

## Magnetische Monopole auf Wanderschaft

**Forschende machen Bewegung magnetischer Monopole in einer Anordnung von Nanomagneten sichtbar**

Seit Jahrzehnten suchen Forschende nach magnetischen Monopolen – einzelnen magnetischen Ladungen, die sich wie einzelne elektrische Ladungen alleine bewegen könnten. Denn normalerweise treten magnetische Pole immer nur in Paaren auf. Nun ist es einem Team von Forschenden des Paul Scherrer Instituts und des University College Dublin gelungen, Monopole als Quasiteilchen in einer Anordnung von nanometergrossen Magneten zu erzeugen und ihre Bewegung unmittelbar mit Hilfe eines Mikroskops an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS), das magnetische Strukturen sichtbar macht, zu beobachten. Wie die elementaren Monopole, die zuerst vom britischen Physiker Paul Dirac 1931 vorhergesagt wurden, ist auch jeder dieser Monopole durch einen „String“, eine Art Verbindungsband, mit einem Partner entgegengesetzter Ladung verknüpft. Die beiden Monopole können sich dabei aber weitgehend unabhängig voneinander bewegen. Diese Ergebnisse sind nicht nur wissenschaftlich interessant, sondern könnten auch die Grundlage für die Entwicklung zukünftiger elektronischer Geräte bilden. Sie wurden am 17. Oktober in Nature Physics online publiziert.

Magnetische Pole treten immer nur paarweise auf – teilt man einen Stabmagneten, der immer einen Nord- und einen Südpol hat, so bekommt man nicht einzelne Pole, sondern wieder zwei Magnete mit je einem Nord- und einem Südpol. Das ist ähnlich wie bei einem Stab, bei dem man nicht zwei einzelne Enden bekommt, wenn man ihn halbiert, sondern zwei Stäbe mit je zwei Enden. Wie aber schon der britische Physiker schweizerischer Herkunft Paul Dirac in den Dreissigerjahren vorhergesagt hat, können die einzelnen Pole auch weit voneinander entfernt sein, solange nur eine magnetische Verbindung zwischen ihnen besteht, die den magnetischen Fluss transportiert – der so genannte Dirac-String. Im letzten Jahr ist es Forschern erstmals gelungen, derartige Monopole in einem magnetischen Material zu erzeugen. Allerdings konnten die zugehörigen Dirac-Strings nur indirekt mit Hilfe von Neutronenstreuung und auch nur bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt beobachtet werden.

### Nanomagnete bilden Monopole

Nun ist es Wissenschaftlern des Paul Scherrer Instituts und des University College Dublin gelungen, magnetische Monopole und die dazugehörigen Dirac-Strings bei Raumtemperatur direkt zu beobachten. Die Forschenden haben dafür eine zweidimensionale Anordnung von winzigen Magneten hergestellt – jeder Magnet war nur rund 500 Nanometer (= Millionstel Millimeter) lang und 150 Nanometer breit. So haben sie ein künstliches zweidimensionales magnetisches Material geschaffen, deren kleinste Bestandteile die Nanomagnete sind. In dem Experiment waren die Nanomagnete in einem Sechseckmuster angeordnet, so dass jeder an seinem Ende auf zwei weitere stiess. Wegen der entfernten Ähnlichkeit mit der Anordnung von Atomen in gewöhnlichem Eis wird diese Struktur als „künstliches Spin-Eis“ bezeichnet. „Für unser Experiment haben wir die Nanomagnete zunächst so vorbereitet, dass an den Begegnungspunkten abwechselnd zwei Nordpole und ein Südpol oder zwei Südpole und ein Nordpol aufeinanderstiessen.“ erklärt Laura Heyderman, die das Projekt von Seiten des PSI leitet.



Die Doktorandin Elena Mengotti an der Mikroskopie-Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Hier kann die Magnetisierungsrichtung von Nanomagneten sichtbar gemacht werden.



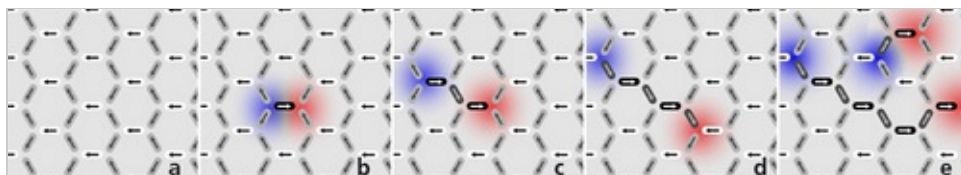
PSI-Forschende Elena Mengotti und Frithjof Nolting, verantwortlich für die Mikroskopie-Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, diskutieren ihre Messergebnisse.



Hans-Benjamin Braun vom University College Dublin und PSI-Forscherin Laura Heyderman diskutieren die theoretische Beschreibung der Monopole und Dirac-Strings.

„Klappt man bei einer solchen Anordnung die Magnetisierungsrichtung eines Magneten mit Hilfe eines äusseren Magnetfelds um, entstehen an den Enden des Magneten zwei Defekte in der ursprünglichen Anordnung. Diese Defekte verhalten sich wie magnetische Monopole.“ so Heyderman weiter.

„Macht man das äussere magnetische Feld stärker, klappt bei benachbarten Magneten die Magnetisierung ebenfalls um. Dieses Umlappen geht dann wie bei einer Reihe Dominosteine weiter, so dass die beiden Monopole eines Paares auseinanderwandern – der eine immer nach rechts, der andere nach links“ erklärt Elena Mengotti, die am PSI über künstliches Spin-Eis doktriert und den grössten Teil der Experimente durchgeführt hat. „Dabei bleiben die beiden Monopole stets durch einen eindimensionalen Pfad von Magneten verbunden, bei denen der Nordpol des einen an den Südpol des nächsten stösst, und die so den Dirac-String bilden. Auch wenn man dann das äussere Feld wieder abschaltet bleiben die Monopole am Ort – sozusagen ‚eingefroren‘ im Spin-Eis.“

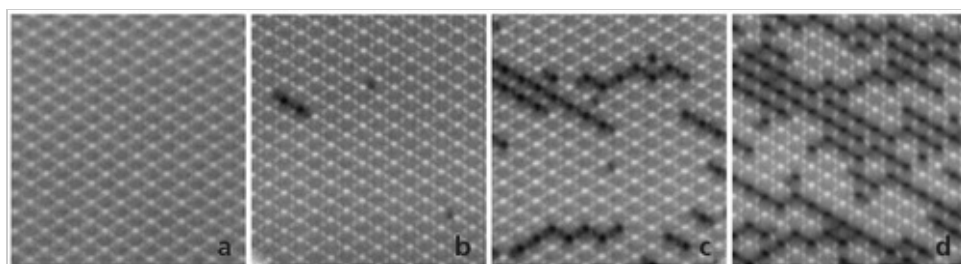


Magnetische Monopole in einer Anordnung von Nanomagneten – schematische Darstellung. Die Pfeile zeigen, in welche Richtung die einzelnen Magnete magnetisiert sind. Pfeilspitze: Nordpol, Pfeilende: Südpol. Nordpol entspricht einer positiven magnetischen Ladung, Südpol einer negativen.

- a: Ausgangszustand: Alle Magnete sind in die gleiche Richtung magnetisiert.
- b: Die Magnetisierungsrichtung eines Nanomagneten hat sich geändert – an den beiden Enden sind zwei Defekte in der ursprünglichen Anordnung entstanden. Diese Defekte verhalten sich wie magnetische Monopole.
- c, d: Weitere Magnete haben ihre Ausrichtung geändert – die Monopole haben sich voneinander entfernt, sind aber durch einen „Dirac-String“ aus umgedrehten Magneten verbunden.
- e: Situation mit zwei Monopolpaaren

## Synchrotronlicht zeigt Magnetismus

An einem Messplatz für magnetische Untersuchungen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS des Paul Scherrer Instituts konnten die Forschenden beobachten, wie sich die Magnetisierungsrichtung der einzelnen Nanomagnete verändert und so zeigen, wie sich die Monopole bewegen. Hier kann man nämlich die Magnetisierung der Magnete direkt abbilden und somit erstmals direkt die Bewegung der Monopole und damit das Wachsen des Dirac-Strings sichtbar machen. Diese Experimente konnten bei Raumtemperatur durchgeführt werden.



Aufnahmen des Systems aus einem echten Experiment an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Dunkle Stellen entsprechen Orten, an denen die Richtung der Magnetisierung umgekehrt wurde. Bild a entspricht wieder dem Ausgangszustand. In den Bildern b, c und d sind deutlich die Dirac-Strings zu sehen, die zwei magnetische Monopole miteinander verbinden. Der gezeigte Bereich ist jeweils rund  $12 \times 12$  Mikrometer gross.

## Die Theorie hinter dem Experiment

Eine lawinenartige Ummagnetisierung entlang eines eindimensionalen Dirac-Strings, wie sie hier beobachtet werden konnte, ist ein neuartiges magnetisches Phänomen und unterscheidet sich stark von Vorgängen in anderen magnetischen Materialien wie sie etwa gegenwärtig in magnetischen Festplatten verwendet werden. Das beobachtete Verhalten konnte in theoretischen Studien des Teams am University College Dublin erklärt werden. „Unsere Ergebnisse stellen nicht nur einen Durchbruch in der direkten Beobachtung von Monopolen und Dirac-Strings in künstlichem Spin-Eis dar, sondern haben auch zum ersten Mal gezeigt, wie deren Bewegung manipuliert werden kann.“ erklärt Hans-

Benjamin Braun, der am University College für das Projekt verantwortlich ist.

## „Digitale Bauteile, die magnetische Ströme nutzen“

„Die Erkenntnisse können auch zentral für die Architektur zukünftiger magnetischer Speicher sein. So geht man im Allgemeinen davon aus, dass die nächste Generation von Speichermedien aus einzelnen isolierten Makrospins – wie unseren Nanomagnetten – bestehen wird.“ so Braun. Laura Heyderman fügt an: „Als nächstes wollen wir herausbekommen, wie man die Monopole noch gezielter auf kleinsten Skalen manipulieren kann, um sie als Speicher oder für logische Operationen einsetzen zu können. Die Idee ist, digitale Bauteile zu entwickeln, in denen man Ströme magnetischer Monopole anstelle elektrischer Ströme nutzen würde.“

### Das Team

Elena Mengotti ist Doktorandin am Paul Scherrer Institut. Sie wird vom Schweizerischen Nationalfonds unterstützt und hat die experimentellen Arbeiten im Rahmen des Projekts durchgeführt.

Frithjof Nolting and Arantxa Fraile Rodriguez vom PSI sind Fachleute für magnetische Spektroskopie und Mikroskopie. Sie haben die experimentellen Arbeiten an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS angeleitet.

Hans-Benjamin Braun (Gruppenleiter) and Remo Hügli (Postdoktorand) vom University College Dublin haben die Theorie zu dem Experiment entwickelt und numerische Simulationen des Systems durchgeführt.

Laura Heyderman (Leiterin der Gruppe “Magnetische Nanostrukturen” am Paul Scherrer Institut) und Hans-Benjamin Braun haben die gemeinsame Forschungsarbeit geleitet.

*Text: Paul Piwnicki*

---

### ÜBER DAS PSI

Das Paul Scherrer Institut entwickelt, baut und betreibt grosse und komplexe Forschungsanlagen und stellt sie der nationalen und internationalen Forschungsgemeinde zur Verfügung. Eigene Forschungsschwerpunkte sind Festkörperforschung und Materialwissenschaften, Elementarteilchenphysik, Biologie und Medizin, Energie- und Umweltforschung. Mit 1400 Mitarbeitenden und einem Jahresbudget von rund 300 Mio. CHF ist es das grösste Forschungsinstitut der Schweiz.

### ÜBER DAS UNIVERSITY COLLEGE DUBLIN

Das University College Dublin (UCD) wurde 1854 gegründet, um der breiten Öffentlichkeit eine universitäre Ausbildung zu ermöglichen. Der vielleicht berühmteste Absolvent von UCD war der Schriftsteller James Joyce, der auch lange in Zürich lebte. Heute ist UCD Irlands grösste Universität und der Campus beherbergt mehrere Forschungsinstitute, Studentensiedlungen, Startup Unternehmen und Sportsanlagen, mit über 23000 Studierenden und Doktorierenden aus mehr als 115 Ländern.

---

### KONTAKT / ANSPRECHPARTNER

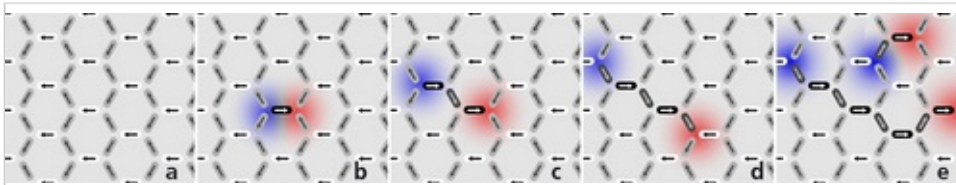
Dr. Laura Jane Heyderman & Elena Mengotti, Labor für Mikro- und Nanotechnologie,  
Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI,  
Telefon: +41 (0)56 310 2613, E-Mail: [laura.heyderman@psi.ch](mailto:laura.heyderman@psi.ch); [elena.mengotti@psi.ch](mailto:elena.mengotti@psi.ch) [Deutsch, Englisch, Italienisch]

Prof. Hans-Benjamin Braun, School of Physics, University College Dublin,  
Dublin 4, Ireland,  
Telefon: + 353 1 716 2564, E-Mail: [beni.braun@ucd.ie](mailto:beni.braun@ucd.ie) [Deutsch, Englisch]

### ORIGINALVERÖFFENTLICHUNG

**Real space observation of emergent magnetic monopoles and associated Dirac strings in artificial kagome spin ice.**  
Elena Mengotti, Laura J. Heyderman, Arantxa Fraile Rodriguez, Frithjof Nolting, Remo V. Hügli, and Hans-Benjamin Braun,  
*Nature Physics* Advance Online Publication 17 October 2010;  
DOI: [10.1038/NPHYS1794](https://doi.org/10.1038/NPHYS1794)<sup>[1]</sup>

## BILDMATERIAL



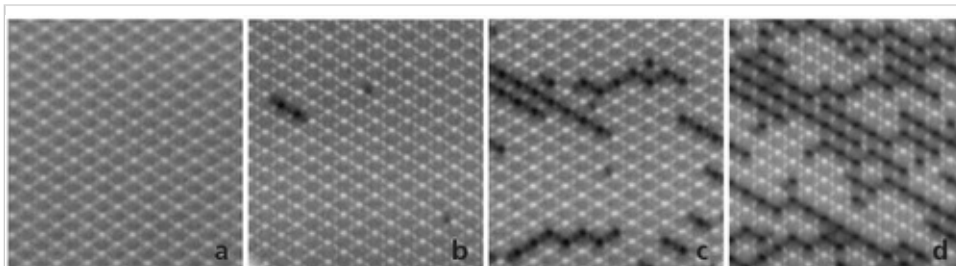
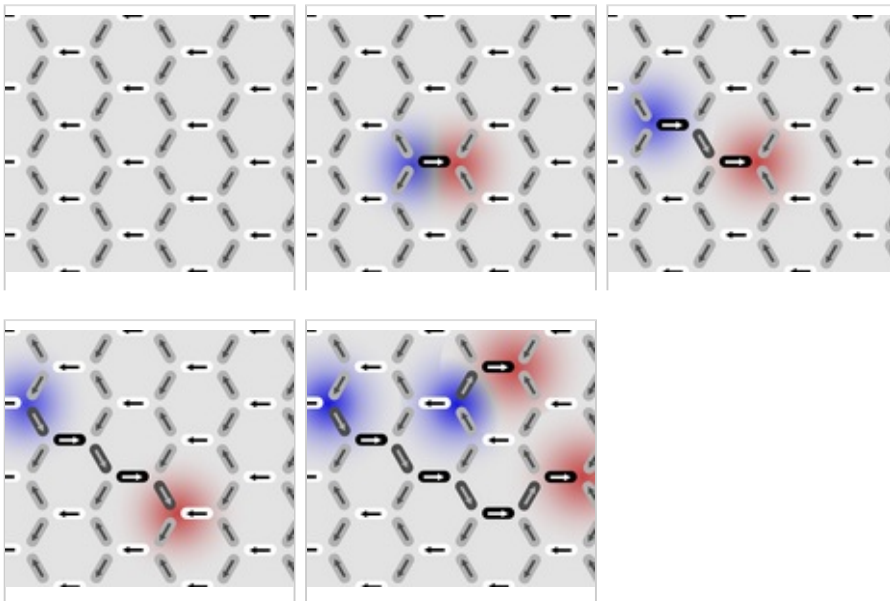
Diagrammreihe

### Erläuterung zu dieser Bildreihe

Magnetische Monopole in einer Anordnung von Nanomagneten – schematische Darstellung. Die Pfeile zeigen, in welche Richtung die einzelnen Magnete magnetisiert sind. Pfeilspitze: Nordpol, Pfeilende: Südpol. Nordpol entspricht einer positiven magnetischen Ladung, Südpol einer negativen.

- a: Ausgangszustand: Alle Magnete sind in die gleiche Richtung magnetisiert.
- b: Die Magnetisierungsrichtung eines Nanomagneten hat sich geändert – an den beiden Enden sind zwei Defekte in der ursprünglichen Anordnung entstanden. Diese Defekte verhalten sich wie magnetische Monopole.
- c, d: Weitere Magnete haben ihre Ausrichtung geändert – die Monopole haben sich voneinander entfernt, sind aber durch einen „Dirac-String“ aus umgedrehten Magneten verbunden.
- e: Situation mit zwei Monopolpaaren (Quelle: PSI/E. Mengotti)

### Einzeldownload



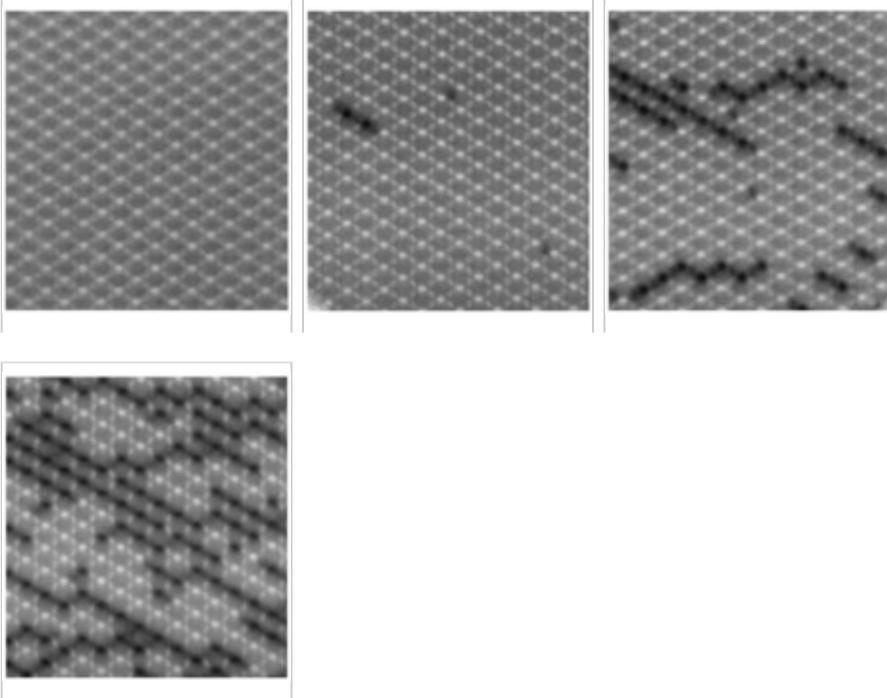
Reihe mit Peem-Aufnahmen

### Erläuterung zu dieser Bildreihe

Aufnahmen des Systems aus einem echten Experiment an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Dunkle Stellen entsprechen Orten, an denen die Richtung der Magnetisierung umgekehrt wurde. Bild a entspricht wieder dem Ausgangszustand. In den Bildern b, c und d sind deutlich die Dirac-Strings zu sehen, die zwei magnetische Monopole miteinander verbinden. Der gezeigte Bereich ist jeweils rund  $12 \times 12$  Mikrometer gross. (Quelle: PSI)



## Einzeldownload



Die Doktorandin Elena Mengotti an der Mikroskopie-Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. Hier kann die Magnetisierungsrichtung von Nanomagneten sichtbar gemacht werden. (Quelle: PSI/M. Fischer)



PSI-Forschende Elena Mengotti und Frithjof Nolting, verantwortlich für die Mikroskopie-Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, diskutieren ihre Messergebnisse. (Quelle: PSI/M. Fischer)



Hans-Benjamin Braun vom University College Dublin und PSI-Forscherin Laura Heyderman diskutieren die theoretische Beschreibung der Monopole und Dirac-Strings. (Quelle: PSI/M. Fischer)

---

### URLs:

[1] : <http://dx.doi.org/10.1038/NPHYS1794>

---

<http://www.psi.ch/media/magnetische-monopole-auf-wanderschaft>