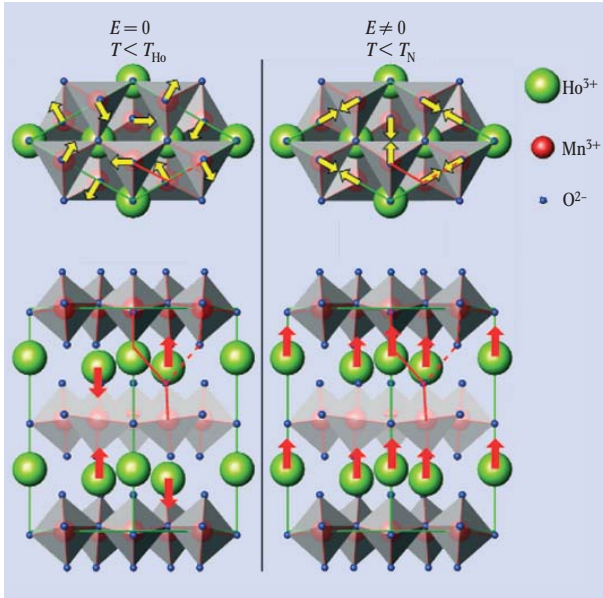


## Multitalente zur Datenspeicherung?

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 Ferromag-



Die Kristallstruktur von  $\text{HoMnO}_3$  ohne (links) bzw. mit angelegtem elektrischem Feld (rechts), in Draufsicht (oben) bzw. Seitenansicht (unten). Die Pfeile zeigen die Orientierungen der magnetischen Momente der  $\text{Mn}^{3+}$ - bzw.  $\text{Ho}^{3+}$ -Ionen. Bei angelegtem elektrischem Feld verschiebt sich die O-Mn-O-Achse innerhalb der  $\text{MnO}_5$ -Koordinationspolyeder leicht. Dadurch ändert sich die magnetische Austauschkopplung zwischen den  $\text{Ho}^{3+}$ -Momenten, die ferromagnetisch ordnen (aus [6]).

netismus 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 Kris-

tallklasse 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].

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  $\text{Mn}^{3+}$ - sowie der  $\text{Ho}^{3+}$ -Ionen ab. Bereits bekannt war, dass  $\text{HoMnO}_3$  bei tiefen Temperaturen ohne angelegtes elektrisches Feld verschiedene magnetische Phasen durchläuft: Unterhalb der Néel-Temperatur  $T_N=75$  K ordnen die  $\text{Mn}^{3+}$ -Momente antiferromagnetisch, unterhalb von  $T_{Ho}=4,6$  K existiert eine antiferromagnetische Ordnung der  $\text{Ho}^{3+}$ -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 Kollegen haben die Symmetrieänderungen in der Anordnung der  $\text{Mn}^{3+}$ -Spins verfolgt, indem sie die Probe mit Laserlicht beleuchteten und das in der Probe erzeugte, bei der doppelten Frequenz abgestrahlte Licht detektierten. Das magnetische Moment der  $\text{Ho}^{3+}$ -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  $\text{HoMnO}_3$  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 verkippeln 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  $\text{HoMnO}_3$  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 ( $T_{Ho}=5$  K) bewirkt ein Übergang zur antiferromagnetischen Ordnung der  $\text{Ho}^{3+}$ -Spinmomente ebenfalls eine Verschiebung der O-Mn-O-Achse innerhalb der Koordinationspolyeder (Abb., links). Dadurch wird die magnetische Austauschkopplung zwischen den  $\text{Mn}^{3+}$ -Momenten in der Ebene verändert, was durch Messungen 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  $\text{Mn}^{3+}$ -Spins auf dem Dreiecksgitter in den  $\text{Mn}^{3+}$ -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  $\text{Mn}^{3+}$ - und  $\text{Ho}^{3+}$ -Spins, wodurch eine ferromagnetische Ordnung der  $\text{Ho}^{3+}$ -Momente entlang der c-Achse hervorgerufen wird (Abb., rechts). Bei diesem Vorgang ordnen sich etwa 40 % der  $\text{Ho}^{3+}$ -Momente (jeweils  $3-4 \mu_B$ ) parallel zum angelegten elektrischen Feld [6]. Die feldin-

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

duzierte Magnetisierung ist somit relativ groß.

Einer japanischen Forschergruppe [5] gelang es kürzlich, in einem anderen ferroelektrischen Perovskitmanganat ( $\text{TbMnO}_3$ ) 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

- [1] *P. Curie*, J. Phys. **3**, 393 (1894)
- [2] *T. H. O'Dell*, The Electrodynamics 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)