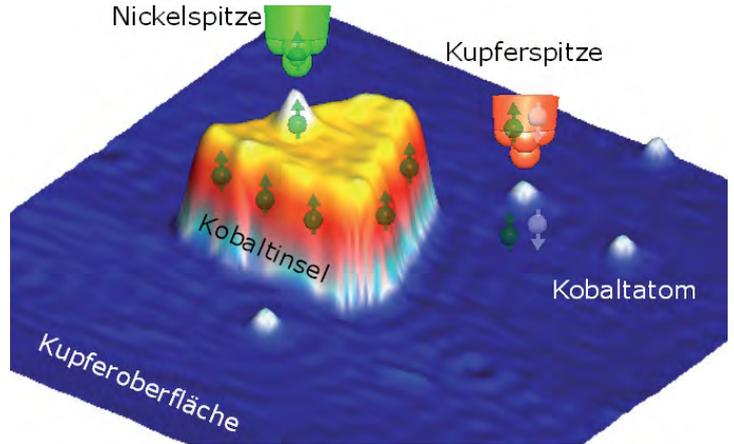
## Stromtransport durch ein einzelnes magnetisches Atom

Einzelne Atome sind die kleinsten Strukturen, die möglicherweise für elektronische Bauelemente nutzbar gemacht werden können. Gelänge es, die Miniaturisierung bis zu dieser fundamentalen Grenze weiter zu treiben, würden sich phantastische neue technische Möglichkeiten eröffnen. Schon heute wird in Laboratorien weltweit auf diesem Gebiet geforscht. In einer Februarausgabe der renommierten Fachzeitschrift *Physical Review Letters* berichteten Wissenschaftler der Universität Kiel über die Kontaktierung eines einzelnen magnetischen Atoms mit makroskopischen Elektroden. Hierzu wurden Experimente mit einem Rastertunnelmikroskop durchgeführt, das bei der Temperatur flüssigen Heliums ( $-269^\circ\text{C}$ ) und im Ultrahochvakuum ( $10^{-9}$  Pa) betrieben wird.

Die Abbildung zeigt ein rastertunnelmikroskopisches Bild einer Kupferoberfläche, die für die Kontaktierungsexperimente verwendet wurde. Man erkennt ferromagnetische Kobaltinseln (Elektronen mit ausgerichtetem und parallelem Spin sind angedeutet) mit dreieckigem Grundriss und einzelne Kobaltatome, die sowohl auf den Inseln als auch auf der Kupferoberfläche liegen. Die Oberfläche dient als die erste, die Kobaltatome kontaktierende Elektrode. Als zweite Elektrode wurde die metallische Spitze des Rastertunnelmikroskops aus nichtmagnetischem, kupferbeschichtetem Wolfram oder aus ferromagnetischem Nickel verwendet. Dieser experimentelle Aufbau lässt die Kontaktierung

der Kobaltatome durch Elektroden in vier Kombinationen zu. Es ist hervorzuheben, dass die Kontaktierung der Einzelatome völlig kontrolliert verläuft, da vor und nach dem Kontaktexperiment rastertunnelmikroskopische Aufnahmen über mögliche Modifikationen der Kontaktregion Auskunft erteilen. Kontaktiert man das Kobaltatom mit zwei nichtmagnetischen Elektroden (kupferbeschichtete Wolframspitze und Kupferoberfläche), dann fließt durch diesen einatomigen Stromkreis bei einer angelegten Spannung von 0.1 V ein Strom von etwa 8  $\mu\text{A}$ . Der Strom erscheint auf den ersten Blick recht niedrig, doch muss man bedenken, dass er durch ein einzelnes Atom geführt wird. Verwendete man ein Kupferkabel mit einem Radius von 1 mm, dann wäre ein entsprechender Strom 500.000.000 A groß. Im obigen Fall liegt ein elektrischer Widerstand des Einzelatoms von 12.500 Ohm vor. Besteht der Stromkreis hingegen aus ferromagnetischen Elektroden (Nickelspitze – Kobaltatom – Kobaltinsel), so wird eine Verdopplung des elektrischen Widerstands beobachtet.

Eine mögliche Erklärung für dieses spektakuläre Ergebnis hängt mit dem Spin der durch das Kobaltatom transportierten Elektronen zusammen. Kontaktiert man das Kobaltatom mit nichtmagnetischen Elektroden, dann fließen Elektronen mit beiden Spinrichtungen durch das Atom; unter Verwendung rein ferromagnetischer Elektroden lässt das Kobaltatom vorwiegend Elektronen



mit einer Vorzugsrichtung des Spins passieren. Da es nur zwei Spinrichtungen gibt, könnte dieses Modell die Verdopplung des elektrischen Widerstands erklären.

Die Bedeutung der Kieler Experimente liegt in der kontrollierten Herstellung eines einatomigen Stromkreises, durch den unter extrem stabilen Bedingungen ein vergleichsweise hoher Strom geführt werden konnte. In bisherigen Experimenten, die nicht über die Möglichkeit der Abbildung des Kontaktbereichs verfügten, konnte man lediglich vermuten, dass die Elektroden ein einzelnes Atom verbinden. Durch die Verwendung

eines Rastertunnelmikroskops ist die Charakterisierung der atomaren Umgebung des Kobaltatoms möglich und sehr wichtig für zukünftige Modellrechnungen zum spinpolarisierten Elektronentransport. Auch legen die Ergebnisse eine Anwendung nahe: einzelne Kobaltatome auf Kobaltinseln könnten als Quellen spinpolarisierter Ströme genutzt werden. Solche Quellen sind für die Spintronik von großer Bedeutung.

N. Néel, J. Kröger, R. Berndt, „Quantized Conductance of a Single Magnetic Atom“, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 086805 (2009)

## Neues aus der wunderbaren Welt der Vortizes

Halbleiterbauelemente haben in den letzten Jahrzehnten den technologischen Fortschritt dominiert. Es zeichnet sich jedoch ab, dass ohne grundlegende Veränderungen der bisher exponentielle Anstieg der Speicherdichte (Moore'sches Gesetz) nicht mehr sehr lange aufrecht erhalten werden kann. Derzeit werden die sogenannten spintronischen Bauelemente, in denen der Spin der Elektronen und nicht deren Ladung als Informationsträger genutzt werden, als wahrscheinlichste Nachfolger der reinen Halbleitertechnologie diskutiert. Diese Bauelemente wären prinzipiell unempfindlicher gegenüber Störungen und könnten Information dauerhaft speichern. Durch die Vermischung von Speicher- und Logikbausteinen würden bisher getrennte Marktsegmente vereinigt und gänzlich neue, wesentlich leistungsfähigere Rechnerarchitekturen wären möglich. Sogenannte rekonfigurierbare Hardwarekomponenten, die aus spintronischen Bauelementen aufgebaut sind, könnten sich zum Beispiel an ihre jeweilige Aufgabenstellung anpassen und so um Größenordnungen schneller und gleichzeitig energieeffizienter arbeiten.

Mitarbeiter des Sonderforschungsbereiches 668 aus der Theoretischen und der Angewandten Physik sowie aus der Informatik haben vor kurzem mehrere wichtige Bei-

träge zur Einsetzbarkeit von solchen spintronischen Strukturen als Speicherzellen geleistet. Zunächst zeigten Stellan Bohls und andere Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs mithilfe eines theoretischen Modells und mikromagnetischer Simulationen, dass magnetische Singularitäten, sogenannte Vortizes, wie sie in weichmagnetischen Dünnschichtstrukturen auftreten, als nichtflüchtige Speicher verwendet werden können. In diesen Strukturen wird die Information als magnetische Bits in der Orientierung der Singularität in positiver oder negativer Richtung aus der Dünnschichtebene heraus durch die starke Austauschwechselwirkung im Ferromagneten gespeichert. Stellan Bohls und Mitarbeiter entwickelten dabei ein neues Konzept für das Schreiben der Bits, das im Gegensatz zu bisherigen Konzepten kein vorheriges Lesen der Bits benötigt und dadurch wesentlich schneller und robuster ist. Dazu berechneten sie die Einflüsse der Magnetfelder und des Drehmomentübertrags von spinpolarisierten Strömen auf die Magnetisierung solcher Vortizes und fanden, dass, in geeigneter geometrischer Anordnung der Stromleitungen, die Kräfte von Magnetfeldern und Drehmomentübertrag sich je nach Ausrichtung der Vortizes verstärkend oder abschwächend überlagern und so die Information in der Speicherzelle sich ent-

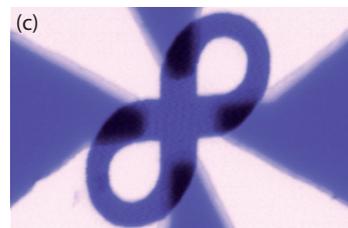
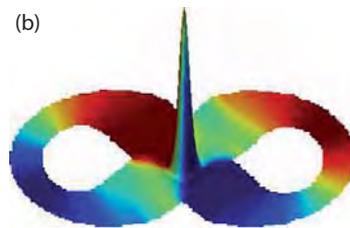
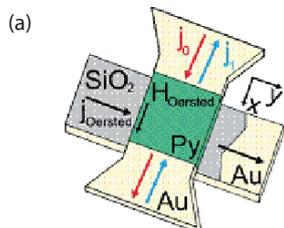
weder verändert oder erhalten bleibt (siehe Skizze in Abbildung (a)). In einer ähnlichen Arbeit stellten Dr. Andre Drews und Mitarbeiter aus der Theoretischen und der Angewandten Physik sowie aus der Informatik fest, dass auch die Antagonisten magnetischer Singularitäten, die sogenannten Antivortizes, als Speicherelemente verwendet werden können. In speziell geformten Strukturen bilden einzelne Antivortizes, in denen die Magnetisierung nicht wie bei Vortizes um die Singularität kreist, sondern auf sie zu und von ihr weg zeigt, einen stabilen Zustand und können durch spinpolarisierte Ströme zum Umschalten der Singularität gebracht werden (siehe Abbildung (b)).

Vor kurzem wurde dieses Umschaltverhalten von Antivortizes durch Mitarbeiter des SFB668 zum weltweit ersten Mal experimentell beobachtet. In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart, der Universität Ghent in Belgien und der Lawrence Berkeley Laboratories in Berkeley, Kalifornien, haben Thomas Kamionka und Mitarbeiter des Instituts für Angewandte Physik der Universität Hamburg speziell geformte magnetische Strukturen (siehe Abbildung (c)) auf hauchdünnen Siliziumnitrid-Membranen präpariert und mithilfe von Synchrotronstrahlung untersucht. Die Strahlung wird in magnetischen Materialien

abhängig von der Ausrichtung der Magnetisierung in Bezug auf die Photonenflussrichtung unterschiedlich stark absorbiert. Durch die extrem kurzen Lichtpulse, wenige Pikosekunden, und komplizierte Röntgenoptiken ist es so möglich, die Änderung der Magnetisierung dieser nur wenige Nanometer großen Singularitäten in Echtzeit zu beobachten. Durch Anlegen von zwei sich überlagernden Wechselströmen gelang es ihnen, die Antivortizes zum Schwingen anzuregen. Oberhalb einer kritischen Stromstärke wurde die Schwingung dann schließlich instabil, so dass die Singularitäten ihre Ausrichtung änderten.

Neben der Möglichkeit, Informationen zu speichern, werden magnetische Singularitäten auch als mögliche Quellen für neuartige Informationsübertragung und als mögliche Logikbausteine diskutiert. Schnelle Feld- oder Strompulse bringen die Singularitäten zum Umschalten, wobei diese hochfrequente Spinwellen hoher Intensität erzeugen, wie mikromagnetische Simulationen gezeigt haben (siehe Abbildung (c)). Diese Spinwellen können durch dünne Drähte geleitet und so gefiltert werden. Durch konstruktive oder destruktive Interferenz sind so logische Operationen möglich.

⇒ Weiter auf Seite 2



(a) Speicherkonzept für schnelleres Schreiben von Vortex-Speicherelementen mit einer Kombination von Magnetfeld- und Strompulsen. (b) Die Magnetisierungskomponenten eines Antivortizes. (c) Achtförmige Permalloystruktur auf einer Siliziumnitridmembran zur Untersuchung von Antivortex-Schaltprozessen. (d) Ortsabhängiges Frequenzspektrum in einer quadratischen Mikrostruktur aufgrund des Umschaltens der Vortex-Singularität (Mitte). Dargestellt sind die Schwingungen in der senkrechten Magnetisierungskomponente mit von unten nach oben zunehmender Frequenz.

## 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 21 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](mailto: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](mailto: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: [hfu@physnet.uni-hamburg.de](mailto:hfu@physnet.uni-hamburg.de)

[www.sfb668.de](http://www.sfb668.de)

## Neues aus der wunderbaren Welt der Vortizes

### Fortsetzung von Seite 1

Bernd Güde (Dept. Informatik) und Mitarbeiter des Sonderforschungsbereichs 668 haben die Einsetzbarkeit spintronischer Nanostrukturen untersucht, indem sie die elektronischen und magnetischen Eigenschaften von magnetischen Mehrlagen-systemen simuliert und modelliert haben. Aus dem entstandenen SPICE-Modell ließen

sich Vorhersagen über Umschaltverhalten, Schaltzeit, und notwendiger Arbeitsspannung ableiten. In den folgenden Schritten sollen nun mehrere Modelle miteinander verbunden werden, um die grundlegenden Einheiten digitaler Logikbausteine zu erstellen und deren zeitliches und elektronisches Verhalten zu optimieren.

A. Drews, B. Krüger, G. Meier, S. Bohlens, L. Bocklage, T. Matsuyama and M. Bolte, „**Current- and field-driven magnetic antivortices for nonvolatile data storage**“, Appl. Phys. Lett. **94**, 062504 (2009).

S. Bohlens, B. Krüger, A. Drews, M. Bolte, G. Meier and D. Pfannkuche, „**Current controlled random-access memory based on magnetic vortex handedness**“, Appl. Phys. Lett. **93**, 142508 (2008).

## Bewegung im Nanokosmos

Seit der Mensch den ersten Blick in den Nanokosmos warf, stand die Idee im Raum, diese winzige Welt der Atome und Moleküle gezielt zu manipulieren und molekulare Maschinen zu entwickeln, die selbständig beliebige Materialien und komplexe Systeme aus einzelnen Atomen und Molekülen aufbauen können. Den Nanokosmos können die Wissenschaftler inzwischen zwar mit aufwendigen Verfahren und großen Geräten gezielt Atom für Atom kontrollieren, aber molekulare Nano-Maschinen sind noch immer im Bereich der Science-Fiction angesiedelt. Nichtsdestotrotz wird an verschiedenen Antriebssystemen für solche Nano-Maschinen intensiv geforscht.

Einen völlig neuen Ansatz eröffnen die Arbeiten der beiden Forscher Makoto Ashino und Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg, die in der Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ veröffentlicht wurden. Zusammen mit einem internationalen Team von Wissenschaftlern fanden die Hamburger Forscher neue Möglichkeiten der Messung der Kräfte, die Moleküle innerhalb von anderen Molekülen bewegen.

Für ihre Experimente sperrten die Forscher metallorganische Moleküle in Kohlenstoff-

Nanoröhrchen ein. Die dabei entstehende Struktur kann man sich wie eine Erbsenschote vorstellen (Abb. 1). Die so vorbereiteten Moleküle innerhalb von Nanoröhrchen wurden auf einer isolierenden Oberfläche platziert und mit Hilfe der berührungslosen Rasterkraftmikroskopie untersucht.

Neben der Untersuchung der Oberflächentopographie der „Erbsenschote“ ermittelten die Wissenschaftler auch gleichzeitig die Energie, die der vibrierenden Spitze des

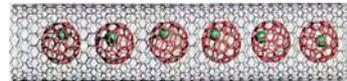


Abb. 1: Wie eine Erbsenschote - metallorganische Moleküle eingesperrt in Kohlenstoff-Nanoröhrchen.

Rasterkraftmikroskops verloren ging, während sie über die Oberfläche der Struktur bewegt wurde. Dadurch konnten die Hamburger Wissenschaftler erstmalig die Kräfte, die die kleinen metallorganischen Moleküle innerhalb der Nanoröhrchen bewegen, messen und sogar gezielt kontrollieren. Dies stellt einen entscheidenden Durchbruch in der Erforschung von molekularen Nanostruk-

turen dar, die für die Entwicklung der Nanotechnologie eine hohe Bedeutung haben.

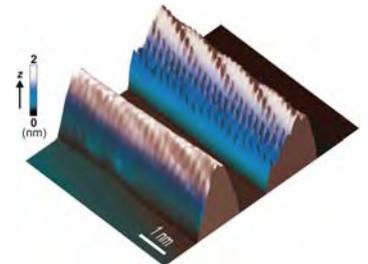


Abb. 2: Oberflächentopographie der „Erbsenschote“ - metallorganische Moleküle eingesperrt in Kohlenstoff-Nanoröhrchen.

M. Ashino, R. Wiesendanger, A. N. Khlobystov, S. Berber, and D. Tomaneck, „**Revealing Subsurface Vibrational Modes by Atom-Resolved Damping Force Spectroscopy**“, Phys. Rev. Lett. **102** 195503 (2009)

M. Ashino, D. Oberfell, M. Halu ka, S. Yang, A. N. Khlobystov, S. Roth, and R. Wiesendanger, „**Atomically resolved mechanical response of individual metallofullerene molecules confined inside carbon nanotubes**“, Nature Nanotechnology **3**, 337 - 341 (2008)

## Hamburger Schüler erforschen die Nanowelt



Hamburger Schüler der Nano-AG überprüfen die vorhandenen Bauteile eines Schüler-Rastertunnelmikroskops

Der Sonderforschungsbereich 668 erforscht sehr erfolgreich den Magnetismus im Nanokosmos und erzielt mit seinen zahlreichen Veröffentlichungen ein großes Echo innerhalb der wissenschaftlichen Fachkreise.

Allerdings erreichen die herausragenden Forschungsergebnisse des SFB 668 nur selten die breite Öffentlichkeit, da sie für Journalisten zu kompliziert und unverständlich erscheinen, um darüber in Tageszeitungen, allgemeinen Zeitschriften, Rundfunk- und Fernsehbeiträgen zu berichten.

Aus diesen Gründen betreibt der SFB 668 eine intensive Öffentlichkeitsarbeit und macht so das Forschungsfeld „Nanomagnetismus“ für die Öffentlichkeit zugänglich.

Neben der klassischen Presse- und Öffentlichkeitsarbeit ist das vorrangige Ziel des SFB 668 die Gewinnung von zukünftigen Nachwuchswissenschaftlern durch die gezielte Ansprache von Kindern und Jugendlichen und deren Einbeziehung in Schulpro-

jekte und Betriebspraktika. Mit Unterstützung durch die „Initiative Naturwissenschaft & Technik“ sind hierzu bereits erste Projekte mit Schulen aus Hamburg und Niedersachsen angelaufen:

Mit dem Gymnasium „Sankt-Ansgar-Schule“ ist gerade ein langfristig angelegtes Schulprojekt in Form einer Nanotechnologie-Arbeitsgemeinschaft gestartet. Mit technischer und wissenschaftlicher Unterstützung durch den SFB 668 wird derzeit aus einem vorhandenen Bausat an der Sankt-Ansgar-Schule ein eigenes Schüler-Rastertunnelmikroskop aufgebaut. An diesem Gerät sollen in Kooperation mit dem SFB weitere Projekte im Rahmen von „Jugend forscht“ durchgeführt werden.

Initiiert durch einen Besuch in der vom SFB 668 betriebenen Ausstellung „Nanotechnologie - Aufbruch in neue Welten“ wurde an das Niedersächsische Internatsgymnasium Bad Bederkesa im Rahmen einer wissenschaftlichen Projektwoche ein Schüler-Rastertunnelmikroskop verliehen.

Durch interessante Projekt- und Praktikumsangebote möchte der SFB Jugendliche ermutigen, sich auch im Rahmen von „Jugend forscht“ und „Jugend gründet“ mit dem Themengebiet des Nanomagnetismus auseinanderzusetzen und sie tatkräftig bei ihren Forschungsarbeiten unterstützen. Mit der Beteiligung an Veranstaltungen wie dem „Girls' Day“ sollen verstärkt Mädchen und junge Frauen für technische und naturwissenschaftliche Berufe begeistert werden.

Ein weiteres sehr wichtiges Angebot für Kinder und Jugendliche ist der Besuch der



Führung durch die Ausstellung „Nanotechnologie - Aufbruch in neue Welten“ des SFB 668

Dauerausstellung „Nanotechnologie - Aufbruch in neue Welten“ in der verschiedene Exponate aus der Forschung, aber auch Anwendungen der Nanotechnologie, die bereits Stand der Technik sind, und Nanotechnologieprodukte, die man bereits kaufen kann, gezeigt werden. Durch die vielfältigen Exponate aus unterschiedlichen Bereichen kann man die Schüler für die Naturwissenschaften begeistern, kommt sehr schnell mit den Schülern ins Gespräch und kann interessante Projektarbeiten anregen.

Besuche in der Ausstellung werden grundsätzlich nur als geführte Rundgänge angeboten, um die komplexen Inhalte möglichst so zu erklären, dass die Gäste mit unterschiedlichen Vorkenntnissen sie auch verstehen und um sofort auf Fragen reagieren zu können. Ein gedruckter Ausstellungsführer, in dem alle Ausstellungs-Exponate noch einmal abgebildet und mit einem kurzen Text beschrieben sind, rundet das Angebot ab.