

■ Direkter Blick auf atomare Bits

Erstmals ist es gelungen, die magnetische Hysterese einzelner Atome mithilfe eines Rastertunnelmikroskops zu vermessen.

Die exponentiell voranschreitende Miniaturisierung der magnetischen Datenspeicherung ist eine zentrale Triebkraft des Informationszeitalters. Inzwischen sind Speicherdichten von mehreren 100 Gbit/Inch² möglich. Jedes einzelne Bit wird dabei durch die Ausrichtung eines kleinen Elementarmagneten gespeichert. Klar dürfte sein, dass die Speicherdichte spätestens bei Bitgrößen kleiner als ein Atom an ihre Grenzen stoßen wird. Wo die Grenzen tatsächlich liegen und inwieweit sie sich mit neuen Konzepten hinausschieben lassen, ist Thema aktueller Forschung.

Vor allem geht es darum, kleinste magnetische Bits zu erzeugen, bei denen die Information trotz thermischer Fluktuationen bei Raumtemperatur nicht verloren geht.

Die entscheidende Größe, welche die nötige Schaltenergie und damit die Stabilität der Bits charakterisiert, heißt Anisotropieenergie und ist eine Folge der Spin-Bahn-Wechselwirkung. Verkleinert man die magnetischen Bits, so verringert sich diese Energie. Betrachtet man hingegen die Anisotropieenergie *pro Atom*, so wächst diese Größe E_A erfreulicherweise weitgehend universell. Tatsächlich zeigen nämlich die Atome, die unsymmetrische Bindungspartner z. B. am Rand eines Bits haben, ein größeres E_A : Während diese in Volumenmaterialien nur von der Größenordnung 10 $\mu\text{eV}/\text{Atom}$ ist, kann sie am Rand von zweidimensionalen magnetischen Inseln (z. B. Co) auf einem unmagnetischen Substrat (z. B. Au) bereits Werte im Bereich von meV/Atom erreichen [1].

Von der Anisotropieenergie hängt auch die mittlere Lebensdauer der Bits ab. Sie berechnet sich nach

$$t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{N \cdot E_A}{kT}\right),$$

mit Boltzmann-Konstante k , Temperatur T , mittlerer Fluktuationszeit¹⁾ $t_0 \approx 10^{-13}$ s und Anzahl der zu schaltenden Atome N . Bei E_A im Bereich von meV/Atom ist

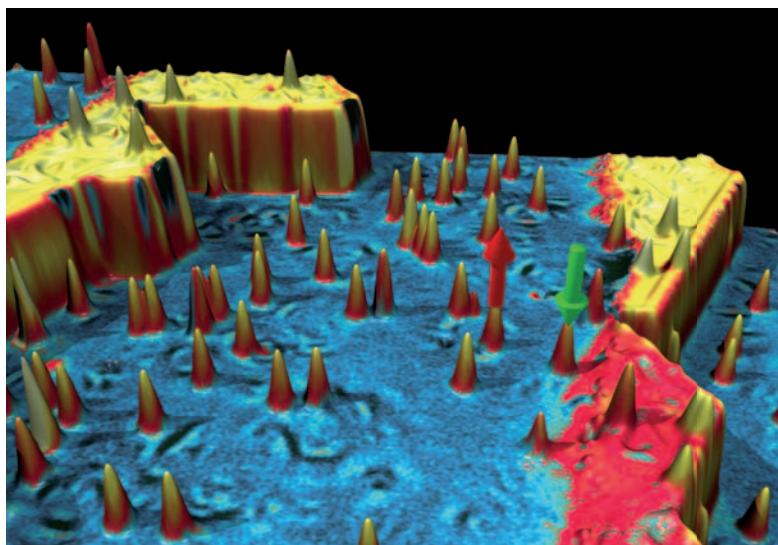


Abb. 1 Diese Rastertunnelmikroskop-Aufnahme zeigt die Platin-Terrassen (blau), an deren Rand sich Kobalt-Streifen befinden. Diese sind je nach Magnetisierungsrichtung rot oder gelb dargestellt. Die nachträglich aufgedampften

Co-Atome erscheinen als rot-gelbe Zuckerhüte. Abhängig vom Abstand zum Streifen sind die Spins der Co-Atome entweder parallel (roter Pfeil) oder antiparallel (grüner Pfeil) zur Streifenmagnetisierung ausgerichtet.

zu erwarten, dass selbst Elementarmagnete aus einzelnen Atomen bei Temperaturen bis ca. 3 K über Stunden stabil bleiben. Auch wenn das noch deutlich unter der für Anwendungen wichtigen Raumtemperatur von 300 K liegt, befindet es sich zumindest im experimentell gut zugänglichen Bereich.

Die Hamburger Arbeitsgruppe um Jens Wiebe und Roland Wiesendanger hatte sich nun zum Ziel gesetzt, die magnetischen Momente einzelner Atome direkt abzubilden und zu untersuchen, wie stabil sie sind. Die Voraussetzungen dafür waren günstig, denn sie hatten vor vier Jahren erstmals in Deutschland ein Rastertunnelmikroskop fertiggestellt, das sich auch noch bei 300 mK betreiben lässt [2], und verfügen über langjährige Expertise in der spin-polarisierten Rastertunnelmikroskopie [3]. Für ihre Experimente wählten sie einzelne Kobaltatome auf einem Pt(111)-Substrat (Abb. 1). Für dieses System hatten Pietro Gambardella et al. bereits vor fünf Jahren Rekordwerte von 9,3 meV/Atom für E_A gefunden [4].

Doch zunächst war die Enttäuschung groß, denn die Atome

zeigten bei 4 K keine stabile Spinausrichtung, sondern paramagnetisches Verhalten (Abb. 2a), d. h. ein äußeres Magnetfeld ist notwendig, um den Elementarmagneten eine Vorzugsrichtung aufzuprägen. Selbst bei 0,3 K ließen sich die Spins zwar leichter ausrichten, aber eben nicht ohne Magnetfeld stabilisieren (Abb. 2b). Dabei ist noch nicht endgültig geklärt, was die Spins im Atom auch bei tiefsten Temperaturen fluktuieren lässt. Möglich wären Tunneleffekte, aber auch Anregungen durch den Tunnelstrom des Mikroskops.

Den Hamburger Experimentatoren gelang es jedoch mit einem Trick, die atomaren Spins zu fixieren [5]. Dazu deponierten sie zunächst einen schmalen Streifen Kobalt an die Stufenkanten des Platin, der magnetisch stabil ist. Danach brachten sie bei tiefen Temperaturen (25 K) einzelne Co-Atome auf die Pt-Terrassen auf (Abb. 1). Diese Einzelatome zeigten nun die gewünschte Hysterese (Abb. 2c), allerdings nur, wenn sie weniger als 5 nm vom Kobalt-Streifen entfernt waren. Je nach Abstand zum Streifen sind die Spins der

1) Die Fluktuationszeit wird im Wesentlichen durch thermisch angeregte Magnonen bestimmt, die typischerweise mittlere Frequenzen kleiner als 10^{13} Hz aufweisen.

Einzelatome entweder parallel oder antiparallel zur Streifenmagnetisierung ausgerichtet. Ein solches Verhalten ist von Schichtsystemen, wie sie z. B. Peter Grünberg im Zusammenhang mit dem Riesenmagnetowiderstand untersucht hat, bestens bekannt. Die im Mittel unpolarisierten Pt-Elektronen bekommen an der Grenzfläche zum Co-Streifen eine Vorzugsrichtung des Spins aufgeprägt. Diese Vorzugsrichtung oszilliert als Funktion des Abstandes vom Co-Streifen. Sie führt somit zu einer unterschiedlichen Spinausrichtung der umgebenden Pt-Elektronen, je nachdem, wo man die einzelnen Co-Atome platziert. Deren Spins richten sich ihrerseits nach den sie umgebenden Pt-Spins aus. Die Energie dieser indirekten Wechselwirkung²⁾ zwischen magnetischen Objekten ergibt sich aus

$$\Delta E(d) = E_0 \frac{\cos(2k_F d)}{(2k_F d)^D},$$

mit Abstand d , Fermi-Wellenzahl k_F , Dimension D der Wechselwirkung und Vorfaktor E_0 .

Tatsächlich haben Jens Wiebe und Kollegen aus den Hysteresekurven diese Wechselwirkungsenergie Atom für Atom bestimmen und die gedämpfte Oszillation über drei Perioden nachweisen können [5]. Ganz nebenbei haben sie dabei Energieskalen von nur 10 μeV aufgelöst – ein Rekordwert für die Rastertunnelspektroskopie.

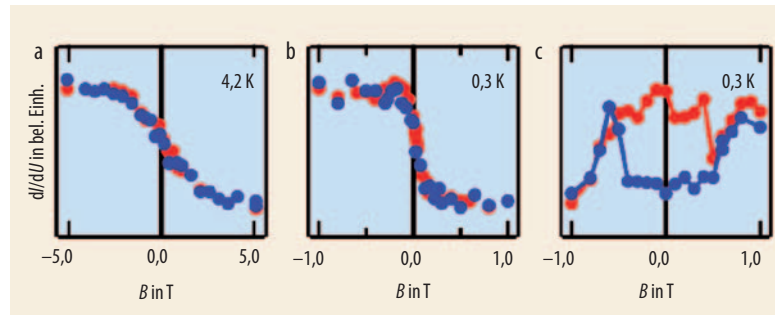


Abb. 2 Mit der spinpolarisierten Spitze eines Rastertunnelmikroskops lässt sich die Magnetisierung der einzelnen Atome anhand der dazu proportionalen Messgröße dI/dU vermessen ($U = 0,3 \text{ V}$) [3]. Bei

Co-Atomen auf Pt(111) zeigt sich zunächst keine Hysterese (a, b), sondern erst, wenn das Co-Atom etwa 1,5 nm vom stabilisierenden Co-Streifen entfernt ist (c). (nach [5])

Auch wenn die magnetisch stabilen Atome schon aufgrund der tiefen Temperaturen keine Alternative zu heutigen Speichermedien bilden, eröffnet die auch im Vorzeichen kontrollierbare Kopplung faszinierende Perspektiven für die Grundlagenforschung. Gerade in Kombination mit der ebenfalls erst kürzlich etablierten Möglichkeit, mit dem Rastertunnelmikroskop Spinanregungen mit atomarer Präzision zu studieren [6], ergeben sich ganz neue Möglichkeiten. Man denke z. B. an die Anregungen in antiferromagnetisch gekoppelten Ringen mit ungerader Atomanzahl. Solche Geometrien lassen sich durch Verschieben der Atome mit dem Rastertunnelmikroskop erzeugen. Sie heißen Frustrationsgeometrien, da die ungerade Anzahl von atomaren Spins nicht erlaubt, abwechselnd Spins nach unten

und nach oben auszurichten. Man erwartet komplexe, nicht-kollineare Spinanordnungen, die darüber hinaus vermutlich ganz neuartige, kollektive Anregungen zeigen. Solche Spinanordnungen und Anregungen mit der atomaren Kontrolle von STM-Messungen zu studieren, eröffnet vermutlich ganz neue Einblicke in die komplexe Welt der wechselwirkenden Elektronen.

Markus Morgenstern

2) Dabei handelt es sich um die Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida-Wechselwirkung (RKKY).

- [1] N. Weiss et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 157204 (2005)
- [2] J. Wiebe et al., Rev. Sci. Instrum. **75**, 4871 (2004)
- [3] M. Bode, Rep. Prog. Phys. **66**, 523 (2003); A. Wachowiak et al., Science **298**, 577 (2002)
- [4] P. Gambardella et al., Science **300**, 1130 (2003)
- [5] F. Meier et al., Science **320**, 82 (2008)
- [6] C. F. Hirjibehedin et al., Science **317**, 1199 (2007)

Prof. Dr. Markus Morgenstern, II. Institut für Physik B und JARA-FIT, Otto-Blumenthal-Straße, RWTH Aachen, 52074 Aachen

KURZGEFASST

■ **Oszillierender Zerfall**

Ein internationales Forscherteam hat an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt überraschend Oszillationen gefunden, wo ein einfacher exponentieller Zerfall erwartet wurde. Bei dem Experiment entstanden durch den Beschuss eines Be-Targets mit Samarium-152 zunächst die beiden radioaktiven Nuklide Praeseodym-140 und Promethium-142. Der Speicherring ESR erlaubte es dann, zeitaufgelöst zu verfolgen, wie die Ionen $^{140}\text{Pr}^{58+}$ bzw. $^{142}\text{Pm}^{60+}$ in die stabilen Isotope Cer-140 bzw. Neodym-142 zerfallen. Dies geschieht durch den Einfang des einzigen Elektrons der Ionen, wodurch sich im Kern ein Proton in ein Neutron umwandelt unter Emission eines Elektron-Neutrinos. Die Wissen-

schaftler fanden einen oszillierenden Zerfall mit einer Periode von rund sieben Sekunden und vermuten, dass Oszillationen zwischen Elektron- und Myon-Neutrinos dafür verantwortlich sind. Yu. A. Litvinov et al., Phys. Lett. B **664**, 162 (2008)

■ **Kein Hinweis auf Higgs-Boson**

Kurz vor dem Start des Large Hadron Colliders am CERN hat die amerikanische Konkurrenz am Tevatron-Beschleuniger des Fermilab das Ergebnis ihrer Suche nach dem Higgs-Boson vorgelegt. Die CDF-Kollaboration untersuchte den Prozess, bei dem aus Proton und Antiproton neben einem W- oder Z-Boson ein Higgs-Boson entsteht, das anschließend in ein b - und ein \bar{b} -Quark zerfällt. Die gefundenen

rund 250 möglichen Ereignisse liegen nicht signifikant über dem Untergrund – das Rennen zwischen Fermilab und CERN bleibt also offen. T. Aaltonen et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 211801 (2008)

■ **Transistor aus Graphen**

Einen Feldeffekt-Transistor, dessen Herzstück ein weniger als zehn Nanometer schmaler Graphen-Streifen ist, haben Wissenschaftler in den USA entwickelt. Solche einlagigen Graphitschichten sind aufgrund der sehr hohen Beweglichkeit der Ladungsträger ein vielversprechendes Material für die Elektronik. Der Transistor funktioniert bei Raumtemperatur. X. Wang et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 206803 (2008)