

Kraft nötig, damit sich die Platten mit einer relativen Geschwindigkeit  $U$  bewegen.

Solche in Flussrichtung orientierten walzenähnlichen Strukturen oder „Streaks“ werden in wandgebundenen turbulenten Scherströmungen häufig beobachtet, und es scheint eine Verwandtschaft mit den tertiären Lösungen zu bestehen [10]. Allerdings gab es wenig Hoffnung, diese Lösungen im Labor zu beobachten, da sie fast immer instabil sind.

Es ist daher überraschend, dass es Hof et al. gelungen ist, die vorhergesagten tertiären Lösungen in ihren Experimenten zu beobachten [1]. Indem sie sorgfältig präparierte Strömungen in einem etwa 30 Meter langen Rohr auf spezielle Weise stören und mit einer raffinierten Technik visualisieren, zeigen sie, dass sich die laufenden Wellen zu mindestens als transiente Phänomene realisieren lassen. Die Abbildung zeigt die gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Strukturen.

Das Rätsel der Beobachtbarkeit der instabilen Lösungen lässt sich wie folgt aufklären: Der sich verändernde Zustand der Rohrströmung entspricht einer Trajektorie im hochdimensionalen Lösungsraum der Bewegungsgleichungen. Die tertiären Lösungen (und die komplexeren, die durch weitere Bifurka-

tionen aus ihnen hervorgehen) sind in bestimmten Richtungen instabil, aber sie ziehen Trajektorien aus den meisten anderen Richtungen an. Die Trajektorien halten sich daher lange in ihrer Nähe auf, bevor sie „vertrieben“ werden. Diese Lösungen kann man daher als virtuelle Verkehrsarterien betrachten, die in dem Maße sichtbar werden, wie sie ein „Impulspaket“ anziehen, und es eine Zeitlang transportieren, bis sie es an eine andere Arterie „ausliefern“ und zerfallen. Die Gesamtheit aller Verkehrsadern bestimmt dann den turbulenten Zustand.

Die von Hof et al. berichteten Ergebnisse sind einer Zusammenarbeit von Ingenieuren, Physikern und Mathematikern zu verdanken. Sie öffnen die Tür nicht nur zu einem vollständigen Verständnis des Übergangs zur Turbulenz, sondern auch zu neuen Möglichkeiten, diesen zu beeinflussen und zu kontrollieren, mit weitreichenden Implikationen für technische Anwendungen. Die neuen Ergebnisse zeigen auch, dass es nie zu spät ist, ein altes Problem in Angriff zu nehmen, insbesondere dann nicht, wenn dies auf interdisziplinäre Weise geschieht.

FRIEDRICH H. BUSSE

- [1] B. Hof et al., *Science* **305**, 1594 (2004)  
 [2] G. H. L. Hagen, *Pogg. Ann.* **46**, 423 (1839).

- [3] O. Reynolds, *Proc. R. Soc. London A* **35**, 84 (1883)  
 [4] J. G. M. Eggels et al., *J. Fluid Mech.* **268**, 175 (1994)  
 [5] M. Nagata, *J. Fluid. Mech.* **217**, 519 (1990)  
 [6] R. M. Clever und F. H. Busse, *J. Fluid Mech.* **234**, 511 (1992)  
 [7] F. Waleffe, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4140 (1998)  
 [8] H. Faisst und B. Eckhardt, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 224502 (2003)  
 [9] H. Wedin und R. R. Kerswell, *J. Fluid Mech.* **508**, 333 (2004)  
 [10] F. Waleffe, *Phys. Fluids* **15**, 1517 (2003)

## Multitalente für die Datenspeicherung?

Ferromagnetische Ferroelektrika (Multiferroika) könnten einen neuen Weg zur Datenspeicherung eröffnen. In diesen Materialien lässt sich die magnetische Ordnung mit Hilfe externer elektrischer Felder beeinflussen. Nun ist es sogar gelungen, die Magnetisierung in einem  $\text{HoMnO}_3$ -Kristall durch ein externes elektrisches Feld gezielt zu orientieren und den Ferromagnetismus als solchen an- oder abzuschalten.

Schon vor 1900 postulierte Pierre Curie die Existenz des magnetoelektrischen Effekts, d. h. die Induktion einer Magnetisierung durch ein elektrisches Feld oder die Induktion einer elektrischen Polarisation durch ein Magnetfeld [1]. Dieses Phänomen wurde in den 1960er und 70er Jahren erstmals untersucht [2, 3], allerdings gab es zu jener Zeit nur wenige Materialien mit messbaren magnetoelektrischen Effekten. Aufgrund von Fortschritten bei der Herstellung und dem Verständnis von Manganaten mit Perowskitstruktur erlebt dieses Forschungsgebiet aber in jüngster Zeit eine Renaissance. Kürzlich wurde entdeckt, dass in den magnetischen Ferroelektrika dieser Kristallklasse die magnetoelektrischen Effekte diejenigen der normalen Ferroelektrika um Größenordnungen übertreffen [4, 5]. Durch die ungewöhnliche Kombination von optischen Spektroskopietechniken mit Neutronenstreuexperimenten ist es nun einer Gruppe von Physikern aus Berlin und Tübingen erstmals gelungen, die magnetoelektrischen Phasenübergänge in  $\text{HoMnO}_3$  auf mikroskopischer Ebene zu erklären und die mit ihnen verbundenen magnetoelektrischen Effekte auf eindrucksvolle Weise darzustellen [6].

Prof. Dr. Friedrich H. Busse, Institut für Physik, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

## KURZGEFASST...

### ■ Unschärfe im Test

Die Heisenbergsche Unschärferelation gilt auch für Winkelposition  $\varphi$  und Drehimpuls  $L$ . Das haben Physiker aus Glasgow und Strathclyde in Großbritannien nun erstmals experimentell bestätigt. Mit einem speziellen Absorber präparierten sie zunächst einen Lichtstrahl, dessen Winkelposition gaußverteilt ist, und maßen anschließend die Verteilung des Drehimpulses mit Hilfe eines geeigneten holographischen Beugungsgitters. Da die Winkelwerte nur in einem Intervall der Länge  $2\pi$  liegen können und die Drehimpulswerte diskret sind, ist die Unschärferelation komplizierter als diejenige für Ort und Impuls; die Ergebnisse stimmen aber mit der Theorie überein.

S. Franke-Arnold et al., *New. J. Phys.* **6**, 103 (2004)

### ■ Laserbeschleunigung mit Qualität

Die Beschleunigung von Teilchen mit Hilfe von Plasmen und Hochenergielasern könnte eine platz- und kostensparende Alternative zu den immer größeren konventionellen Beschleunigern bieten. Nun ist es gleich drei Forscherteams gelungen zu zeigen, dass sich mit Hilfe der sog.

Plasma-Wakefield-Methode stark gerichtete Elektronenstrahlen mit einer sehr schmalen Energieverteilung (im 100 MeV-Bereich) erzeugen lassen. Dazu werden 30–50 fs kurze Laserpulse mit Leistungen von 10–50 TW in einen nur 2 mm langen Strahl aus ionisiertem Gas fokussiert. Die Laser erzeugen eine Plasmawelle, auf denen die Elektronen quasi „surfen“.

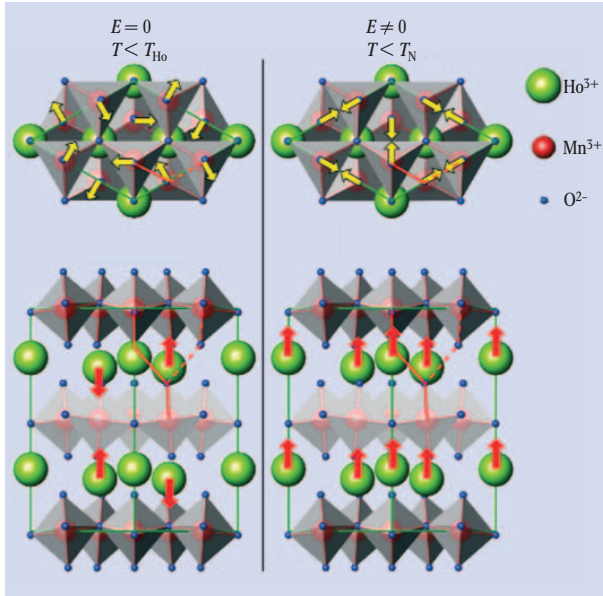
S. P. D. Mangles et al., *Nature* **431**, 535; C. G. R. Geddes et al., *Nature* **431**, 538; J. Faure et al., *Nature* **431**, 541 (2004)

### ■ Quantenregister aus fünf Atomen

Physiker der Uni Bonn haben ein Quantenregister für fünf Qubits entwickelt, bei dem jedes Qubit durch ein neutrales Cäsiumatom repräsentiert wird. Die Atome befinden sich in einer optischen Dipolfalle und lassen sich mithilfe eines äußeren Magnetfeldes unter Ausnutzung des Zeeman-Effekts einzeln ansprechen. Das Register lässt sich im Prinzip auf viele Atome und Qubits erweitern, für einen Quantencomputer fehlt aber noch ein Quantengatter, in dem die eigentlichen Rechnungen durchgeführt werden.

D. Schrader et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 150501 (2003)

Die elektrischen und magnetischen Eigenschaften dieser Substanz hängen vom subtilen Zusammenspiel der Anordnung der Atome im Kristall sowie der Wechselwirkung zwischen den magnetischen Momenten der  $Mn^{3+}$ - sowie der  $Ho^{3+}$ -Ionen ab. Bereits bekannt war, dass  $HoMnO_3$  bei tiefen Temperaturen



Die Kristallstruktur von  $HoMnO_3$  ohne (links) bzw. mit angelegtem elektrischem Feld (rechts), in Draufsicht (oben) bzw. Seitenansicht (unten). Die Pfeile zeigen die Orientierungen der magnetischen Momente der  $Mn^{3+}$ - bzw.  $Ho^{3+}$ -Ionen. Bei angelegtem elektrischem Feld verschiebt sich die O-Mn-O-Achse innerhalb der  $MnO_5$ -Koordinationspolyeder leicht. Dadurch ändert sich die magnetische Austauschkopplung zwischen den  $Ho^{3+}$ -Momenten, die ferromagnetisch ordnen (aus [6]).

ohne angelegtes elektrisches Feld verschiedene magnetische Phasen durchläuft: Unterhalb der Néel-Temperatur  $T_N=75$  K ordnen die  $Mn^{3+}$ -Momente antiferromagnetisch, unterhalb von  $T_{Ho} = 4,6$  K existiert eine antiferromagnetische Ordnung der  $Ho^{3+}$ -Momente. Setzt man jedoch den Kristall einem elektrischen Feld von  $\pm 10^5$  V/m aus, so existiert unterhalb von  $T_N$  überraschenderweise eine ferromagnetische Ordnung der  $Ho$ -Momente, wobei die induzierte Magnetisierung parallel zur elektrischen Feldrichtung ist (Abb., rechts). Die Anordnung der magnetischen Momente lässt sich mit optischen Methoden untersuchen. Thomas Lottermoser und seine Koautoren haben die Symmetrieänderungen in der Anordnung der  $Mn^{3+}$ -Spins verfolgt, indem sie die Probe mit Laserlicht beleuchteten und das in der Probe erzeugte, bei der doppelten Frequenz abgestrahlte Licht (2. Harmonische) detektierten. Das magnetische Moment der  $Ho^{3+}$ -Spins wurde durch die Drehung der

Polarisationsebene des Lichts (Faraday-Rotation) nachgewiesen [6].

Um den mikroskopischen Ursprung dieses Effekts zu verstehen, ist eine Betrachtung der bei hohen Temperaturen auftretenden Übergänge zwischen Phasen hilfreich, bei denen die elektrischen Dipolmomente unterschiedlich geordnet sind. Bei hexagonalen Manganaten wie  $HoMnO_3$  sind die Sauerstoff-Koordinationspolyeder in der Hochtemperaturphase ( $T > 1300$  K) aufrecht und unverzerrt, und der Kristall ist paraelektrisch. Beim ersten von zwei unter Abkühlung beobachteten Phasenübergängen verkippen die Koordinationspolyeder leicht; diese Phase ist antiferroelektrisch. Erst ein zweiter Phasenübergang bei  $T=875$  K, bei dem sich die O-Mn-O-Achse innerhalb der Koordinationspolyeder aus dem Polyederzentrum verschiebt, führt aufgrund der Symmetriebrechung zu einer ferroelektrischen Ordnung und somit zu einer spontanen elektrischen Polarisation [6].

Die magnetoelektrischen Phasenübergänge in  $HoMnO_3$  bei tiefen Temperaturen lassen sich nun analog zu den ferroelektrischen Phasenübergängen bei hohen Temperaturen verstehen. Dies haben Messungen mit Neutronen und Röntgenbeugungsmethoden gezeigt, die einen Einblick in die magnetische Struktur von Kristallen auf atomarer Ebene erlauben [6]. Bei tiefen Temperaturen ( $T_{Ho}=4,6$  K) bewirkt ein Übergang zur antiferromagnetischen Ordnung der  $Ho^{3+}$ -Spinmomente ebenfalls eine Verschiebung der O-Mn-O-Achse innerhalb der Koordinationspolyeder (Abb., links). Dadurch wird die magnetische Austauschkopplung zwischen den  $Mn^{3+}$ -Momenten in der Ebene verändert, was durch Messungen der 2. Harmonischen nachgewiesen werden konnte. Der Hintergrund ist die „magnetische Frustration“, die für Spins auf einem Dreiecksgitter mit antiferromagnetischer Austauschkopplung zwischen nächsten Nachbarn auf Grund der Symmetrie eintritt und aus der Physik der Spingläser bekannt ist. Bei unverzerrten Polyedern sind die  $Mn^{3+}$ -Spins auf dem Dreiecksgitter in den  $Mn^{3+}$ -Ebenen nahezu perfekt „frustriert“, aber schon durch eine geringe Verschiebung der O-Mn-O-Achse (innerhalb der Sauerstoff-Koordinationspolyeder) von nur 2 % lässt sich die Frustration überwinden (Abb., oben). Die Wirkung eines angelegten

elektrischen Feldes unterhalb der Néel-Temperatur lässt sich demnach folgendermaßen verstehen: Über die feldinduzierte Verschiebung der O-Mn-O-Achse verändert sich die magnetische Kopplung zwischen den  $Mn^{3+}$ - und  $Ho^{3+}$ -Spins, wodurch eine ferromagnetische Ordnung der  $Ho^{3+}$ -Momente entlang der c-Achse hervorgerufen wird (Abb., rechts). Bei diesem Vorgang ordnen sich etwa 40 % der  $Ho^{3+}$ -Momente (jeweils  $3-4 \mu_B$ ) parallel zum angelegten elektrischen Feld [6]. Die feldinduzierte Magnetisierung ist somit relativ groß.

Einer japanischen Forschergruppe [5] gelang es kürzlich, in einem anderen ferroelektrischen Perovskitmanganat ( $TbMnO_3$ ) den im Vergleich zum hier beschriebenen Effekt inversen magnetoelektrischen Prozess nachzuweisen. Bei tiefen Temperaturen ließ sich durch das Anlegen eines starken Magnetfelds die elektrische Polarisation in Magnetfeldrichtung gezielt umschalten.

Beide magnetoelektrischen Effekte eignen sich im Prinzip für Anwendungen im Bereich der Datenspeicherung. So könnte man z.B. das Umschalten der Magnetisierung von Speicherzellen im MRAM (Magnetic Random Access Memory) ohne äußeres magnetisches Feld erreichen, welches derzeit durch Ströme in Leiterbahnen erzeugt wird und sehr langreichweitig ist. Der Vorteil würde in einem geringeren Energieverbrauch des Speichers liegen und eine Verringerung der unerwünschten Wechselwirkung mit benachbarten Speicherzellen ermöglichen. Für den kommerziellen Einsatz wäre es jedoch notwendig, zunächst Materialien zu finden, bei denen elektrisch induzierte magnetischen Phasen schon bei Raumtemperatur und darüber auftreten.

GEORG WOLTERS DORF UND  
GÜNTHER BAYREUTHER

Dr. Georg Woltersdorf, Prof. Dr. Günther Bayreuther, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Regensburg, 93040 Regensburg

- [1] P. Curie, J. Phys. **3**, 393 (1894)
- [2] T. H. O'Dell, The Electrodynamic of Magneto-Electric Media, Amsterdam 1970
- [3] A. J. Freeman und H. Schmid (Hrsg.), Magnetolectric Interaction Phenomena in Crystals, London 1975
- [4] C. W. Nan et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 3831 (2002)
- [5] T. Kimura et al., Nature **426**, 55 (2003)
- [6] T. Lottermoser et al., Nature **430**, 541 (2004)