

Magnetismus ist ein fundamentales Gebiet wissenschaftlicher Forschung. Neue Erkenntnisse über das physikalische Verhalten von Magnetischen Oxiden verhelfen dem Magnetismus in jüngerer Zeit zu einer Renaissance und definieren ein Feld moderner Grundlagenforschung und zukunftsweisender Technologien. Die Entdeckung des »kolossalen Magnetwiderstandes« (CMR) in dünnen Schichten durch Mitarbeiter des Göttinger Festkörperphysikers Prof. Dr. Konrad Samwer im Jahre 1993 löste einen regelrechten Boom wissenschaftlicher Aktivitäten aus. Spintronics ist dabei ein neues Gebiet im Grenzbereich zwischen Magnetismus und Elektronik. Hier sehen Forscher ein enormes Potenzial für Anwendungen im Bereich elektronischer Speichermöglichkeiten und einer Computertechnologie für das 21. Jahrhundert. Ein weiteres hochaktuelles Forschungsfeld, das sich aus den Resultaten der Physik und Technologie der Magnetischen Oxide entwickelt hat, ist das Gebiet der »Multiferroics«. Hier zeichnet sich nach Meinung der Wissenschaftler die Chiptechnologie der Zukunft ab, mit Bauteilen aus einem einzigen Material.

# Zurück in die Zukunft

Magnetische Oxide

Vasily Moshnyaga, Konrad Samwer

Magnetismus ist vermutlich eines der ältesten Gebiete der Wissenschaft. Seit Beginn unserer Zivilisation werden aufgrund des natürlichen Vorkommens magnetischen Gesteins im Erdkern, »Magnetit« genannt, magnetische Phänomene nicht nur beobachtet, sondern auch genutzt. So hat beispielsweise die Verwendung von magnetischen Nadeln in Kompassen die Navigation zu einem der lukrativen Gebiete der magnetischen Anwendungen gemacht.

Dabei hat immer eine Aura der Magie den Magnetismus umgeben, denn bis zum Mittelalter waren nur wenige Phänomene verstanden. Anfang des 17. Jahrhun-

derts schrieb Sir William Gilbert (1544–1603) die erste wissenschaftliche Abhandlung »De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno tellure; Physiologia nova, plurimis & argumentis, & experimentis demonstrata. Londra, Pie Short, 1600«. Bemerkenswerterweise überprüfte Gilbert auch Volkslegenden, darunter beispielsweise die Frage, ob Knoblauch den magnetischen Effekt einer Kompassnadel zerstören könne. Weitaus wichtiger aber war die von ihm eingeführte erste klare Unterscheidung zwischen magnetischen Effekten und dem Ampere-Effekt, den wir heute statische Aufladung nennen. »De magnete« ist ein komprimierter Überblick über das, was zu jener Zeit über die Natur des Magnetismus bekannt war, ergänzt durch viele Erkenntnisse von Gilbert, die er durch eigene Experimente gewonnen hatte. Er verglich die Polarität von Magneten mit der des Erdmagnetfeldes und leitete aus der Analogie eine komplette Philosophie des Magnetismus ab. (Abbildung 1)

Weitere Meilensteine zum Verständnis des Magnetismus wurden durch das experimentelle Genie des Michael Faraday (1819–1867)

und dessen theoretischem Gegenbild James C. Maxwell (1831–1879) erbracht, so dass der Magnetismus zu einer wichtigen Säule des menschlichen Wissens und der Wissenschaft wurde. Die theoretischen Fortschritte und die starke Einbindung in nahezu alle Bereiche der technischen Entwicklung machen diese Disziplin zu einem der wichtigsten Gebiete der aktuellen Forschung.

Ein bekannter natürlicher Magnet, mineralisches Magnetit aus Eisen- und Sauerstoffatomen mit der chemischen Formel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , gehört zur Klasse der magnetischen Oxide, welche heutzutage sowohl in der Grundlagen- und angewandten Forschung als auch für technische Anwendungen von großem Interesse sind. Dieses Interesse wurde ausgelöst durch die Entdeckung der Supraleitung bei hohen Temperaturen (höher als der Siedepunkt von Stickstoff, der bei 77 Kelvin liegt) in gemischten Yttrium-Barium-Kupfer-Oxiden (Y-Ba-Cu-Oxiden) im Jahre 1986. Magnetische Oxide beinhalten Übergangsmetalle wie Eisen (Fe), Mangan (Mn), Chrom (Cr) oder Kobalt (Co) mit ungepaarten Elektronen in ihrer d-Schale, welche für die magnetischen Eigenschaften verantwortlich sind. In magnetischen Oxiden variiert die elektronische Konfiguration des Übergangsmetalls mit seiner chemischen Wertigkeit, der Valenz. Das führt zu unterschiedlichen Spinzuständen, dem so genannten »Mischvalenzzustand« des magnetischen Ions. Hieraus



Abbildung 1: Sir William Gilbert (1544–1603), Autor der ersten wissenschaftlichen Abhandlung über magnetische Phänomene

resultierend, werden stark korrelierte Elektronenwechselwirkungen erzeugt, welche zu einem komplexen strukturellen, elektronischen und magnetischen Verhalten führen. In dieser Hinsicht zeigen magnetische Oxide, die Übergangsmetalle wie Mangan, Kobalt oder Ruthenium enthalten, faszinierende Eigenschaften.

Eine der berühmtesten Gruppen der magnetischen Oxide, die Manganate, haben die generische Formel  $\text{Ln}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$  (Ln = Lanthan, Praseodym, Neodym; und A = Kalzium, Strontium, Barium;) und kristallisieren in der Perowskit-Struktur (Abbildung 2). Perowskitische Manganate sind seit mehr als einem halben Jahrhundert bekannt – die erste Veröffentlichung von D. Jonker und J. van Santen wurde im Jahr 1950 publiziert. Dennoch fand der große Durchbruch erst im Jahre 1993 statt, als der so genannte »kolossale Magnetwiderstand« (CMR) in dünnen Manganatschichten von Rittmar von Helmholt und Kenichi Chahara entdeckt wurde. Der CMR-Effekt, illustriert in Abbildung 3, beschreibt die Abnahme des elektrischen Widerstandes in einem äußeren Magnetfeld. Diese Widerstandsänderungen können extrem groß sein, bis zu sechs bis acht Größenordnungen in einem magnetischen Feld von einigen Tesla. Ferner ist in Abbildung 3 eine klare Beziehung zwischen magnetischer und elektronischer Phase dargestellt: Der Übergang vom Isolator zum Metall ist gekoppelt mit dem Übergang vom Para- zum Ferromagneten. Demnach kann der CMR-Effekt als Metall-Isolator-Übergang angesehen werden, welcher vom äußeren Magnetfeld getrieben wird.

Die Entdeckung des CMR-Effekts regte große Aktivitäten einerseits in der Grundlagenforschung an, um eine adäquate phänomenologische und mikroskopische Beschreibung dieses faszinierenden Effekts zu geben, andererseits in der technologischer Forschung,

um den Effekt für Anwendungen auszunutzen. Ein wichtiger Schritt zum Verständnis des CMR-Effekts und der Physik der Manganate wurde von Andy Millis in den USA 1995 gemacht, der argumentierte, dass die Wechselwirkung zwischen den Elektronen alleine (der so genannte Doppelaustausch zwischen den Mangan-Ionen) nicht ausreichend ist, um einerseits den CMR und andererseits die Komplexität und Vielfalt von Phasen der Manganate zu erklären. Es sollte eine weitere Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen und dem Kristallgitter aufgrund des so genannten Jahn-Teller-Effekts geben. Dieser Vorschlag resultiert in einem neuen physikalischen Konzept, dem »Jahn-Teller-Polaron«. Es öffnet eine »orbitale Seite« in der Physik der Manganate mit dem Wechselspiel zwischen Spin, Ladung (Orbitale) und Gitter, um den CMR und die Phasenübergänge zu erklären.

**Magnetismus und Spintronic**

Wie sieht es mit möglichen Anwendungen von Manganaten in technischen Bauelementen aus? Die großen Magnetfelder von einigen Tesla und das schmale Temperaturfenster, die für große Widerstandsänderungen nötig sind, machen den CMR unattraktiv für Anwendungen. Die Situation ist aber nicht so schlecht, wie es auf den ersten Blick scheint. Blicken wir auf das momentan am schnellsten expandierende Gebiet des Magnetismus, das Gebiet der Spintronic. Das wesentliche Konzept des Spintronic liegt in der Manipulation von Spinströmen, im Gegensatz zur normalen Elektronik, die den Spin der Elektronen ignoriert. Dieses Gebiet, an der Nahtstelle zwischen Magnetismus und Elektronik liegend, ist von erheblichem Interesse in der großen Nachfrage nach neuen elektronischen Elementen, in welchen ein magnetisches Feld aufgrund der Wirkung auf den Spin der Elektro-

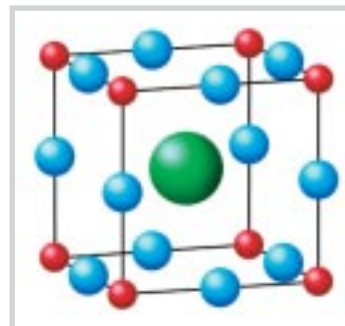


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt die Perowskit-Struktur mit Sauerstoff-Anionen (blau), Ln-, A-Kationen (grün) und Mangan-Kationen (rot)

nen den elektrischen Strom kontrollieren kann. Jenseits heutiger Anwendungen bei Festplatten und Speichern zeigt, die Spintronic viel versprechende Potenziale für neue Entwicklungen und übt damit einen wichtigen Einfluss auf die Forschung und Technologie des 21. Jahrhunderts aus.

Um zu verstehen, wie die Manganate in die Spintronic eingebunden werden können, blicken wir zunächst auf den schematischen Aufbau (Abbildung 4) einer neuen Generation von Computerspeichern – den magnetischen RAM oder auch MRAM (magnetic random access memory). Dieser besteht aus zwei dünnen, ferromagnetischen Elektroden, welche durch eine dünne (ein bis zwei

Abbildung 3: Verknüpfung zwischen dem Metall-Isolator-Übergang (a), Phasenübergang von Ferro- zu Paramagnetika (b) und dem CMR- Effekt für eine dünne Lanthan-Calcium-Manganoxid-Schicht.

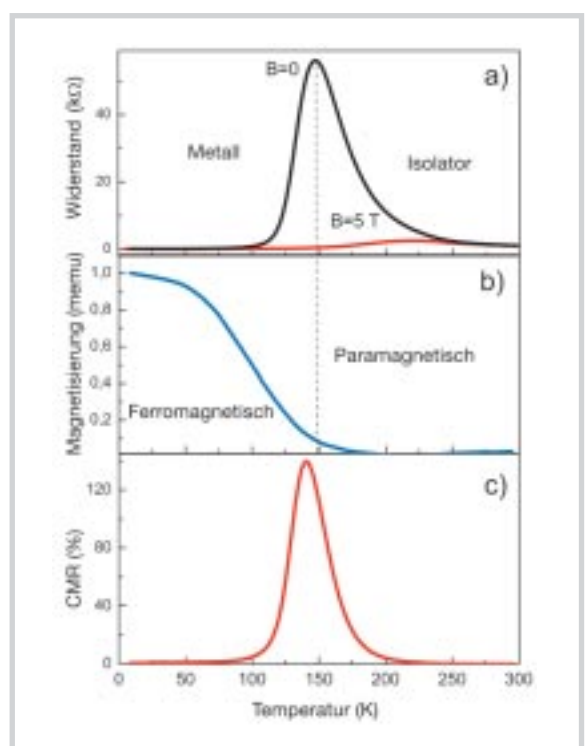
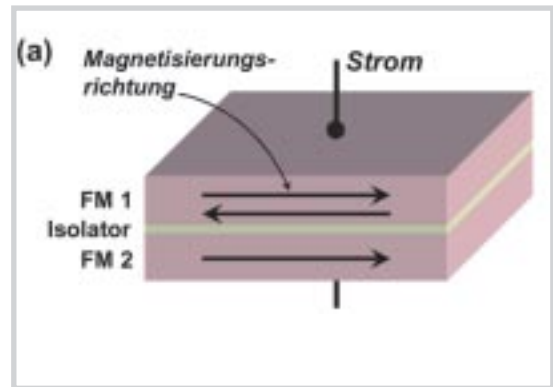
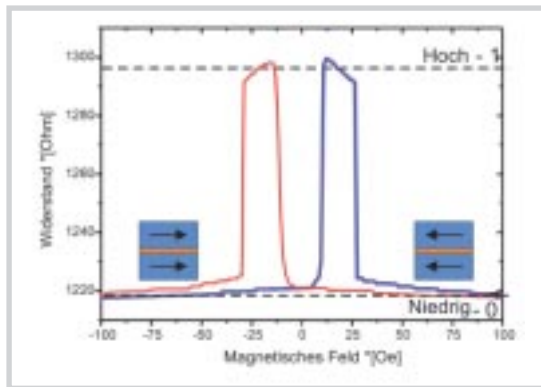


Abbildung 4:  
Der Widerstand eines magnetischen Tunnelkontaktes hängt von der relativen Orientierung der Magnetisierungsrichtungen der beiden ferromagnetischen Elektroden ab. Für die parallele Anordnung ergibt sich ein geringer elektrischer Widerstand als für die antiparallele Anordnung. Dieser »Tunnel-Magneto-Widerstand« wird in magnetischen Speichern genutzt.



Nanometer), isolierende Schicht, üblicherweise Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oder Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ), getrennt sind. Der elektrische Strom kann aufgrund des quantenmechanischen Tunnelprozesses von einer Elektrode zur anderen fließen. Hierbei ist wichtig, dass die Elektronen in den ferromagnetischen Elektroden einen wohl definierten Spin aufweisen – man spricht auch von spin-polarisierten Elektronen – und dass dieser Spin während des Tunnelprozesses erhalten bleibt.

Zusammengenommen führt dieses zu verschiedenen Widerständen des magnetischen Tunnelkontaktes in Hinblick auf die relative Orientierung der Magnetisierungsrichtungen der beiden ferromagnetischen Elektroden. Unter Anwendung eines kleinen magnetischen Feldes, mit der magnetischen Feldstärke von lediglich einigen Oersted (Oe), kann der Tunnelkontakt von einem hochohmigen Zustand in einen niederohmigen Zustand geschaltet werden. Der Unterschied der Widerstände zwischen paralleler und antiparalleler Orientierung der Magnetisierungsrichtungen normalisiert auf den Wert für parallele Orientierung. Angegeben in Prozent wird er Tunnel-Magnetowiderstand (TMR) genannt. Die ersten magnetischen Tunnelkontakte mit Kobalt-Eisen (CoFe) als ferromagnetischen Elektroden und Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) als Isolationsbarriere zeigten einen Effekt von circa 20 Pro-

zent. Kürzlich erreichten Stuart Parkin und andere einen Wert von 200 Prozent und höher bei Raumtemperatur unter Verwendung von Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ) als Barriere. Genau dieses benötigt man für ein Computer-Speicherelement. Der wesentliche Vorteil eines solchen MRAMs – so die Bezeichnung dieses Speicherelements – gegenüber flüchtigen, auf Halbleitertechnologie basierenden Speichern ist, dass sie ihre Information nach dem Abschalten des Computers weiterhin speichern. Ein weiterer Vorteil gegenüber den permanenten Flash-Speichern, die heutzutage in der portablen Elektronik eingesetzt werden, ist ihre Schreibgeschwindigkeit – sie sind um den Faktor 1.000 schneller. Mindestens zwei kommerzielle MRAMs von Motorola sowie aus der Zusammenarbeit von IBM und Infineon waren bereits 2004 erhältlich.

Was können nun die Manganate zu der Spintronic beitragen? Dem Jullière-Modell entsprechend ist der entscheidende Faktor zur Erzielung hoher TMR-Werte die Spinpolarisation. Im Gegensatz zu den gut bekannten magnetischen Metallen wie Eisen und Kobalt sind die Elektronen an der Fermikante für Manganate nahezu vollständig spinpolarisiert, was zu extrem großen TMR-Werten führt. So zeigen Manganat-basierende magnetische Tunnelkontakte mit einer  $\text{SrTiO}_3$ -Barriere einen TMR von 1.800 Prozent bei tiefen Temperaturen. Ein weiteres

Verständnis der Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften sowie eine Optimierung der Curie-Temperaturen sind aber weiterhin nötig, um die Manganate tatsächlich konkurrenzfähig zu machen.

Ein weiteres Feld von Anwendungen betrifft Magnetfeldsensoren. Dazu hat die Arbeitsgruppe an der Universität Göttingen kürzlich einen Manganat-Dünnschichtsensor, basierend auf dem anisotropen Magneto-Widerstandseffekt (AMR), präsentiert. Für eine solche Art von Sensor ist kein Tunnelkontakt (Mehrlagen-Geometrie) notwendig, sondern lediglich ein einzelner epitaktischer Film. Aufgrund der speziell gewählten Geometrie der Elektroden (so genannter planarer Hall-Effekt, der in Abbildung 5 dargestellt ist) ist die transversale Spannung (Widerstand) nicht nur sensitiv auf die Größe der Magnetisierung, sondern auch auf deren Richtung bezogen auf den Stromfluss. Die transversale Spannung ändert sich drastisch mit dem äußeren Magnetfeld, was zu einer Magneto-spannung von zirka 400 Prozent für  $H = 500$  Oe führt. Weiterhin beträgt die Sensitivität unseres Sensors bei Raumtemperatur  $S = 20$  Prozent/Oe. Diese Werte überschreiten die entsprechenden Werte für AMR-Sensoren, die auf ferromagnetischen Metallen basieren (Co/Ni-Multilag) und erlauben eine Detektion von Magnetfeldern bis zu  $H = 10^{-4}$  Oe. Der Prototyp dieses Manganat-basierenden AMR-Sensors wurde 2004

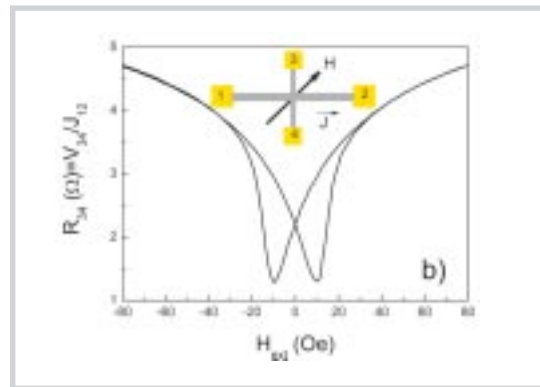
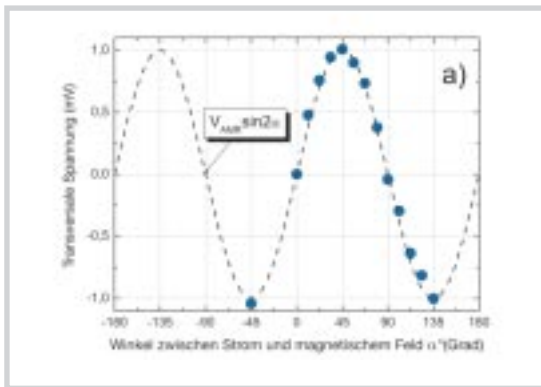


Abbildung 5: Winkel- (a) und Magnetfeldabhängigkeit des AMR-Sensor bestehend aus einer La-(Ca,Sr)-Mn-O-Schicht mit den Elementen Lanthan, Calcium, Strontium und Manganoxid. Die Probegeometrie ist in (b) dargestellt: Der Strom fließt von Elektrode 1 zur Elektrode 2, die Spannung wird zwischen 3 und 4 gemessen. Das Magnetfeld liegt parallel zur Schichtebene.

auf der internationalen Hannover Messe präsentiert. Wir glauben, dass durch Abstimmen der Schichteigenschaften in ihrer Zusammensetzung und Kristallinität sowie der Herstellungsparameter (Lithographie, Kontakte, Auslese-Elektronik) die bestimmenden Parameter weiter optimiert werden können, was den Sensor sehr attraktiv für den Markt macht.

Hervorgerufen durch große Fortschritte in der Nanotechnologie, erlebten die Manganate während der vergangenen Jahre eine zweite Renaissance. Die Intention, Festkörper bis in den Nanometerbereich einzuschränken, gefördert durch die Computer-Industrie und durch das Interesse der Grundlagenforschung, hatte konkrete Folgen für die Manganate. Es wurde sowohl experimentell beobachtet als auch theoretisch begründet, dass die elektronischen Eigenschaften der Manganate räumlich inhomogen sein können. Elektronische Inhomogenität oder Phasenseparation ist eng verknüpft mit dem oben angemerkten Zusammenspiel von Ladungs-(Orbitalen-), Spin- und Gitterfreiheitsgraden. Daraus resultiert eine Konkurrenz zwischen ferromagnetischer Wechselwirkung (Dopelaustausch) und antiferromagnetischer Wechselwirkung (Superaustausch), was zur Bildung von ferromagnetischen metallischen und antiferromagnetischen isolierenden Bereichen innerhalb einer Probe mit definierter chemischer Zusammensetzung über



**KLINIKEN  
UELZEN UND  
BAD BEVENSEN GMBH**

Die Kliniken Uelzen und Bad Bevensen GmbH ist ein Unternehmen innerhalb des RHÖN-KLINIKUM-Konzerns und Akademisches Lehrkrankenhaus der Medizinischen Hochschule Hannover.

Wir suchen für die Abteilung für **Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie** zum nächstmöglichen Termin eine/einen

### Assistenzärztin/-arzt in der Weiterbildung

Unsere Unfallchirurgische Abteilung bietet neben der Traumatologie inkl. der Wirbelsäulen- und Beckenchirurgie auch die orthopädische Chirurgie einsch. Hüft-, Knie- und Schulterendoprothetik sowie die elektive und notfallmäßige Handchirurgie an. Die Abteilung verfügt über insgesamt 60 Betten.

Im Rotationsverfahren mit der Allgemein- und Gefäßchirurgie kann die volle Weiterbildung erworben werden.

In unserem neu erbauten Klinikum halten wir insgesamt 410 Planbetten der Fachabteilungen Innere Medizin/Kardiologie, Innere Medizin/Gastroenterologie, Neurologie, Allgemein- und Gefäßchirurgie, Minimal-Invasive Chirurgie, Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Gynäkologie/Geburtshilfe, Pädiatrie, Anästhesie und Intensivmedizin, Radiologie und HNO (Belegabteilung) vor.

Die Klinik verfügt über insgesamt 8 OP-Säle, eine interdisziplinäre ITS mit 22 Betten sowie über eine IMC-Station (Intermediate-Care) mit 30 Betten.

Am Klinikum sind der Notarztwagen und ein Rettungshubschrauber stationiert.

Wir erwarten Einsatzbereitschaft, Teamgeist und die Teilnahme am Bereitschafts-, Rufbereitschafts- und NEF-Dienst und bieten die Mitarbeit in einem jungen, dynamischen Team sowie eine breitgefächerte Ausbildung.

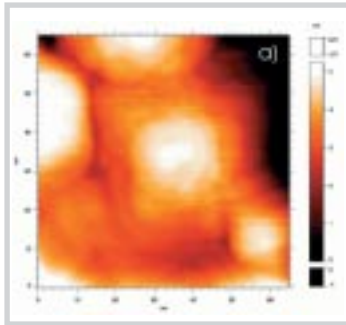
Wir bieten neben einer tariflichen Vergütung inkl. einer zusätzlichen Altersversorgung eine tariflich abgesicherte Ergebnisbeteiligung am Unternehmenserfolg.

**Telefonische Anfragen sind möglich an Herrn Chefarzt PD Dr. med. Walz, Tel.: 0581/ 83 66 00 bzw. 83 66 01.**

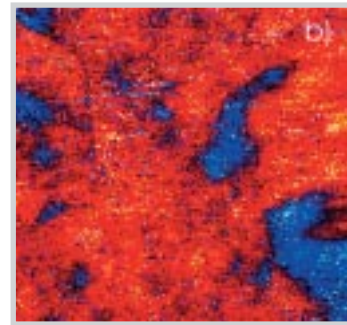
Bewerbungen mit den üblichen Unterlagen werden erbeten an

**Kliniken Uelzen und Bad Bevensen GmbH,  
Personalabteilung, Hagenskamp 34, 29525 Uelzen**

Abbildung 6: STM Topographiebild (a) und Verteilung von metallischen (rot) und isolierenden (blau) Bereichen innerhalb desselben Ausschnittes (b).



verschiedene Längenskalen führt: von Mikrometern bis hinunter in den Nanometer-Bereich. Wir untersuchten die Phasenseparation in La-Ca-MnO (Lanthan-Calcium-Manganoxid) Schichten mit Hilfe der Raster-Tunnel-Mikroskopie in Kombination mit Tunnel-Spektroskopie unter Ultrahoch-Vakuum Bedingungen (Abbildung 6). Die Schicht, heruntergekühlt auf 78 Kelvin, befand sich global im ferromagnetischen Zustand, Curie Temperatur,  $T_c = 250\text{K}$ . Neben der Morphologie wurden lokal auch Strom-Spannungs-Charakteristika mit einer räumlichen Auflösung von einem Nanometer gemessen. Anschließend wurden die Tunnelleitfähigkeiten abgebildet (Abbildung 6b). Es ist zu erkennen, dass die Leitfähigkeit nicht homogen



ist: Die Probe besteht aus metallischen (rot eingefärbten) und isolierenden (blau eingefärbten) Bereichen der Größenordnung von ungefähr fünf bis 20 Nanometern.

Die mesoskopischen elektronischen Inhomogenitäten sind insofern sehr attraktiv für die zukünftige Nanotechnologie, da sie die Herstellung von räumlich selbst organisierten Nanostrukturen mit verschiedenen Funktionalitäten innerhalb eines homogenen Mediums erlauben. Demnach ist die Kontrolle der Phasenseparation und darüber hinaus ihre Entstehung in »einer zunächst elektronisch homogenen Vorlage« von großem Interesse und ein herausforderndes Problem. Weiterhin kann auch über eine »selbst organisierte Lithographie« nachgedacht werden, durch die während der Präparation eines »p-n«-Übergangs keine Bildung von irgendwie gearteten Grenzflächen zwischen verschiedenen chemischen Phasen auftritt, womit beispielsweise Diffusionsprobleme vermieden werden können. (vgl. N. Mathur und P. Littlewood in Physics Today 56, 25 (2003))

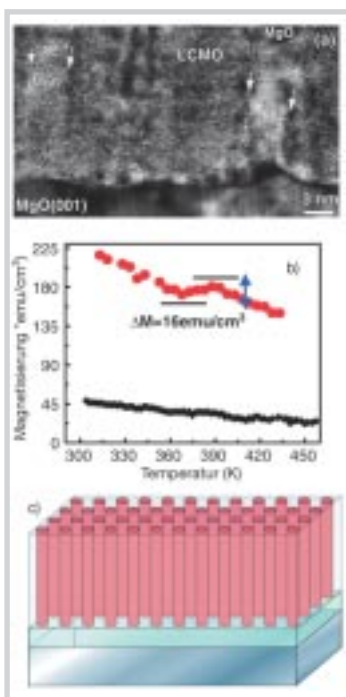
## Multiferroisches Verhalten

Nicht zuletzt soll das so genannte »Multiferroische Verhalten« angesprochen werden, welches in manchen magnetischen Oxiden und in oxidischen Komposit-Materialien beobachtet wurde und großes Interesse geweckt hat. Neben den ferromagnetischen Oxiden, deren magnetische Momente von ungepaarten Elektronenspins der 3d- oder 4f-Übergangsele-

mente hervorgerufen werden, existieren auch ferroelektrische Oxide wie beispielsweise Barium-Titanoxid ( $\text{BaTiO}_3$ ), in denen anstelle des magnetischen Moments ein elektrisches Dipolmoment aufgrund eines strukturellen Phasenübergangs und einer daraus resultierenden Verschiebung des Titan-Atoms existiert. Ferroelektrische Materialien werden in der Praxis als piezoelektrische Aktuatoren, Signalumwandler oder Generatoren, pyroelektrische Sensoren für Infrarot-Strahlung und anderes eingesetzt. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass einige Oxide gleichzeitig sowohl magnetische als auch elektrische Ordnung aufweisen. Aufgrund der Kopplung zwischen der Magnetisierung (magnetischen Momenten) und der Polarisation (elektrisches Dipolmoment) werden sie auch als »magnetoelektrisch« bezeichnet. Diese Kopplung, normalerweise vermittelt durch eine elastische Wechselwirkung, erlaubt die Kontrolle der Magnetisierung/Polarisation durch ein elektrisches/magnetisches Feld, was von großer Bedeutung für neuartige Anwendungen ist – im Wesentlichen wäre die Entwicklung von neuen Bauelementen aus einem einzelnen Material möglich.

Um die elastische Kopplung zwischen den Schichtkomponenten zu erhöhen, wurde eine Nanokomposit-Architektur von dünnen Schichten (Abbildung 7) vorgeschlagen, bestehend aus Manganat eingebettet in eine Magnesiumoxid-Matrix. Die Beeinflussung der Transporteigenschaften der Manganat-Nanocluster durch eine mechanische Ankopplung wurde demonstriert. Kürzlich präparierten Zheng et al. unter Verwendungen unseres Göttinger Ansatzes multiferroische Dünnschicht-Nanostrukturen, in denen die elastisch gekoppelten Phasen auch magnetoelektrisch gekoppelt sind. Das heißt, die Magnetisierung ändert sich an der Curie-Temperatur des Ferroelektrikums

Abbildung 7: Transmissionselektronenmikroskopie-Aufnahme einer LCMO: Magnesiumoxid (MgO) Nanokomposit-Schicht (a): Das epitaktische Wachstum beginnt am Magnesiumoxid-Substrat. Die Magnetisierung als Funktion der Temperatur (b) für das Nanokomposit  $\text{Co-Fe}_2\text{O}_4:\text{BaTiO}_4$  zeigt eine Änderung an der ferroelektrischen Übergangstemperatur des  $\text{BaTiO}_3$ ,  $T \approx 390\text{K}$ . Schematische Anordnung von Nanophasen (c) wie sie in verwendet wird, um eine maximale elastische Kopplung zwischen ihnen zu bewirken. In einer Multilagengeometrie wären alle Schichten an das Substrat gespannt.



(Abbildung 7b). Dies öffnet neue Wege, um magnetoelektrische Oxide aus Manganaten und Titanaten zu erschaffen, welche zwar untereinander maximale elastische Kopplung aufweisen, nicht aber zum Substrat (Abbildung 7c).

**Zusammenfassung**

Wir haben die unserer Meinung nach wichtigsten Aspekte von magnetischen Oxiden in der heutigen Wissenschaft und technologischen Entwicklung vorgestellt, die den Fokus unserer Forschung am I. Physikalischen Institut der Universität Göttingen bilden. Wie an einigen Beispielen gezeigt wurde, ist diese an sich sehr alte Disziplin der Hintergrund für technologische Innovationen zu Beginn des neuen Jahrhunderts.

Die Entdeckung des »kolossale Magnetwiderstand« (CMR) in dünnen Schichten im Jahre 1993 durch Prof. Samwer und seine Mitarbeiter löste dabei eine Vielzahl von wissenschaftlichen Aktivitäten aus. Spintronics wird als neues Gebiet im Grenzbereich zwischen Magnetismus und Elektronik vorangetrieben und verspricht Anwendungen im Bereich einer Computertechnologie für das 21. Jahrhundert.

Ein ebenfalls hochaktuelles Forschungsfeld, das sich aus neuesten Resultaten der Physik und Technologie der Magnetischen Oxiden entwickelt hat, ist das Gebiet der »Multiferroics«. Mit Bauteilen aus einem einzigen Material könnte darin die Chiptechnologie der Zukunft liegen. ◀

The physics of magnetic phenomena, with their numerous fundamental achievements as well as various applications, has long been considered a basic but very stable »stone« of the »building« of physics. In this short review we try to convince the reader that since the last decade of the 20th century, this old and canonical discipline has enjoyed a renaissance and is becoming a rapidly developing branch of modern science and technology. This is chiefly due to the huge progress in the field of Magnetic Oxides. Being a member of the family of strongly correlated electronic systems, Magnetic Oxides show extremely interesting physical effects. One of them is the so-called »colossal magnetoresistance« (CMR) effect, which assumes that electrical resistance of magnetic material can be drastically reduced (by some orders of magnitude!) by applying an external magnetic field. In fact, the CMR effect initiated a boom in scientific activity in the nineties. Another milestone, Spintronics, is a new field on the interface between magnetism and electronics. Spintronics, based on the manipulation of spin currents, has already demonstrated huge potential in the creation of new electronic devices, including computer memories. Very recent achievements in physics and technology of Magnetic Oxides have resulted in a new field called »Multiferroics«. This is a trial to combine ferromagnetic (magnetic moment related to the spin of electron) and ferroelectric (electric dipole moment due to the charge of electron) behaviour in an individual material or in a composite material. In principle, Multiferroics opens up the new possibility of building a nano-electronic device with sensor (informative part) and actuator (energetic part) on the same chip. We believe that the curtain is yet to fall on magnetism and therefore invite the reader to visit »Magnetic Oxides«.



*PD Dr. Vasily Moshnyaga, Jahrgang 1956, studierte Physik an der Technischen Universität in Chisinau (Moldawien) und der Physikalisch-Technischen Universität in Moskau (Russland). Bis zu seiner Promotion 1984 war er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Allgemeine Physik der Akademie der Wissenschaften in Moskau tätig. Im Anschluss forschte der Physiker von 1984 bis 1998 am Institut für Angewandte Physik und am Institut für Ökologische Genetik der Akademie der Wissenschaften in Chisinau. Im Juni 1998 wechselte Dr. Moshnyaga an die Universität Augsburg und wurde Ende 1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am I. Physikalischen Institut der Universität Göttingen. Hier schloss er im Juni diesen Jahres seine Habilitation ab. Die Arbeitsgebiete von Dr. Moshnyaga sind die experimentelle Festkörperphysik, elektronisch hochkorrelierte Systeme, Magnetismus, Metall-Isolator-Übergänge und Supraleitung.*



*Prof. Dr. Konrad Samwer, Jahrgang 1952, studierte Physik an den Universitäten Göttingen und Bonn. Nach dem Diplomabschluss (1975) und der Promotion (1981) wechselte er als Postdoktorand an das California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena (USA). Für seine Arbeiten über Metallische Gläser erhielt er 1983 den Heinz Maier-Leibnitz-Preis. 1987 folgte die Habilitation in Göttingen. Zwei Jahre später wurde Prof. Samwer an die Universität Augsburg berufen, an der er bis zu seinem Ruf an die Georgia Augusta lehrte und forschte. Seit 1999 leitet er das I. Physikalische Institut der Universität Göttingen. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Gläser und des Kolossalen Magnetwiderstandes in dünnen Schichten wurde der Wissenschaftler 2004 mit dem höchstdotierten deutschen Forschungspreis, dem Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis, ausgezeichnet.*