

# Wasser, Übergänge und Spins

Highlights aus dem Programm des Arbeitskreises Festkörperphysik

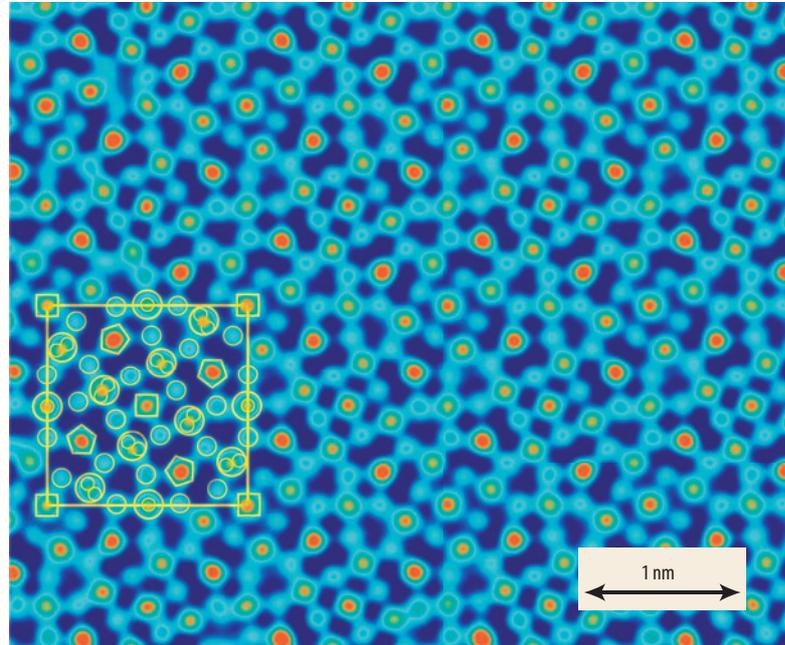
Rainer Scharf

Der Arbeitskreis Festkörperphysik (AKF, inzwischen: Sektion Kondensierte Materie, SKM) hatte zu seiner diesjährigen Frühjahrstagung nach Berlin an die Technische Universität eingeladen. Knapp 5600 Physikerinnen und Physiker nahmen an der Tagung teil, hielten insgesamt 2929 Vorträge und präsentierten 1679 Poster. Es folgt eine kleine Auswahl aus der großen Themenvielfalt, die diese Tagung geboten hat.

## Extreme Elektronenmikroskopie

Am Tagungsort, an der ehemaligen Technischen Hochschule Berlin, bauten Ernst Ruska und Max Knoll 1931 das erste Elektronenmikroskop. Inzwischen können Transmissionselektronenmikroskope Details auflösen, die kleiner sind als ein Angström. Auf welche Weise dies möglich geworden ist, beschrieb Knut Urban vom Forschungszentrum Jülich. Der entscheidende Schritt dafür war die Korrektur der sphärischen Aberration der elektromagnetischen Linsen. Sie wurde erst in den Neunzigerjahren möglich, als es Max Haider am EMBL in Heidelberg gelang, im Rahmen eines Projektes der Volkswagenstiftung, an dem auch Urban beteiligt war, ein von Harald Rose an der TU Darmstadt berechnetes Konzept zu realisieren, das auf Multipolllinsen beruht.

Den Durchbruch hin zu atomarer Auflösung brachte die Idee, die sphärische Aberration um einige Prozent überzukompensieren, also negativ zu machen. Damit lässt sich die von den Atomen gelieferte Phaseninformation im Elektronenwellenfeld in Amplitudeninformation umwandeln. Der so erzielte hohe Kontrast macht auch sehr schwach streuende Atomarten wie



Ultradünne epitaktische Schichten der sog. Relaxoren, zu denen das komplexe Oxid  $\text{Ca}_{0,28}\text{Ba}_{0,72}\text{Nb}_2\text{O}_5$  gehört, versprechen Anwendungen z.B. in der Kommunikationstechnik, zur holographischen Datenspeicherung oder als pyroelektrische De-

Sauerstoff oder Stickstoff erkennbar, die zuvor der Elektronenoptik nicht zugänglich waren. Die neue Mikroskopie in atomaren Dimensionen lässt sich nur auf der Basis der Quantenmechanik verstehen. Die Elektronenoptik wird dabei wie ein Interferometer betrieben. Die so erzielten „Bilder“ betrachtet man als reine Elektroneninterferenzmuster, deren Information sich erst auf der Basis numerischer Lösungen der Schrödinger-Gleichung erschließen lässt.

Mit diesem Verfahren konnten Urban und seine Mitarbeiter erstmals das für die Natur der Supraleitung in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  so wichtige Phänomen der Sauerstoff-Leerstellenordnung nachweisen. Bei Untersuchungen an dünnen Schichten aus  $\text{BaTiO}_3$  gelang es, die Sauerstoffbelegung an Gitterfehlstellen wie Zwillingsgrenzen mit

tektoren. Die ultrahochauflösende Elektronenmikroskopie erlaubt es erstmals, den Sauerstoff (kleine Kreise) abzubilden und dessen Konzentration atomar zu bestimmen. (große Kreise: Niob; Fünfecke: Barium; Quadrate: Kalzium)

atomarer Genauigkeit zu messen. In ferroelektrischen Bleizirkontitanat-Dünnschichten war es möglich, die Verschiebung der positiv und negativ geladenen Ionen in der Einheitszelle auf besser als 5 pm genau zu messen. Daraus ließ sich die Richtung der elektrischen Polarisationsdipole und die Breite der Domänenwände mit atomarer Präzision bestimmen. Dabei zeigte sich, dass die Domänenwände sehr breit waren und sich über einige Einheitszellen erstreckten, um die in ihnen steckende elektrische Feldenergie möglichst klein zu halten. Urban beschrieb diese Untersuchung als ein Beispiel dafür, dass man in Zukunft die Werte kritischer physikalischer Parameter direkt aus atomaren Verschiebungen im Pikometerbereich, Atom für Atom, ermitteln kann.

## Die 63 Rätsel des Wassers

Wasser ist eine nahezu allgegenwärtige Substanz, deren Eigenschaften jedoch alles andere als „normal“ sind, betonte Eugene Stanley von der Boston University. Üblicherweise werden Flüssigkeiten mit abnehmender Temperatur dichter und weniger kompressibel, doch beim Wasser ist es anders. Unterhalb von 46 °C steigt seine Kompressibilität, seine Dichte nimmt unterhalb von 4 °C ab. Ein weiteres Beispiel für untypisches Verhalten des Wassers ist die Zunahme seiner Wärmekapazität bei abnehmender Temperatur unterhalb von 35 °C. Insgesamt 63 solcher Anomalien weist das Wasser im flüssigen oder festen Zustand auf, für die es noch keine schlüssige Erklärung gibt.

Das komplexe Verhalten des Wassers rührt daher, dass seine Moleküle unregelmäßig geformte und elektrisch geladene Tetraeder sind. Das Wechselwirkungspotential zwischen den Molekülen hat nicht nur ein Minimum, sondern zwei, die sich durch die Orientierung und die Abstände der benachbarten Molekülcluster unterscheiden. Dies führt dazu, dass zwei konkurrieren-

de Längenskalen auftreten, welche die Eigenschaften des Wassers prägen. Computersimulationen haben ergeben, dass Wasser unterhalb von -120 °C zwei amorphe Phasen unterschiedlicher Dichte besitzt, zwischen denen bei einem Druck von 0,2 GPa ein Phasenübergang 1. Ordnung stattfindet. Oberhalb von -100 °C kann Wasser als unterkühlte Flüssigkeit vorliegen. Zwischen -120 °C und -100 °C vermutet man ein Gebiet mit zwei flüssigen Phasen unterschiedlicher Dichte, die wie die amorphen Phasen durch eine Phasenübergangslinie voneinander getrennt sind. Diese Linie endet in einem kritischen Punkt, sodass es möglich ist, die beiden Flüssigkeiten stetig ineinander umzuwandeln. Ob dies der Fall ist, sollen experimentelle Untersuchungen der Schmelzkurven der polymorphen Formen von Eis unter hohem Druck klären.

Ohne Wasser ist irdisches Leben undenkbar. Stanley sagte pointiert: Solange das Wasser nicht verstanden ist, kann man auch die Biologie nicht verstehen. Als Beispiel für diesen engen Zusammenhang nannte er den Glasübergang, den viele hydrierte Proteine bei etwa

220 K aufweisen. Oberhalb des Übergangs zeigen die Proteine diffusives Verhalten, unterhalb führen sie nur noch Schwingungen aus und verlieren ihre biologische Funktionalität. Stanley und seine Mitarbeiter vermuten, dass sich dieser Glasübergang auf einen Phasenübergang des Hydrationswassers zurückführen lässt. Dabei könnte es sich um den schon erwähnten Übergang zwischen zwei flüssigen Formen des Wassers handeln, der allerdings bei deutlich tieferen Temperaturen vermutet wird. So schnell gibt das Wasser seine Geheimnisse nicht preis.

## Unkonventioneller Quantenphasenübergang

Thermische Schwankungen treiben klassische Phasenübergänge, wie das Schmelzen von Eis oder die Entmagnetisierung eines Ferromagneten durch Erhitzen. Am absoluten Temperaturnullpunkt, wo diese klassischen Fluktuationen verschwinden, können Quantenfluktuationen ihre Rolle übernehmen und zu einem Quantenphasenübergang führen. Dabei wechselt ein physikalisches System seinen Grundzustand, wenn sich ein nicht-thermischer Kontrollparameter wie der Druck oder ein Magnetfeld verändert. In den letzten Jahren sind Quantenphasenübergänge intensiv untersucht worden, da sie auch die bei höheren Temperaturen auftretenden physikalischen Eigenschaften beeinflussen und zu neuartigen Phasen wie der unkonventionellen Supraleitung führen können. Zudem zeigt sich an ihnen ein Verhalten, das über die Standardtheorie der kritischen Phänomene hinausgeht und in keine der bekannten Universalitätsklassen fällt.

Dieses unkonventionelle Verhalten haben Philipp Gegenwart von der Universität Göttingen und seine Kollegen am Schwere-Fermionen-Metall  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  (YRS) experimentell studiert, das eine schwache antiferromagnetische Ordnung zeigt. Ein kleines Magnetfeld kann die magnetischen Fluktuationen im Metall soweit verstärken, bis

### GAEDE-PREIS

Jun. Prof. Dr. Stefan G. Mayr (Mitte) von der Universität Göttingen erhielt in Berlin für seine Untersuchungen zur Entstehung selbstorganisierter Nanostrukturen an Oberflächen und beim Wachstum dünner Schichten mittels Experiment und Computersimulation den Gaede-Preis 2008 der Deutschen Vakuumgesellschaft (DVG) aus den

Händen des DVG-Präsidenten Karl Jouston (links). Zum Preis gehört traditionell auch ein Modell der Gaedeschen Molekular-Luftpumpe, das der Forschungs- und Entwicklungsleiter der Firma Oerlikon Leybold Vakuum GmbH in Köln, Ulrich Jung (rechts), überreichte.



J. Röhl

die antiferromagnetische Ordnung am quantenkritischen Punkt zusammenbricht. Das würde ins Standardbild passen, wonach die Schwankungen eines Ordnungsparameters über immer größere Längenskalen korreliert sind, bis sie schließlich zum Phasenübergang führen. Doch thermodynamische Messungen an YRS haben gezeigt, dass neben den Schwankungen des magnetischen Ordnungsparameters auch noch elektronische Fluktuationen auftreten und zusammen mit ihnen kritisch werden.

Als ein Schwere-Fermionen-Metall enthält YRS ein Gitter aus f-Elektronen, die bei hohen Temperaturen lokalisiert sind. Die Kondo-Wechselwirkung schirmt bei tiefen Temperaturen die magnetischen Momente dieser Elektronen ab. Dabei entstehen schwere, aber dennoch bewegliche elektronische Quasiteilchen, die sich mit Landaus Theorie der Fermi-Flüssigkeit beschreiben lassen. Die an YRS gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass diese Quasiteilchen

bei Annäherung an den Quantenphasenübergang immer schwerer werden und schließlich aufbrechen. Damit ändern sich zusätzlich zum magnetischen Grundzustand auch die elektronischen Eigenschaften, und ein Lokalisierungsübergang der f-Elektronen tritt auf. Um diese Experimente theoretisch zu beschreiben, ist es daher erforderlich, neben den Schwankungen des Ordnungsparameters auch die innere Natur der aus f-Elektronen und Leitungselektronen zusammengesetzten schweren Quasiteilchen zu berücksichtigen.

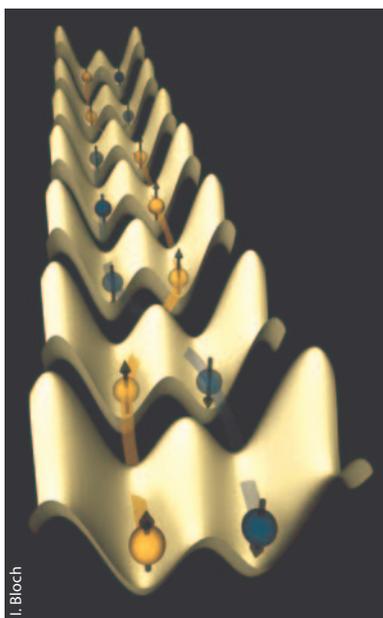
### Ultrakalte Gase und Quantenmagnetismus

Mit ultrakalten atomaren Gasen in Lichtgittern lassen sich viele wichtige Probleme der Festkörperphysik untersuchen. So hat man mit bosonischen Atomen den Übergang vom Mott-Isolator zur Supraflüssigkeit realisiert und die Anderson-Lokalisierung beobach-

tet. Mit fermionischen Atomen, deren Wechselwirkung durch eine Feshbach-Resonanz variiert wurde, gelang es, den Übergang von einem BCS-Zustand aus atomaren Cooper-Paaren zu einem Bose-Einstein-Kondensat aus bosonischen Molekülen zu verfolgen. Wie Immanuel Bloch von der Universität Mainz berichtete, haben er und seine Mitarbeiter mit bosonischen Atomen in Lichtgittern die Superaustauschwechselwirkung untersucht, die dem Quantenmagnetismus in stark korrelierten elektronischen Materialien zugrunde liegt und die möglicherweise bei der Hochtemperatur-Supraleitung eine wichtige Rolle spielt.

Um magnetische Systeme zu modellieren, nimmt man vereinfachend an, dass die Elektronenspins auf einem Raumgitter sitzen und mit benachbarten Spins wechselwirken. Das kann durch Austauschwechselwirkung geschehen, bei der die Austauschsymmetrie und die Coulomb-Abstoßung der überlappenden Elektronenorbi-

tale zusammenspielen. Doch auch wenn der Überlapp verschwindet, können Nachbarspins wechselwirken, indem die Spins virtuell zu ihren Nachbarn und wieder zurück tunneln. Um diese Superaustauschwechselwirkung zu beobachten, haben Bloch und Mitarbeiter ein Bose-Einstein-Kondensat aus ca. 80 000 Rubidium-87-Atomen in ein dreidimensionales Lichtgitter mit zunächst symmetrischen Doppel-



Ultrakalte Rubidium-Atome in einem Lichtgitter sind ein Modellsystem, um den Quantenmagnetismus zu untersuchen.

muldenpotentialen gebracht. Die beiden Spin-Einstellungen haben sie durch zwei Zeeman-Niveaus realisiert. Nach der Vorbereitung waren die Spins längs einer Gitterachse antiferromagnetisch geordnet, wobei in jeder Doppelmulde links ein aufwärts- und rechts ein abwärtsgerichteter Spin saß.

Aufgrund der Superaustauschwechselwirkung konnten die Spins in den Doppelmulden ihre Plätze tauschen. Die Messungen ergaben, dass diese Spindynamik im Wesentlichen zwei Frequenzen enthielt, aus denen sich die beiden Parameter des Bose-Hubbard-Modells bestimmen ließen, das die Spindynamik näherungsweise beschreibt. War das Doppelmuldenpotential stark asymmetrisch, so änderte die Superaustauschwechselwirkung ihr Vorzeichen von +

(ferromagnetisch) zu – (antiferromagnetisch). Die Wechselwirkung der Spins in einer Doppelmulde ließ sich somit in Größe und Vorzeichen kontrollieren. Dadurch ergibt sich eine neue Möglichkeit, die Wechselwirkung zwischen Spins in optischen Gittern maßzuschneidern. Auf diese Weise können Spins mit mehreren ihrer Nachbarn verschränkt werden, sodass sie einen Cluster-Zustand bilden, den man für Quantenberechnungen nutzen könnte.

### Ein Maser mit einem künstlichen Atom

Mit einem einzelnen Atom kann man Laserstrahlung erzeugen, wenn es nur stark genug an eine Mode des elektromagnetischen Feldes gekoppelt ist. Dazu lässt man z. B. angeregte Atome nacheinander einzeln in einen Hohlraum von sehr hoher Güte fliegen, in dem die von ihnen abgestrahlten Photonen sehr lange überleben und nachfolgende Atome zu induzierter Emission veranlassen. In dem Ein-Atom-Maser, den Yasunobu Nakamura von den NEC Laboratorien in Tsukuba und seine Kollegen entwickelt haben, ist es ein und dasselbe künstliche Atom auf einem Halbleiterchip, das viele Mikrowellenphotonen in einen supraleitenden Resonator emittiert.

Das künstliche Atom, ein sog. Josephson-Ladungs-Qubit, besteht aus einer supraleitenden Aluminiuminsel, die durch zwei Tunnelkontakte mit einer ebenfalls supraleitenden Erdung verbunden ist. Von der Erdung können Cooper-Paare auf die Insel tunneln. Das Qubit lässt sich durch die beiden Zustände  $|0\rangle$  und  $|2\rangle$  beschreiben, bei denen sich kein Elektron oder ein Cooper-Paar auf der Insel befindet. Die beiden Zustände unterscheiden sich durch eine Ladungsenergie, die eine Elektrode regulieren kann. Ein weiterer Tunnelkontakt verbindet die Insel mit einem Drain, über den einzelne Elektronen von der Insel abfließen können. Schließlich ist die Insel noch stark an einen Mikrowellen-

resonator gekoppelt, der aus einem Niob-Wellenleiter besteht.

Sitzt ein Cooper-Paar auf der Insel, so ist der Maser in seinem Grundzustand  $|2\rangle$ . Eine Drain-Spannung bricht das Cooper-Paar auf und entzieht der Insel ein Elektron. Dadurch wird der Maser inkohärent gepumpt. Dann geht auch das zweite Elektron von der Insel zum Drain über, und der Maser ist in seinem angeregten Zustand  $|0\rangle$ . Sobald ein Cooper-Paar von der Erdung auf die Insel tunnelt, kehrt der Maser in seinen Grundzustand zurück, und die freiwerdende Energie gelangt als Mikrowellenphoton mit einer Frequenz von 9,899 GHz in den Resonator. Im stationären Betrieb waren etwa 30 solcher Photonen im Resonator, die das künstliche Atom zu weiterer Emission in dieselbe Strahlungsmoden stimulierten. Die große Photonenzahl sowie die geringe Linienbreite der aus dem Resonator ausgekoppelten Strahlung sind ein Beleg für den Laser-Effekt. Wurde der Maser von außen mit Mikrowellen angeregt, sodass mehr als ein Photon im Resonator war, hatte die emittierte Strahlung eine deutlich geringere Linienbreite als die anregende. Auf einem Chip könnte man den Maser als Quelle oder als Verstärker für Mikrowellen nutzen.

### Magnetismus mit Licht steuern

Licht lässt sich durch Magnetfelder beeinflussen. Ein bekanntes Beispiel ist der magneto-optische Faraday-Effekt, bei dem ein Magnetfeld die Polarisations Ebene einer Lichtwelle beim Durchgang durch ein transparentes Medium dreht. Umgekehrt kann zirkular polarisiertes Licht in einem Medium eine Magnetisierung hervorrufen. Theo Rasing von der Radboud Universität Nijmegen und seine Mitarbeiter benutzen ultrakurze Lichtpulse, um mit diesem inversen Faraday-Effekt starke und ultrakurze Magnetfeldpulse zu erzeugen. Mit solchen Pulsen ließe sich magnetische Ordnung auf sehr kurzen Zeitskalen herstellen und kontrollieren. Dadurch könnte man die Schreib-

geschwindigkeit von magnetischen Datenspeichern erheblich vergrößern. Wie Rasing berichtete, hatten seine und andere Arbeitsgruppen schon vor einigen Jahren gezeigt, dass Laserpulse von weniger als  $10^{-13}$  s Dauer magnetische Materialien innerhalb 1 ps lokal entmagnetisieren oder in ihnen die Elektronenspins umdrehen. Dabei wurden die Spins jedoch thermisch angeregt, sodass der nächste Puls erst folgen durfte, wenn sie sich wieder abgekühlt hatten. Außerdem heizte sich das Material lokal auf, wodurch der Schreibdichte in einem Speichermedium Grenzen gesetzt sind.

Inzwischen gelang es Rasing und seinen Mitarbeitern, die Magnetisierung von Dysprosiumorthoferrit mit Laserpulsen von 200 fs Länge nichtthermisch zu kontrollieren. Die kurzen, zirkular polarisierten Laserpulse riefen eine Magnetfeldstärke von etwa 5 Tesla hervor. Die dadurch verursachten schnellen Oszillationen der Magnetisierung

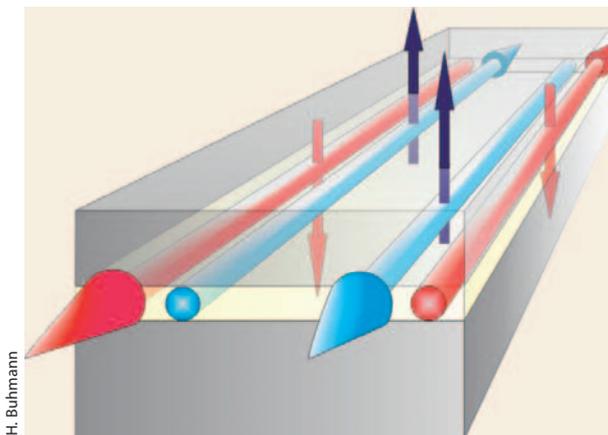
beobachteten die Forscher mit einem zeitverzögerten linear polarisierten Laserpuls, dessen Polarisationsrichtung aufgrund des Faraday-Effekts gedreht wurde. Um jedoch auf diese Weise in einem magnetisierten Material alle Spins einzeln zu flippen und so die Magnetisierung vollständig umzukehren, wäre eine enorme Lichtintensität erforderlich, durch die sich das Material stark aufheizen würde.

Mit einem Trick ist es der Gruppe von Rasing nun gelungen, mit einzelnen 40 fs langen Laserpulsen die Magnetisierung in der amorphen ferrimagnetischen Legierung GdFeCo reproduzierbar umzukehren. Dieses Material ist wegen seiner starken magneto-optischen Effekte bekannt und wird für magneto-optische Aufzeichnungen benutzt. Je nach Polarisation konnten die Laserpulse der Magnetisierung einzelner Domänen eine bestimmte Ausrichtung geben. Dabei wurde das Material kurzfristig und lokal bis knapp unter seinen Curie-Punkt

erwärmt, der bei 500 K liegt. Die angeregten Spins ließen sich dann durch das vom Laserpuls verursachte Magnetfeld von 1 Tesla leichter ausrichten und behielten ihre Orientierung nach Abkühlung bei. Damit haben die niederländischen Forscher ein schnelles magneto-optisches Aufzeichnungsverfahren entwickelt, das den inversen Faraday-Effekt nutzt.

### Quanten-Spin-Hall-Isolator

Die Spintronik verfolgt das Ziel, den Elektronenspin zu kontrollieren und für Rechenoperationen zu nutzen. Hier könnte der Spin-Hall-Effekt eine wichtige Rolle spielen. Dabei lenkt ein elektrisches Feld Elektronen in einer dünnen Schicht je nach ihrer Spineinstellung in unterschiedliche Richtungen ab – ohne die Einwirkung eines externen magnetischen Feldes. Während Störstellen den extrinsischen Effekt verursachen, tritt in perfekten Kris-



H. Buhmann

Beim Quanten-Spin-Hall-Isolator fließen Spin-polarisierte Ströme dissipationslos in Kanälen nahe dem Rand der Probe.

tallgittern ein intrinsischer Effekt auf, dem die Spin-Bahn-Kopplung der Elektronen zugrunde liegt. In Analogie zum Quanten-Hall-Effekt – bei dem der Ladungsträgertransport auf den Rand der Probe beschränkt ist, während das Probeninnere in einem isolierenden Zustand ist – wurde für spezielle Halbleiterschichten wie Graphen ein neuer topologischer Isolatorzustand, der sog. Quanten-Spin-Hall-Isolator, vorhergesagt. Dabei fließen spinpolarisierte Ströme dissipationslos in Kanälen nahe dem Rand der Probe. Die Elektronen mit entgegengesetztem Spin bewegen sich dann in entgegengesetzte Richtung und können nicht zurückgestreut werden. Hartmut Buhmann von der Universität Würzburg und seine Kollegen konnten diesen Effekt jetzt nachweisen.

Dazu stellten sie Halbleiterschichtstrukturen her, bei denen eine HgTe-Schicht von zwei (Hg,Cd)Te-Barrrieren eingeschlossen war. Dass solche Schichten den Quanten-Spin-Hall-Effekt zeigen, hatten Shou-Cheng Zhang und seine Mitarbeiter von der Stanford Universität vorhergesagt. Entscheidend ist die ungewöhnliche Bandstruktur des II-VI-Halbleiters HgTe. Normalerweise stammt bei solchen Halbleitern das Leitungsband von den s-Orbitalen der Gruppe-II-Atome und das Valenzband von den p-Orbitalen der Gruppe-VI-Atome. Bei HgTe-Kristallen ist es jedoch umgekehrt. Wenn die HgTe-Schicht dicker als 6,3 nm ist, bleibt diese Inversion der Bänder erhalten. Dünnere HgTe-Schichten haben hinge-

gen aufgrund der angrenzenden (Hg,Cd)Te-Barrrieren eine normale Abfolge der Bänder.

Die Forscher kühlten Halbleiterstrukturen mit unterschiedlich dicken HgTe-Schichten auf Temperaturen zwischen 10 mK und 1,8 K ab und sorgten dafür, dass die Fermi-Energie in der Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband lag. Für eine Dicke von weniger als 6,3 nm verschwand die Leitfähigkeit der Schicht. War die Schicht hingegen dicker, so betrug ihre Leitfähigkeit etwa  $2e^2/h$ . Diesen Wert würde man für einen Quanten-Spin-Hall-Isolator erwarten, bei dem ein effektiver Ladungstransport in Kanälen nahe dem Rand der Schicht auftritt. Bei der kritischen Dicke von 6,3 nm fand demnach ein Quantenphasenübergang von einem herkömmlichen Isolator zu einem Quanten-Spin-Hall-Isolator statt. Um den Quanten-Spin-Hall-Effekt praktisch nutzen zu können, müsste er bei Zimmertemperatur auftreten. Ob sich dies verwirklichen lässt, wird die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet zeigen.

### Spintronik mit multiferroischen Materialien

Multiferroische Materialien können ferroelektrisch und ferromagnetisch zugleich sein. Dies macht sie für viele Anwendungen interessant. So lassen sich ihre elektrischen Eigenschaften magnetisch beeinflussen und umgekehrt. Darüber hinaus erlauben es diese Materialien, Information sowohl elektrisch als auch magnetisch zu speichern. Wie Agnès Barthélémy von der Université Paris-Sud berichtete, sind dünne Schichten aus  $\text{La}_{0,1}\text{Bi}_{0,9}\text{MnO}_3$  (LBMO) multiferroisch – sogar noch bei einer Schichtdicke von nur 2 nm. In Zusammenarbeit mit dem letztjährigen Physiknobelpreisträger Albert Fert haben sie und ihre Kollegen dünne LBMO-Schichten als Tunnelbarrieren in magnetischen Tunnelkontakten eingesetzt und ihre Eigenschaften studiert.

Die Forscher ließen die LBMO-Schicht epitaktisch auf einer Unterlage aus Strontiumtitanat wachsen,

die sie mit einer Pufferschicht aus  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  (LSMO) überzogen hatten. Die halbmetallische und ferromagnetische LSMO-Schicht diente als Elektrode bei der Untersuchung der multiferroischen LBMO-Schicht. Mit einer Spannung von  $\pm 4$  V wurden  $\mu\text{m}$ -große Bereiche einer 2 nm dicken LBMO-Schicht bei Zimmertemperatur elektrisch polarisiert und anschließend mit einem Piezoresponsorasterkraftmikroskop sichtbar gemacht. Die auf- bzw. abwärts polarisierten ferroelektrischen Domänen ließen sich auch nach mehreren Stunden noch deutlich erkennen.

Wie man die magnetischen Eigenschaften multiferroischer Materialien für die Spintronik nutzen kann, zeigte Agnès Barthélémy an einem Tunnelkontakt mit einer nm-dünnen LBMO-Schicht als Barriere. Die Elektronen tunnelten dabei aus der ferromagnetischen LSMO-Elektrode durch die Barriere in eine Goldelektrode. Waren die LSMO-Elektrode und die LBMO-Barriere antiparallel magnetisiert, so war der bei 3 K gemessene Tunnelmagnetwiderstand um etwa 50 % größer als bei paralleler Magnetisierung. Die multiferroische Schicht wirkte dabei wie ein Spinfilter. Doch auch die ferroelektrische Polarisierung beeinflusste die Tunneleigenschaften der Schicht merklich, indem sie das Profil der Tunnelbarriere veränderte. Je nach Polarisationsrichtung hatte die Barriere daraufhin eine unterschiedliche mittlere Höhe, und der Tunnelelektrowiderstand änderte sich. Die multiferroische LSMO-Schicht konnte sowohl mit der elektrischen als auch mit der magnetischen Polarisationsrichtung ein Bit speichern. Diese Bits ließen sich durch Messung der entsprechenden Tunnelwiderstände abfragen. Darüber hinaus erlauben multiferroische Schichten, Informationen elektrisch zu schreiben und magnetisch zu lesen. Damit könnten sie die Vorzüge eines MRAMs mit denen eines FeRAMs (Ferroelectric Random Access Memory) kombinieren.