

## Skymionen: Magnetische Nano-Knoten als Datenspeicher

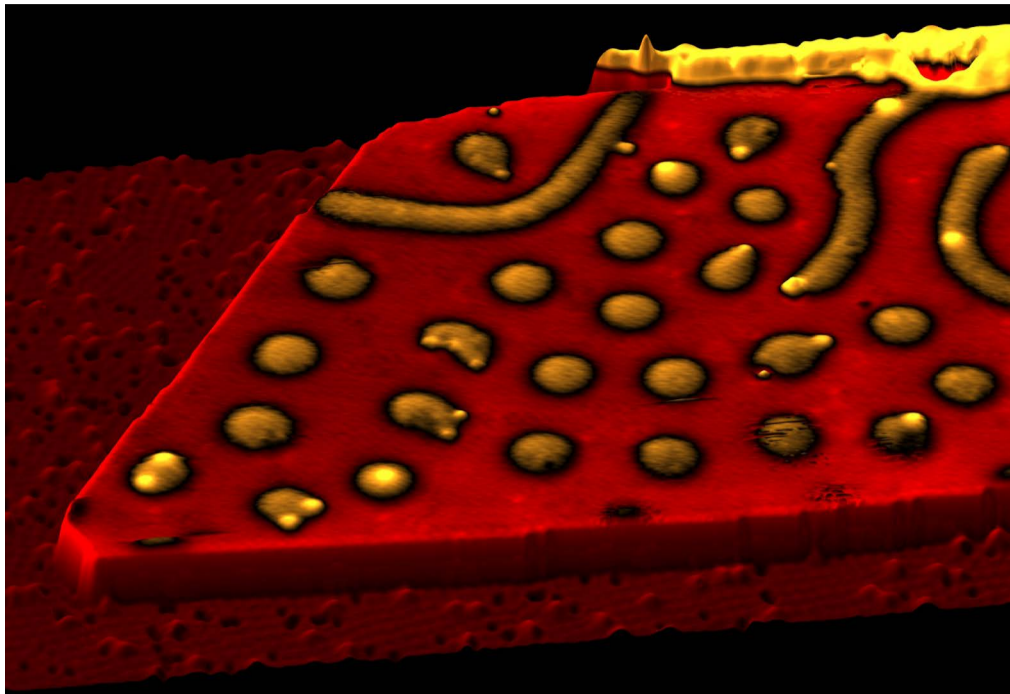


Abb. 1: Das Bild zeigt eine spinpolarisierte Rastertunnelmikroskopie-Messung von Skymionen auf einem zwei Atomlagen dicken Film aus Palladium und Eisen auf einem Iridium-Kristall. Die Skymionen sind als kleine gelbe Punkte dargestellt. (Bild: A. Kubetzka, Universität Hamburg)

Mit dem Streben nach immer kompakteren elektronischen Geräten mit gleichzeitig immer höherer Speicherdichte werden herkömmliche magnetische Speichertechnologien bald an ihre physikalischen Grenzen gelangen. In den bisher verwendeten konventionellen Speichern bestehen die magnetischen Bits, ähnlich wie klassische Stabmagnete, aus vielen Atomen mit einer parallelen Anordnung ihrer magnetischen Momente und können entsprechend ihrer magnetischen Ausrichtung die für die Informationstechnologie wichtigen Werte „1“ und „0“ darstellen. Durch die stetige Miniaturisierung findet aufgrund des magnetischen Streufeldes eine zunehmend stärkere Wechselwirkung zwischen benachbarten Bits statt, was zu Datenverlust führen kann. Zudem sind kleine magnetische Bits gegenüber thermischen Fluktuationen nicht besonders stabil, was auch als superparamagnetisches Limit bezeichnet wird.

Ein Ausweg aus dieser technologischen Sackgasse könnte die Ver-

wendung „robusterer“ magnetischer Strukturen wie z. B. Skymionen sein. Diese Strukturen kann man sich bildlich als einen zweidimensionalen Knoten vorstellen bei dem sich die magnetischen Momente mit einem einheitlichen Drehsinn innerhalb einer Ebene um 360° drehen (siehe Abb. 2). Diese magnetischen Knoten haben Teilchencharakter und man kann ihnen eine Art Ladung – die topologische Ladung – zuordnen, womit es möglich ist, mit einem Skymion den Bit-Zustand „1“ (es gibt ein Skymion) und „0“ (es gibt kein Skymion) darzustellen.

Durch die geschickte Wahl von Temperatur und äußerem Magnetfeld ist nun den Hamburger Wissenschaftlern aus der Gruppe von Prof. Roland Wiesendanger erstmalig die Herstellung und Manipulation einzelner Skymionen gelungen. Dazu verwendeten die Experimentalphysiker einen zwei Atomlagen dicken Film aus Palladium und Eisen auf einem Iridium-Kristall. Bringt man diese Probe in ein magnetisches Feld, kann

man mit Hilfe eines spinpolarisierten Rastertunnelmikroskops einzelne und räumlich feste Skymionen mit einer Größe von wenigen Nanometern beobachten. Diese können mit einem kleinen elektrischen Strom aus der Mikroskopspitze geschrieben und gelöscht werden. Bei der Erzeugung eines Skymions werden die sonst parallel ausgerichteten magnetischen Momente so verwirbelt, dass sich eine Art zweidimensionaler Knoten bildet, beim Löschen wird der Knoten wieder aufgelöst.

„Endlich haben wir ein magnetisches System gefunden, in dem wir lokal zwischen gewöhnlicher ferromagnetischer Ordnung und komplexer Spinanordnung hin und herschalten können.“, begeistert sich Dr. Kirsten von Bergmann, langjähriges Mitglied der Arbeitsgruppe Wiesendanger. Wie in der Zeitschrift *Science* veröffentlicht, konnten auf einem Probenausschnitt vier Skymionen gezielt erzeugt und aufgelöst

werden (siehe Abb. 2). „Die Idee vom sprichwörtlichen Knoten im Taschentuch, um sich etwas zu merken, haben wir auf die Speichertechnologie übertragen und können Daten in zweidimensionalen magnetischen Knoten speichern.“, erklärt der Physiker Niklas Romming.

Ob und wann Skymionen als Datenspeicher in unseren Computern, Tablet-PCs und Smartphones eingesetzt werden können, lässt sich heute noch nicht sagen. Das experimentell realisierte Schreiben und Löschen von Skymionen hat aber die Machbarkeit dieser Technologie bewiesen und somit wurde mit dieser Arbeit eine wichtige Hürde bei der technologischen Umsetzung genommen.

[1] *Writing and Deleting Single Magnetic Skyrmions* N. Romming, C. Hanneken, M. Menzel, J. E. Bickel, B. Wolter, K. von Bergmann, A. Kubetzka, and R. Wiesendanger, *Science* **341**, 6146 (2013)

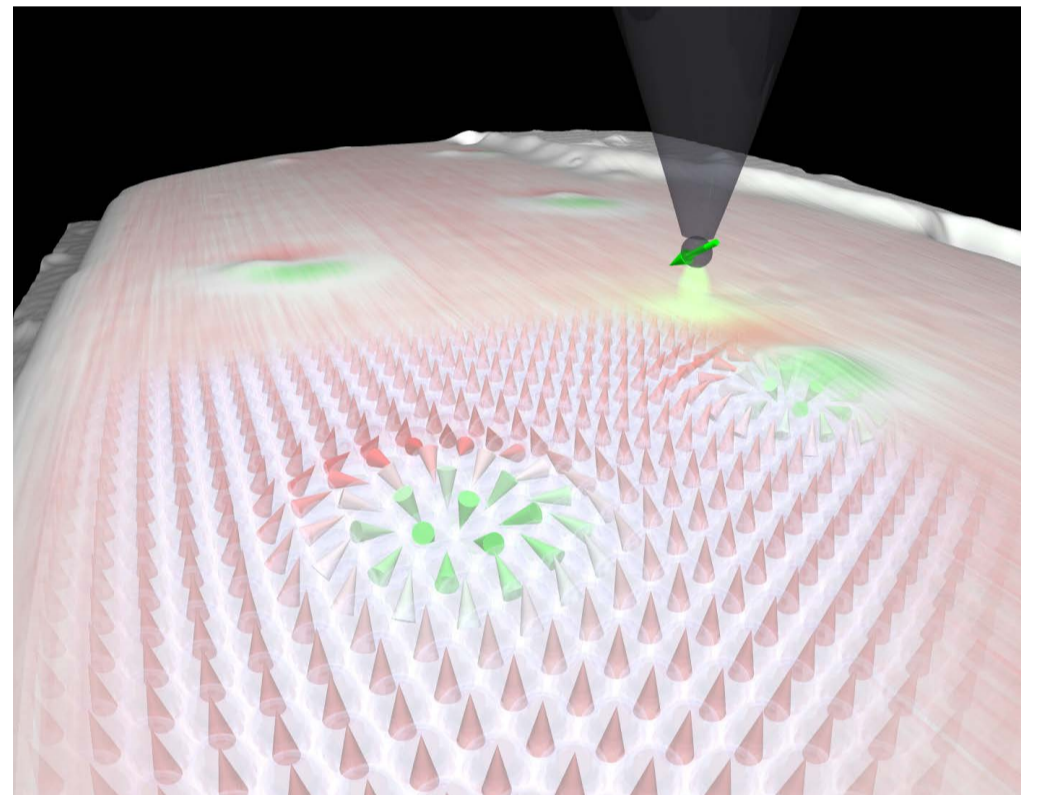


Abb. 2: Das Bild zeigt die Daten einer spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie-Messung hinterlegt mit der Magnetisierung der Probe. (Bild: N. Romming, Universität Hamburg)

## Abbildung magnetischer Molekülorbitale gelungen

Wie das Fachjournal „Nature Communications“ im August 2012 berichtete, ist es Wissenschaftlern der Universität Hamburg erstmals gelungen, die magnetische Struktur von bekannten Einzelmolekülmagneten mit der Spinaufgelösten Rastertunnelmikroskopie abzubilden.

Dafür wurden Einzelmolekülmagnete – nur nanometergroße magnetische Moleküle – untersucht, die in der Lage sind, die Richtung ihres magnetischen Moments, dem sogenannten Spin, beizubehalten. Man kann sich jedes dieser komplexen und doch winzigen Moleküle wie einen kleinen Magneten vorstellen, mit denen sich neue magnetische Nanostrukturen konstruieren lassen. Diese könnten zukünftig noch kleinere Computerchips oder völlig neuartige Datenspeicher ermöglichen. Aber auch für den Bau von Quantencomputern ist der Einsatz dieser molekularen Magneten vorstellbar.

Abbildung 3 zeigt einzelne, flach auf einer magnetischen Oberfläche aufliegende Moleküle. Die acht kreisförmig angeordneten Punkte bilden die Ladungsverteilung der Elektronen mit einer bestimmten Spinrichtung im Molekül ab. Rote Färbung steht für antiparallel, blaue für parallel zur Magnetisierung der Oberfläche ausgerichtete Spins. Die beiden Bilder zeigen die Ladungsverteilung bei verschiedenen Energien, nämlich jeweils der Energie die aufgewendet werden muss, um dem Molekül ein weiteres Elektron einer bestimmten Spinrichtung anzuheften. Die Beobachtung verschiedener Spinausrichtung bei verschiedenen Energien bedeutet, dass es leichter ist demselben Molekülorbital ein Elektron mit antiparallel zur Oberfläche ausgerichtetem Spin hinzuzufügen, als ein Elektron mit entgegengesetztem Spin. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei den untersuchten

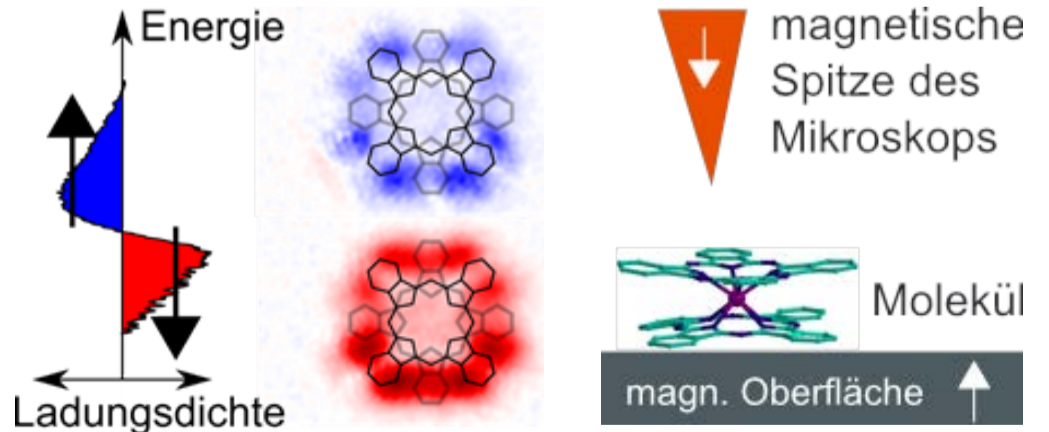
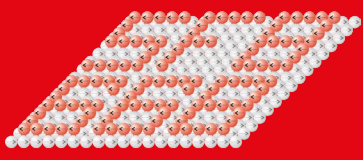


Abb. 3: Bild von J. Schwöbel, Universität Hamburg

Einzelmolekülmagneten das gesamte Molekül, und nicht nur das magnetische Zentralatom, magnetisch ist.

Die Abbildung dieser magnetischen Molekülorbitale war bisher nicht möglich und damit ist den Hamburger Wissenschaftlern ein weltweit viel beachteter Durchbruch gelungen.

[1] *Real-space observation of spin-split molecular orbitals of adsorbed single-molecule magnets*, J. Schwöbel, Y. Fu, J. Brede, A. Dilullo, G. Hoffmann, S. Klyatskaya, M. Ruben, and R. Wiesendanger, *Nature Communications* **3**, 953 (2012)



## LEGO® mit atomaren Magneten

Wie die Zeitschrift „Nature Physics“ im April 2012 berichtete, haben Physiker der Universität Hamburg neuartige Magnete, die aus nur wenigen Atomen bestehen, aufgebaut und untersucht. Ähnlich wie bei einem LEGO®-Bausatz, allerdings mit viel kleineren Bausteinen, können die Wissenschaftler Eisen-Atome, die auf einem Kupfersubstrat liegen, Atom für Atom zu unterschiedlichsten Strukturen zusammensetzen. Jeder dieser Bausteine ist auch ein kleiner Kompass, der in zwei unterschiedliche Richtungen zeigen kann. Die so konstruierte magnetische Nanostruktur kann von den Wissenschaftlern erforscht werden, um ein besseres Verständnis der physikalischen Grundlagen des Magnetismus zu erhalten.

Das verwendete Werkzeug ist ein sogenanntes spinpolarisiertes Rastertunnelmikroskop. Mit diesem Gerät kann eine atomar scharfe Nadel mit sehr hoher Präzision über den Eisen-Atomen, die auf einer Kupfer-Oberfläche liegen, positioniert werden. Wird die Nadel in größerem Abstand über die Eisen-Atome gefahren, so werden die Eisen-Atome gewissermaßen von der Nadel „gespürt“; die Wissenschaftler können dadurch die Atome „sehen“. Wird die Nadel dagegen

sehr nahe an eines der Eisen-Atome herangeführt und dann bewegt, folgt dieses Atom der Nadel und kann damit auf der Kupfer-Oberfläche an einen beliebigen Ort verschoben werden. Auf diese Art und Weise können beliebige Strukturen Atom für Atom aufgebaut werden, genau wie bei einem LEGO®-Bausatz.

Das Neuartige an dem, in der vorliegenden Arbeit, verwendeten Rastertunnelmikroskop ist eine magnetische Funktionalisierung der Nadel. Damit kann von den Wissenschaftlern nicht nur die Position der Eisen-Atome, sondern auch noch die Ausrichtung ihrer Magnetisierung ermittelt werden. Die Eisen-Atome verhalten sich nämlich wie winzige Kompassnadeln, die entweder nach oben oder nach unten ausgerichtet sind. Wie die Wissenschaftler durch ihre Untersuchungen herausgefunden haben, hängt die Ausrichtung eines jeden der Eisen-Atome im Magneten dabei von der Anzahl seiner Nachbarn und ihrer jeweiligen Entfernung ab. Über dieses Verfahren können neuartige Magnete, wie z. B. in Form von Ketten, oder in Form eines sogenannten Kagomé-Gitters hergestellt werden. In Kollaboration mit Wissenschaftlern des Forschungszentrums Jülich wurden die Eigen-

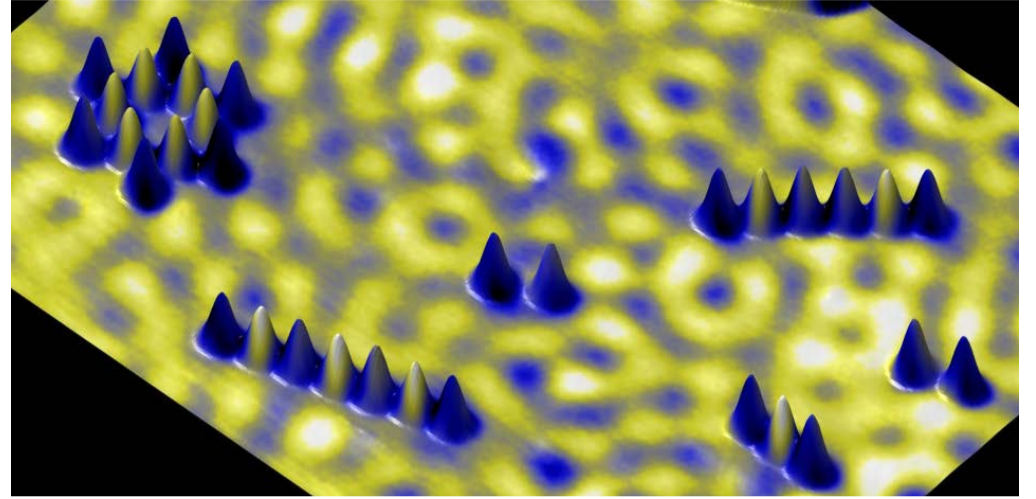


Abb. 4: Die Abb. zeigt die auf einer Kupfer-Oberfläche liegenden Eisen-Atome (Kegel), die zu verschiedenen Ketten- und Kagomé-förmigen Magneten zusammengesetzt wurden. Als Werkzeug wurde dafür ein Rastertunnelmikroskop verwendet. Gleichzeitig wird mit dem Rastertunnelmikroskop die magnetische Ausrichtung der Eisenatome ausgelesen; gelbe Färbung der Eisen-Atome entspricht einer Ausrichtung nach oben, blaue Färbung einer Ausrichtung nach unten. (Bild: A. A. Khajetoorians, Universität Hamburg)

schaften der untersuchten Magnete mit aufwendigen Rechnungen, die auf dem Supercomputer in Jülich durchgeführt wurden, verglichen. Dabei ergaben sich interessante Abweichungen von dem erwarteten Verhalten. Mit der weiteren Erforschung der neuartigen Magneten erhoffen sich die Wissenschaftler daher in Zukunft ein besseres Verständnis der Grundlagen des Magnetismus auf atomarer Skala.

Diese neuen Erkenntnisse könnten die Basis für die Entwicklung beispielsweise neuer Permanentmagnete oder magnetischer Sensoren liefern, welche ohne die knappen und teuren Seltenerdmetalle auskommen.

[1] Atom-by-atom engineering and magnetometry of tailored nanomagnets, A. A. Khajetoorians, J. Wiebe, B. Chilian, S. Lounis, S. Blügel, and R. Wiesendanger, *Nature Physics* **8**, 497 (2012)

## Spinspiralen für energiesparende Computersysteme

Die stetige Miniaturisierung von Computern und Speichermedien erfordert neue Konzepte zur Speicherung, Verarbeitung und Transport von Informationen. Forscher der Universitäten in Hamburg und Kiel und des Forschungszentrums Jülich fanden einen neuen Weg, wie Informationen im Nanometerbereich durch Ketten aus einzelnen Eisenatomen extrem schnell und effizient übertragen werden können. Wie die Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ im Mai 2012 berichtete, wird für den Informationstransport lediglich der Eigendrehimpuls von Elektronen - der sogenannte Spin - benutzt, wodurch die Daten-Übertragung im Gegensatz zu herkömmlichen elek-

tronischen Bauteilen praktisch keine Energie verbraucht und mit sehr hoher Geschwindigkeit abläuft.

In der herkömmlichen Halbleiter-Elektronik unserer modernen Computer werden Daten in Form von elektrischer Ladung verarbeitet. Da hierfür auch Ladungen auf Leiterbahnen verschoben werden müssen, also ein elektrischer Strom fließt, werden die Bauteile warm und müssen aufwändig gekühlt werden. Gerade bei mobilen Computern ist dieser Energieverbrauch ärgerlich, weil dadurch deutlich längere Laufzeiten der Geräte verhindert werden. Das Forscherteam schlägt nun einen neuartigen Weg vor, um Informationen sehr schnell auf extrem dünnen

Leiterbahnen fast ohne Energieaufwand zu transportieren.

Hierfür untersuchten Wissenschaftler aus der Arbeitsgruppe von Prof. Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg Eisenketten mit einer Breite von lediglich zwei Atomen, die auf eine Iridium-Oberfläche aufgebracht wurden. Mittels der spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie konnten sie die magnetische Struktur sichtbar machen und fanden, dass sich die Spins der Eisenatome spiralförmig entlang der Kette anordnen. „Wenn ich die magnetische Ausrichtung eines Eisenatoms in der Spinspirale kenne, kenne ich automatisch auch die Ausrichtung aller anderen Atome der gesamten Spinspirale, ohne diese zu vermessen“, sagt Dr. Matthias Menzel. Das heißt, wenn man an der einen Seite der Eisenkette eine bestimmte magnetische Ausrichtung anlegt, dann dreht sich die Spinspirale entsprechend der magnetischen Eingabe. Ähnlich wie bei einer Stellschraube mit Spiralgewinde kann man nun am Ende der Spinspirale ablesen, wie weit die Spirale gedreht wurde und welche magnetische Ausrichtung auf der anderen Seite angelegt wurde. Auf diese Weise können Informationen entlang der Spinspirale transportiert werden.

Theoretische Arbeitsgruppen vom Forschungszentrum Jülich sowie der Universität Kiel führten aufwändige quantenmechanische Rechnungen auf Supercomputern durch, und entdeckten, dass nicht nur die interne Kopplung der Spinspirale, sondern auch deren Drehsinn äußerst robust ist. Dadurch bieten solche Spinspiralen diverse Vorteile für mögliche

Anwendungen zum Informationstransport:

- Durch die komplexe magnetische Struktur zeigen sie nur eine sehr kleine Restmagnetisierung, was sie gegen störende, äußere Magnetfelder fast immun macht.
- Aufgrund des ausgezeichneten Drehsinns, sind die Spinspiralen unanfällig gegenüber Defekten in der magnetischen Struktur, was eine zuverlässige Datenübertragung auch über längere Strecken garantiert.
- Gleichzeitig lassen sie sich über die Enden sehr leicht beeinflussen, unabhängig von der Länge der Spirale, was wichtig für einen effizienten Informationstransport ist.
- Da die Spirale beliebig rotierbar ist, ist der Informationstransport nicht mehr auf das binäre System beschränkt (0 und 1).

Die Arbeit der Wissenschaftler aus Hamburg, Jülich und Kiel könnte einen neuen Weg für die weitere Miniaturisierung in der Informationstechnologie eröffnen. Durch dieses Konzept für einen Datentransport im Nanometerbereich lassen sich Leiterbahnen wesentlich dichter packen als bisher. Dadurch könnten Computerchips konstruiert werden, die deutlich kleiner, schneller und extrem energiesparend sind.

[1] Information Transfer by Vector Spin Chirality in Finite Magnetic Chains, M. Menzel, Y. Mokrousov, R. Wieser, J.E. Bickel, E. Vedmedenko, S. Blügel, S. Heinze, K. von Bergmann, A. Kubetzka, and R. Wiesendanger, *Physical Review Letters* **108**, 197204 (2012)

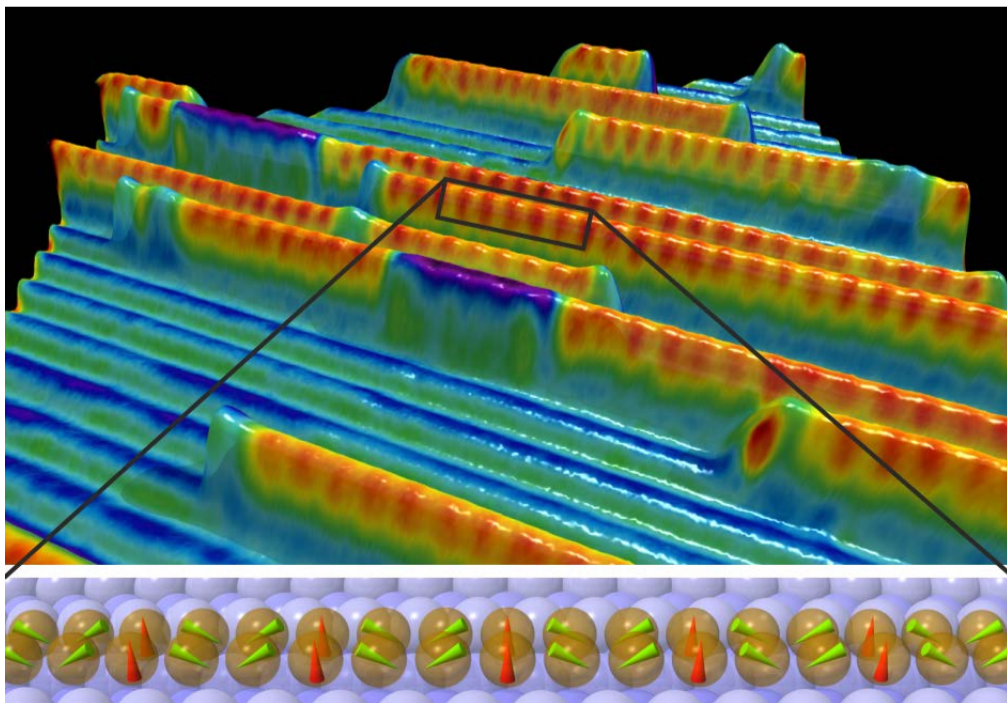
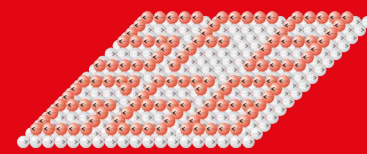


Abb. 5: Ketten aus Eisenatomen (gelb, rot) auf einer Iridiumoberfläche (blau, grün) aufgenommen mit spinpolarisierter Rastertunnelmikroskopie. Die Modulation entlang der Eisenketten wird durch die Anordnung der magnetischen Momente zu einer Spinspirale hervorgerufen. (Bild: 30x30 nm, M. Menzel, Universität Hamburg)



## Topologisch stabile magnetische Helix: Ein theoretisches Konzept für die Energiespeicherung und den Informationstransfer

Im Januar 2014 wurde in der Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ über ein einfaches physikalisches Gesetz berichtet, das Form und Anzahl der stabilen Konfigurationen in einer Kette aus magnetischen Teilchen mit der Länge des Systems in Relation setzt. Die Magnete sind dabei durch langreichweitige dipolare oder indirekte Austauschwechselwirkung (RKKY-Wechselwirkung) miteinander gekoppelt: Einstellungen mit der Form einer Helix und einem ganzzahligen Vielfachen an Windungen – analog zu einem fest eingespannten Seil mit mechanischer Anregung – sind topologisch stabil. Auf dieser Basis wurde nun ein Mechanismus beschrieben, mit dem die Energie der magnetischen Kette sukzessive erhöht werden kann, wobei den topologisch geschützten Zuständen als stabile „Zwischenlager“ eine Sonderrolle zukommt.

Nach heutigem Stand der Forschung wird die nächste Generation von Computern auf Basis logischer Elemente konstruiert, die aus Ketten magnetischer Atome oder Nanoteil-

chen gebildet werden. Um dabei die wirtschaftliche Frage nach effizienter Zwischenspeicherung der Energie zu beantworten, kann man nun die Energie der Ketten stückweise verändern, indem man das System aus einer topologisch stabilen Konfiguration in die energetisch nächstgelegene stabile Konfiguration „hineindreht“: Auf Basis von Simulationen und einem selbstentworfenen Modell gelang es E. Y. Vedmedenko and D. Altwein damit ein energiespeicherndes Element zu beschreiben, das einzig auf magnetischen anstatt auf elektronischen Freiheitsgraden basiert.

Um die Energie zu speichern, muss das erste magnetische Teilchen der Kette solange rotiert werden, bis das System einen energetisch höher liegenden stabilen Helixzustand „gefunden“ hat: Zu einem späteren Zeitpunkt kann diese potentielle Energie wieder frei gesetzt werden, wobei sich die Anzahl der Speicherzustände mit der Kettenlänge vergrößert. Außerdem kann man bei diesem Prozess das Fortschreiten eines „Knotens“ bzw. eines „magne-

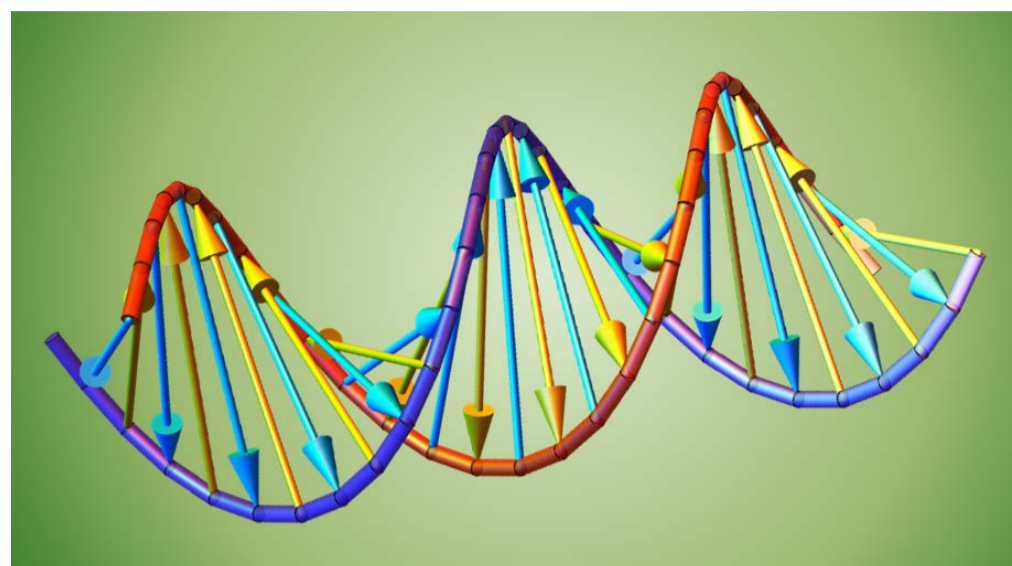


Abb. 6: Die Grafik zeigt die magnetische Kette in Form einer Helix, mit der zukünftig Energie gespeichert und Daten übertragen werden könnten. (Bild: E. Vedmedenko, Universität Hamburg)

tischen Wellenpaketes“ durch die Kette als Informationstransfer beschreiben. Die wesentliche Stärke des vorgestellten Konzepts besteht in der breiten Anwendungsmöglichkeit für diverse Systeme makroskopischer und mikroskopischer Ausdehnung, wie z. B. magnetische Multilagen,

magnetische Anordnung von Molekülen und Nanoteilchen, Kolloide, Bose-Einstein-Kondensate und atomare Ensembles.

[1] *Topologically Protected Magnetic Helix for All-Spin-Based Applications*, E. Y. Vedmedenko and D. Altwein, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 017206 (2014)

## Schalten der Magnetisierung durch ein elektrisches Feld: Neue Technik für energieeffiziente Datenspeicher

Wie die Zeitschrift „Physical Review Letters“ im Januar 2014 berichtete, ist es Physikern der Universität Hamburg erstmals gelungen, die Magnetisierung von einzelnen Nano-Speicherzellen mit einem elektrischen Feld zu schalten. In der Zukunft könnte die neue Technik dazu verwendet werden, extrem schnelle Speichermedien mit geringem Energieverbrauch herzustellen.

Viele digitale Geräte, die wir aus unserem Alltag kennen, speichern Informationen auf Festplatten oder MRAMs in magnetischen Zellen. Deren Magnetisierung kann dabei zwei mögliche Orientierungen aufweisen, die den logischen Zuständen „0“ oder „1“ zugeordnet werden. Üblicherweise werden magnetische Felder oder große Ströme benutzt, um Daten auf die Speicherzellen zu

schreiben. Dies hat den Nachteil, dass die Speicherzellen sowie der Stromverbrauch solcher Medien relativ groß sind.

Wie die Forschergruppe um Prof. Roland Wiesendanger nun zeigte, können einzelne magnetische Speicherzellen durch das Anlegen eines lokalen elektrischen Feldes gezielt so verändert werden, dass je nach Wunsch entweder das Schreiben oder das Speichern von Informationen erleichtert wird. Hierzu nutzten die Physiker ein selbstentwickeltes Rastertunnelmikroskop, in dem mit einer feinen Messspitze einzelne Speicherzellen magnetisch untersucht werden können. Die verwendeten Zellen bestehen dabei lediglich aus ca. 100 Eisenatomen. Eine zwischen Messspitze und Zelle angelegte Spannung erzeugt dabei ein lokales elektrisches Feld. Die Experimente zeigten, dass sich die Magnetisierung der Zelle je nach Orientierung des elektrischen Feldes leichter bzw. schwerer schalten lässt. In zukünftigen Daten-

speichern könnte daher ein kurzzeitig angelegtes elektrisches Feld eine entscheidende Rolle spielen: Beim Schreiben von Daten erleichtert das Feld die Magnetisierungsumkehr. Nach dem Schreibvorgang wird das Feld wieder ausgeschaltet und somit die Speicherzelle gegen eine ungewollte Magnetisierungsumkehr stabilisiert.

„Da zum Anlegen des elektrischen Feldes nur ein extrem kleiner Strom benötigt wird, kann der Energieverbrauch eines solchen Speichers minimiert werden. Insbesondere im mobilen Einsatz, etwa in Smartphones oder Laptops, liegt daher ein großes Potential der neuen Technik“, sagt Physiker Andreas Sonntag, einer der an der Studie beteiligten Experimentatoren.

[1] *Electric-Field-Induced Magnetic Anisotropy in a Nanomagnet Investigated on the Atomic Scale*, A. Sonntag, J. Hermenau, A. Schlenhoff, J. Friedlein, S. Krause, and R. Wiesendanger, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 017204 (2014)

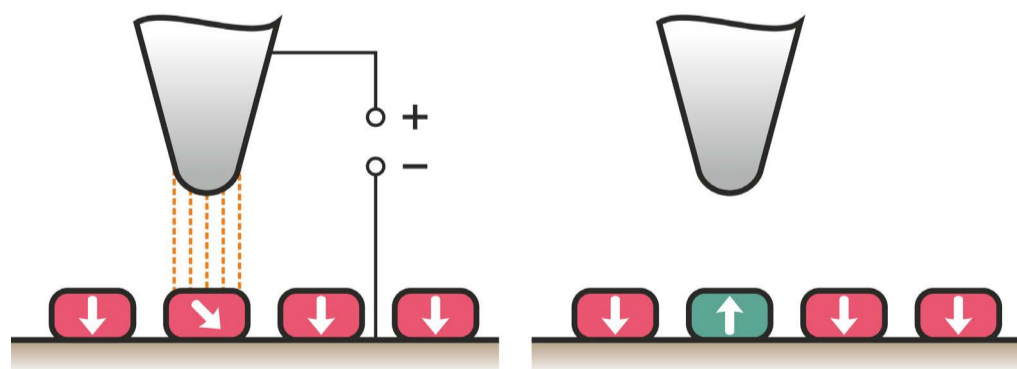


Abb. 7: Veranschaulichung des Schaltens der Magnetisierung: Das elektrische Feld (orange) destabilisiert eine einzelne magnetische Speicherzelle und verursacht so eine Magnetisierungsumkehr (links). Die Zelle behält diese Magnetisierung bei, wenn das Feld ausgeschaltet ist (rechts). (Bild: A. Sonntag, Universität Hamburg)

## 10 Millionen Euro für die weitere Erforschung des Nano-Magnetismus

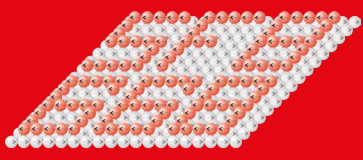
Der bereits seit 2006 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichtete Sonderforschungsbereich (SFB) 668 mit dem Thema „Magnetismus vom Einzelatom zur Nanostruktur“ kann seine exzellente Arbeit fortsetzen. Für die dritte Förderperiode des Forschungsverbundes wurde Ende 2013 von der DFG ein Forschungsetat von ca. 10 Millionen Euro für vier weitere Jahre bewilligt.

Im SFB 668 untersuchen über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Hamburg und der Universität Kiel in 18 wissenschaftlichen Teilprojekten magnetische Phänomene auf kleinsten Längenskalen. Das Forschungsprogramm umfasst experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Magnetismus einzelner Atome, Moleküle und Nanoteilchen. Bei der personellen Struktur des Sonderfor-

schungsbereichs wird stark auf die Nachwuchsförderung gesetzt. Sprecher des Sonderforschungsbereichs 668 ist Prof. Dr. Roland Wiesendanger vom Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg.

Herausragende Erfolge des SFB 668 bei der Erforschung des Nanomagnetismus waren in der letzten Förderperiode beispielsweise die Entwicklung eines funktionierendes Spintronik-Logik-Bauteils, das nur

aus wenigen magnetischen Atomen aufgebaut ist (*Science* **332**, 6033 pp. 1062-1064 [2011]) und die Verwendung von einzelnen magnetischen Skyrmionen – eine Art magnetischer Knoten – für die Datenspeicherung (*Science* **341**, 636-639 [2013]). Solche wirbelförmigen magnetischen Strukturen besitzen außergewöhnliche Eigenschaften und können inzwischen von den Forschern individuell geschrieben und gelöscht werden.



## 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 Dauer von 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 hat für einen Zeitraum von 12 Jahren Forschungsmittel in Höhe von insgesamt ca. 31 Millionen Euro erhalten. Im SFB 668 forschen über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Hamburg und der Universität Kiel in 18 Teilprojekten auf dem Gebiet des „Nanomagnetismus“. Das Forschungsprogramm umfasst experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Magnetismus einzelner Atome, Moleküle und Nanoteilchen.

### 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

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

## Die kleinsten Magnete der Welt

Die Suche nach kleinstmöglichen stabilen Magneten ist hoch relevant für das Ausloten der ultimativen Grenzen bei der weiteren Miniaturisierung magnetischer Datenspeicher wie beispielsweise Festplatten. Wie die Zeitschrift „Science“ im Januar 2013 berichtete, ist es einem Forscherteam um den Hamburger Physikprofessor Roland Wiesendanger erstmals gelungen, kleinste Magnete aus jeweils nur 5 Eisenatomen durch gezielte Atommanipulation zu konstruieren und die Langzeitstabilität ihrer Magnetisierungsrichtung nachzuweisen. Dafür verwendeten die Forscher ein selbst entwickeltes, weltweit einmaliges Supermikroskop an der Universität Hamburg, welches atomare Strukturen abbilden und gleichzeitig deren magnetische Eigenschaften bestimmen kann. Die neuen Forschungsergebnisse sind sowohl von grundlegender Bedeu-

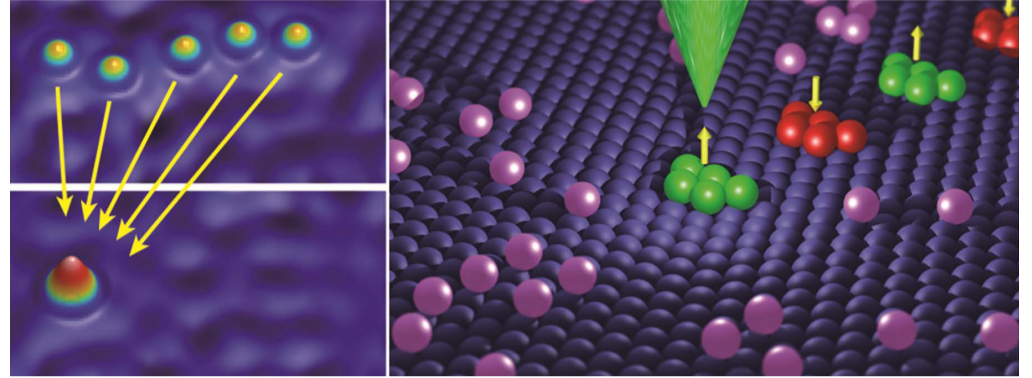


Abb. 8: Die Abbildung zeigt schematisch die künstlich erzeugten magnetischen Cluster aus jeweils 5 Eisenatomen auf einer Kupfer-Unterlage, welche eine alternierende, zeitlich stabile Magnetisierungsrichtung aufweisen. Der Magnetisierungszustand dieser kleinsten magnetischen Cluster wird mit einer atomar scharfen magnetisch-sensitiven Sondenspitze ausgelesen. (Bild: J. Harm, Universität Hamburg)

tung im Hinblick auf das Verständnis des Magnetismus kleinster nanoskaliger Partikel und Cluster als auch von technologischem Interesse im Hinblick auf zukünftige Generationen hochdichter magnetischer Datenspeicher.

[1] *Current-Driven Spin Dynamics of Artificially Constructed Quantum Magnets*, A. A. Khajetoorians, B. Baxevanis, C. Hübner, T. Schlenk, S. Krause, T. O. Wehling, S. Lounis, A. Lichtenstein, D. Pfannkuche, J. Wiebe, and R. Wiesendanger, *Science* **339**, 55 (2013)

## Abbilden und Manipulieren kleinster Nano-Magnete

Wird ein hohes elektrisches Feld an eine scharfe Magnetnadel angelegt, so lösen sich Elektronen heraus, die einen Stromfluss erzeugen. Forschern der Universität Hamburg gelang es nun erstmals, diesen physikalischen Effekt der sogenannten „Feldemission“ zum Abbilden und Manipulieren kleinster Magnete zu nutzen, wie die Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ im August 2012 berichtete.

Hierfür positionierten die Wissenschaftler um Prof. Roland Wiesendanger in ihrem sogenannten „Spinpolarisierten Rasterfeldemissionsmikroskop“ bei  $-230^\circ$  Celsius eine Magnetnadel über einen Magneten, der nur aus 50 Eisenatomen besteht.

Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes lösen sich Elektronen aus der Nadelspitze, werden zum Magneten hin beschleunigt und dringen schließlich in diesen ein. Die Hamburger Forscher konnten so nicht nur seine Magnetisierung auslesen, sondern auch gezielt hin- und herschalten. Der Abstand zwischen der Nadelspitze und dem Magneten beträgt dabei einige Nanometer, was typischen Schreib-Lesekopf-Abständen in heutigen Festplatten entspricht. Damit erfüllen die Hamburger Experimente die grundlegenden Voraussetzungen für eine Schreib-Lese-Technik, wie sie in einer neuartigen Speichertechnologie mit ultrahoher Datendichte zum

Einsatz kommen könnte: Der konventionelle Schreib-Lesekopf würde hierbei durch eine einfache magnetische Nadel ersetzt werden, und digitale Daten würden durch die beschriebene „Feldemission“ ausgelesen und geschrieben. So könnte im Vergleich zu heutigen Geräten eine zehntausendfach höhere Datenkapazität erzielt werden.

Die neuartige Schreib-Lese-Technik basiert dabei auf den mikroskopischen Wechselwirkungsprozessen zwischen dem Magneten und den aus der Nadel gelösten Elektronen: bei niedrigem Emissionsstrom wird der Zustand des Magneten über Leitfähigkeitsmessungen ausgelesen, und bei hohem Emissionsstrom zwingen die Elektronen mit ihrem Eigendrehimpuls (dem sogenannten „Spin“) den Nanomagnet gezielt seine Magnetisierungsrichtung umzukehren. „Durch den lokalen Elektronenbeschuss heizt sich der Nanomagnet zudem beträchtlich auf, was seine Manipulation deutlich erleichtert“, erläutert Physikerin Anika Schlenhoff.

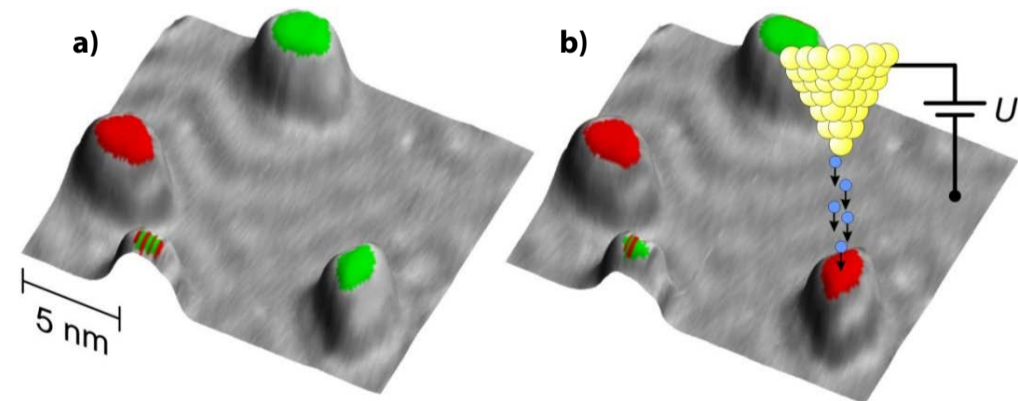


Abb. 9: a) Eisen-Nanomagnete (entsprechend ihrer Magnetisierung grün und rot eingefärbt) b) Zur Manipulation wird eine magnetische Nadelspitze über den Nanomagnet positioniert und dieser mit spinpolarisierten feldemittierten Elektronen beschossen. Das nach der Manipulation aufgenommene Bild zeigt, dass der Nanomagnet seine Magnetisierung umgekehrt hat. (Bild: A. Schlenhoff, Universität Hamburg)

[1] *Individual Atomic-Scale Magnets Interacting with Spin-Polarized Field-Emitted Electrons*, A. Schlenhoff, S. Krause, A. Sonntag, and R. Wiesendanger, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 097602 (2012)

## Viele Preise und Ehrungen für Wissenschaftler des SFB 668

**Dr. Alexander Ako Khajetoorians** wurde auf der 76. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin für seine bahnbrechenden Arbeiten auf dem Gebiet der Nano-Spintronik mit dem **Gerhard Ertl Young Investigator Award 2012** ausgezeichnet.

**Prof. Dr. Roland Wiesendanger** wurde zum **Ehrenprofessor des Harbin Institute of Technology (HIT)** ernannt. Er erhielt diese Auszeichnung für seine Pionierleistungen auf dem Gebiet der spinsensitiven Rastertunnelmikroskopie.

Für ihre Forschungsarbeiten zum Abbilden und Manipulieren kleinster Nano-Magnete erhielt **Anika Schlenhoff** auf der 29. European Conference on Surface Science (ECOSS) in Edinburgh den **ECOSS-Preis 2012**.

Die Deutsche Vakuumgesellschaft verlieh **Dr. Kirsten von Bergmann** den **Gaede-Preis 2013** für die direkte Beobachtung und detaillierte Analyse komplexer Spinstrukturen auf atomarer Skala mittels spinpolarisierter Rastertunnelmikroskopie.

**Prof. Dr. Roland Wiesendanger** wurde im Juli 2013 zum **auswärtigen**

**Mitglied der Polnischen Akademie der Wissenschaften** gewählt. Damit wurde seine führende Rolle in der Wissenschaft ebenso gewürdigt wie seine Verdienste um die deutsch-polnische wissenschaftliche Zusammenarbeit.

**Dr. Alexander Ako Khajetoorians** wurde in das **Emmy Noether-Programm** der Deutschen Forschungsgemeinschaft aufgenommen und mit 1,8 Millionen Euro für den Aufbau einer Nachwuchsgruppe unterstützt. Außerdem erhielt er den Europäischen Nicholas Kurti Preis 2014 für

seine herausragenden Forschungsbeiträge auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik.

**Prof. Dr. Roland Wiesendanger** erhielt Ende 2013 bereits zum zweiten Mal vom Europäischen Forschungsrat ERC (European Research Council) einen mit über 2 Millionen Euro dotierten Forschungspreis („**Advanced Grant**“) für den Forschungsbereich Naturwissenschaft und Technik. Damit werden zukünftig Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleitung gefördert.