

■ Symmetriebruch mit Erinnerung

Die magnetischen Momente von Antiferromagneten lassen sich durch elektrische Ströme schalten.

Aufgrund rasant wachsender Datenmengen im Rahmen der fortschreitenden Digitalisierung unseres Alltags steigt auch der Bedarf nach immer größeren Speicherkapazitäten. Zukünftige Datenspeicher müssen drei Anforderungen genügen: hohe Speicherdichte bei größtmöglicher Stabilität, hohe Energieeffizienz trotz nichtflüchtiger Speicherung und schnelle Zugriffsgeschwindigkeiten auf die Daten. Mit den bisherigen Ansätzen ist das nicht ohne Weiteres möglich: So erhöhten in der Vergangenheit zwar immer kleinere magnetische Strukturen die Speicherdichte. Eine weitere Miniaturisierung führt aber zu niedrigeren Energiebarrieren zwischen den magnetischen Zuständen, sodass sich die Langzeitstabilität der digitalen Information verringern kann. Über die grundlegenden Anforderungen hinaus könnte z. B. das „Internet der Dinge“ davon profitieren, wenn die Grenze zwischen schnellem flüchtigem Arbeitsspeicher und permanentem Datenspeicher verschwindet.

Seit Anfang der 1990er-Jahre wird das Magnetoresistive Random Access Memory (MRAM) als Alternative zu elektronischen, flüchtigen Speichertechniken entwickelt. Ein MRAM kodiert die Informationen

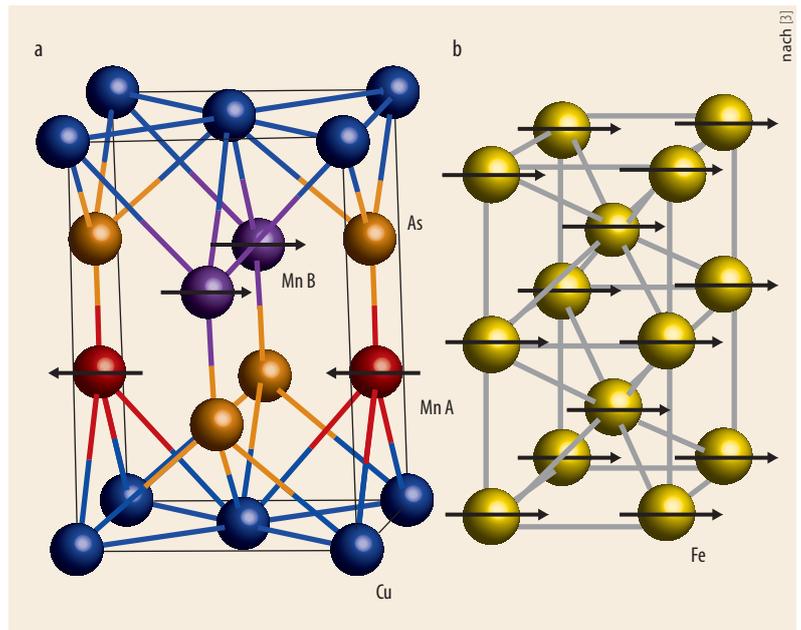


Abb. 1 Im Antiferromagneten CuMnAs (a) bildet Mangan zwei Untergitter (rot und lila). Die Ausrichtung ihrer magnetischen Momente (Pfeile) ist genau entgegengesetzt, sodass die Inversionssymmetrie des Kristallgitters lokal ge-

brochen ist. In einem typischen Ferromagneten wie Eisen (b) mit einer bcc-Kristallstruktur sind alle magnetischen Momente gleich ausgerichtet und die Inversionssymmetrie ist global gebrochen, wenn ein externes Magnetfeld anliegt.

nicht in elektronischen, sondern in magnetischen und damit nichtflüchtigen Speicherelementen. Bisher beruhen MRAMs hauptsächlich auf Ferromagneten als aktivem Speicherelement. Setzt man einen Ferromagneten einem magnetischen Feld aus, richten sich die magnetischen Momente oder Spins entlang der Feldlinien aus. Die

unterschiedliche Ausrichtung der Magnetisierung entspricht in einer digitalen Speicherung den „Nullen“ und „Einsen“.

In Ferromagneten verursachen benachbarte Schichten allerdings Streufelder, welche die benachbarten Bits stören können. Daher ist die maximale Speicherdichte dort begrenzt. Im Gegensatz dazu rufen Antiferromagnete keine Streufelder hervor und erlauben damit höhere Speicherdichten als ihr ferromagnetisches Pendant. Außerdem sind sie unempfindlich gegenüber starken externen Magnetfeldern, die beispielsweise in der Medizin bei der Magnetresonanztomographie zum Einsatz kommen. Als Speichermedium sind sie deshalb stabiler und lassen sich prinzipiell schneller schalten als Ferromagnete [1, 2].

Die gesamte Magnetisierung eines Antiferromagneten addiert sich zu Null auf, weil die magnetischen Momente alternierend ausgerichtet sind. Daher verändern externe Magnetfelder antiferromagnetische Materialien nur sehr schwer. Wie sind dann die Vorteile

KURZGEFASST

■ Primfaktoren aus fünf Qubits

Der Shor-Algorithmus beschreibt, wie ein Quantencomputer große Zahlen schnell in Primfaktoren zerlegt, indem seine Qubits parallel arbeiten. Österreichischen Physikern ist es mit Kollegen vom MIT erstmals gelungen, mit fünf Qubits die Zahl 15 ohne Vorwissen zu faktorisieren – vorher waren dazu zwölf Qubits nötig. Die Forscher implementierten eine neue Kühlmethode für die Ionenfallen der Qubits, um mit vier zu rechnen und das fünfte als Zwischenspeicher zu nutzen. Weil Algorithmus und Fallenarchitektur skalierbar sind, gehen die Forscher davon aus, dass ihre Methode für beliebig große Zahlen anwendbar ist.

T. Monz et al., Science 351, 1068 (2016)

■ Bäume im Sturm

Aus dem Windbruch von Bäumen nach heftigen Stürmen lernt man, dass eine Windgeschwindigkeit von etwa 42 m/s nötig ist, um Bäume aller Art und Größe umzuwerfen. Französische Forscher untersuchten experimentell mit Zylindern aus Buchenholz den Einfluss von Durchmesser und Höhe des Stammes auf die kritische Windgeschwindigkeit. Basierend auf dem Hookeschen Gesetz entwickelten sie ein Modell, das die tatsächliche Baumgestalt berücksichtigt. Dieses Modell bestätigt eine universelle kritische Geschwindigkeit und könnte auch für Korallen in Wasserströmen gelten.

E. Viot et al., Phys. Rev. E 93, 023001 (2016)

der Antiferromagneten in der Spintronik nutzbar, und wie lassen sich Informationen schreiben, auslesen und löschen?

Ein Team von Wissenschaftlern aus Großbritannien, Tschechien, Deutschland und Polen fand nun einen Weg, um Informationen in einem antiferromagnetischen Material zu speichern. Die Forscher um Peter Wadley konnten zeigen, dass die magnetischen Momente in einem Antiferromagneten bei Raumtemperatur elektrisch zu schalten und auszulesen sind [3]. Damit legen sie die Grundlage für eine auf Antiferromagneten basierende Datenspeicherung.

Dabei spielt eine gebrochene Inversionssymmetrie im Kristallgitter die entscheidende Rolle. Von Inversionssymmetrie spricht man, wenn es mindestens einen ausgezeichneten Punkt im Kristallgitter gibt – das Inversionszentrum – an dem Spiegelbild und Original des Gitters identisch aussehen. Häufig ist eine Brechung dieser Symmetrie die Ursache spannender Phänomene in

der Festkörperphysik. Beispielsweise ist eine gebrochene Inversionssymmetrie zwingend notwendig, um die Magnetisierung in einem Kristall global zu verändern.

Wadley und Kollegen untersuchten Kupfer-Mangan-Arsenid (CuMnAs), ein Material mit Inversionszentrum in der Kristallstruktur. Um das elektrische Schalten dennoch zu beobachten, nutzten sie aus, dass CuMnAs sowohl eine besondere kristalline als auch eine spezielle magnetische Struktur besitzt (Abb. 1). Das Kristallgitter zeichnet sich durch eine lokal gebrochene Inversionssymmetrie aus. Interne strominduzierte Felder, die ein Spin-Bahn-Drehmoment hervorrufen, erlauben es, die lokalen magnetischen Momente zu schalten. Die Orientierung der Spin-Bahn-Drehmomente hängt dabei von der Periodizität der antiferromagnetischen Untergitter ab. Im Fall von CuMnAs tragen die beiden Mangan-Untergitter das magnetische Moment. Ihre spezielle Orientierung macht es möglich,

die magnetischen Momente zu schalten.

Die Untergitter A und B sind so angeordnet, dass in ihrer Umgebung die Inversionssymmetrie lokal gebrochen ist und sich lokal zwei Spinpolarisationen mit unterschiedlichen Vorzeichen aufbauen. Diese führen zu einem Spin-Bahn-Drehmoment der Form

$$\frac{d\mathbf{M}_{A,B}}{dt} \sim \mathbf{M}_{A,B} \times \mathbf{p}_{A,B},$$

wobei $\mathbf{M}_{A,B}$ den Vektor des Moments der Untergitter A und B bezeichnet, während $\mathbf{p}_{A,B}$ die entsprechende Spinpolarisation beschreibt. Die beiden Untergitter bilden Inversionspartner, und somit gilt $\mathbf{p}_A = -\mathbf{p}_B$. Das Vorzeichen des effektiven Feldes, das auf die Magnetisierung der beiden Untergitter wirkt, ändert sich demnach periodisch und ermöglicht es, die Momente zu schalten.

Bei einer Schreibstromdichte von 4×10^6 A/cm² beobachteten Wadley und Kollegen, dass die Magnetisierung reproduzierbar

Dr. Matthias Benjamin Jungfleisch,
Materials Science Division,
Argonne National Laboratory,
Argonne, IL 60439, USA

umschaltet, wenn der elektrische Strom parallel zur ursprünglichen Ausrichtung der Spins angelegt wird. Um die Magnetisierung wieder zurück in die Ausgangsrichtung zu schalten, muss dagegen ein Strom senkrecht zur ursprünglichen Ausrichtung der Spins anliegen. Beide Effekte treten sowohl bei niedrigen Temperaturen von etwa 150 K wie auch bei Raumtemperatur auf. Voraussetzung für das elektrische Schalten bei Raumtemperatur ist die hohe Néel-Temperatur des Antiferromagneten CuMnAs. Oberhalb dieser charakteristischen Temperatur verliert das antiferromagnetische Material seine magnetische Ordnung. Theoretische Berechnungen basierend auf dem Kubo-Formalismus bestätigen die experimentellen Beobachtungen. Um die magnetischen Zustände

auszulesen, verwendeten die Forscher eine Widerstandsmessung, die aufgrund der relativistischen Spin-Bahn-Wechselwirkung von der Spinorientierung abhängt [4].

Die besondere Kristall- und Spinstruktur von CuMnAs in der Machbarkeitsstudie ist keine Einschränkung für die technische Anwendung anderer antiferromagnetischer Materialien. Beispielsweise könnte sich Mn₂Au, das ebenfalls eine hohe Néel-Temperatur besitzt, aufgrund seiner höheren Leitfähigkeit sogar besser für ein elektrisches Umschalten der Magnetisierung eignen als CuMnAs.

Antiferromagnetismus findet sich sowohl in Metallen als auch in Isolatoren oder Halbleitern. Die Robustheit und Schnelligkeit der Materialien sollte es erlauben, sie in bestehende Konzepte der Mikro-

elektronik zu integrieren. Gleichzeitig steckt die Implementierung von Antiferromagneten als aktives Bauelement in der modernen Festkörperphysik und Spintronik noch in den Kinderschuhen. Die Möglichkeit, die Magnetisierung in Antiferromagneten elektrisch zu schalten, wird sicherlich weitere Arbeiten zum Antiferromagnetismus inspirieren und uns weitere spannende Entdeckungen in diesem Gebiet in den kommenden Jahren bereiten.

Matthias Benjamin Jungfleisch

- [1] A. V. Kimel et al., *Nature* **429**, 850 (2004)
- [2] A. V. Kimel et al., *Nature Physics* **5**, 727 (2009)
- [3] P. Wadley et al., *Science* **351**, 587 (2016)
- [4] I. Fina et al., *Nature Comm.* **5**, 4671 (2014)

■ Ein ganz besonderer Saft

Die Flickerbewegungen von roten Blutkörperchen werden teils durch aktive Prozesse verursacht.

Seit Robert Browns Arbeiten zu der nach ihm benannten Bewegung in den 1820er-Jahren verfolgten zahlreiche Studien das Ziel, den Ursprung der „Flickerbewegung“ lebender Materie zu klären. Zu welchen Teilen ist sie aktiven, biologischen bzw. passiven, thermischen Ursprungs? In einer kürzlich erschienenen Arbeit nimmt ein interdisziplinäres Forscherteam um Timo Betz von der Universität Münster diese Frage für rote Blutkörperchen erneut ins Visier [1]. Mikrorheologische Methoden erlauben es, eine Verletzung des Fluktuations-Dissipations-Theorems (FDT) nachzuweisen. Begleitende Modellrechnungen und Computersimulationen machen als Ursache dafür aktive Prozesse innerhalb des membranverstärkenden Spektrinskeletts der Blutzellen verantwortlich.

Dass die Welt auf mikroskopischer Skala von einer Vielzahl bewegter Wesen („Animalcules“) bevölkert ist, hatte im 17. Jahrhundert bereits der niederländische Tuchhändler Antonie van Leeuwenhoek

mit den ersten Mikroskopen entdeckt. Während Brown bei seinen Untersuchungen daher zunächst noch davon ausging, dass die beobachtete Bewegung mit einer belebten Ursache zu erklären sei, ist es dank des durchschlagenden Erfolgs seiner Untersuchungen heute umgekehrt: Man fahndet nach Abweichungen von den Vorhersagen der Theorie der Brownschen Bewegung, welche die Stärke der passiven, thermischen Fluktuationen abhängig von den Materialeigenschaften und der Temperatur vorhersagt. Die Suche gilt jedoch letztlich heute genauso wie damals dem Anteil der „Lebenskraft“ an der „lebendigen Kraft“, heute besser bekannt als kinetische Energie.

Die von Timo Betz untersuchten Blutkörperchen (Erythrozyten) haben eine wichtige physiologische Bedeutung als flexible Transportbehälter von Hämoglobin. Um davon möglichst viel verstauen zu können, verlieren sie ihren Zellkern. Dies vermindert ihre biologische Regenerations- und Adaptionsfähigkeit, sodass sie im lebenden Organismus

mit jedem Atemzug millionenfach neu erzeugt werden. Sie sind also einfach erhältlich sowie gut reproduzierbar und charakterisierbar. Die Flickerbewegung der Erythrozytenmembran ist jedoch speziell: Zellmembranen sind üblicherweise durch ein innen anhaftendes Polymerskelett mechanisch verstärkt (Abb. 1) und widersetzen sich der Verformung daher durch Krümmungssteifigkeit und laterale Spannung. Wie bei einer Gitarrensaite macht normalerweise die Spannung die Musik – nicht aber bei den Erythrozyten. Die Analyse ihrer Membranfluktuationen im Rahmen der Brownschen Molekularbewegung führte bereits 1975 zu der Hypothese, dass aktive Lebensprozesse die Membranspannung im Vergleich zur Biegesteifigkeit klein halten. Das erklärt auch, warum die Frage nach dem Ursprung der Membranfluktuationen nicht ohne Weiteres durch einen direkten Vergleich lebender und toter Blutkörperchen zu entscheiden ist: Deren „passive“ Materialeigenschaften unterscheiden sich erheblich und damit