

■ Kooperation trotz Frustration

Erstmals wurde ein magnetoelektrisches Multiglas nachgewiesen, das sich in elektrischer sowie magnetischer Hinsicht glasartig verhält.

Materialien, in denen magnetische und elektrische Eigenschaften stark miteinander koppeln, sind vom technologischen Gesichtspunkt aus äußerst interessant. Man stelle sich zum Beispiel ein magnetisches Speichermedium vor, in das sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung ganz ohne Leitungsströme Informationen einschreiben lassen. Der Speicherprozess wäre dadurch schneller, und es würde keine strombedingte Abwärme entstehen.

Die lineare Induktion einer Magnetisierung durch ein elektrisches Feld und die komplementäre Induktion einer elektrischen Polarisierung durch ein magnetisches Feld wurden zwar schon 1896 vorausgesagt und 1960 experimentell nachgewiesen, aber bis vor kurzem galten diese Effekte als prinzipiell zu klein für Anwendungen. Erst als Forscher zu Beginn des 21. Jahrhunderts erkannt hatten, dass sich diese Beschränkung in geeignet strukturierten Materialsystemen überwinden lässt, setzte eine fieberhafte Suche nach neuartigen magnetoelektrischen Materialien ein. Einige der stärksten magnetoelektrischen Kopplungsphänomene fanden sich in Systemen, die gleichzeitig magnetisch und ferroelektrisch geordnet sind und daher Multiferroika heißen [1].

Da die Natur uns aber nur sehr wenige Multiferroika zur Verfügung stellt, versucht man auf alternative Weise, magnetische und elektrische Ordnung zu vereinen. Kompositverbindungen, in denen eine ferromagnetische und eine ferroelektrische Konstituente vermischt oder aufeinander geklebt sind, zeigen mechanisch vermittelte magnetoelektrische Effekte [1]. In epitaktischen Übergitterstrukturen treten insbesondere an ihren Grenzflächen zahlreiche Effekte magnetoelektrischer Natur auf [2]. Denkbar wäre auch, magnetoelektrische Kopplungen in Systemen zu suchen, die zwar nicht über viele Einheitszellen hinweg magnetisch und elektrisch ausgerichtet sind, die aber zumindest im Bereich einiger Einheitszellen über eine solche Ordnung verfügen.

In Gläsern ist dies der Fall. Gläser sind allgemein feste Materialien mit wohldefinierten kurzreichweitigen Wechselwirkungen, aber langreichweitiger Unordnung. Der glasartige Zustand folgt aus der Frustration: Konkurrierende Wechselwirkungsprozesse führen dazu, dass zahlreiche ungeordnete Zustände in energetischer Nähe zum wohlgeordneten Grundzustand existieren, von denen die Atome beim Erstarren einen einnehmen [3].

Die zwei Gesichter des Multiglases

V. V. Shvartsman und Mitarbeiter haben in der Gruppe von W. Kleemann an der Universität Duisburg-Essen nun gezeigt, dass auch Gläser – in einer Ausweitung der zunächst nur für Kristalle geltenden Begriffe – multiferroisches und magnetoelektrisches Verhalten zeigen können. Die Forscher entdeckten, dass sich SrTiO_3 nach der Dotierung mit etwa 2 % Mangan (Mn) sowohl in elektrischer als auch magnetischer Hinsicht glasartig verhält und damit die Bezeichnung „Multiglas“ verdient hat [4].

Die Mn^{2+} -Ionen besetzen in einer Perowskitstruktur Sr^{2+} -Plätze und sind klein genug, um sich entlang einer der sechs kubischen Achsen verlagern zu können (Abb. 1a). Sie bilden dort lokale elektrische Dipolmomente. Die Ionen wechseln bei abnehmender Temperatur immer seltener ihren Platz, bis der elektrische Dipolglaszustand bei $T_g = 38$ K erreicht ist. Die Mn-Ionen verteilen sich zeitlich stabil, aber zufällig. Die magnetische Wechselwirkung zwischen den Mn^{2+} -Spins spiegelt diese Unordnung wider (Abb. 1b). Sie ist ebenfalls räumlich uneinheitlich – „frustriert“ –, sodass keine gleichförmige magnetische Ordnung entstehen kann. In der Folge bilden die magnetischen Mn^{2+} -Dipole eben-

Prof. Dr. Manfred Fiebig, Universität Bonn, Nussallee 14-16, 53115 Bonn

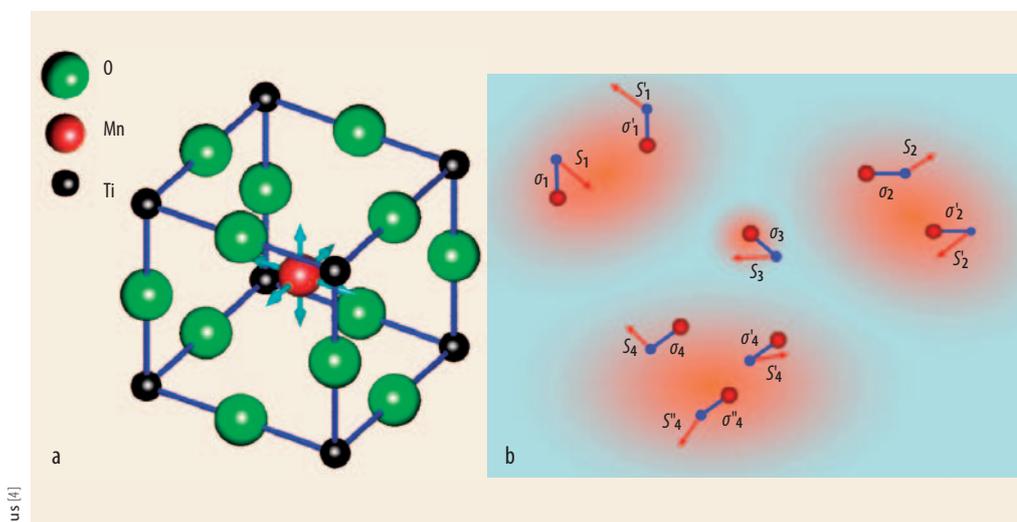


Abb. 1 Die Mn^{2+} -Ionen im SrTiO_3 -Gitter können sich lokal verlagern (a). Im Multiglaszustand existieren polare Cluster, in denen die elektrischen Dipolmomente σ_j (blaue Pfeile) lokal ferroelektrisch und die Mn-Spins S_j (rot) lokal antiferromagnetisch korreliert sind (b).

aus [4]

falls einen glasartig fixierten Zustand, der bei 34 K einsetzt.

Wie lässt sich nun der Multiglaszustand nachweisen? Zum einen beeinflusst die Frequenz in charakteristischer Weise die Temperaturabhängigkeit der elektrischen bzw. magnetischen Polarisierbarkeit. Je tiefer die Temperatur ist, desto träger reagieren die Dipole des erstarrenden Glases auf ein äußeres Feld. Das Maximum der entsprechenden Suszeptibilität verschiebt sich daher mit steigender Frequenz zu höheren Temperaturen. Ein weiteres Indiz für den Glaszustand ist ein Gedächtniseffekt: Die Dipole im Glas verteilen sich nach einiger Zeit entsprechend der Umgebungstemperatur. Die Temperatur wird damit im Glas gespeichert und ist mit einer Suszeptibilitätsmessung selbst nach einer zwischenzeitlichen Temperaturänderung rekonstruierbar. In $(\text{Sr}, \text{Mn})\text{TiO}_3$ wurde der Gedächtniseffekt sowohl mit magnetischen als auch mit elektrischen Suszeptibilitätsmessungen nachgewiesen, was den Multiglaszustand bestätigt.

Obwohl die magnetischen und elektrischen Dipole des Multiglases sich unabhängig voneinander ausrichten, besteht eine ausgeprägte magnetoelektrische Kopplung zwi-

schen ihnen. So zeigt das Multiglas einen starken magnetokapazitiven Effekt, bei dem magnetische und elektrische Felder biquadratisch aneinander koppeln. Das magnetoelektrische Multiglas gilt damit als bedeutende Weiterentwicklung der Multiferroika. Magnetische und elektrische Unordnung existieren gleichzeitig und ersetzen die Koexistenz magnetischer und elektrischer Ordnung. Gleichwohl können die magnetoelektrischen Wechselwirkungen stärker ausgeprägt sein als in kristallinen Systemen. Vor allem verdeutlicht die Entdeckung des magnetoelektrischen Multiglases, dass das Potenzial an Systemklassen mit magnetoelektrischem Verhalten noch längst nicht ausgeschöpft ist – wenn man bereit ist, auch an ungewöhnlichen Stellen danach zu suchen.

Manfred Fiebig

- [1] M. Fiebig, *J. Phys. D* **38**, R123 (2005)
- [2] S. Thiel, G. Hammerl, A. Schmehl, C. W. Schneider und J. Mannhart, *Science* **313**, 1942 (2006)
- [3] M. Henkel, M. Pleimling und R. Sanctuary (Hrsg.), *Ageing and the glass transition*, Springer Lecture Notes in Physics, Springer, Heidelberg (2006)
- [4] V. V. Shvartsman, S. Bedanta, P. Borisov und W. Kleemann, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 165704 (2008)

KURZGEFASST

■ Flippige Torsion

In Boston haben Physiker das winzige Drehmoment gemessen, das auf einen Draht wirkt, wenn darin Elektronenspins umklappen (Spin-Flip). Sie schickten einen Strom durch zwei in Reihe geschaltete Nanodrähte aus ferromagnetischem Kobalt bzw. unmagnetischem Gold. Da die im Kobalt ausgerichteten Elektronenspins im Gold teilweise umklappen, wirkt aufgrund der Drehimpulserhaltung ein Drehmoment von 10^{-20} Nm auf den Draht. Die Messung bestätigt eine zehn Jahre alte Vorhersage deutscher Theoretiker. G. Zolfagharkhani et al., *Nature Nanotech.* **3**, 720 (2008)

■ Von Gamstars und UGOs

Weniger als 1000 detektierte Photonen haben ausgereicht, um mithilfe des im Juni 2008 gestarteten Fermi-Observatoriums einen rotierenden Neutronenstern nur aufgrund seiner Gammastrahlung zu entdecken. Dieser aus-

schließlich im Gammabereich sichtbare Stern (ein „gamstar“) ist vermutlich ein Pulsar, der Radio- und Gammastrahlung in verschiedene Richtungen emittiert, sodass nur die Gammastrahlung die Erde erreicht. Möglicherweise liefern „gamstars“ auch die Erklärung für die seit 25 Jahren bekannten Unidentified Gamma-Ray Objects (UGOs). A. A. Abdo et al., *Science* **322**, 1218 (2008)

■ Instantan durch den Tunnel

Wie lange brauchen Elektronen, um einen Potentialberg zu durchtunneln? Weniger als 34 Attosekunden, lautet die Antwort eines internationalen Physiker-teams. In einem raffinierten Aufbau hat es die Zeit gestoppt, die ein Elektron benötigt, um einem Helium-Atom zu entkommen. Ein rotierendes Laserfeld erzeugte dabei den Potentialberg und diente gleichzeitig als Stoppuhr. Verschiedene theoretische Ansätze sagen eine deutlich längere Zeit vorher. P. Eckle et al., *Science* **322**, 1525 (2008)