



Hologramme aus dem Nanokosmos

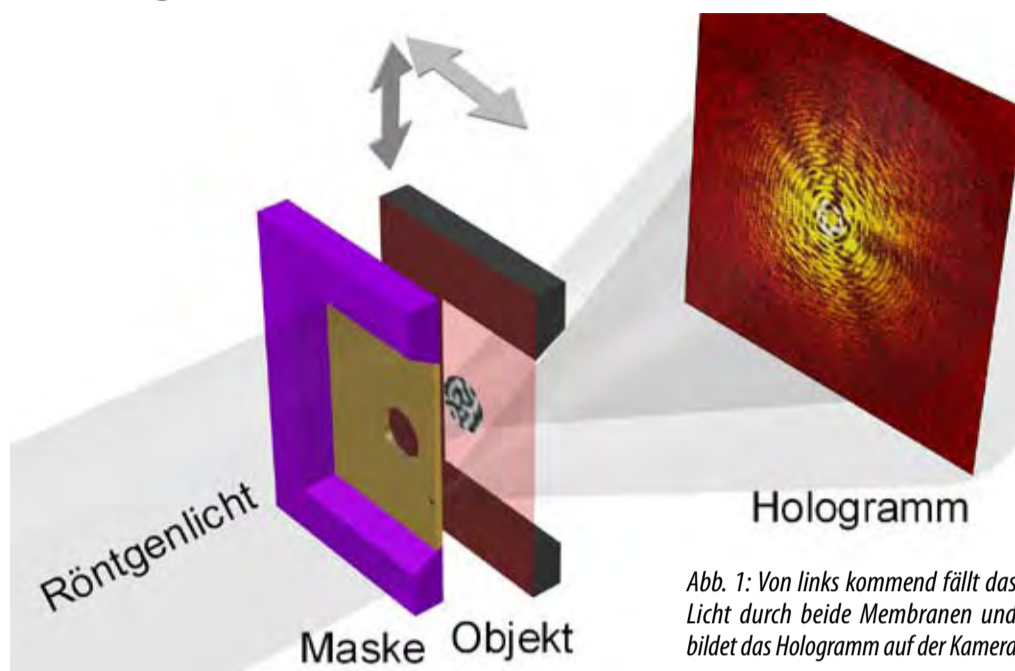


Abb. 1: Von links kommt das Licht durch beide Membranen und bildet das Hologramm auf der Kamera

Jeder kennt aus dem Alltag die Hologramme, die beispielsweise auf Kreditkarten als Sicherheitsmerkmale angebracht sind. Im Unterschied zum Foto eines Objektes, das nur die Amplitude der Lichtwelle, die von einem Objekt ausgeht, aufzeichnet, enthält ein Hologramm zusätzlich die örtliche Information über die Phase der Lichtwelle. Bei geeigneter Beleuchtung des Hologramms wird die ursprüngliche Wellenfront phasenrichtig wiederhergestellt und der Betrachter erhält einen dreidimensionalen Eindruck des Objektes.

Aber nicht diese Eigenschaft der Holografie steht im Mittelpunkt, wenn es um die Abbildung kleinster Strukturen geht, sondern die Tatsache, dass für die Aufzeichnung eines Hologramms keinerlei Linsen benötigt werden. Für die Untersuchung

nanometergroßer Strukturen wird Licht mit mindestens ebenso kleiner Wellenlänge benötigt (weiche Röntgenstrahlung). Die einzigen Linsen, die in diesem Wellenlängenbereich funktionieren (sog. Fresnel-Zonenplatten), sind sehr aufwändig herzustellen und liefern trotzdem eine um eine Größenordnung schlechtere Abbildungsqualität als Linsen für sichtbares Licht.

Die Vorgehensweise bei der linsenlosen Aufzeichnung eines Hologramms besteht darin, die Lichtwelle - nachdem sie das Objekt durchstrahlt hat - bei der Aufzeichnung mit einer Referenzwelle bekannter und dazu stabiler (kohärenter) Phase zu überlagern (Interferenz).

Als Referenzwelle dient eine Kugelwelle, die von einem wenige Nanometer großen Loch direkt neben dem

Objekt ausgeht. Kohärente Röntgenstrahlen stehen an modernen Synchrotron-Quellen oder an den ganz neuen Freie-Elektronen-Lasern wie dem Hamburger FLASH mit größter Helligkeit zur Verfügung, so dass seit einigen Jahren Verfahren zur holografischen Abbildung von Nanostrukturen erprobt werden.

Eine Arbeitsgruppe des SFB 688 in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern vom DESY in Hamburg und der ESRF in Grenoble hat kürzlich das erste voll funktionsfähige Mikroskop für die Holografie von Nanostrukturen vorgestellt. Dabei erlaubt der neuartige Aufbau aus zwei direkt hintereinander angeordneten und präzise gegeneinander verschiebbaren Siliziumnitrid-Membranen, eine beliebige Stelle des zu untersuchenden Objekts gezielt anzufahren und abzubilden, was mit den bisher bekannten Verfahren nicht möglich war. Der Trick besteht darin (Abb. 1), die optisch wirksamen Komponenten, das sind ein Mikrometer großes Loch für die Wahl des Bildausschnitts und das kleine Loch für die Erzeugung der Referenzwelle, aus einer eigenen, undurchlässigen Membran

herzustellen. Das Objekt wird dagegen auf einer zweiten, durchlässigen Membran präpariert, die separat gewechselt werden kann.

Die Hologramme der einzelnen Bildausschnitte eines ausgedehnten Objekts werden am Computer rekonstruiert und die Bilder anschließend zusammengesetzt. Weiche Röntgenstrahlung bietet die Möglichkeit der selektiven Abbildung einzelner chemischer Elemente oder auch deren lokaler Magnetisierung, was sich je nach Fragestellung gezielt ausnutzen lässt (siehe Abb. 2). Die Zeitstruktur der Röntgenpulse verspricht darüber hinaus Information auf der Piko-sekunden-Skala. Gegenwärtig wird an einer Verbesserung der Ortsauflösung auf 10 nm gearbeitet. Die Fachzeitschrift „Applied Physics Letters“ bewertete die Technik der „Röntgen-Holografischen Mikroskopie“ (XHM) als so vielversprechend, dass sie der Veröffentlichung ein eigenes Titelblatt widmete.

D. Stickler, R. Frömter, H. Stillrich, C. Menk, C. Tieg, S. Streit-Nierobisch, M. Sprung, C. Gutt, L.-M. Stadler, O. Leupold, G. Grübel, and H. P. Oepen, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 042501 (2010)



Abb. 2: Magnetische Domänenstruktur eines Co/Pt-Films unter dem Einfluss einer von links nach rechts ansteigenden Eisenbedeckung.

Neues über atomare Bits

Hervorgerufen durch die immer zunehmende Miniaturisierung elektronischer Geräte und die stetig wachsende Flut digitaler Daten wird beständig nach Möglichkeiten gesucht, den Platz für die kleinste Speichereinheit, ein Bit, zu reduzieren. Bei der magnetischen Speichertechnologie gibt es das ultimative Ziel, irgendwann einmal die Information eines Bits in der magnetischen Ausrichtung eines einzelnen Atoms speichern zu können. Magnetische Atome verhalten sich wie winzige Kompassnadeln, deren Magnetisierung entweder nach oben (Bit 1) oder unten (Bit 0) zeigen kann. Aufgrund deren geringer räumlicher Ausdehnung ergäben sich dadurch immens hohe Speicherdichten, die für Jahrzehnte das Platzproblem lösen würden. Allerdings gibt es auf dem Weg dorthin vor allem zwei grundlegende Probleme: (i) die atomaren Bits schalten bei Raumtemperatur in Bruchteilen einer Sekunde zwischen den zwei Zuständen (0) und (1), wodurch die gespeicherte Information verloren geht; (ii) bei zu kleinen Abständen von wenigen Nanometern koppeln benachbarte Bits, was ebenfalls zu einem Datenverlust führt. Innerhalb des SFB 668 wird daher auf diesem Gebiet geforscht, um vielleicht doch

irgendwann durch eine geeignete Wahl des Materials für die Bits und deren Unterlage den ultimativen magnetischen Datenspeicher verwirklichen zu können.

Mittels der Methoden der modernen Oberflächenphysik lassen sich atomare Bits z.B. auf eine extrem flache Oberfläche eines Metalls aufbringen, die als Modellsystem eines atomaren Datenspeichers dienen. Das einzelne atomare Bit kann dabei mit der magnetisch beschichteten Spitze eines Rastertunnelmikroskops ausgelesen werden (siehe Abb. 3). Bereits vor einem halben Jahrhundert schlugen die Theoretiker Ruderman, Kittel, Kasuya und Yosida eine neue Art der Kopplung (RKKY-Kopplung) zwischen solchen magnetischen Atomen vor, die neben dipolarer Kopplung und direktem magnetischen Austausch als dritte fundamentale Wechselwirkung den Magnetismus im Festkörper bestimmt. Dabei spielen die Leitungselektronen im metallischen Substrat eine wichtige Rolle, die im Mittel unmagnetisch sind, denn ihre Spins zeigen statistisch in alle Richtungen. Nichtsdestotrotz können sie an den atomaren Bits gestreut werden, und werden dabei in direkter Nachbarschaft der Bits magnetisch polarisiert. Die an einem

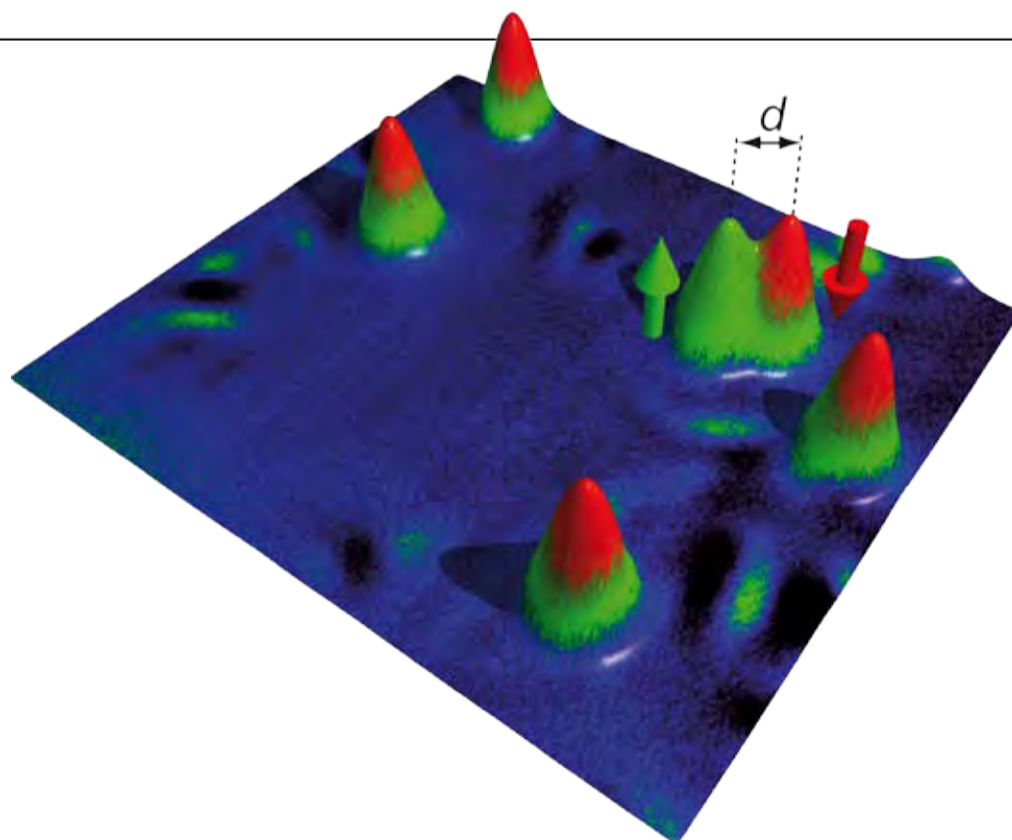


Abb. 3: Rastertunnelmikroskopische Auslesung des Magnetisierungszustands einzelner Kobaltatome (Kegel), die auf einer Platinoberfläche (blau) liegen. Die Farbe der Kobaltatome spiegelt dabei ihren Magnetisierungszustand wieder (nach oben: grün; nach unten: rot). Da ein Magnetfeld nach unten angelegt wurde, welchem die Magnetisierung folgt, erscheinen die meisten Atome rot. Nur das Linke der beiden Atome eines Paares mit einem Abstand von $d = 0.7$ nm ist entgegengesetzt zum Magnetfeld nach oben ausgerichtet. Dies liegt an der sogenannten RKKY-Kopplung zum Partner.

Bit gestreuten Elektronen merken sich gewissermaßen dessen Magnetisierungszustand und können ihn nach ihrer Reise zu einem weiteren,

benachbarten Bit weitervermitteln, wenn dieses im Umkreis weniger Nanometer zu finden ist. Dadurch wird eine magnetische Kopplung



Neues über atomare Bits

hervorgerufen, die je nach Abstand zu paralleler oder antiparalleler Ausrichtung benachbarter Bits führt. Die nach den vier Entdeckern benannte RKKY-Kopplung ist vor allem in Festkörpern, die eine geringe Menge magnetischer Atome enthalten, die dominierende der drei Wechselwirkungen.

Aufgrund der Rolle der Leitungselektronen als Vermittler der RKKY-Wechselwirkung bestimmt deren Bandstruktur die Stärke und Richtungsabhängigkeit der Kopplung. Bisher wurden vereinfachende theoretische Modelle benutzt, mit denen die Kopplungsstärke erfolgreich in Volumenmaterialien vorausgesagt werden konnte. Nach diesen Modellen ist die Kopplung nur vom Abstand der zwei magnetischen Atome, nicht aber von ihrer Ausrichtung zu den Kristallrichtungen abhängig (siehe z. B. Abb. 4 A). Obwohl eine Orientierungsabhängigkeit aufgrund der Kristallstruktur oft erwartet wird, ist es experimentell bisher nicht gelungen, einen direkten Beweis dafür zu erbringen. Dies lag vor allem an der Unzulänglichkeit der bisher

benutzten magnetischen Ausleseverfahren, die räumlich über einen großen Bereich und damit verschiedene Ausrichtungen mitteln.

Wie in einer aktuellen Ausgabe der Zeitschrift „Nature Physics“ berichtet wird, ist es nun in einer Zusammenarbeit von Wissenschaftlern der Universität Hamburg und des Forschungszentrums Jülich gelungen, die Richtungsabhängigkeit der RKKY-Kopplung direkt zu vermessen und mit einem aufwendigen Modell zu vergleichen [1]. Die in Hamburg experimentell ausgelesene Magnetisierungsrichtung in Paaren von atomaren Bits verschiedenen Abstands und verschiedener Orientierung stimmt dabei erstaunlich gut mit der auf dem Supercomputer in Jülich gerechneten Kopplung überein (Abb. 4 B). Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der RKKY-Kopplung von der Ausrichtung der zwei Bits, die man anhand der einfacheren Modelle nicht beschreiben kann.

Diese Erkenntnisse haben schließlich auch einen großen praktischen Nutzen für die zukünftige Entwicklung von Nanostrukturen aus einer große-

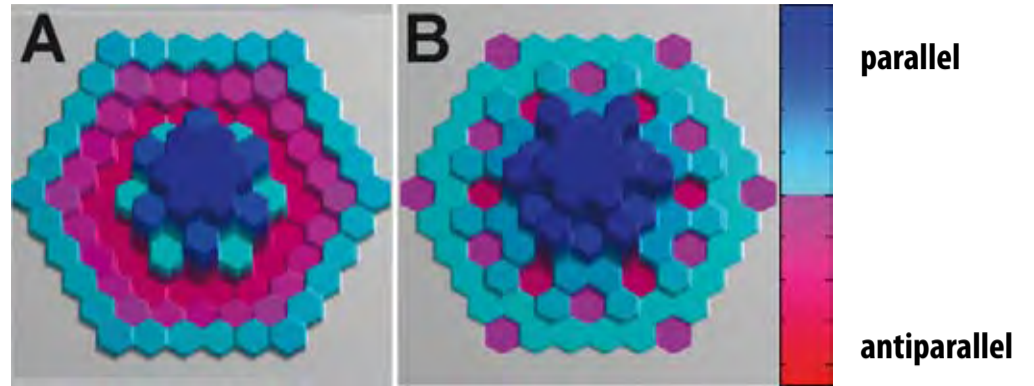


Abb. 4: Stärke und Ausrichtung der von einem Atom in der Mitte des Bildes hervorgerufenen RKKY-Wechselwirkung als Funktion der Position des zweiten Atoms. A: Berechnete Wechselwirkung bei Annahme eines einfachen Leitungselektronensystems ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Bandstruktur. B: Die mittels aufwendiger Dichtefunktionaltheorie berechnete Wechselwirkung zeigt eine wesentlich stärkere Richtungsabhängigkeit und stimmt sehr gut mit der experimentell ermittelten Wechselwirkung überein.

ren Anzahl einzelner magnetischer Atome. Mittels der Spitze des Rastertunnelmikroskops lassen sich die magnetischen Atome in einer nahezu beliebigen Struktur zusammenschieben. Mithilfe der gewonnenen Karte der RKKY-Kopplung lässt sich daher eine Nanostruktur mit maßgeschneiderter Kopplung entwerfen und verwirklichen. Solche Nanostrukturen könnten interessante Eigenschaften im Hinblick auf zukünftige spintro-

nische Bauelemente haben. Eine andere vielversprechende Möglichkeit besteht in ihrer Anwendung als Modellsystem für neuartige Rechenverfahren, die die Quantennatur der Bits ausnutzen.

[1] L. Zhou, J. Wiebe, S. Lounis, E. Vedmedenko, F. Meier, S. Blügel, P. H. Dederichs, and R. Wiesendanger, *Nature Physics* **6**, 187 - 191 (2010)

Neue Entwicklungen in der Theorie des Nanomagnetismus

Die physikalischen Eigenschaften magnetischer Atome auf nichtmagnetischen Substraten können durch hochinteressante Viel-Teilchen-Phänomene, wie z.B. durch den Kondo-Effekt, bestimmt sein. Die Kondo-Temperatur eines Kobalt-Atoms, eingebettet in eine Matrix bestehend aus wenigen Kupfer-Atomen auf einer Kupferoberfläche, ist Raster-Tunnel-Methoden experimentell zugänglich und hängt, wie eindrucksvoll gezeigt werden konnte [1], empfindlich von der detaillierten geometrischen Struktur ab. Für ein grundlegendes Verständnis ist es erforderlich, die thermodynamischen sowie die spektroskopischen Eigenschaften stark

wechselwirkender Viel-Elektronen-Systeme zu berechnen. Große Fortschritte konnten hier in den letzten Jahren mit Hilfe der „continuous-time quantum Monte-Carlo“-Technik (CT-QMC) [2] erzielt werden. Zwei Neuerungen, die für den Hamburger SFB 668 von hoher Bedeutung sind, sollen hier kurz vorgestellt werden.

Die magnetischen Eigenschaften von 3d-Übergangsmetal-Nanoteilchen werden durch itinerante magnetische Momente verursacht. Dies kann durch einen Hamilton-Operator $H = H_0 + U \cdot H_1$ modelliert werden, dessen „freier“ Anteil H_0 das intra- und interatomare Hopping von Elektronen zwischen spinentarteten

Orbitalen beschreibt und dessen „wechselwirkender“ Anteil $U \cdot H_1$ die stark abgeschirmte, lokale Coulomb-Abstoßung auf einem Atom darstellt. Versehen mit realistischen Parametern aus einer zuvor durchgeführten ab-initio-Bandstrukturrechnung, kann mit einem solchen Hubbard-artigen Modell eine realistische Beschreibung des Magnetismus von Nanoteilchen auf einem Substrat erreicht werden. Als Standardmethode zur Lösung eines solchen Problems ist seit den Anfängen der Quantenmechanik die Störungstheorie bekannt. Erwartungswerte von Observablen können in Potenzen der Kopplungsstärke U entwickelt und für niedrige Ordnungen k berechnet werden. Die praktische Beschränkung ist dabei durch den mit k immens steigenden Aufwand gegeben. Mit der CT-QMC-Methode ist es dagegen möglich, die gesamte Störreihe (von $k = 0$ bis $k = \infty$) numerisch exakt aufzusummieren. Dazu wird mit einem stochastischen Verfahren ein „random walk“ durch den Konfigurationsraum aller Ordnungen k erzeugt und die interessierende Observable, z.B. ein lokales magnetisches Moment, während des walks „gemessen“ und anschließend gemittelt. In Abwesenheit des sogenannten Vorzeichenproblems können damit endliche Systeme mit raum-zeitlichem Volumen Ω mit einem nur potenzartig anwachsenden Aufwand behandelt werden.

Vor kurzem konnte nun gezeigt werden, dass auch die freie Energie $F = -kT \ln Z$ bzw. die Zustandssumme Z mithilfe von CT-QMC berechnet werden kann [3]. Diese war der CT-QMC-Methode bislang wegen des Entropie-Beitrags nicht zugänglich, ist aber für die Konstruktion von magnetischen Phasendiagrammen unverzichtbar. In Zukunft sollen magnetische Phasendiagramme für

Nanostrukturen auf nichtmagnetischen Substraten mit dieser Technik bestimmt werden.

Eine weitere Neuerung wurde in [4] vorgestellt: Durch eine Erweiterung der CT-QMC-Methode und durch entsprechenden Ausbau der Computerprogramme kann erstmals die Kondo-Temperatur für reale Nanosysteme berechnet werden. Entscheidend ist hier, dass die volle Orbitalstruktur des Coulomb-Wechselwirkungsvermittlers mitgenommen wird. Abb. 5 zeigt die so berechnete lokale Zustandsdichte für das 3d-Orbital eines auf einer Cu(111)-Oberfläche an einem dreifach koordinierten Platz adsorbierten Co-Atoms. Die scharfe, an die Fermi-Kante gepinnte und stark temperaturabhängige Kondo-Resonanz ist im Vergleich zur lokalen Zustandsdichte einer einfachen Bandstrukturrechnung deutlich zu erkennen. Die damit verbundene Ausbildung eines lokalen Singulettts steht im Falle zweier magnetischer Atome in Konkurrenz zur nichtlokalen Singulettbildung mittels einer indirekten, über das Substrat vermittelten magnetischen („RKKY“) Kopplung. Ob z.B. als Funktion der Anzahl der Atome ein gerade/ungerade-Effekt (Abb. 5) erwartet werden kann, ist eine der vielen spannenden Fragen auf diesem Gebiet. Wir erhoffen uns von der CT-QMC-Technik genauere Aufschlüsse zum Wechselspiel zwischen Kondo-Effekt und RKKY-Kopplung.

[1] N. Neel, J. Kröger, R. Berndt, T. O. Wehling, A. I. Lichtenstein und M.I. Katsnelson, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 266803
[2] A. N. Rubtsov und A. I. Lichtenstein, *JETP Lett* **80** (2004) 61
[3] Gang Li, W. Hanke, A. N. Rubtsov, S. Baise and M. Potthoff, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 195118
[4] E. Gorelov, T.O. Wehling, A. N. Rubtsov, M. I. Katsnelson und A. I. Lichtenstein, *Phys. Rev. B* **80** (2009) 155132

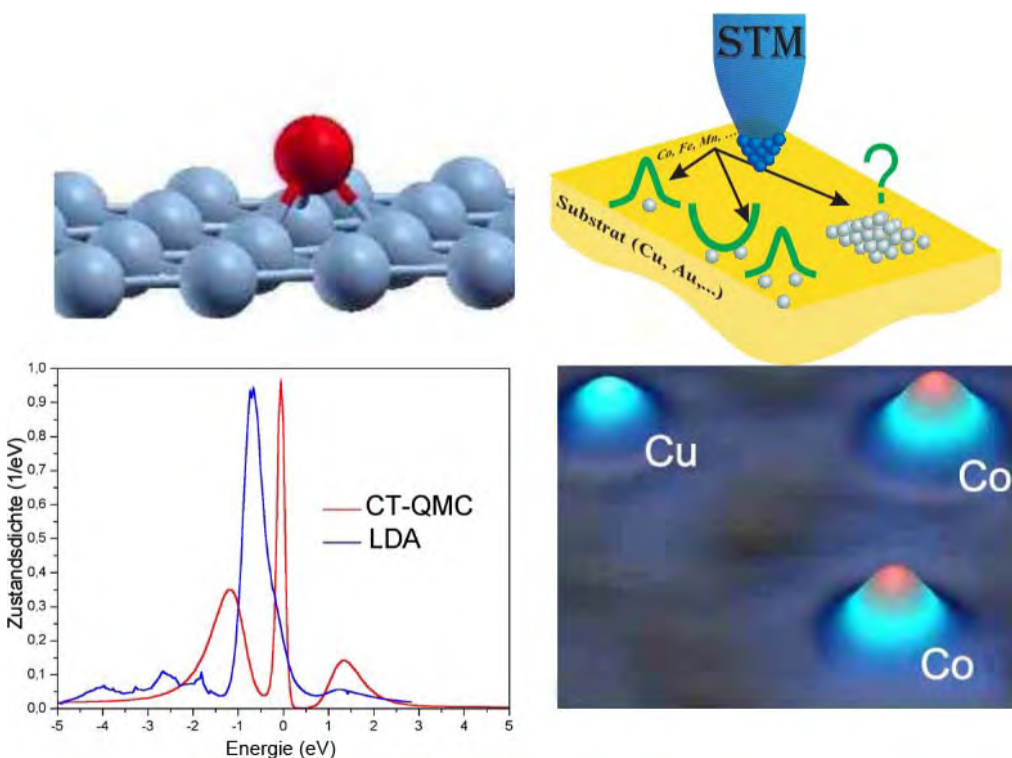


Abb. 5: Vergleich zwischen den Resultaten einer Bandstrukturrechnung (LDA) und einer CT-QMC-Rechnung für die lokale 3d-Zustandsdichte (unten links) eines Co-Atoms auf einer Cu(111)-Oberfläche (oben links). Abhängig von der Anzahl benachbarter magnetischer Atome kann ein komplexes Wechselspiel zwischen Kondo-Effekt und RKKY-Kopplung erwartet werden (oben rechts). Experimentell ist der Kondo-Effekt an einzelnen (unten rechts) und an Clustern magnetischer Atome auf unmagnetischen Substraten mittels Raster-Tunnel-Techniken zugänglich (siehe z.B. Referenz [1]).



Aufgerollte Flüstergalerie für Spinwellen

Eines der Highlights beim Besuch der St. Pauls Kathedrale in London ist die Flüstergalerie unterhalb der Hauptkuppel. Schallwellen werden an den gekrümmten Wänden der Kuppel so reflektiert, dass sich Besucher von einer zur anderen Seite der Kuppel über mehr als 30 Meter zuflüstern können.

Die Führung und Verstärkung von Wellen in geschlossenen Geometrien wird in der Nanowelt ganz ähnlich auf viel kleinerem Maßstab genutzt, beispielsweise um Spinwellen zu manipulieren. Wie im Februar in der Zeitschrift *Physical Review Letters* berichtet, haben Hamburger Forscher des SFB 668 und der Landesexzellenzinitiative Nanospintronics nun erstmals aus wenigen Nanometern dicken aufgerollten ferromagnetischen Eisennickellegierungen (Permalloy) Flüstergalerien für Spinwellen hergestellt [1].

Zum Aufrollen der ferromagnetischen Schichten haben Felix Balhorn und Mitarbeiter hauchdünne und hoch verspannte Halbleiterunterlagen aus Galliumarsenid und Indiumgalliumarsenid genutzt, die sich nach dem Ablösen vom Substrat zusammen mit der Eisennickelschicht

wie ein Teppich aufrollen [2]. Dieser automatische Aufrollvorgang wird durch den Abbau der Verspannung in der Halbleiterschicht getrieben, ähnlich wie bei einem Bimetall, das sich aufgrund der verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten seiner Komponenten bei Erwärmung aufbiegt.

In hochauflösenden Mikrowellenabsorptionsexperimenten haben die Forscher gefunden, dass solche aufgerollten Flüstergalerien Spinwellen mit bestimmten Frequenzen resonant verstärken. Mit einem analytischen Modell gestützt durch mikromagnetische Simulationen konnten sie zeigen, dass die Spinwellenanregungen in den übereinander gewickelten Eisennickelschichten trotz der dazwischen liegenden Halbleiterschichten dipolar koppeln und sich kollektive Spinwellen ausbilden. Resonante Verstärkung wird erreicht, wenn ein ganzzahliges Vielfaches n der Wellenlänge dieser kollektiven Spinwellen in den Umfang der Flüstergalerie passt, wie in Abb. 6 für $n = 2$ schematisch gezeigt. In den bisher realisierten Strukturen mit Durchmessern von etwa 3 Mikrometern können die Frequenzen der

azimuthalen Resonanzen mit einem externen Magnetfeld zwischen 3 und 10 GHz eingestellt werden.

In weiterführenden Experimenten wollen die Hamburger Forscher unter anderem untersuchen, inwiefern eine mechanische Deformation der flexiblen aufgerollten Spinwellengalerien zum Manipulieren der Resonanzfrequenzen ohne externes

Magnetfeld genutzt werden kann, um mechanisch einstellbare Spinwellenfilter zu realisieren.

[1] F. Balhorn, S. Mansfeld, A. Krohn, J. Topp, W. Hansen, D. Heitmann, and S. Mendach, *Physical Review Letters* **104**, 037205 (2010)

[2] S. Mendach, J. Podbielski, J. Topp, W. Hansen, and D. Heitmann, *Applied Physics Letters* **93**, 262501 (2008)

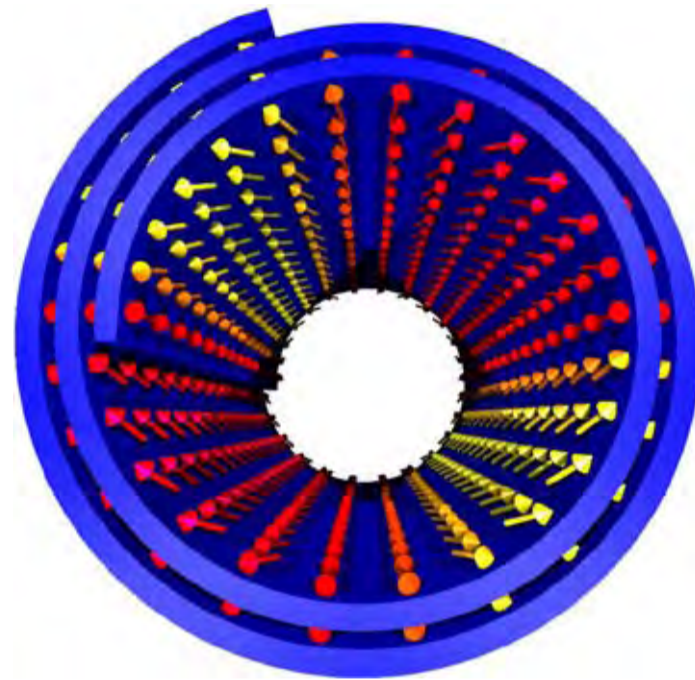


Abb. 6: Schematische Darstellung einer aufgerollten Mikroflüstergalerie für Spinwellen. Die verspannte Indiumgalliumarsenid-Multischicht ist blau und der ferromagnetische Eisennickelfilm ist transparent dargestellt. Die kollektiven Spinanregungen im Eisennickel sind hier für $n = 2$ durch Pfeile angedeutet.

Am Puls der Zeit - Speicherkonzept auf der Überholspur

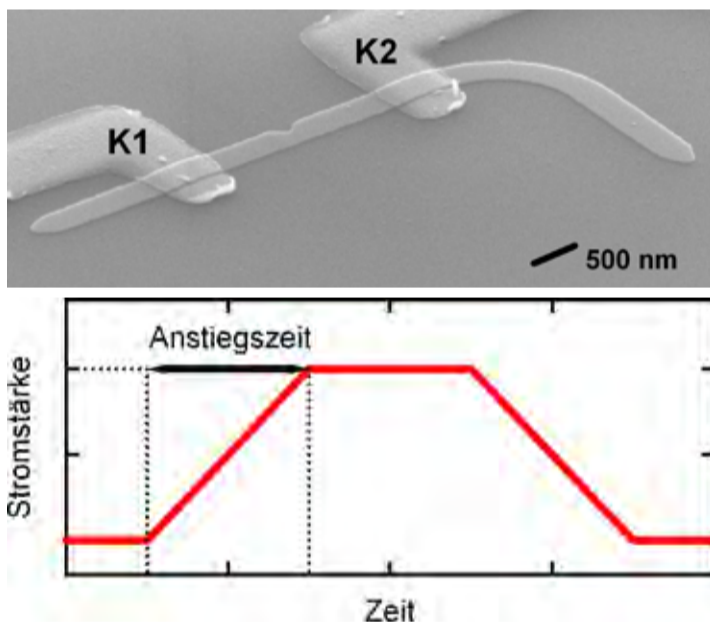


Abb. 7: Oben: Ein magnetischer Nanodraht mit zwei Kontakten. Zwischen den Kontakten befindet sich eine Einkerbung, an der die Domänenwand haftet. Unten: Zeitlicher Verlauf der Stromstärke. Entscheidend für die Experimente ist die Anstiegszeit des Strompulses.

schnellere Zugriffszeiten als heutige Festplatten. Die Bits werden wie bei Magnetbändern hintereinander geschrieben. Als Speichermedium

dient jedoch ein magnetischer Nanodraht. Zum Lesen und Schreiben von Information muss der Draht nicht mechanisch über die Schreib- und Leseeinheit bewegt werden, stattdessen schiebt ein elektrischer Strom die magnetischen Domänenwände, in denen die Information gespeichert wird, durch den Draht. Dieser Strom besteht aus Elektronen, die im magnetischen Material eine Vorzugsrichtung des magnetischen Moments besitzen; man spricht auch von einem spinpolarisierten Strom. Dieser Strom bewegt alle Domänenwände gleichförmig, gemeinsam entlang des Drahts. Domänenwände können sehr schnell bewegt werden. Sie können in einer Sekunde mehrere hundert Meter zurücklegen. Diese hohe Geschwindigkeit ist die Ursache für die schnellen Zugriffszeiten, die dieses Speicherkonzept verspricht. Das physikalische Grundprinzip des Racetrack-Memories funktioniert bereits im Labor. Die Realisierung eines echten Bauelements erfordert

jedoch noch weitere Forschung.

Wie in *Physical Review Letters* nachzulesen war, gelang es Lars Bocklage und seinen Kollegen vom SFB 668 in diesem Zusammenhang erstmalig die Zeitabhängigkeit der Kraft eines elektrischen Stroms auf eine Domänenwand analytisch zu berechnen und experimentell nachzuweisen. In den Experimenten wurde dabei der zeitliche Verlauf des Strompulses, der die Domänenwand vorantreibt, variiert (Abb. 7). Doch im Gegensatz zum Rennwagen, dessen Beschleunigung nur von einer antreibenden Kraft abhängt, stellte sich heraus, dass der Strom im Nanodraht zwei Beiträge zur Kraft auf die Domänenwand bewirkt. Ein Teil kommt durch die absolute Stärke des Stroms zustande und ist mit dem Treten des Gaspedals vergleichbar. Der neu entdeckte Beitrag wird durch die zeitliche Änderung des Stroms hervorgerufen und hat in der klassischen Mechanik kein Pendant. Die Messergebnisse zeigen, dass die Anstiegszeit des Stroms vergleichbar mit der für die Domänenwand cha-

rakteristischen Dämpfungszeit sein muss (Abb. 8). Für die untersuchten Domänenwände in Permalloy-Nanodrähten liegt die Dämpfungszeit bei einigen Nanosekunden. Diese Eigenschaft hängt stark von der Art der Domänenwand und dem Material ab. Für Domänenwände in anderen Materialien können prinzipiell deutlich kürzere Zeiten bis in den Bereich von Pikosekunden gelten, das Prinzip des beobachteten Effekts lässt sich jedoch auf alle Typen von Domänenwänden und Materialien anwenden.

Die Ergebnisse der Kooperation des Instituts für Angewandte Physik mit dem I. Institut für Theoretische Physik können die Zuverlässigkeit der Bewegung einer Domänenwand in einem Nanodraht erhöhen. Und Zuverlässigkeit ist bei Speichern eine wichtige Eigenschaft, das weiß jeder, dessen Festplatte die wichtigen Daten nicht mehr rausrücken wollte.

L. Bocklage, B. Krüger, T. Matsuyama, M. Bolte, U. Merkt, D. Pfannkuche, and G. Meier, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 197204 (2009)

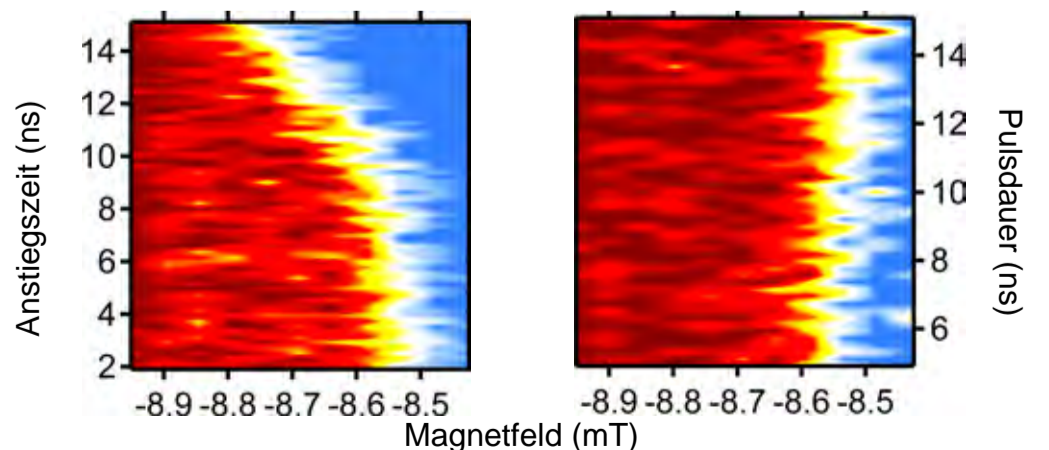


Abb. 8: Ablösewahrscheinlichkeit der Domänenwand von der Einkerbung. Rot (blau) bedeutet, dass die Domänenwand (nicht) abgelöst wurde. Die linke Grafik zeigt die Abhängigkeit der Ablösewahrscheinlichkeit von der Anstiegszeit, die rechte Grafik von der Pulsdauer. Ein deutlicher Effekt wird nur bei Änderung der Anstiegszeit beobachtet.

Rennfahrer wissen es: Beschleunigung ist alles. Das ist auch im Nanokosmos so, doch mit einigen Überraschungen. Wie Physiker der Universität Hamburg in ihren Experimenten an magnetischen Nanodrähten herausgefunden haben, treten an Domänenwänden, den Übergängen zwischen magnetischen Bereichen, zusätzliche Kräfte auf, wenn ein elektrischer Strom sich schnell ändert. Die Domänenwände spielen für das von Dr. Stuart Parkin vom IBM Forschungszentrum in Almaden, Kalifornien, vorgeschlagene neue Speicherkonzept namens Racetrack-Memory die entscheidende Rolle.

Der Racetrack-Speicher ist ein magnetischer Speicher, der extrem hohe Speicherdichten verspricht und als ein Kandidat zur Nachfolge von Festplatten angesehen wird. Wie Festplatten verlieren diese Speicher die gespeicherte Information auch nach Abschalten des Stroms nicht. Neben hohen Speicherdichten versprechen Racetrack-Memories viel



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 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 19 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

www.sfb668.de

Präsentation für Schüler auf dem „NORTEC Campus“



Abb. 9: Nachwuchswissenschaftler präsentieren Tieftemperatur-Experimente zum Nanomagnetismus auf dem NORTEC Campus

Die „NORTEC“ ist eine alle zwei Jahre stattfindende Fachmesse für industrielle Produktionstechnik und Metallbearbeitung. Auf der Messe wird die gesamte Prozesskette der industriellen Produktion abgebildet, beginnend mit der Forschung über die Prototypenfertigung bis zum geprüften Endprodukt.

In diesem Rahmen informiert der NORTEC Campus über die vielfältigen Arten, mit der Wissenschaft und Technik unser aller Leben bestimmen und welche Rolle die Fächer Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik dabei spielen.

Am 27. und 28. Januar 2010 zeigten Nachwuchswissenschaftler des SFB 668 in Kooperation mit der MIN-Fakultät der Universität Hamburg verschiedene Experimente und Präsentationen auf dem NORTEC Campus, um Schülerinnen und Schüler für die Naturwissenschaften und Technik zu begeistern und als zukünftige Wissenschaftler zu gewinnen.

In vielen lebhaften Diskussionen interessierten sich die Schüler neben wissenschaftlichen Fragestellungen vor allem für die naturwissenschaftlichen Studienangebote der Universität Hamburg.

La-Ola im Nanomagneteten

Das heutige Informations- und Multimedia-Zeitalter fordert immer größere Datenmengen auf immer kleinerem Raum. Eine große Rolle für die Datenspeichertechnik spielen dabei winzige magnetische Nanopartikel, die aus wenigen Atomen bestehen. Jedes der Partikel repräsentiert dabei ein Bit, also die kleinste Informationseinheit, die je nach Ausrichtung der Gesamtmagnetisierung entweder „0“ oder „1“ annehmen kann. Nur durch eine stetige Miniaturisierung dieser Nanomagnete werden immer größere Speicherdichten ermöglicht, und ein Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen. Grundvoraussetzung für die langfristige Sicherung von Daten ist dabei die Stabilität der magnetischen Teilchen gegen thermische Anregungen: Unterhalb einer kritischen Größe beginnt die Magnetisierung eines Partikels von sich aus, spontan zwischen seinen beiden Zuständen, also zwischen „0“ und „1“, hin- und herzuschalten, was unweigerlich zum Verlust der gespeicherten Daten führt.

Volumenartige magnetische Materialien sind stets durch komplexe Domänenstrukturen gekennzeichnet, bei denen die magnetischen Spins innerhalb jeder einzelnen Domäne parallel liegen. Die magnetischen Domänen sind dabei durch Übergangsbereiche, sogenannte Domänenwände, voneinander abgegrenzt. Kleinste Nanomagnete bestehen nur aus einer einzelnen Domäne: Alle magnetischen Spins des Teilchens zeigen in eine gemeinsame Richtung. Um die Magnetisierung nun in die entgegengesetzte Richtung zu schalten, muss jedes Atom seinen magnetischen Spin drehen. Bislang wurde angenommen, dass diese Nanomagneten kohärent von einem Zustand in den anderen umschaltet, was bedeutet, dass sich alle magnetischen Spins des Teilchens gemeinsam drehen und dabei stets parallel zueinander stehen (Abb. 10).

Im Department Physik der Universität Hamburg wurde nun gezeigt, dass diese Annahme überholt ist. Mitarbeiter des SFB 668 der Gruppe um Prof. Wiesendanger untersuchten das thermische Schaltverhalten von magnetischen Nanoinseln, die aus etwa 100 Atomen bestehen. Dazu wurde die magnetische Spitze eines Rastertunnelmikroskops so weit an

einzelne Nanoinseln angenähert, bis ein sogenannter Tunnelstrom zwischen Spitze und Insel floss. Je nach relativer Ausrichtung der Magnetisierung von Spitze und Insel wurde dann entweder ein hohes oder ein niedriges Signal der differentiellen Leitfähigkeit gemessen.

Sowohl die Experimente als auch entsprechende Simulationen zeigen, dass die Nanoinseln über einen komplexen Schaltmechanismus ihre Magnetisierung ändern, vergleichbar einer La-Ola-Stadionwelle. Zum Schalten wird kurzzeitig der eindomänige Magnetisierungszustand aufgegeben, um eine Domänenwand an einem Ende der Insel zu formen. Diese Domänenwand, die den bereits umgeschalteten vom noch nicht geschalteten Teil der Insel trennt, durchläuft diese von einem Ende zum anderen und überführt die Insel somit in ihren entgegengesetzten, wieder eindomänigen Magnetisierungszustand.

Eine detaillierte Analyse des thermischen Schaltverhaltens der Nanoinseln in Korrelation zu ihrer Größe, Form und Temperatur ergab, dass die Domänenwand dabei vorzugsweise entlang einer bestimmten kristallografischen Achse orientiert ist und sich senkrecht zu dieser bewegt, genauso wie sich eine La-Ola im Stadion immer entlang der Sitzplatzreihen bewegt und ihre Front senkrecht zu den Reihen orientiert ist. Dieser

Effekt hat direkte Auswirkungen auf das Schaltverhalten einer Nanoinsel: Ist sie besonders lang, so ist die Distanz, die die Domänenwand zum erfolgreichen Schalten der Magnetisierung überwinden muss, entsprechend groß. Dies bewirkt, dass viele Domänenwände – die sich im Gegensatz zur La-Ola nicht nur vorwärts, sondern auch rückwärts bewegen – wieder an den Ort ihrer Entstehung statt an das andere Ende der Insel gelangen, ohne dabei die Magnetisierung umzuschalten. Für besonders breite Inseln stellt sich heraus, dass die Anzahl der möglichen Entstehungskeime einer Domänenwand erhöht ist, was entsprechend zu einer höheren gemessenen Schaltrate führt. Im Analogon der La-Ola bedeutet dies, dass wenige Menschen sich leichter zu einer vollständigen La-Ola koordinieren können als große Massen.

Wie die Forscher zeigten, variieren die Schaltraten der Nanomagnete je nach Inselgröße und -form um bis zu mehrere Größenordnungen. Diese Erkenntnisse helfen dabei, maßgeschneiderte Nanoteilchen zu entwickeln, die je nach gewünschtem Anwendungsgebiet entweder besonders stabil (Datenspeicher) oder empfindlich (Sensor) sind.

S. Krause, G. Herzog, T. Stapelfeldt, L. Berbil-Bautista, M. Bode, E. Y. Vedmedenko, and R. Wiesendanger, *Phys. Rev. Lett.* **103** 127202 (2009)

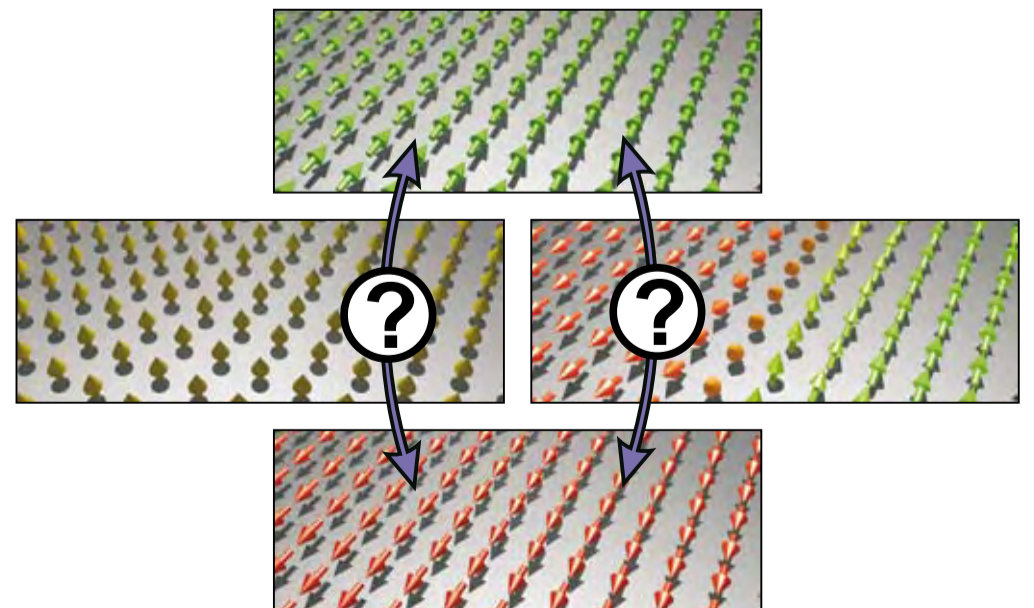


Abb. 10: Um den Magneten zwischen seinen Grundzuständen (oben, unten) zu schalten, können sich entweder alle magnetischen Spins gemeinsam drehen (links), oder die Ummagnetisierung wird über einen komplexen Mechanismus realisiert, bei dem die magnetischen Spins reihenweise rotieren (rechts). Die gemeinsame parallele Ausrichtung der Spins wird dafür kurzzeitig aufgegeben.