

SPINTRONIK

Magnetische Knoten auf der Festplatte

Erstmals konnten Forscher gezielt so genannte Skyrmionen »schreiben« und »löschen«. Mit solchen magnetischen Wirbeln lassen sich zumindest im Prinzip Informationen viel dichter speichern als auf gängigen Festplatten.

VON CHRISTIAN HANNEKEN UND NIKLAS ROMMING

Das Ende der Computerfestplatten ist abzusehen, denn künftigen Anforderungen an hohe Speicherkapazitäten sind sie wohl schon bald nicht mehr gewachsen. Auf handelsüblichen Exemplaren werden jeweils viele Atome, deren magnetische Momente parallel zueinander ausgerichtet sind, zu einem Datenbit zusammengefasst. Ein solches Atombündel ähnelt einem winzigen Stabmagneten, der sich in genau zwei Richtungen orientieren und auf diese Weise Nullen und Einsen darstellen kann. Damit auf derselben Fläche mehr Daten unterkommen, verkleinerte man die magnetischen Bits im Lauf der Zeit immer weiter. Ab einer gewissen Größe geht das aber nicht mehr.

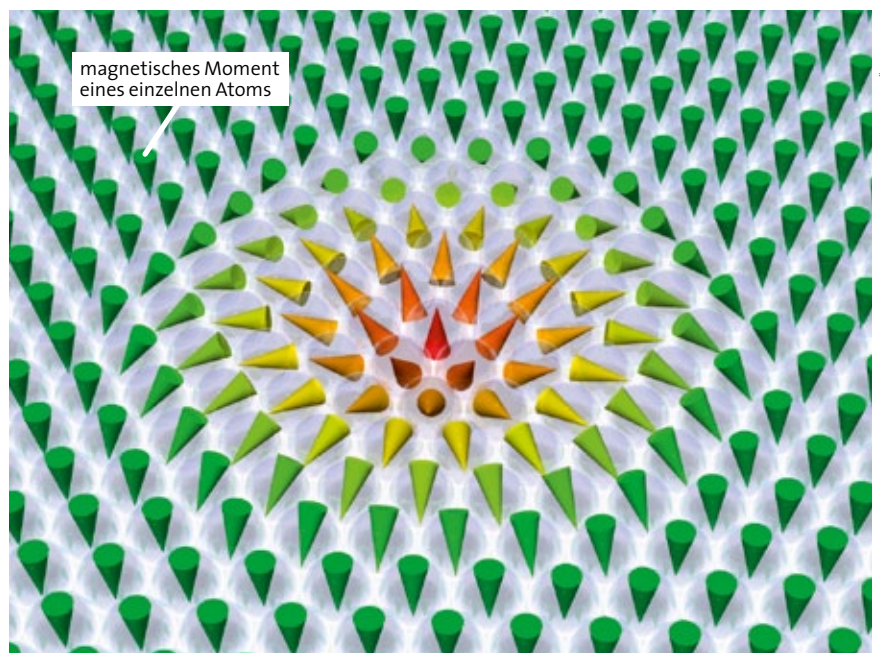
Dann führen die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Bits und thermische Fluktuationen dazu, dass einzelne Bits ungewollt umschalten.

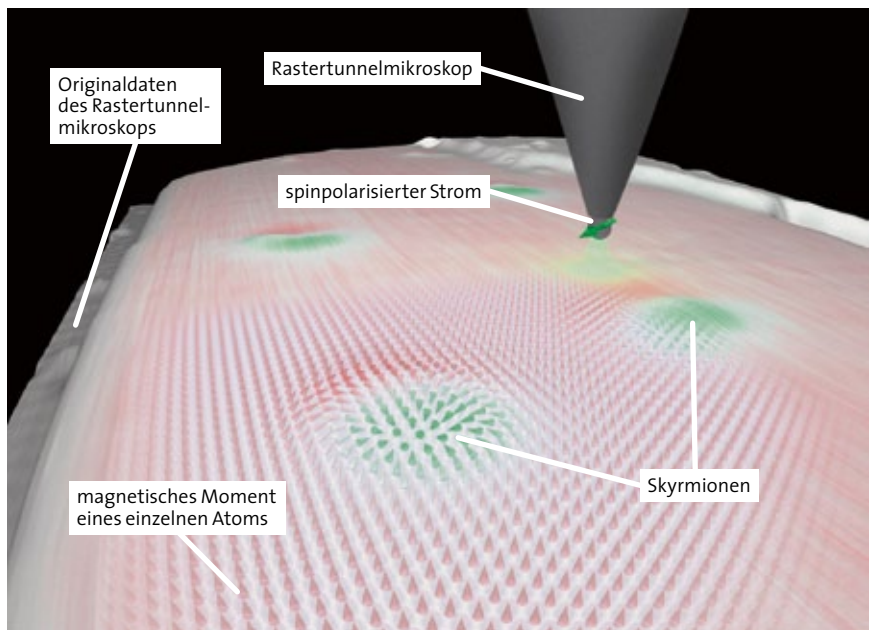
Doch es gibt eine Alternative. Bislang werden die magnetischen Momente, genauer die Spins der Teilchen, entweder parallel oder antiparallel zueinander angeordnet, also kollinear, wie Experten sagen. Doch es sind auch nichtkollineare Spin-Strukturen denkbar; in ihnen haben benachbarte Spins weit mehr Möglichkeiten, sich anzuordnen. Dabei nehmen sie durch verschiedene, miteinander konkurrierende Wechselwirkungen aufeinander Einfluss. Eine davon ist die so genannte Austauschwechselwirkung – ein Effekt,

der von der Quantennatur der magnetischen Momente herrührt und zum Beispiel in ferromagnetischen Materialien benachbarte Spins parallel ausrichtet. Ein weiterer Effekt, die Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung, bringt Spins dazu, sich vorzugsweise verkippt zueinander zu orientieren. Beide Wechselwirkungen zusammen können unter bestimmten Bedingungen eine ganz spezielle nichtkollineare Struktur von Spins hervorbringen: ein Skyrmion (siehe Darstellung unten).

Die Idee der Skyrmionen ist nicht neu. Der britische Theoretiker Tony Skyrme, nach dem sie benannt sind, hatte vor mehr als 50 Jahren den Gedanken entwickelt, dass in quanten-

Diese schematische Darstellung eines Skyrmions zeigt die magnetischen Momente (in Kegelform, Färbung abhängig von der jeweiligen Ausrichtung) einzelner Atome auf der Oberfläche eines Festkörpers. Grüne Kegel entsprechen dem ferromagnetischen Zustand, in dem die magnetischen Momente parallel ausgerichtet sind. Die wirbelförmige Struktur der gelben und roten Elemente ist dagegen charakteristisch für Skyrmionen.





physikalischen Feldern bestimmte Phänomene auftreten können, die sich mathematisch wie Teilchen beschreiben lassen und dabei Wirbeln ähneln, die in ihrer Bewegung eingefroren sind. 1989 sagten Forscher dann voraus, dass solche Quasiteilchen auch in magnetischen Systemen vorkommen können, wo sie von den wechselwirkenden Spins benachbarter Partikel hervorgebracht werden. Ihren Teilchencharakter gewinnen sie, weil die Spinrichtungen gewissermaßen »verknotet« sind und sich nur unter Energieaufwand wieder entknoten lassen. Im Jahr 2009, gelang es an der Technischen Universität München erstmals, solche Wirbel, lokalisiert an den Gitterpunkten eines gedachten regelmäßigen Gitters, experimentell in einem Festkörper nachzuweisen.

Zu den Voraussetzungen für die Entstehung von Skyrmionen in einem Kristall zählt, dass in diesem eine bestimmte Form der Raumsymmetrie gebrochen sein muss; in den bis dahin untersuchten Kristallen war dies durch deren chirale Struktur sichergestellt, die eine Unterscheidung zwischen links- und rechtshändigen Systemen ermöglicht. Eine entsprechende Symmetriebrechung liegt aber auch an der Oberfläche eines Festkörpers vor. 2011 gelang es unserer Arbeitsgruppe um Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg, ein quadratisches Skyrmionengitter in einem nur eine Atomlage dicken Eisenfilm auf einem Iridiumkristall nachzuweisen. Das Ergebnis ließ auf mehr hoffen: Das Materialsystem konnten wir in einem einfachen

Mit der magnetischen Spitze eines Rastertunnelmikroskops können Skyrmionen (grüne Bereiche) präzise vermessen, aber auch manipuliert werden. Schickt man einen spinpolarisierten Strom durch die Spitze des Mikroskops, lässt dessen magnetisches Moment die Quasiteilchen entstehen oder verschwinden. Im Hintergrund der illustrierenden Darstellung sind die mit dem Mikroskop gewonnenen Daten zu sehen (grau).

Verfahren herstellen, außerdem waren die Skyrmionen kleiner als in früheren Studien. Weil sie zudem in einem dünnen Film auftraten – und nicht etwa im Inneren eines Kristalls –, bieten sie die Voraussetzung, sich durch vertikale Ströme leicht manipulieren zu lassen.

Vier Datenbits – der erste Schritt zur Festplatte der Zukunft?

Doch dies war nur der erste Schritt. In der Folgezeit konzentrierte sich unsere Gruppe auf die gezielte Erzeugung und Vernichtung von Skyrmionen, also auf das »Schreiben« und »Löschen« von Datenbits. Damit hatten wir jetzt Erfolg: Es gelang uns, in einem ebenfalls extrem dünnen Film aus Palladium und Eisen auf einem Iridiumsubstrat vier Skyrmionen kontrolliert hin- und herzuschalten, sie also immer wieder zu erzeugen und zu vernichten (*Science* 341, S. 636, 2013). Jedes Skyrmion setzte sich dabei aus rund 300 Atomen zusammen und besaß einen Durchmesser von fünf bis sechs Nanometer (milliardstel Meter).

Durch Selbstorganisation hatten sich auf dem Substrat zuerst Eisen- und auf diesen Palladiuminseln gebildet; letztlich war die Palladium-Eisen-Schicht gerade einmal zwei Atomlagen dick. Bei Temperaturen um minus 269 Grad Celsius nahm dieses System drei verschiedene Phasen an. Zunächst bildete sich in den Palladium-Eisen-Inseln eine spiralartige Spinstruktur aus. Schalteten wir ein äußeres magnetisches Feld ein, teilten sich die Spiralen, verkleinerten sich und begannen, ein regelmäßiges Gitter aus Skyrmionen zu bilden. Erhöhten wir das Magnetfeld weiter, verschwanden die Skyrmionen nach und nach, bis nur noch einzelne zurückblieben, die an Defekten in den Palladiuminseln verharrten. Bei noch höherer Feldstärke richteten sich schließlich alle magnetischen Momente in der Palladium-Eisen-Lage in Richtung des Magnetfelds aus – das System war ferromagnetisch geworden.

An diesem letzten Phasenübergang, der Grenze zwischen der Skyrmionen-Gitterphase und Ferromagnetismus,

Kostbare Kacke

Ekeltherapie hilft gegen hartnäckige Darmleiden.

In letzter Zeit befassen sich auffallend viele Fachartikel mit dem regen Leben in unserem Darm. Die dort angesiedelten Mikroben sind zwar winzig, aber so zahlreich, dass sie ein bis zwei Kilogramm zum Körpergewicht beitragen. In aller Regel handelt es sich um gutartige Symbionten, die sich beim Verdauen der Speisen nützlich machen und das allgemeine Wohlbefinden fördern – wozu auch ein guter Stuhlgang gehört. Doch mitunter schleichen sich in unsere inneren Feuchtgebiete bösartige Parasiten ein, etwa das Bakterium *Clostridium difficile*. Es verursacht Durchfall und Fieber, ist oft resistent gegen Antibiotika und kann sogar zum Tod führen.

Angesichts eines besonders bedrohlichen Falls wagte der Mediziner Max Nieuworp am Amsterdamer Universitätskrankenhaus 2006 eine so genannte Fäkaltransplantation: Nach einer gründlichen Darmspülung verabreichte er der Patientin über eine bis in den Zwölffingerdarm geschobene Nasensonde den mit Salzlösung verflüssigten Spenderkot ihres Sohns. Binnen Tagen gesundete die Frau völlig (*Science* 341, S. 954, 2013).

Falls Sie einen Spiegel zur Hand haben, sollten Sie an diesem Punkt der Lektüre Ihren Gesichtsausdruck kontrollieren: Fast sicher werden Sie an sich die hochgezogene Oberlippe beobachten, eine typische Ekelreaktion. Umgangssprachlich wird die medizinische Übertragung der Darmflora darum auch Ekeltherapie genannt.

Dabei kann das Verfahren auf eine ehrwürdige Tradition zurückblicken. Der chinesische Arzt Ge Hong beschrieb es schon im 4. Jahrhundert, sein deutscher Fachkollege Christian Franz Paullini (1643–1712) zählte in seinem 1697 erschienenen Lehrbuch »Heilsame Dreck-Apotheke« verschiedene Beispiele für die Heilwirkung menschlicher Exkremente auf. Und schließlich publizierte der US-Mediziner Ben Eiseman von der University of Colorado in Denver im Jahr 1958 in der Zeitschrift »Surgery« jenen Artikel über vier erfolgreiche Fäkaltransplantationen, der Nieuworp ein halbes Jahrhundert später den Mut zu seinem gelungenen Therapieversuch machte.

Inzwischen wird die Methode von manchen Medizinern routinemäßig praktiziert und ist Gegenstand mehrerer kontrollierter Studien. Viele Ärzte bleiben allerdings skeptisch und warnen vor Euphorie. Beispielsweise muss der Spenderkot zuvor gründlich auf mögliche Krankheitserreger untersucht werden, doch in der Grauzone der Alternativmedizin werden über das Internet bereits dubiose Anleitungen zur Fremdkotaufnahme verbreitet.

Möglicherweise verspricht die medizinische Manipulation der Darmflora auch ein Mittel gegen krankhaftes Übergewicht. Ein interdisziplinäres Team von Ernährungswissenschaftlern, Biologen und Medizinern um die französische Genetikerin Emmanuelle Le Chatelier hat einen Zusammenhang zwischen Fettleibigkeit und geringer Artenvielfalt der Darmmikroben nachgewiesen (*Nature* 500, S. 541, 2013). Verarmt das Biotop in unserem Unterleib aus irgendeinem Grund genetisch, so steigt das Risiko, an Adipositas zu erkranken. Umgekehrt lässt sich die mikrobielle Artenvielfalt durch schlank machende Diät erhöhen, wie ein Team um die Biologin Aurélie Cotillard zeigen konnte (*Nature* 500, S. 585, 2013).

Vielleicht wird man Fettleibigen daher eines Tages raten, Fremdkot aufzunehmen, um ihre magere Darmflora zu bereichern. Das könnte am Ende das schlechte Image der Fäzes aufpolieren. Schon 1964 gab Hans Magnus Enzensberger in seinem Gedicht »Die Scheisse« zu bedenken: »Hat sie uns nicht erleichtert? / Von weicher Beschaffenheit / und eigentümlich gewaltlos / ist sie von allen Werken des Menschen / vermutlich das friedlichste. / Was hat sie uns nur getan?«



Michael Springer

bietet sich die Chance, einzelne Skymionen zu schreiben und zu löschen. Das Rastertunnelmikroskop, mit dem wir auch unsere Beobachtungen durchgeführt hatten, nutzten wir nun, um einen »magnetischen« Strom in die einzelnen Skymionen zu injizieren (Illustration S. 23). Dieser war so präpariert, dass bei einem Teil der fließenden Elektronen der Spin in dieselbe Richtung zeigte. So gelang es uns, Skymionen in ferromagnetische Bereiche zu verwandeln und umgekehrt, zumindest mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit.

Dabei fanden wir heraus, dass die Umschaltwahrscheinlichkeit entscheidend von der Energie der aus dem Mikroskop austretenden Elektronen abhängt. Auch die Richtung des Prozesses, ob ein Skymion also geschrieben oder gelöscht wird, konnten wir beeinflussen: Wir mussten dazu lediglich die Stromrichtung umkehren. Im Detail ist der zu Grunde liegende Mechanismus zwar noch unklar, aber wir vermuten, dass der Spin-Transfer-Torque – das Drehmoment, das der magnetische Strom auf die magnetischen Momente in der Probe ausübt – eine wichtige Rolle spielt.

Zumindest im Prinzip lassen sich Skymionen also zum Speichern von Daten benutzen. Unsere Versuche gelangen bislang allerdings nur im Ultrahochvakuum, bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt und in einem starken äußeren Magnetfeld. Darum versuchen wir nun, das Experiment so zu verändern, dass es auch unter alltäglicheren Bedingungen noch funktioniert. Der Aufwand könnte sich lohnen, denn Skymionen sind viel kleiner als konventionelle magnetische Bits. Mit Hilfe der magnetischen Knoten werden sich die Nullen und Einsen auf künftigen Festplatten möglicherweise noch einmal um das Zehn- bis Hundertfache dichter packen lassen als mit herkömmlicher Technologie – selbst wenn diese bis an ihr physikalisches Maximum ausgereizt wird.

Christian Hanneken und Niklas Romming

promovieren im Fach Physik in der Arbeitsgruppe um Roland Wiesendanger am Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg.