

Um die Ecke geschaltet

In einem multiferroischen Schichtsystem lässt sich bei Raumtemperatur die Magnetisierung mit einem elektrischen Feld umkehren.

Ferroische Materialien sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Festplatten, Generatoren und Transformatoren machen sich den Ferromagnetismus zunutze, während Ferroelektrika Grundlage von Aktuatoren, Sensoren oder Kondensatoren sind. Nur selten sind magnetische und elektrische Ordnung gleichzeitig in einem Material anzutreffen, das man dann als Multiferroikum bezeichnet. Oft beeinflussen sich die beiden Ordnungen, sodass ein magnetisches Feld die elektrische und ein elektrisches Feld die magnetische Ordnung steuern kann. Gerade letzteres verspricht kompakte, energieeffiziente Speichermedien, in denen eine elektrische Spannung anstelle eines energieaufwändig mit Strom erzeugten magnetischen Feldes die digitale magnetische Information schreibt.

Bereits 1894 dachte Pierre Curie über Materialien nach, in denen ein elektrisches Feld eine proportionale Magnetisierung induzieren kann – und umgekehrt. Es sollte aber noch über fünfzig Jahre bis zum Nachweis des so genannten linearen magnetoelektrischen Effekts in Cr_2O_3 dauern. Leider erwies er sich als zu schwach und tritt zu selten auf, um technisch von Interesse zu sein. Um das Jahr 2000 herum wurden Multiferroika als mögliche Quelle starker Wechselwirkungen magnetischer und elektrischer Eigenschaften vorgeschlagen. Dieses nun verallgemeinernd als magneto-elektrisch bezeichnete Verhalten wird inzwischen intensiv erforscht. Bemerkenswert ist, dass Ferroelektrizität bevorzugt in Umgebungen mit leeren d-Orbitalen auftritt, während die magnetische Ordnung von Übergangsmetallionen teilgefüllte d-Orbitale verlangt. Multiferroika werden daher nicht nur aus technologischen Erwägungen heraus untersucht, sondern auch, weil die ferroelektrische Ordnung von ungewöhnlicher Natur sein muss, um gemeinsam mit der magnetischen Ordnung bestehen zu können [1, 2].

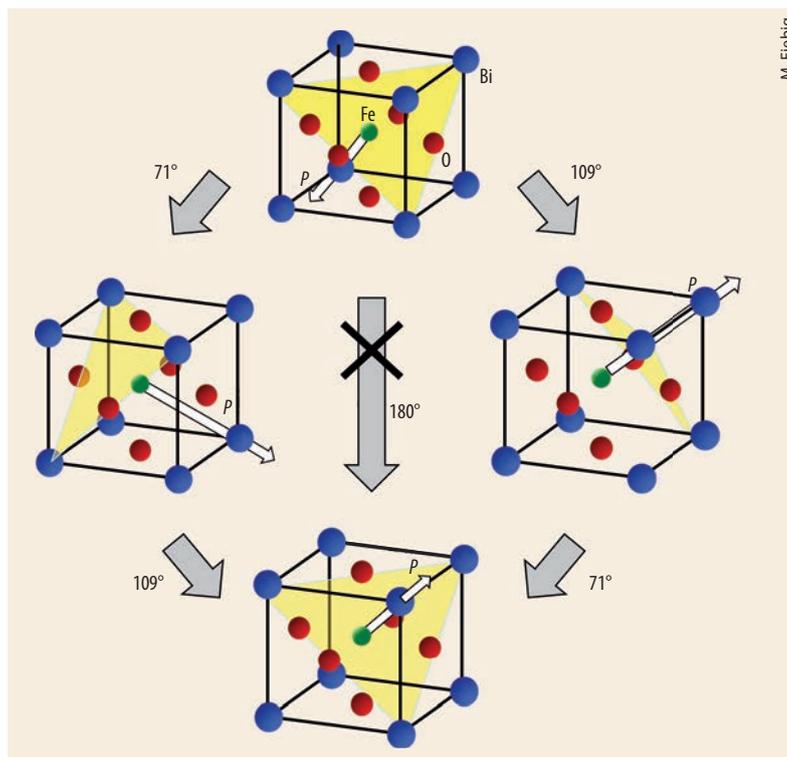


Abb. 1 In multiferroischem BiFeO_3 zeigt die ferroelektrische Polarisierung P entlang einer der Würfeldiagonalen, was acht mögliche Orientierungszustände ergibt. Zwischen benachbarten Domänen bilden die Polarisierungsrichtungen stets

Winkel von 71° , 109° oder 180° miteinander. Die Polarisierungsrichtung wird, wie hier für einen der acht Zustände gezeigt, nicht direkt, sondern in einem Zweistufenprozess über einen assoziierten 71° - oder 109° -Zustand umgekehrt.

Vor Kurzem erreichte ein Team um Ramamoorthy Ramesh an der University of California in Berkeley eines der ultimativen Ziele der Multiferroik-Forschung [3]. Sie zeigten, dass sich die Magnetisierung eines BiFeO_3 -basierten multiferroischen Systems durch ein elektrisches Feld bei Raumtemperatur reversibel umpolen lässt. Sie nutzten dies, um den ohmschen Widerstand eines magnetischen Bauteils, eines „Spinventils“, mithilfe weniger Volt zu steuern.

BiFeO_3 ist das am intensivsten erforschte Multiferroikum. Es besitzt zwar eine komplizierte Struktur, ist jedoch zurzeit das einzige bekannte multiferroische Material, das bei Raumtemperatur eine robuste Ordnung aufweist. Das Material besitzt acht ferroelektrische Polarisierungszustände in Kombination mit einer magnetischen Spiralordnung ohne Magnetisierung [4].

Schon vor mehr als fünf Jahren gelang es den Forschern aus Berkeley, in dünnen BiFeO_3 -Schichten das Wachstum der acht Polarisierungsdomänen zu kontrollieren [5]. Eine Gruppe aus Frankreich wies eine eindeutige Beziehung zwischen der magnetischen Spirale und der Achse der ferroelektrischen Polarisierung nach [6]. Die Gruppe aus Berkeley wiederum bedeckte die BiFeO_3 -Schicht mit einer $\text{Co}_{0,90}\text{Fe}_{0,10}$ -Schicht und zeigte, dass die Magnetisierung dieser Legierung an die magnetische Spirale des BiFeO_3 , die ja selbst keine Magnetisierung trägt, koppelt. Als Gesamtsystem verhält sich $\text{BiFeO}_3/\text{Co}_{0,90}\text{Fe}_{0,10}$ somit als Multiferroikum mit starker elektrischer Polarisierung und Magnetisierung. Ein eleganter Trick erlaubte es, eine eindeutige Beziehung zwischen der Polarisierung und der Magnetisierung sowie deren Schaltverhalten

zu erreichen. Dazu erzeugten die Forscher ein Muster aus periodisch angeordneten Domänenstreifen von zwei der acht Polarisierungszustände. In der Schichtebene der Heterostruktur wird die Nettopolarisierung des Streifenmusters eindeutig in eine Nettomagnetisierung der $\text{Co}_{0,90}\text{Fe}_{0,10}$ -Schicht übertragen. Vor allem aber führt die Umkehr der Nettopolarisierung durch eine angelegte elektrische Spannung eindeutig zu einer Umkehr der Nettomagnetisierung [7].

In der jetzt publizierten Arbeit gehen Heron und Mitarbeiter noch einen entscheidenden Schritt weiter [3]. Sie zeigen, dass sich die BiFeO_3 -Polarisierung (und damit die $\text{Co}_{0,90}\text{Fe}_{0,10}$ -Magnetisierung) auch lokal, also innerhalb eines einzelnen Domänenstreifens reversibel umkehren lässt. Wesentlich ist dabei, dass die Umkehr jeweils in zwei Schritten geschieht, in denen die Polarisierung um 71° und um 109° und damit „um die Ecke“ rotiert (Abb. 1). Dies ist energetisch erheblich günstiger als eine direkte 180° -Umkehr. Ein Prozess mit drei 71° -Schaltvorgängen wäre zwar ebenfalls denkbar, scheitert aber an der geometrischen Anisotropie des Schichtsystems.

Der magnetoelektrische Zweistufen-Schaltprozess hat mehrere technologische Vorteile: Er reduziert die Längenskala, auf der das Schaltverhalten sich manifestiert. Während zuvor Domänenmuster mit einer Ausdehnung im Mikrometerbereich betrachtet wurden, lassen sich nun auch Nanostrukturen innerhalb eines solchen Musters deterministisch schalten. Dazu reichen Spannungen von wenigen Volt im Gegensatz zu bislang etwa 100 Volt aus. Die Spannung wird senkrecht zur Schicht angelegt, aber nach wie vor ist es die Polarisierungskomponente in der Schichtebene, die kontrolliert wird.

Als praktische Umsetzung dieses Effekts präsentieren die Wissenschaftler ein Spinventil: Mithilfe weniger Volt wird das magnetische Moment in einer Heterostruktur so geschaltet, dass diese einen elektrischen Strom tendenziell entweder passieren lässt oder blockiert.

Die Arbeit von Heron und Mitarbeitern ist ein gutes Beispiel dafür, dass die stärksten magnetoelektrischen Korrelationen oft nicht im Multiferroikum selbst, sondern in der Wechselwirkung unterschiedlicher Materialien im Kontakt miteinander auftreten. Damit fällt den Grenzflächen eine besondere Bedeutung zu. Zum einen vermitteln sie die Kopplung zwischen den wechselwirkenden Materialien. Zum anderen können Grenzflächen selbst Quelle starker magnetoelektrischer Effekte sein, die aus der lokal reduzierten Geometrie und Symmetrie erwachsen [8]. Eine Grenzfläche besonderer Art sind dabei die Domänenwände, die Bereiche mit unterschiedlicher Polarisierung und/oder Magnetisierung trennen. Im Gegensatz zu

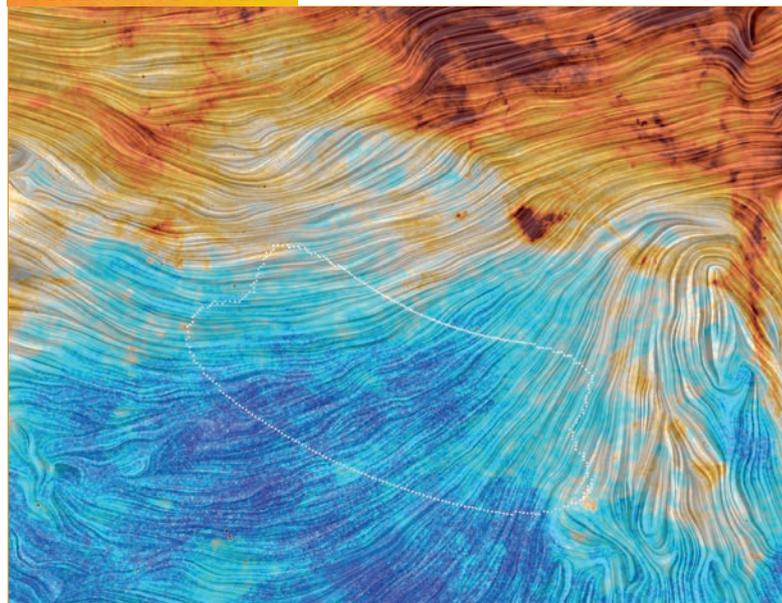
den Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialien sind Domänenwände beweglich und lassen sich jederzeit erzeugen und wieder vernichten. Dies ist ein zusätzlicher wertvoller Freiheitsgrad bei der Entwicklung neuartiger magnetoelektrischer Bauteile [9].

Manfred Fiebig

Prof. Dr. Manfred Fiebig, Departement Materialwissenschaft, ETH Zürich, Vladimir-Prelog-Weg 4, CH-8093 Zürich

- [1] N. A. Hill, *J. Phys. Chem. B* **104**, 6694 (2000)
- [2] M. Fiebig, *J. Phys. D* **38**, R123 (2005)
- [3] J. T. Heron et al., *Nature* **516**, 370 (2014)
- [4] T. Zhao et al., *Nature Materials* **5**, 825 (2006)
- [5] Y.-H. Chu et al., *Nano Lett.* **9**, 1726 (2009)
- [6] D. Lebeugle et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 227602 (2008)
- [7] J. T. Heron et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 217202 (2011)
- [8] M. Fiebig et al., *Nature* **419**, 818 (2002)
- [9] J. Seidel et al., *Nature Materials* **8**, 229 (2009)

VERSTAUBTE DATEN



ESA/Planck Collaboration. Acknowledgment: M.-A. Miville-Deschênes, CNRS – Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-XI, Orsay

Die BICEP2-Kollaboration hat doch keinen Nachweis für die kosmische Inflation gefunden: Das ergibt eine gemeinsame Analyse aller Messdaten für den kosmischen Mikrowellenhintergrund, den die Teams von BICEP2 und der Planck-Mission vorgelegt haben. BICEP2 sowie das Keck-Array haben vom Südpol aus nur bei einer einzigen Frequenz beobachtet, der Planck-Satellit aber in neun Frequenzkanälen, sieben davon mit polarisationsempfindlichen Detektoren. Damit ließ sich der Beitrag des Vordergrund, insbesondere des galaktischen Staubs besser quantifizieren. Die Abbildung zeigt, dass dieser Beitrag in der galaktischen Ebene zwar am größten ist

(braun), dass er aber auch im dem Bereich, den BICEP2 und Keck-Array ins Visier genommen hatten (gestrichelte weiße Linie), nicht zu vernachlässigen ist. Die Textur zeigt die Orientierung des galaktischen Magnetfelds. Nach der gemeinsamen Analyse bleibt also kein signifikantes Signal einer primordialen B-Mode der Polarisierung übrig, der Signatur von Gravitationswellen aus der Inflationsphase. Dafür gelang es, eine weitere Ursache für eine B-Mode zu identifizieren: den Gravitationslinseneffekt, verursacht durch ein kosmisches Netzwerk massereicher Strukturen. (AP)

BICEP2/Keck Array und Planck Collaborations, arXiv:1502.00612 (2015)