

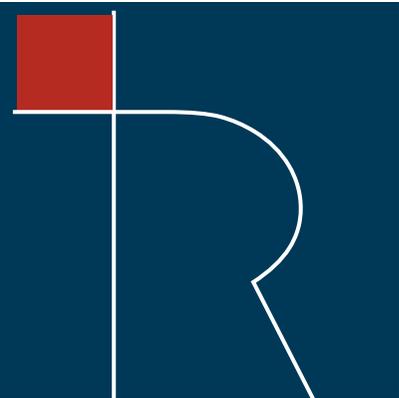
# WISSENSCHAFTS JOURNAL

der  
Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg



# scientia halensis

- Nanostrukturierte Materialien im Blick der Wissenschaft
- Wenn Physiker an Grenzen stoßen ...
- Virtuelles Labor: Forschung und Entwicklung am Computer
- ... aber der Teufel erschuf die Oberflächen



**R I P P E L**  
 IMMOBILIEN  
 ARCHITEKTUR

# (T)RAUM FÜR

Grundstücke für Ihre Planung:  
 Kröllwitz-2,5 geschossig, Kröllwitz-  
 Südhang-Terrassenbebauung (1,5)  
 Delau-herrliches Waldgrundstück in  
 3. Bauflucht (1,5G) pos. Bauvorbesch.,  
 Kröllwitz-n.d. Petruskirche (2,5G)

INDIVIDUALISTEN

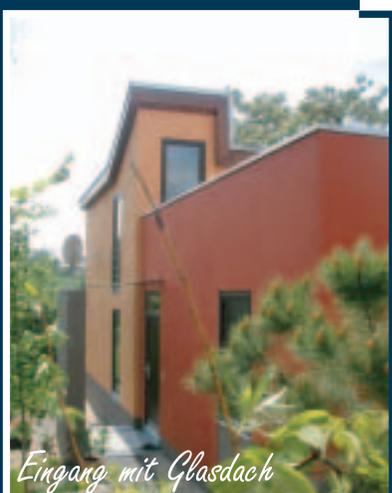


*EFH in Kröllwitz (100m<sup>2</sup>)*



*Dachterrasse ...*

*EFH im Süden von Halle (200 m<sup>2</sup>)*



*Eingang mit Glasdach*



*EFH mit Galerie*

*Und wann  
 dürfen wir  
 Ihr Haus  
 planen?*

**PHONE: 29 0 29 99**

**Editorial**

Hans-Reiner Höche, Hartmut S. Leipner und Heinrich Graener ..... 4

**Schwerpunktthema »Nanostrukturierte Materialien«****Nanostrukturen – Von der Natur geschaffen**

Frank Heyroth und Bodo Fuhrmann ..... 5

**Nanostrukturen ...**

Modeerscheinung in den Materialwissenschaften?

Hans-Reiner Höche ..... 7

**Atome sehen – Mikroskope für kleinste Strukturen**

Hartmut S. Leipner und Peter Werner ..... 9

**Faszination Nanowelt**

Forschung im Zentrum für Computational Nanoscience

Wolfram Hergert ..... 11

**EPOS – eine neue intensive Positronenquelle für die Materialforschung**

Kooperation zwischen Uni und Forschungszentrum Rossendorf

Reinhard Krause-Rehberg, Gerhard Brauer und Hartmut S. Leipner ..... 13

**Verachtet die Defekte nicht**

SFB 418 untersucht nanoskopische Inhomogenitäten

Horst Schneider und Steffen Trimper ..... 15

**Wenn Physiker an Grenzen stoßen ...**

Forschung an oxidischen Grenzflächen

Ingrid Mertig und Angelika Chassé ..... 17

**Die Objekte sind winzig – die Chancen riesig**

Das Innovationsforum »Nanostrukturierte Materialien«

Hartmut S. Leipner ..... 19

**Wenn Elektronen durch die Wand gehen ...**

Spinpolarisiertes Tunneln in magnetischen Nanostrukturen

Dirk Sander, Wolfgang Kuch und Jürgen Kirschner ..... 20

**Virtuelles Labor: Forschung und Entwicklung am Computer**

Arthur Ernst und Patrick Bruno ..... 22

**Poröse Strukturen zur Herstellung****von Nanodrähten und Nanoröhren**

Kornelius Nielsch, Reinold Hillebrand und Ulrich Gösele ..... 24

**Zielgenaue Präparation von Proben****für die Transmissionselektronenmikroskopie**

Frank Altmann und Dieter Katzer ..... 26

**Große Moleküle und kleine Strukturen**

Mario Beiner und Thomas Thurn-Albrecht ..... 27

**Nanopartikelhaltige Gläser:****Neue Perspektiven für ein altes Material**

Klaus-Jürgen Berg und Heinrich Graener ..... 29

**... aber der Teufel erschuf die Oberflächen**

Oberflächen- und Grenzflächenphysik an der Martin-Luther-Universität

Wolf Widdra ..... 31

**Einzelne Moleküle als Bausteine und****Sonden zur Analyse von Nanostrukturen**

Johannes Hohlbein und Christian G. Hübner ..... 33

**Studieren am Fachbereich Physik**

Angelika Chassé, Martin Diestelhorst und Detlef Reichert ..... 35

Personalien ..... 36

Rätselfoto/Autoreninfo ..... 38

Titelbild: Rasterelektronenmikroskopisches Bild einer porösen Glasstruktur (blau eingefärbt) mit Nickelkristallen (gelb eingefärbt). Probe aus dem Institut für Technische Chemie und Molekulare Chemie, Aufnahme Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften, 4 000fache Vergrößerung.

Rücktitel: »Landschaftsbild« einer Siliciumoberfläche nach einem Versuch zum Wachstum von Nanostäbchen. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, 11 000fache Vergrößerung (Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik / Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften)

**IMPRESSUM**

scientia halensis – Wissenschaftsjournal der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Ausgabe 2/2004, 12. Jahrgang  
erscheint viermal im Jahr

**HERAUSGEBER**

Der Rektor der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

**REDAKTION**

Dr. Monika Lindner, Ute Olbertz (verantwortlich für diese Ausgabe), Dr. Margarete Wein

**REDAKTIONSBEIRAT** (für scientia halensis – Universitätszeitung und Wissenschaftsjournal):

Prof. Dr. Wilfried Grecksch (Rektor), Prof. Dr. Marlis Ahlert, Prof. Dr. Dr. Gunnar Berg, Prof. Dr. Heinrich Dilly, Prof. Dr. Wilfried Herget, Prof. Dr. Armin Höhland, Dr. Monika Lindner, Paolo Schubert, Ute Olbertz, Prof. Dr. Joachim Radke, Katrin Rehschuh, Prof. Dr. Hermann-Josef Rupieper, Dr. Heiner Schnell, Dr. Ralf-Torsten Speler, Prof. Dr. Hermann H. Swalve, Ingrid Stude, Prof. Dr. Jörg Ulrich, Dr. Margarete Wein

**GRAFIK-DESIGN**

Barbara und Joachim Dimanski  
Dipl.-Grafik-Designer AGD/BBK

**ANSCHRIFT DER REDAKTION**

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Rektorat  
Universitätsring 14  
06099 Halle (Saale)  
Telefon: 0345 55-21420/22/24  
Fax: 0345 55-27082, 55-27254  
E-Mail:  
monika.lindner@verwaltung.uni-halle.de  
ute.olbertz@verwaltung.uni-halle.de  
margarete.wein@verwaltung.uni-halle.de  
Internet: <http://www.uni-halle.de>

**LAYOUT**

Ute Olbertz  
Jens Gerth (Umschlagseiten)

**DRUCKVORBEREITUNG & DRUCK**

AF Druck GmbH Holleben

**ANZEIGENPREISLISTE**

2004a

Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht unbedingt die Meinung der Redaktion oder des Herausgebers wieder.  
Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte oder Bilder keine Haftung.

ISSN 0945-9529

scientia halensis erscheint mit freundlicher Unterstützung der Vereinigung der Freunde und Förderer der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg e. V.

## EDITORIAL

**Hans-Reiner Höche, Hartmut S. Leipner und Heinrich Graener**

4

Mit diesem Heft der scientia halensis soll die für alle Beteiligten sehr erfolgreiche Zusammenarbeit des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften und des Fachbereichs Physik mit dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik und dem Fraunhoferinstitut für Werkstoffmechanik einer breiten Öffentlichkeit schlaglichtartig vorgestellt werden. Die Auswahl der Einzelbeiträge orientiert sich an dem naturwissenschaftlichen Forschungsschwerpunkt Materialwissenschaften, wobei Nanostrukturen den »roten Faden« bei der Themenauswahl bilden.

Für die Herstellung von nanostrukturierten Materialien gibt es eine riesige Auswahl von Verfahren und Methoden, die sich in zwei Strategien unterteilen lassen: einerseits das Herabskalieren zu immer kleineren geometrischen Abmessungen durch Nutzung von Formgebungsverfahren und andererseits die Herstellung von Materialien durch den gesteuerten Aufbau auf atomarer und molekularer Skala. Ziel dieser

immer weitergehenden Miniaturisierung ist es beispielsweise in der Halbleiterindustrie, auf immer engerem Raum möglichst viel Information zu speichern bzw. bei geringem Energieaufwand immer größere Datenmengen zu verarbeiten. Darüber hinaus kann man durch die Begrenzung auf wenige Atome bzw. Moleküle physikalische Eigenschaften erzwingen, die das gleiche Material in makroskopischen Dimensionen nicht hat und physikalisch begründet auch nicht haben kann. Hier setzt die physikalische Grundlagenforschung an. Sie sucht gleichzeitig nach immer neuen Wegen der Herstellung von nanostrukturierten Materialien, der Verbesserung der analytischen Verfahren und der Modellierung der Materialsysteme mit Methoden der theoretischen Physik. Die Umsetzung in industrielle Verfahren führt zur sogenannten Nanotechnologie, die für sich genommen als Querschnittsdisziplin anzusehen ist, da sie schon jetzt in sehr vielen Bereichen zu spektakulären neuen Anwendungen geführt hat.

Gerade in diesem Jahr, dem Jahr der Technik, wird allorts das Potenzial der Nanotechnologie diskutiert. Es gibt nationale und internationale Programme zur Einführung und Entwicklung neuer Technologien. Am Standort Halle wird dem dadurch Rechnung getragen, dass im bis 2006 zu errichtenden dritten Gebäude des Technologie- und Gründerzentrums das Technikum für Nanostrukturierte Materialien eingerichtet wird, das den zentralen Teil des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften bilden wird. Die fächerübergreifende Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Nanostrukturen beschränkt sich aber nicht auf die oben genannten physikalisch orientierten Bereiche, sondern integriert auch Arbeitsrichtungen der Chemie und Ingenieurwissenschaften. Das Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik und das Fraunhoferinstitut für Werkstoffmechanik werden ebenfalls im TGZ III Arbeitsgruppen etablieren. ■

Übersehen Sie nicht die  
besten Momente im Leben.

Alles wird anders.  
Trotthe bleibt gut.



1 8 8 7 4 6 0 0

TROTTHE  OPTIK  
since 1887

Große Steinstraße 10 | 06108 Halle (S.)

Telefon: (0345) 2029241

Steinweg 27 | 06110 Halle (S.)

Telefon: (0345) 5 12 65 60

www.trotthe.de

# NANOSTRUKTUREN – VON DER NATUR GESCHAFFEN

**Frank Heyroth und Bodo Fuhrmann**

Die Nanotechnologie, ein sich in den letzten Jahren rasant entwickelnder, gebietsübergreifender Zweig der Forschung und Entwicklung, der sich mit der Herstellung und Anwendung nanostrukturierter Materialien befasst, hat seine Vorbilder in der Natur. Natürliche nanostrukturierte Materialien sind in der belebten und unbelebten Natur in vielfältiger Form vorhanden und werden seit über 100 Jahren durch den Menschen auch technisch genutzt. In den Millionen Jahren der Evolution konnten sich in den biologischen Systemen optimierte, multifunktionale, nanoskalierte Strukturen herausbilden. Dabei wird insbesondere die Wechselwirkung zwischen Festkörpern oder lebenden Organismen mit ihrer Umwelt wesentlich von der Nanostruktur ihrer Grenzflächenschichten bestimmt. Auch die makroskopischen Eigenschaften der Körper, wie z. B. deren mechanische Festigkeit, sind eng mit der mikroskopischen Anordnung der beteiligten Bausteine verknüpft. Im Folgenden soll dies an Hand von drei unterschiedlichen Nanostrukturen aus der belebten Natur verdeutlicht werden.

## **Knochenstruktur**

Bis heute ist es ein aktueller Gegenstand der Forschung, wie die Natur harte und sehr feste Kompositmaterialien, wie Knochen, Zähne oder Muschelschalen, aus einer Mischung von weichen, zähen Proteinen und eingebetteten harten aber spröden Mineralkristallen erzeugt. Dabei besitzen viele Organismen eine hoch entwickelte Kontrolle über die Kristallisationsprozesse; sie bestimmen Kristallstruktur und -form. Diese reicht von den filigranen silikathaltigen Strukturen der Kieselalgen bis hin zu hoch bruchfesten Knochenstrukturen.

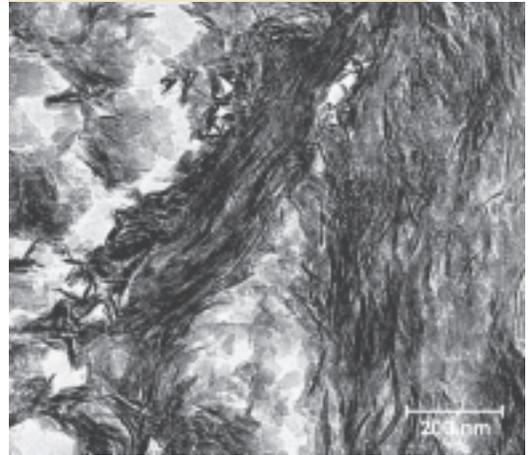
Als Beispiel soll eine elektronenmikroskopische Aufnahme von menschlichem Knochen dienen. Knochen ist ein hierarchisch aufgebautes Gewebe. Er besteht in seiner untersten Organisationsebene zum größten Teil aus einem Gerüst selbstorganisiert wachsender, organischer Kollagenfibrillen mit eingelagerten Hydroxylapatit-Kristallplättchen. Auf höherer hierarchischer Ebene

(sub-mm) hat das Gewebe eine trabekuläre (schwammartige) Struktur. Die größte Bruchzähigkeit von Knochen hängt von der Struktur auf allen Hierarchieebenen ab, aber insbesondere die spezielle Nanostruktur macht es dem Knochen möglich, Spannungsüberhöhungen an Defekten bei mechanischer Belastung effizient abzubauen. Die Komposite aus der Natur sind damit Vorbilder für die Herstellung von festen, aber trotzdem fehlertoleranten Materialien wie es z. B. in der Industrie durch Zugabe von speziellen Füllstoffen zu Polymermischungen erreicht werden soll.

## **Der »Lotus-Effekt«**

Bei Regen kann man beobachten, dass bestimmte Pflanzenoberflächen (z. B. die Blätter von Kohl, Kapuzinerkresse und insbesondere der Lotusblume) von Wasser nicht benetzt werden und zugleich vollkommen schmutzabweisend sind. Der Grund liegt in der kombinierten Mikro-

5



Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme eines Ultradünnschnitts aus der Kortikalis eines menschlichen Oberschenkelknochens. Die dunkel erscheinenden Objekte sind Hydroxylapatit-Plättchen, die in verschiedenen Ausrichtungen im Knochen vorliegen.

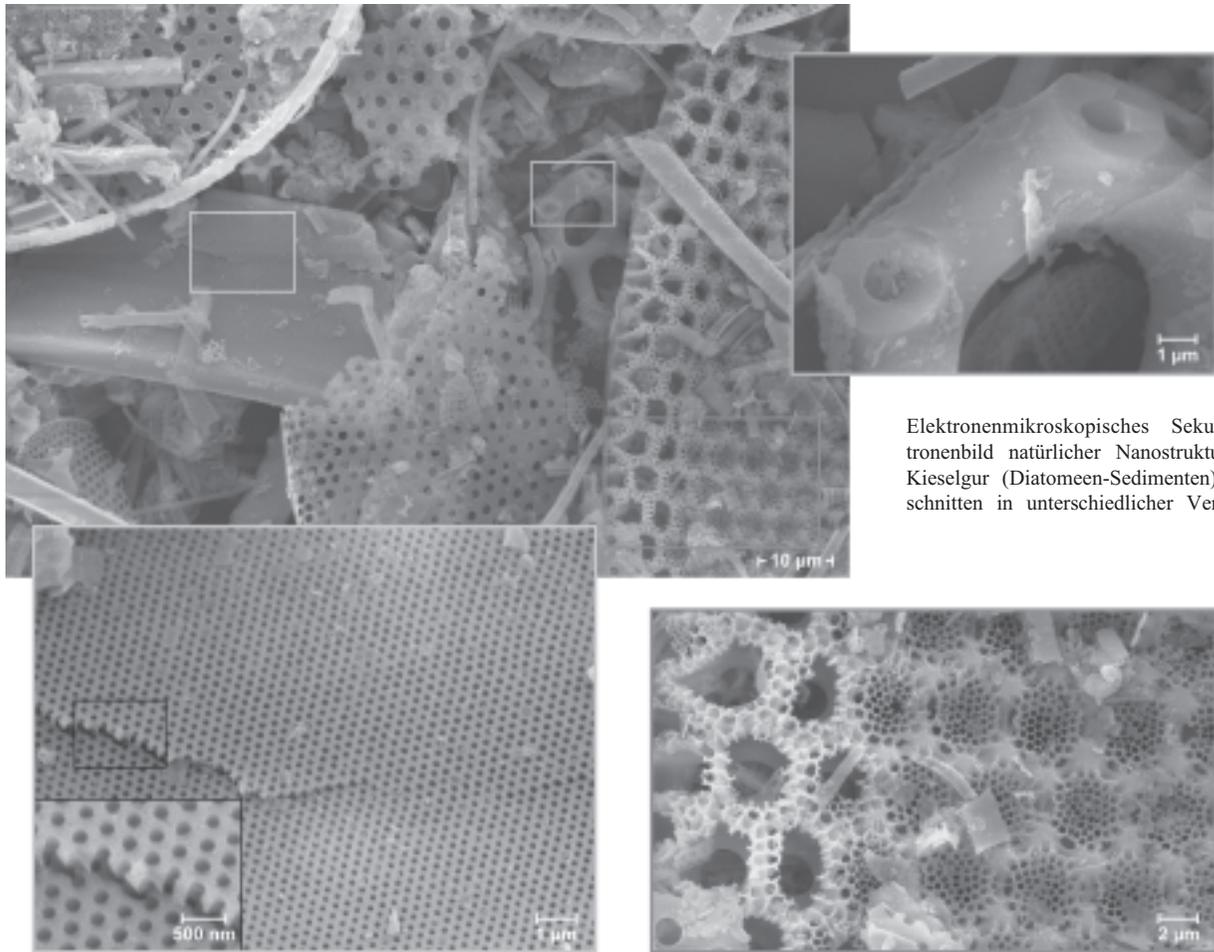
Mikrographie aus dem Institut für Werkstoffwissenschaft der Universität Halle.

und Nanostruktur der Pflanzenoberflächen, wie eine Arbeitsgruppe an der Universität Bonn Anfang der neunziger Jahre herausfand. Durch diese Strukturierung wird eine hydrophobe glatte Oberfläche superhydrophob, also extrem wasserabstoßend (vgl. Abbildung). In der rauen Blattoberfläche wird Luft so eingeschlossen, dass sich die Kontaktfläche zu einem Flüssigkeitstropfen oder Schmutzpartikel minimiert – der Tropfen zieht sich, bedingt durch seine Oberflächenspannung, zu einer Kugel zu-



Links: Wassertropfen auf einem Grünkohlblatt (3fach vergrößert). Die Tropfen berühren die superhydrophobe Blattoberfläche nur an wenigen Punkten und ziehen sich auf Grund der Oberflächenspannung zu einer Kugel zusammen. Rechts: Rasterelektronenmikroskopisches Bild der Blattoberfläche. Durch die Kombination von Mikro- (Zellen) und Nanostruktur (Wachskristalle) wird die effektive Kontaktfläche zu einem Flüssigkeitstropfen minimiert.

6



Elektronenmikroskopisches Sekundärelektronenbild natürlicher Nanostrukturen in Kieselgur (Diatomeen-Sedimenten) mit Ausschnitten in unterschiedlicher Vergrößerung.

sammen und rollt bei geringsten Neigungswinkeln scheinbar reibungslos ab. Dabei werden auch eventuell vorhandene Schmutzpartikel mitgerissen; die Blattoberfläche reinigt sich so quasi selbst. Dieses Verhalten wird auch als »Lotus-Effekt« bezeichnet.

Man findet ihn auch im Tierreich z. B. bei Libellen- und Schmetterlingsflügeln. Technologisch wird derzeit versucht, den Lotus-Effekt nachzubilden, um sich selbst reinigende Fassadenfarben, Dachziegel oder Polymerfolien für Solarzellen und Glasfassaden zu entwickeln.

### Kieselalgen (Diatomeen)

Kieselalgen bevölkern in einer riesigen Artenvielfalt unseren Planeten schon seit Urzeiten und zählen bis heute als Plankton in den Weltmeeren zu den größten Sauerstoffproduzenten. Alle der mehr als zehntausend Arten haben eines gemeinsam – sie umgeben sich mit einem Skelett aus Siliziumdioxid in Form von amorpher Kiesel-

säure. Nach dem Absterben der Algen sinken deren Skelette auf den Meeresboden, wo sich über viele Millionen Jahre riesige Sedimentschichten ansammeln.

Im Jahre 1836 entdeckte ein Fuhrmann zufällig in der Lüneburger Heide erstmals große Vorkommen solcher Ablagerungen aus dem Miozän in Form von »weißer Erde«, die heute als Kieselgur oder Diatomeenerde bekannt ist. Gegenwärtig werden weltweit ca. 1,8 Mio. t jährlich im Tagebau gefördert; die Gesamtvorkommen auf der Erde werden auf insgesamt etwa 900 Mio. t geschätzt.

Kieselgur wird aufgrund der porösen Struktur der Kieselalgenschalen nach Aufarbeitung vor allem als Filtrierhilfsmittel in der Anschwemmfiltration u. a. zur Klärung von Fruchtsäften, Wein und Bier sowie in der Zuckerindustrie verwendet. Weiterhin kommt Kieselgur als Dämm- und Baustoff zur Wärme- und Schallisierung sowie als Schleifmittel, z. B. in Zahnpasta, zum Einsatz.

Alfred Nobel vermischte 1865 (deutsches Patent 1867) Diatomeenerde mit dem sehr

stoßempfindlichen Nitroglycerin und erfand so das stoßunempfindlichere Dynamit. Für Mikroskopiker sind Diatomeen beliebte Objekte zu Test- und Justierzwecken.

Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen typische Strukturen der Diatomeenschalen. Vergleichbare Strukturen findet man auch in den künstlich hergestellten Nanoporen und -kanälen, wie sie in den folgenden Beiträgen vorgestellt werden. ■

*Frank Heyroth studierte von 1989 bis 1995 Physik an der Martin-Luther-Universität (Promotion 2000) und ist seit 2002 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Interdisziplinären Zentrum für Materialwissenschaften für das Analytische Labor verantwortlich.*

*Bodo Fuhrmann studierte von 1984 bis 1989 Physik an der halleischen Universität (Promotion 1994) und arbeitet jetzt als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Interdisziplinären Zentrum für Materialwissenschaften.*

# NANOSTRUKTUREN ...

## MODEERSCHEINUNG IN DEN MATERIALWISSENSCHAFTEN?

**Hans-Reiner Höche**

Die Nanotechnologie – gemeint sind Technologien zur Strukturierung von Materialien auf Längenskalen von 1 Hunderttausendstel bis 1 Millionstel Millimeter Länge – ist eine der Schlüsseltechnologien dieses Jahrhunderts. Für Physiker ist dieses Gebiet von besonderem Interesse, verbindet es doch die Atomphysik mit der Festkörperphysik. Anfänglich sah man die Verschiebung der Relation der Zahl der Atome an der Oberfläche zu den im Volumen der Partikel befindlichen Atome als wesentliches Kriterium an. Heute weiß man, dass in nanostrukturierten Materialien physikalische Gesetzmäßigkeiten gelten, die im makroskopischen Festkörper vernachlässigbar sind bzw. nicht zum Tragen kommen. So leuchten beispielsweise Halbleiterpartikel mit einem Radius von 4,1 nm im Roten, bei einem Radius von 1,7 nm im Gelben und bei 1,2 nm Radius im Grünen. Diese quantentheoretisch begründete Abhängigkeit zeigt exemplarisch, wie durch immer kleinere Dimensionen neue Eigenschaften entstehen können.

Ausgangspunkt für die Entwicklung der Nanotechnologie war die Mikrominiaturisierung elektronischer Bauelemente, die sich anfänglich als ingenieurtechnische Herausforderung beschreiben lässt. Je weiter man sich in den lateralen Dimensionen aber atomaren Maßstäben näherte, umso deutlicher wurden die Grenzen, die durch physikalische Gesetzmäßigkeiten gesetzt sind.

### Lithographie

Bei der Herstellung von Nanostrukturen sind die lithographischen Verfahren von zentraler Bedeutung. Allerdings sind der Miniaturisierung durch die Beugung des verwendeten Lichtes Grenzen gesetzt (für sichtbares Licht bei ca. 250 nm). Man kann nun versuchen, die Wellenlänge immer weiter zu verkleinern und wird so zwangsläufig zur Elektronenstrahlolithographie geführt. Diese Technik ist zeitlich sehr aufwändig (d. h. lange Herstellungszeiten und damit keine Massenproduktion möglich). Heutzutage geht die Entwicklung neben

dem Übergang zur Ultraviolett-Lithographie dahin, dass die »Masterschablonen« (sozusagen Stempel) abgeformt werden. Das geht mit Spritzgussverfahren oder »Imprint«-Techniken (Prägen). Als Beispiel zeigt Abb. 1 die Struktur einer DVD, wie sie heute in der Informationstechnologie zum Einsatz kommt. Man erkennt die technologischen Probleme, die beim elektronenstrahlolithographischen Prozess des Schreibens eines Kreises entstehen.

### Ferroelektrische Speicherbauelemente

Als Beispiel einer innovativen Anwendung der Imprinttechnik sei die Herstellung von ferroelektrischen RAM (random access memory) genannt, wie sie in der Gruppe von PD Dr. Dietrich Hesse am MPI für Mikrostrukturphysik entwickelt wurde. Ziel ist die möglichst kleine Dimensionierung von nichtflüchtigen Speichern auf der Basis von ferroelektrischen Materialien. Da sowohl die ferromagnetischen als auch die ferroelektrischen Materialeigenschaften

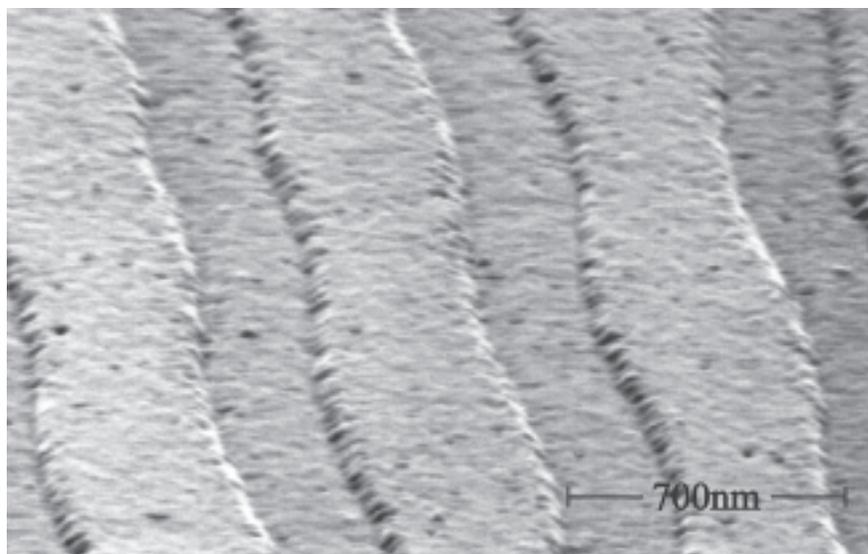


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Abbildung eines optischen Datenträgers (DVD)

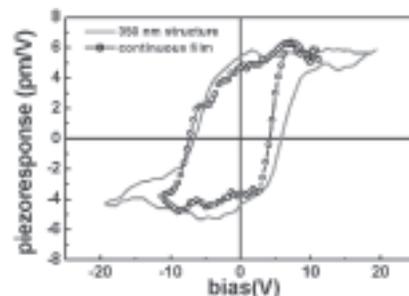
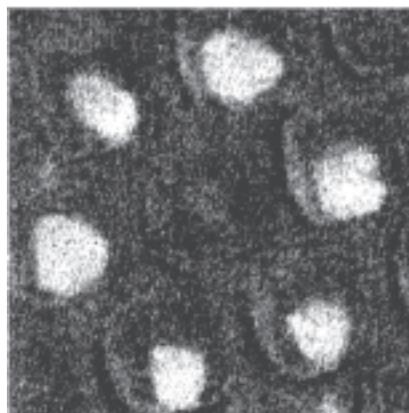
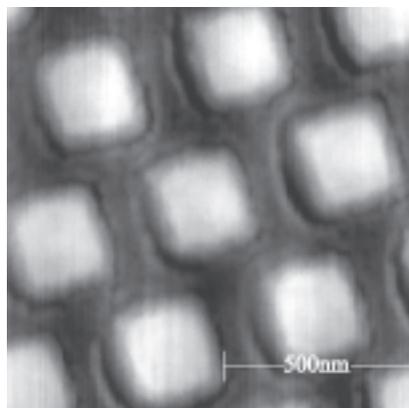


Abb. 2: (A) Rasterkraftmikroskopische Abbildung von 250 nm großen PZT-Zellen (Topographie-Kontrast); (B) Rasterkraftmikroskopische Abbildung des elektrischen Feldes an den Zellen; (C) Hystereseschleife als Nachweis der Ferroelektrizität.

typische Festkörpereigenschaften sind, war die Frage, bis zu welchen Dimensionen das Phänomen der Ferroelektrizität auftritt. Dazu mussten nanostrukturierte Materialien hergestellt werden. In dem in Halle entwickelten Verfahren wird die Imprinttechnik nicht zur Strukturierung der fertigen ferroelektrischen Schichten eingesetzt, sondern es wird in der weichen Ausgangsmasse der sogenannten »precursor«-Phase die Material-»Portionierung« so vorgenommen, dass nach den thermischen Prozessen PZT-Nanopartikel (PZT steht für Blei-

8

zirkonattitanat) entstehen. In Abb. 2A sind die fertigen Partikel abgebildet. Abb. 2B belegt die »Adressierbarkeit«, d. h. die Schaltbarkeit der Einzelpartikel durch Anwendung elektrischer Felder. Das mittlere der 7 vergrößert dargestellten Teilchen hat die andere Polarität in Relation zu den umgebenden 6 Partikeln. In Abb. 2C schließlich ist der Nachweis erbracht, dass auch diese kleinen Partikel noch die für makroskopische Ferroelektrika typische Hystereschleife zeigen.

### Halbleiter-»Quantenpunkte«

Im dritten Beispiel sind nanoskopische Halbleiterpartikel auf einer Siliziumoberfläche ausgewählt (Abb. 3). Die Bezeichnung Quantenpunkte ist darin begründet, dass bei diesen kleinen Partikeln (»Punkten«) die Eigenschaften durch Phänomene der Quantentheorie bestimmt sind. Sie wurden im Institut für Kristallzüchtung Berlin durch epitaktisches Wachstum von Silizium-Germanium-Legierungen (SiGe) auf Siliziumoberflächen gezüchtet. Die Herstellung geschieht hier nicht durch lithographische Verfahren, sondern durch so genannte Selbstorganisation. Beim Wachstum von SiGe-Legierungen gibt es an der Grenzfläche schon nach wenigen Atomlagen große elastische Verzerrungen, die

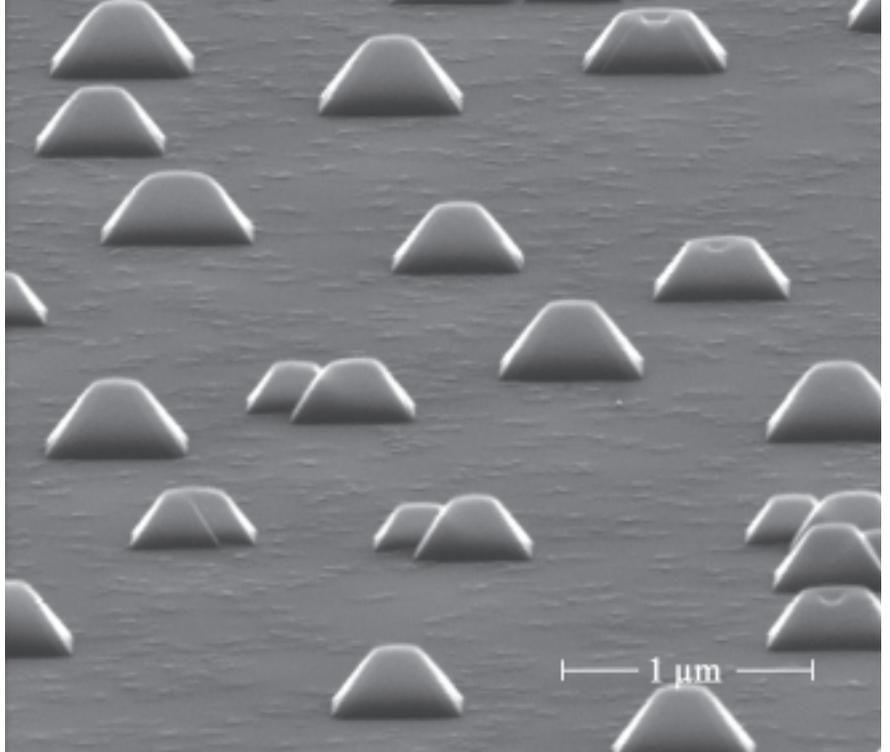


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Abbildung von SiGe-»Quantenpunkten«

durch das weitere lokalisierte Wachstum der SiGe-Hügel abgebaut werden. Das entspricht dem Prinzip der Energieminimierung. Diese Strukturen werden mit dem Ziel hergestellt, die im Infraroten liegende Lichtemission des Siliziums durch Nanostrukturierung ins Sichtbare zu verschieben, um damit letztendlich im sichtbaren Spektralbereich arbeitende Lichtquellen zu bauen.

### Nanodrähte

Als Letztes sei die Erzeugung von Nanostäben/-drähten aus Silizium genannt, die in den Gruppen von Dr. Peter Werner und PD Dr. Margit Zacharias am MPI für

Mikrostrukturphysik verfolgt wird. Erzeugt man in einem ersten Schritt auf der Siliziumoberfläche kleine Goldpartikel (statistisch verteilt oder durch lithographische Prozesse in regelmäßiger Anordnung) und bietet dann der so präparierten Oberfläche Siliziumatome an (durch Verdampfen oder reaktive Prozesse), so werden diese zunächst im Gold gelöst und dann an der Grenzfläche Gold/Silizium als Silizium abgeschieden. Dabei wird der Durchmesser des sich bildenden Siliziumstabes durch den Durchmesser des Goldkügelchens festgelegt. Solche Quantendrähte zeigen gegenüber dem massiven Silizium auffällig veränderte elektrische Eigenschaften. In Abb. 4 ist eine rasterelektronenmikroskopische Abbildung solcher Silizium-»Stäbchen« wiedergegeben. Man erkennt deutlich die auf der Spitze thronende Goldhalbkugel. Zur Zeit wird auf breiter Front an neuen Methoden zur Erzeugung von Nanostrukturen gearbeitet; nahezu jede Woche werden neue Ideen publiziert. Parallel dazu müssen die diagnostischen Methoden zur Bestimmung der Materialeigenschaften voran gebracht und das theoretische Verständnis vertieft werden.

Die Nanostrukturforschung und Nanotechnologie sind wegen des außerordentlich großen Anwendungspotenzials keine vorübergehende Modeerscheinung, sondern der Aufbruch in ein neues Zeitalter der Materialforschung. ■

*Hans-Reiner Höche studierte von 1960 bis 1966 Physik an der halleschen Universität (Promotion 1971, Habilitation 1980), seit 1992 Professor für das Arbeitsgebiet Kristallphysik am FB Physik, seit 1996 Geschäftsführender Direktor des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften.*

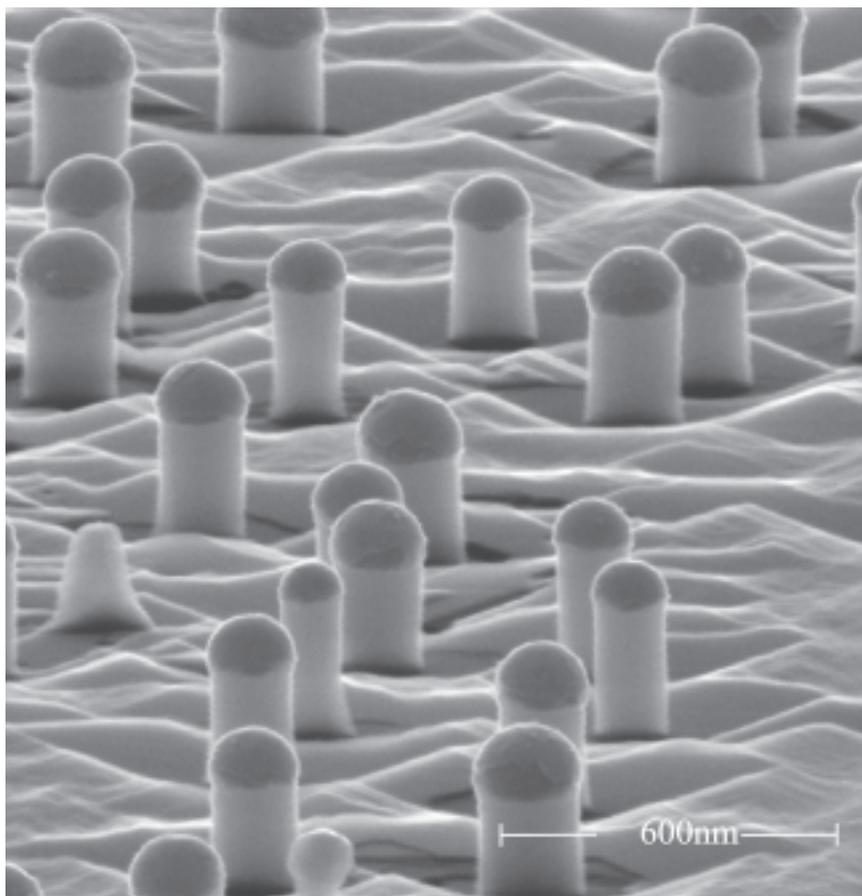


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Abbildung von Si-»Quantendrähten«

# ATOME SEHEN – MIKROSKOPE FÜR KLEINSTE STRUKTUREN

Hartmut S. Leipner und Peter Werner

Richard P. Feynmans (Nobelpreisträger für Physik 1965) berühmte Rede »Plenty of Room at the Bottom« aus dem Jahr 1959 am California Institute of Technology gilt gemeinhin als Geburtsurkunde der Nanotechnologie. In diesem Vortrag hat er die Vision, dass der Text der 24bändigen Encyclopaedia Britannica mit der entsprechenden Technologie klein genug geschrieben werden könne und auf einem Stecknadelkopf Platz finden müsse. Diese Vision ist unmittelbar mit seiner Forderung nach entsprechenden Werkzeugen verbunden: Baut bessere Mikroskope, damit man sehen kann, was auf dem Stecknadelkopf ist, letztendlich mit einer solchen Auflösung, um Atome zu erkennen. Während Elektronenmikroskope lange Zeit keine besseren abbildenden Eigenschaften hatten als der Boden einer Bierflasche, sind heute Geräte mit exzellenten Parametern verfügbar, die den direkten Zugang zum atomaren Aufbau vieler Materialien erlauben.

Die Möglichkeit eines um Größenordnungen besseren Auflösungsvermögens von Elektronenmikroskopen im Vergleich zu Lichtmikroskopen beruht auf dem Welle-Teilchen-Dualismus. Elektronen als Welle aufgefasst besitzen eine sehr viel kleinere Wellenlänge als Licht, die entsprechend dem Rayleighkriterium den kleinsten noch auflösbaren Objektabstand bestimmt. Allerdings wird dieser theoretische Wert bei weitem nicht erreicht. Das Problem ist die Abbildungsoptik mit den Abbildungsfehlern von magnetischen Linsen, die für Elektronen benutzt werden. Weiterhin sind die entstehenden Bilder nur aus der Überlagerung (Interferenz) der Elektronenwellen in

der Probe zu verstehen und verlangen i. A. eine aufwändige mathematische Simulation. Die neueste Generation von Elektronenmikroskopen setzt nicht nur auf eine computergesteuerte Korrektur von Abbildungsfehlern, sondern kombiniert die Abbildung mit der spektroskopischen Analyse in nanoskopischen Bereichen. Man gewinnt damit aus der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) nicht nur Informationen über die kristallographische Anordnung (Abb. 1), sondern auch über die chemische Natur der untersuchten Strukturen. Die verschiedenen elektronenmikroskopischen Abbildungsmethoden sind nicht nur kompliziert in der Technik, sondern verlan-

gen auch ausgefeilte Präparationsverfahren für das Probenmaterial. Auf der Basis eines Kooperationsvertrags zwischen dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik und der Martin-Luther-Universität wurde deshalb 1999 ein Zentrum für Materialcharakterisierung (CMC) gegründet, um die

9

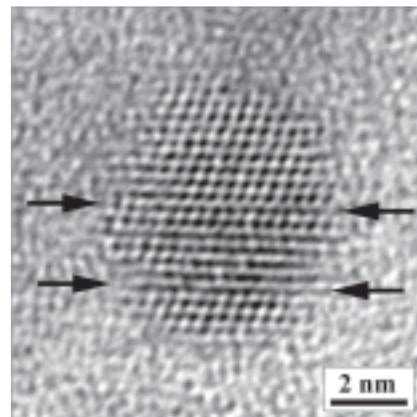


Abb. 1 Hochauflösendes TEM-Bild eines einzelnen Cadmiumselenid-Teilchens, an dem die Position der atomaren Bausteine erkennbar wird. Die Pfeile kennzeichnen Planardefekte (Aufnahme H. Hofmeister, MPI für Mikrostrukturphysik).

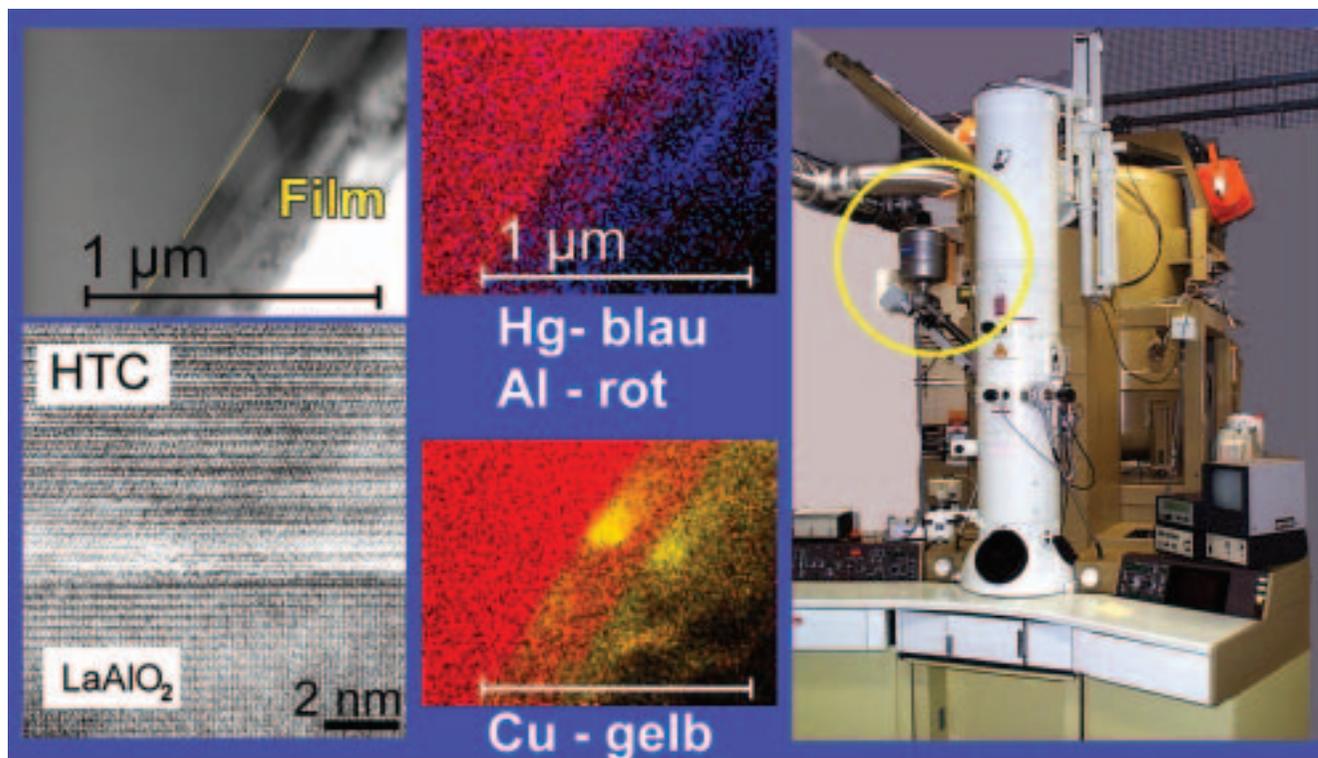


Abb. 2 Hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie eines Hochtemperatur-Supraleiters (Institut für Physikalische Hochtechnologie Jena), aufgenommen mit einem JEOL JEM4000 (rechts). In den linken Teilbildern sind der HTSL-Film und das Substrat bei unterschiedlicher Vergrößerung wiedergegeben. Die mittleren Bilder zeigen die Elementverteilung in dem Grenzgebiet HTSL-Film/Substrat. Der gelbe Kreis am Elektronenmikroskop rechts weist speziell auf das EDX-Spektrometer hin.

Hochleistungsgeräte gemein zu nutzen und einem breiten Kreis von Interessenten zur Verfügung zu stellen. Im folgenden sollen zwei Beispiele vorgestellt werden, die die experimentellen Möglichkeiten im CMC charakterisieren.

### TEM an Hochtemperatur-Supraleitern

Seit den 70er Jahren machen neue magnetische Werkstoffe von sich reden: die Klasse der sogenannten Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL). Bis dahin wurde die Supraleitung zumeist in Metallen und Legierungen beobachtet, die hierzu mittels flüssigem Helium abgekühlt werden mussten. Die neu entdeckten HTSL funktionieren schon bei  $-200^{\circ}\text{C}$ , was neue, kostengünstige technische Anwendungen ermöglicht. Die supraleitenden Eigenschaften in diesen HTSL-Materialien hängen in starkem Maße von der Mikrostruktur ihres Gefüges ab, aber auch von der Gitterstruktur der einzelnen Kristallite. Moderne Elektronenmikroskope erlauben es, gleichzeitig sowohl die Morphologie der Schichten bzw. Filme, deren Kristallgitterstruktur als auch die Verteilung der chemischen Elemente mit hoher Ortsauflösung zu ermitteln. Als Beispiel demonstriert Abb. 2 eine solche Analyse eines komplexen HTSL-Films ( $\text{Hg}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_6$ ) der auf einem Substrat, hier  $\text{LaAlO}_2$ , abgeschieden wurde. Das für diese Untersuchung verwendete Transmissionselektronenmikroskop (siehe Abb. 2) kann sowohl Übersichtsaufnahmen (links oben), hochaufgelöste Bilder

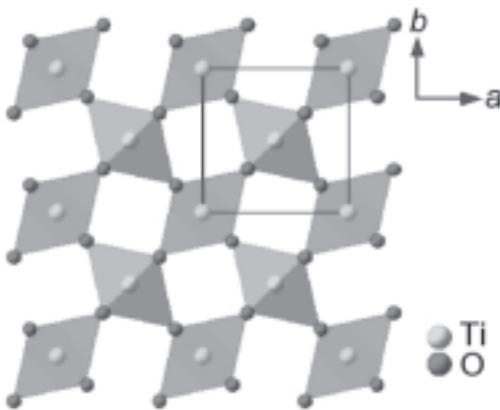


Abb. 3 Kristallstruktur der  $\text{TiO}_2$ -Modifikation Rutil. Die Sauerstoffatome bilden ein Oktaeder, in deren Zentrum das Titan sitzt. Eingezeichnet ist eine Elementarzelle entlang der a- und b-Achsen.

des Kristallgitters (links unten) als auch chemische Analysen von ein und derselben Probenstelle liefern. Die chemische Analyse basiert auf der Auswertung der Röntgenstrahlen, die bei dem Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Probe entstehen (sogenanntes EDX-Verfahren – energy dispersive X-ray analysis). Der Elektronenstrahl hat dabei einen Durchmesser von nur einem Nanometer ( $10^{-9}$  m), was eine hohe Ortsauflösung ermöglicht. In der Mitte sind entsprechende Falschfarbenaufnahmen der Verteilung der Elemente in diesen Schichten wiedergegeben. Dabei handelt es sich um die relevanten Elemente Aluminium (Al), Kupfer (Cu) und Quecksilber (Hg). Diese Aufnahmen zeigen mit einer Ortsauflösung von nur einigen Nanometern, dass die Elemente, speziell Cu recht inhomogen verteilt sind. In diesem gezeigten Fall ist zu erwarten, dass die Supraleitung an diesen Stellen stark reduziert wird.

### Analytische TEM an Titanoxid

Titanoxid ist ein vielfältig eingesetztes Material, u. a. als Korrosionsschutzschicht und Photokatalysator. Eine extrem dünne Oxidschicht ist verantwortlich für die gute biomedizinische Verträglichkeit von Titan, das in Implantaten verwendet wird. Titanoxid kommt aber in unterschiedlichen Modifikationen vor, die substanziiell veränderte physikalische Eigenschaften haben. Ähnliche Titan-Sauerstoff-Oktaeder wie in  $\text{TiO}_2$  (Abb. 3) sind auch Bestandteil verschiedener ferroelektrischer Verbindungen. Ziel hochauflösender elektronenmikroskopischer Untersuchungen an solchen Materialien ist es nicht nur, die Anordnung der Atome – bzw. lokale Abweichungen von der perfekten Struktur – herauszubekommen. Zum einen möchte man die Atome in ihrer chemischen Natur identifizieren und zum anderen die spezifischen Bindungsverhältnisse aufklären (Bindungslängen, -winkel, Koordination der Nachbaratome). Diese Informationen kann man mit hoher Ortsauflösung von der Elektronenenergieverlust-Spektroskopie (EELS) bekommen. Die auf einen Festkörper auftreffenden hochenergetischen Primärelektronen erleiden einen bestimmten Energieverlust, der charakteristisch für die Elektronenstruktur des Materials ist. Aus den gemessenen Spektren kann man auf die beteiligten Elektronenübergänge zwischen spezifischen Niveaus schlussfolgern. Abb. 4 zeigt

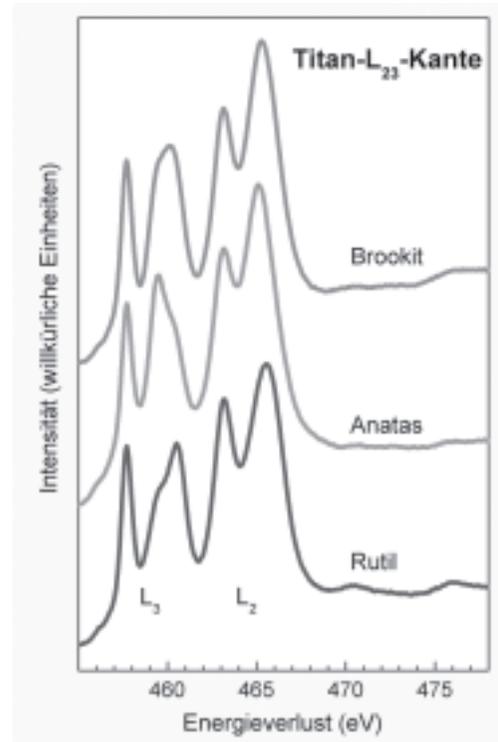


Abb. 4 Elektronenenergieverlustspektren der drei  $\text{TiO}_2$ -Modifikationen Rutil, Anatas und Brookit im Bereich der  $L_{2,3}$ -Kante des Titans.

gemessene Verlustspektren an den drei Modifikationen des  $\text{TiO}_2$ . Diese Spektren können nun – in Verbindung mit theoretischen Rechnungen – als »Fingerprint« für hochauflösende Messungen in dünnen Schichten dienen, um deren Struktur im Detail analysieren zu können. ■

*Hartmut S. Leipner studierte von 1977 bis 1982 Physik an der Karlsuniversität Prag und wurde 1987 an der Martin-Luther-Universität promoviert (Habilitation 2001). Er ist wissenschaftlicher Geschäftsführer des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften.*

*Peter Werner studierte Physik an der Martin-Luther-Universität und wurde dort 1988 promoviert. Von 1990 bis 1992 arbeitete er am Lawrence Berkeley Laboratory (USA). Seit 1992 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle.*

# FASZINATION NANOWELT

## FORSCHUNG IM ZENTRUM FÜR COMPUTATIONAL NANOSCIENCE

### Wolfram Hergert

Nanoskalige Dimensionen werden weltweit mehr und mehr industriell erobert, nachdem sich die Zugriffsmöglichkeiten auf die einzelnen Bausteine der Materie in den letzten Jahrzehnten wesentlich verbessert haben. Das Zentrum für Computational Nanoscience (CNS) – als Bestandteil des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften – widmet sich der theoretischen Untersuchung, Modellierung und Simulation von Nanosystemen. Dabei besteht die größte Herausforderung darin, Modellierungen über mehrere Größenordnungen von Raum und Zeit durchzuführen.

#### Nanostrukturen auf Metall-Oberflächen

Die Möglichkeit, metallische Nanostrukturen auf Metalloberflächen direkt zu untersuchen und gezielt zu verändern, erfordert eine kritische Prüfung klassischer Konzepte. In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Valeriy S. Stepanyuk und Prof. Dr. Jürgen Kirschner vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik wurde das Konzept der mesoskopischen Fehlpassung erarbeitet, das erfolgreich zur Diskussion der Eigenschaften metallischer Nanostrukturen eingesetzt wird.

#### Begriff der Fehlpassung für Nanostrukturen

Ausgehend von der Gitterfehlpassung, d. h. dem Unterschied der Gitterkonstanten von Substrat und dem Material, aus dem die deponierten Nanostrukturen bestehen, kann man überlegen, welche mechanischen Spannungen beim Aufwachsen der Nanostrukturen auftreten. Diese Überlegungen versagen jedoch oft bereits auf qualitativem Niveau! Die Anwendung des klassischen Begriffs der Gitterfehlpassung auf den Beginn des epitaktischen Wachstums führt nicht zu einer sinnvollen Beschreibung der resultierenden Spannungen. Die **makroskopische**

**Fehlpassung** wird aus den Gitterkonstanten der Volumenkristalle berechnet. Die Differenz der Gitterkonstanten wird ins Verhältnis zur Substratgitterkonstante gesetzt. Für die Homoepitaxie ist die makroskopische Fehlpassung null. Dieses einfache Bild ist jedoch nicht zutreffend. Auch bei der Homoepitaxie treten Spannungen auf. Es kommt zu atomaren Verschiebungen, die für die Wachstumsform, Insel- oder Lagenwachstum, entscheidend sein können.

Die Spannungseffekte auf **mesoskopischer** Skala können nicht mehr mit der makroskopischen Fehlpassung diskutiert werden, da die mittlere Bindungslänge in der wachsenden Nanostruktur von der Bindungslänge im entsprechenden Volumenkristall verschieden ist.

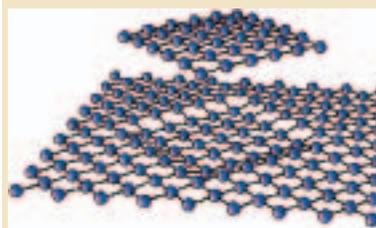
Die Notwendigkeit der Anpassung der Beschreibung auf der Nanoskala wird aus Abb. 1 klar. An den Rändern der Inseln treten auf Grund der verringerten Koordinationszahl starke Relaxationen auf, die mit zunehmendem Abstand vom Inselrand kleiner werden. Das Skalenverhalten der Fehlpassung wird maßgeblich durch das Verhältnis der Anzahl der Randatome zur Gesamtzahl der Atome bestimmt.

Bei der Definition der **mesoskopischen** Fehlpassung wird die mittlere Bindungslänge in der Nanostruktur ins Verhältnis zur Bindungslänge im Substrat gesetzt. Die

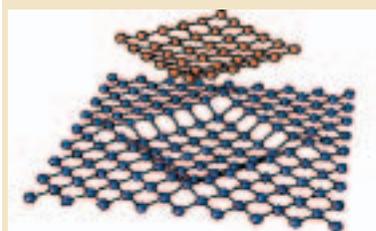
mesoskopische Gitterfehlpassung kann nicht einfach aus den Gleichgewichtsgitterkonstanten bestimmt werden, sondern erfordert numerische Simulationen. Für kleine Inseln variiert die mesoskopische Gitterfehlpassung stark mit der Zahl der Atome in der Insel.

#### Inselformen – Käseglocke oder Untertasse

Aus Rechnungen folgt, dass die Cu-Insel auf einem Cu(001)-Substrat die Form einer »Käseglocke« annimmt, d. h. die Randatome relaxieren stärker in Richtung der Cu-Oberfläche als die Atome im Zentrum der Insel. Auch das Substrat zeigt deutliche Relaxationseffekte (s. Abb. 2).



Insel aus Cu-Atomen



Insel aus Co-Atomen

Abb.2: Quadratische Inseln (36) Atome auf Cu(001)

Im Falle des heteroepitaktischen Wachstums von Co auf Cu(100) kommt es zu vergleichbaren Relaxationseffekten. Jedoch zeigt die Insel eine »Untertassenform«. Weiterhin stellt man fest, dass Relaxationseffekte hier größer sind als beim homoepitaktischen Wachstum von Cu-Inseln auf Cu(100).

Die Unterschiede in den Inselformen sind in den unterschiedlichen Kraftwirkungen der Atome aufeinander begründet. Für die Untertassenform der Co-Inseln ist auch der Magnetismus dieser Nanostrukturen mit verantwortlich.

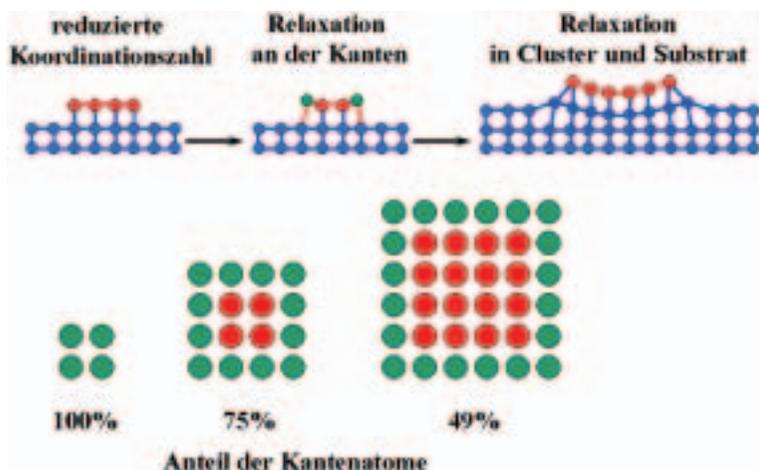


Abb.1: Ursache der mesoskopischen Gitterfehlpassung

## 12 Photonische Kristalle

Photonische Kristalle sind im (sub)- $\mu\text{m}$ -Bereich periodisch strukturierte dielektrische Materialien. Solche periodischen Strukturen können Frequenzbereiche (Bandlücken) aufweisen, in denen sie kein Licht transmittieren. Photonische Kristalle kann man auch als **Halbleiter für Licht** bezeichnen.

Solche photonischen Kristalle sind die Basis für vielfältige Anwendungen in der Optoelektronik. Sie werden in optischen Technologien, die die heutigen Informati-

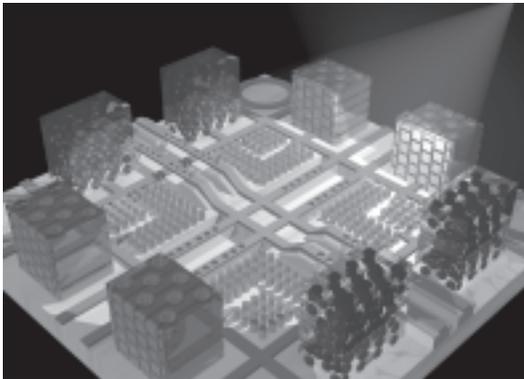


Abb. 3: Photonic Micropolis – Vision einer Kombination verschiedener auf photonischen Kristallen beruhender Komponenten (Joannopoulos Research Group at MIT, <http://ab-initio.mit.edu/photons/micropolis.html>)

onstechnologien ablösen werden, eine große Rolle spielen (s. Abb. 3).

Am MPI für Mikrostrukturphysik werden in der Abteilung von Prof. Dr. Ulrich Gösele zweidimensionale Strukturen, bestehend aus gitterperiodisch angeordneten Poren im Ausgangsmaterial, z. B. einem Silizium-Wafer, mittels elektrochemischer Ätzverfahren hergestellt.

Diese Strukturen können als Template zur Herstellung von Nanoröhren und Nanostäben, wie in dem Artikel auf Seite 24 erläutert, verwendet werden, stellen aber gleichzeitig photonische Kristalle dar. Eine wichtige Problemstellung ist die Optimierung der photonischen Bandlücke in zweidimensionalen Strukturen, bzw. die Konstruktion von dreidimensionalen photonischen Strukturen mit großer photonischer Bandlücke. In Zusammenarbeit mit Dr. Reinald Hillebrand (MPI für Mikrostrukturphysik) wurde eine dreidimensionale Struktur entwickelt (s. Abb. 4), die eine photonische Bandlücke von mehr als 25 Prozent der Mittenfrequenz der Bandlücke aufweist.

Diese Struktur kann aus den elektrochemisch hergestellten zweidimensionalen Strukturen erzeugt werden, indem senkrecht zu den geätzten Poren ein weiteres Porengitter mittels Ionenstrahlätzung erzeugt wird.

Gerade dieses Beispiel zeigt die Zukunft des Gebietes Computational Nanoscience:

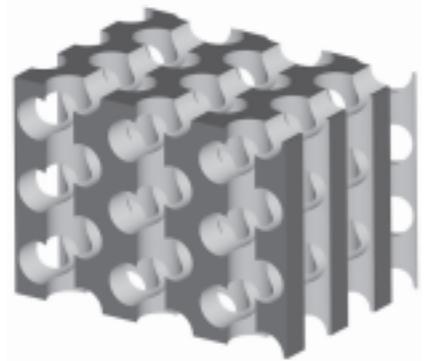


Abb.4: Design eines photonischen Kristalls basierend auf makroporösem Silizium

das gezielte Konstruieren von Mikro- und Nanostrukturen mit bestimmten vorgegebenen Eigenschaften.

*Der Autor, Jg. 1954, studierte von 1972 bis 1977 Physik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Nach Promotion und Habilitation wurde er 1996 zu apl. Professor für Computational Physics ernannt. Er leitet das Zentrum für Computational Nanoscience. Seine Forschungsschwerpunkte sind Festkörpertheorie und Photonik.*

## Attraktive Eigentumswohnungen – Straße der OdF 2



4-Raum-Wohnung  
mit ca. 115 qm, Balkon, Parkett, Komfortbad,  
mit Blick in den Stadtpark, Aufzug  
komplett bezugsfertig ab 179.687 EUR

3-Raum-Wohnung  
mit ca. 89 qm, Zimmer mit Erker, Parkett,  
Südseite, Blick ins Grüne, Aufzug  
komplett bezugsfertig ab 138.790 EUR

2-Raum-Wohnung  
mit ca. 74 qm, Balkon Richtung Westen,  
Komfortbad, Aufzug, Parkett  
komplett bezugsfertig ab 116.650 EUR

weitere Wohnungen im Angebot

### Beste Lage am grünen Stadtpark

#### Ihre Vorteile

Zahlung erst bei Übergabe  
Eigenheimzulagedarlehen und Baukindergeld  
günstige KfW-Darlehen  
Denkmalabschreibung für Eigennutzer  
exclusive Stadtlage

**WEISENBURGER**



Straße der OdF 3  
Telefon 03 45 - 29 170 0  
[www.weisenburger.com](http://www.weisenburger.com)

# EPOS – INTENSIVE POSITRONENQUELLE FÜR DIE MATERIALFORSCHUNG

## KOOPERATION ZWISCHEN UNI UND FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

**Reinhard Krause-Rehberg, Gerhard Brauer und Hartmut S. Leipner**

Materialforschung mit Positronen ist eine anerkannte Spezialrichtung der halleischen Physik. In Kooperation zwischen dem Großforschungszentrum Rossendorf und dem Interdisziplinären Zentrum für Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg befindet sich eine hochintensive Positronenquelle im Aufbau. Nach Fertigstellung wird das Labor als ein europäisches Kompetenzzentrum für Materialforschung mit Positronen auch externen Nutzern zur Verfügung stehen.

Die weitere Entwicklung der Materialwissenschaften gehört zu den erklärten Schwerpunkten der Forschungskonzeption der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. In diesem Kontext wurde im Vorjahr mit der Errichtung eines weit über die Grenzen des Landes Sachsen-Anhalt hinaus wirksamen Kompetenzzentrums für Material- und Werkstoff-Forschung mit hochintensiven Positronenstrahlen begonnen. Dieses Vorhaben ordnet sich ein in die Aktivitäten des Interdisziplinären Zentrums für Materialwissenschaften der Universität zum Studium nanostrukturierter Materialien. Die Martin-Luther-Universität hat dazu einen Kooperations- und Nutzungsvertrag mit dem Forschungszentrum Rossendorf e. V., einer Institution der

Leibniz-Gemeinschaft, zur Errichtung eines externen Forschungslaboratoriums abgeschlossen.

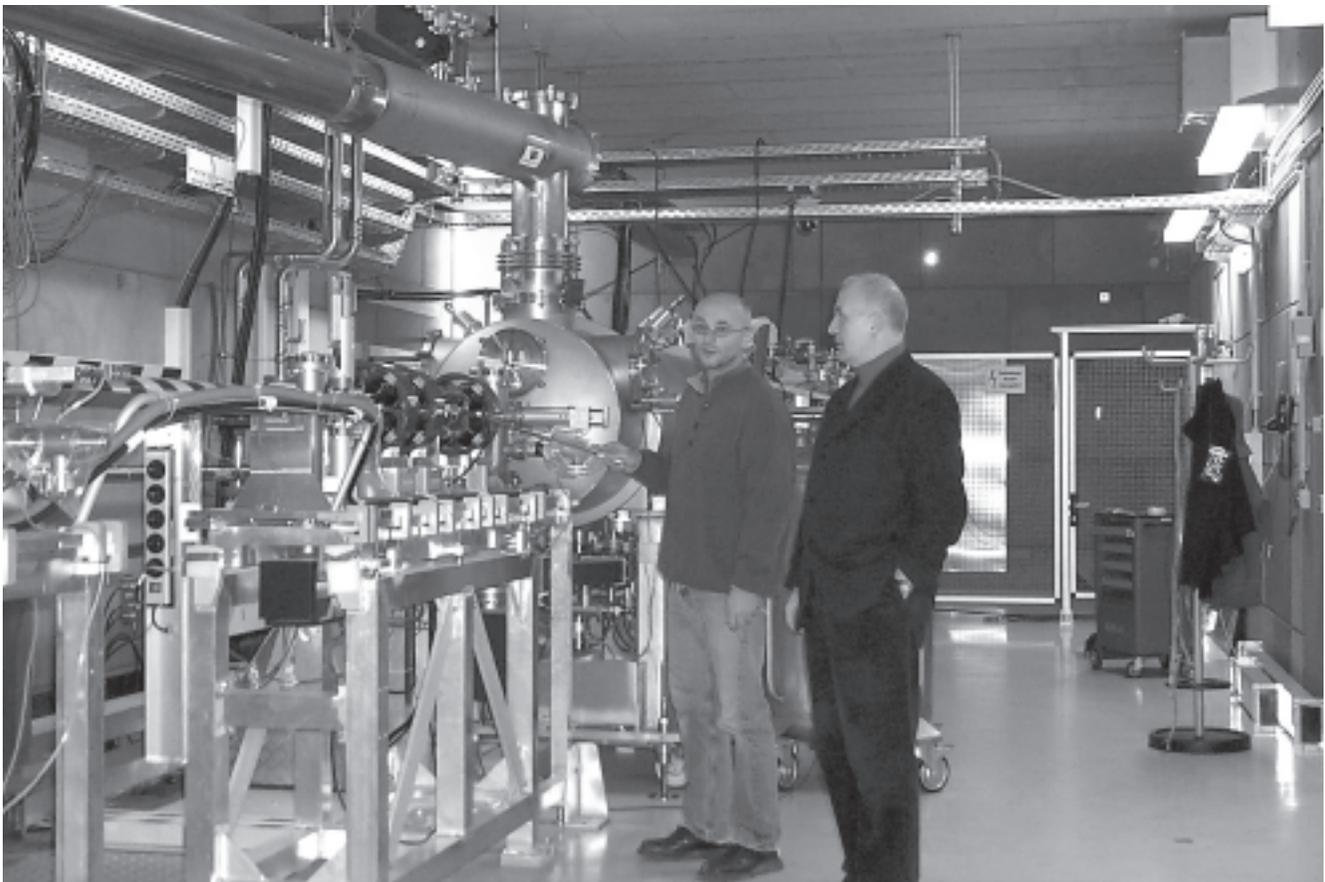
### *Materialforschung mit Positronen*

Die Nachfrage nach analytischen Methoden mit einer Auflösung bis zu einem Millionstel Millimeter wächst infolge der zunehmenden Miniaturisierung in allen Bereichen der Materialwissenschaften. Untersuchungen mit Positronen haben sich in den letzten Jahren zu einer unverzichtbaren Methode der Materialcharakterisierung entwickelt. Das Positron ist dabei ein Elementarteilchen, das exakt einem Elektron entspricht, mit dem Unterschied einer ent-

gegengesetzten elektrischen Ladung. Beim Aufeinandertreffen von negativ geladenen Elektronen der Materie mit den Positronen kommt es zur Zerstrahlung (Annihilation), also zur Bildung von Gammastrahlen, der Umwandlung von Masse in Energie.

Aus diesem Vorgang können in sehr empfindlicher Weise spezifische Informationen über den inneren Aufbau von Festkörpern entnommen werden. Dafür werden die Positronen beispielsweise aus einer radioaktiven Quelle in den zu untersuchenden Werkstoff implantiert. Dort überleben sie noch eine kurze Zeit, in der sie sich frei durch das Material bewegen. Treffen sie dabei auf Defekte im Material (Fehlstellen im Kristallgitter, Versetzungen, Nanoporen, usw.), so können sie für den Rest ihrer Lebensdauer dort lokalisiert werden. Dabei ändern sich die von außen messbaren Annihilationsparameter, wie u. a. die Positronenlebensdauer. Damit können diese Defekte in Größe, Zahl und ihren chemischen Eigenschaften untersucht werden. Die Positronentechnik kann für die Cha-

13



Das Foto zeigt den Leiter der ELBE-Strahlenquelle des Forschungszentrums Rossendorf Dr. Peter Michel (links) und Dr. Gerhard Brauer (Mitautor) vor der Strahlerzeugungsanlage von ELBE.

Foto: FZR-Archiv

rakterisierung eines breiten Spektrums technologisch relevanter Werkstoffe verwendet werden, wie z. B. Halbleiter, Metalle, Polymere und Keramiken. Mit dieser Methode lassen sich insbesondere atomare kleine Defekte, wie Leerstellen untersuchen (fehlendes Atom im Kristallgitter), deren Struktur und Konzentration in vielen Fällen die Materialeigenschaften und Bauelementefunktionen wesentlich bestimmen. Wegen ihrer geringen Größe sind solche Defekte nur selten mikroskopischen Methoden zugänglich.

#### Das EPOS-System am Forschungszentrum Rossendorf

Das Hauptproblem bei einem Positronen-Laborsystem, wie es auch am Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität existiert, ist die geringe Intensität der verwendeten radioaktiven Positronenquelle, die zu langen Messzeiten führt. Es ist deshalb geplant, an der neuen Strahlungsquelle ELBE (Elektronen-Linearbeschleuniger für Strahlen hoher Brillanz und niedriger Emittanz) im Forschungszentrum Rossendorf eine neuartige, intensive Positronenquelle aufzubauen. Sie trägt den Namen »EPOS« (ELBE POsitron Source). Der primäre hochenergetische Elektronenstrahl von ELBE (40 MeV, 40 kW) ist gepulst und

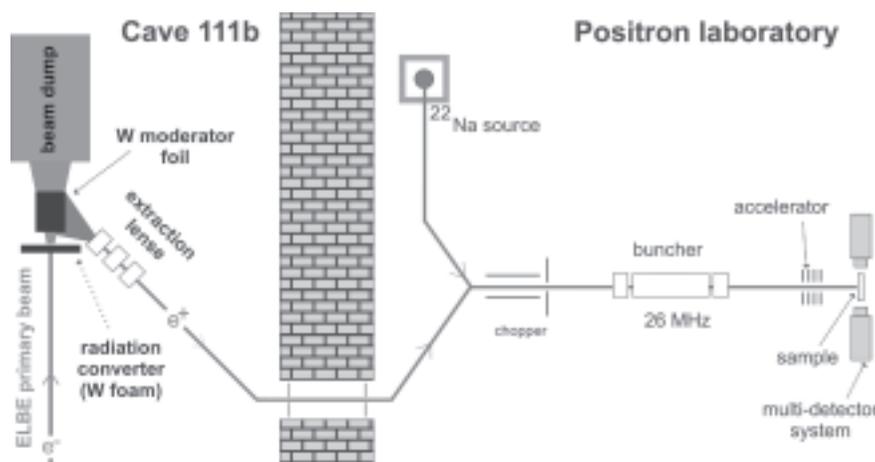
hat dabei eine einmalige Zeitstruktur superkurzer, intensiver Elektronenimpulse. Diese werden in einem Wolfram-Target durch den Effekt der Paarbildung in Elektron-Positron-Paare verwandelt. Man erreicht auf diese Weise eine um drei Größenordnungen höhere Intensität der Positronenquelle im Vergleich zu konventionellen Systemen. Die Positronen werden moderiert, d. h. abgebremst und als monoenergetischer, gepulster Positronenstrahl in das Positronenlabor bei ELBE geführt, wo dann die Experimente mit Hilfe eines Multidetektor-Systems geplant sind. Dieses Detektorsystem wird als erstes System seiner Art an einer intensiven Positronenquelle vollständig digital funktionieren. Dadurch, und durch den Einsatz neuartiger Kurzzeitdetektoren, kann die Qualität der gewonnenen Spektren erheblich verbessert werden, wodurch eine bisher weltweit unerreichte Zeitauflösung bei gleichzeitig besserer Stabilität erzielt werden kann.

Mit diesem Positronenlabor einer neuen Generation wird es möglich, Lösungen für vielfältige Probleme der Materialwissenschaften aufzuzeigen. Damit wird der entscheidende Baustein eines Kompetenzzentrums für Materialforschung mit Positronen am Interdisziplinären Zentrum für Materialwissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg realisiert. Die innerhalb von drei Jahren neu zu

schaffende Einrichtung stärkt die Forschungskompetenz des Landes Sachsen-Anhalt. Das EPOS-Projekt wird die Vernetzung von Forschung, Lehre und Kooperation mit der Wirtschaft nachhaltig verbessern. So erhalten Studenten und Nachwuchswissenschaftler aus Sachsen-Anhalt die Möglichkeit, Forschung auf höchstem Niveau in einem Großforschungszentrum durchzuführen. Durch die bearbeiteten materialwissenschaftlichen Probleme werden sie zwanglos in laufende Industriekooperationen einbezogen. Das geplante Kompetenzzentrum soll nach seiner Inbetriebnahme internationalen Kollaborationen offen stehen. Eine große Zahl von Wissenschaftlern aus vielen europäischen Ländern hat bereits jetzt ihre Bereitschaft erklärt, zum wissenschaftlichen Erfolg des Projekts beizutragen. ■

*Reinhard Krause-Rehberg, Jg. 1955, studierte 1976–1981 Physik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Seine Promotion (1985) und Habilitation (1995) beschäftigten sich mit materialwissenschaftlichen Themen. Im Jahre 2002 wurde er an der halleschen Universität zum apl. Professor für Experimentelle Physik berufen. Er ist Leiter des EPOS-Projektes.*

*Gerhard Brauer, Jg. 1948, studierte 1966–1973 Physik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Seine Promotion (1974, MLU Halle-Wittenberg) und Habilitation (1983, TU Dresden) beschäftigten sich mit materialwissenschaftlichen Themen. Seit 1973 arbeitet er am Forschungsstandort Rossendorf und leitet das von ihm nach 1992 dort aufgebaute Positronenlabor. Seine Mitarbeit am EPOS-Projekt beinhaltet u. a. die Koordinierung und Betreuung aller Arbeiten im FZ Rossendorf.*



Schema des EPOS-Labors. Der gepulste ELBE-Primärstrahl trifft (im ELBE-Raum Cave 111b) auf einen Wolfram-Konverter, wo durch Paarbildung Positronen erzeugt werden. Diese werden in einem Moderator abgebremst und über Extraktionslinsen zu einem gepulsten Strahl monoenergetischer Positronen geformt, der ins Positronenlabor geführt wird. Hier sorgt ein System von Pulsformern und Pulsbündeler (Chopper, Buncher) für beste Zeitauflösung und geringen Messuntergrund. Die Positronen werden schließlich kurz vor der Probe definiert beschleunigt, wodurch tiefenabhängige Messungen an den unterschiedlichsten Werkstoffen möglich werden. Der beim Umwandlungsprozess von Elektronen in Positronen nicht verbrauchte ELBE-Primärstrahl wird in einem Strahlfänger (Beam Dump) aufgefangen.

**Englisch  
Italienisch**

tel + fax: 0345 1203233  
e-mail: phil\_green@web.de  
Ihr Partner: Phillip Green aus London

Individueller Unterricht - Textbearbeitung  
Sprachtraining - mit dem Muttersprachler

**The English Language School**  
Kl.Ulrichstr. 20 06108 Halle (S)

# VERACHTET DIE DEFEKTE NICHT

## SFB 418 UNTERSUCHT NANOSKOPISCHE INHOMOGENITÄTEN

**Horst Schneider und Steffen Trimper**

Faszinierenderweise haben Strukturen auf unterschiedlichen Längenskalen einen entscheidenden Einfluss auf das dynamische Verhalten kondensierter Materie. In der modernen Materialforschung hat sich die Einführung einer nanoskopischen Ebene bewährt. Mit physikalischen Verfahren lassen sich Strukturen wie eben Defekte, Grenzflächen, dynamische Heterogenitäten in diesem Bereich auflösen. Deren eigenschaftsprägende Auswirkungen auf das makroskopische Verhalten von Festkörpern, Verbundwerkstoffen, Keramiken, Gläsern und Polymeren werden in dem seit 1996 bestehende Sonderforschungsbereich 418 intensiv untersucht. Unter Federführung des Fachbereichs Physik sind im SFB Arbeitsgruppen aus den FB Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität sowie des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik und des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik miteinander vernetzt.

### Forschungsgebiet

Das Auffinden von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen komplexer Systeme erfordert die Anwendung einer Vielzahl experimenteller und theoretischer Methoden. In den genannten halleischen Wissenschaftseinrichtungen ist ein breites Spektrum festkörperphysikalischer Verfahren, insbesondere vielfältiger spektroskopischer und elektronenmikroskopischer Methoden etabliert, die es gestatten, detaillierte Aussagen zu strukturellen und dynamischen

und keramischen Hochleistungswerkstoffen. Die Aufnahme einer Bariumtitanatkeramik mit dem Transelektronenmikroskop (TEM) ist in Abb. 1 gezeigt. Wesentlich befördert wird das Forschungsprogramm des SFB durch die seit mehreren Jahren bestehende Kooperation des MPI und der Fachbereiche Physik und Chemie bei der Untersuchung von strukturellen Charakteristika und makroskopischen Eigenschaften spezieller keramischer Funktionswerkstoffe. Die Einbeziehung von *Gläsern und Poly-*

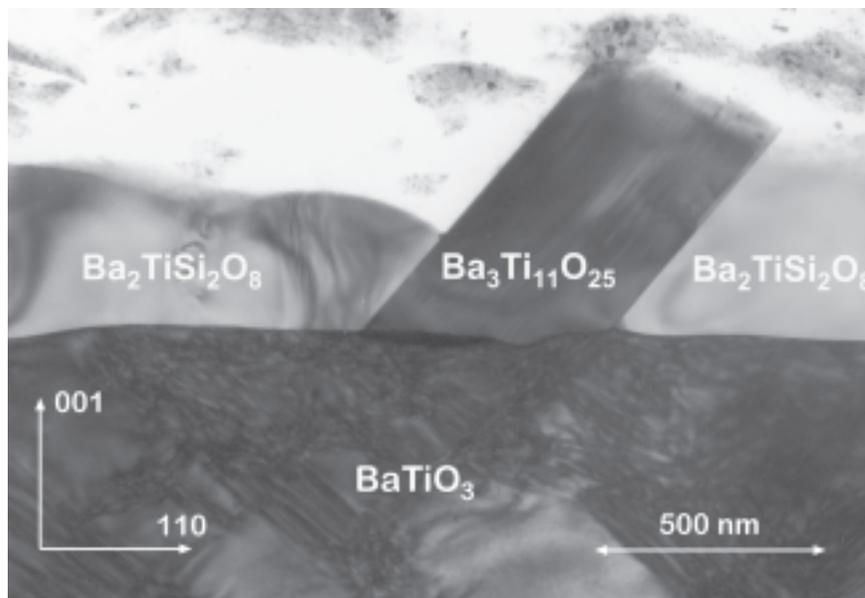


Abb. 1: TEM-Abbildung an einer Querschnittsprobe: Räumlich alternierende Bildung von Fresnoit  $Ba_2TiSi_2O_8$  und einer bisher nicht bekannten, möglicherweise metastabilen titanreichen Phase  $Ba_3Ti_{11}O_{25}$  durch Festkörperreaktion eines  $SiO_2$ -Filmes mit einem  $BaTiO_3$ -Einkristall.

Festkörperphänomenen gerade im Nanometerbereich zu treffen. Dazu kommen die umfangreichen Erfahrungen der verschiedenen Forschergruppen bei der Untersuchung der strukturellen Besonderheiten und eigenschaftssteuernden Wirkung von *Oberflächen, Grenzflächen, Sekundärphasen und speziellen Defekten in Dünnschicht- und Verbundsystemen sowie metallischen*

*meren* (Zusammenarbeit der FB Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften) in das Materialspektrum erlaubt eine Gegenüberstellung der bei der weichen Materie gesammelten Erfahrungen mit denen der Physik des gestörten kristallinen Festkörpers. Auch bei diesen Stoffklassen werden Untersuchungen der molekularen Dynamik zum Verständnis der Materialeigenschaften

heran gezogen. Bereichert wird die Thematik des SFB durch theoretische Gruppen am FB Physik und am MPI. Unter dem Dach des SFB werden all diese verschiedenen Arbeitsrichtungen auf dem Gebiet der kondensierten Materie gebündelt. Der SFB »Struktur und Dynamik nanoskopischer Inhomogenitäten in kondensierter Materie« wurde im Sommer 1996 eingerichtet und arbeitet jetzt bis 2005 in seiner dritten Periode.

15

### Projektbereiche

Der SFB umfasst 14 Projekte, die in zwei Projektbereiche untergliedert werden. Die Themen des Bereichs A sind stärker auf strukturelle Untersuchungen zur Charakterisierung der komplexen Anordnung von Atomen und Molekülen in der festen Phase, in Lösungen, an Grenz- und Oberflächen von Festkörpern ausgerichtet. Daraus abgeleitet werden zeitliche Veränderungen der Nanostrukturen und die Kinetik ablaufender Prozesse diskutiert. Der Projektbereich B stellt kooperative Effekte und deren Dynamik in das Zentrum seiner Aktivitäten, wobei nicht die in Gläsern und Polymeren fehlende Fernordnung, sondern die lokal auftretende Nahordnung und der hohe Grad an Kooperativität der Elementarprozesse die entscheidenden Herausforderungen an die experimentelle Verifizierung und die theoretische Modellierung darstellen.

Die hohe Effektivität des SFB erwächst vor allem aus einer projektübergreifenden Zusammenarbeit, die sich in folgende Cluster von eng verzahnten Projekten manifestiert:

- Reaktionskinetik und Funktionskeramik,
- Grenzschichten und oberflächenmodifiziertes Wachstum,
- Polymere und dynamische Heterogenitäten,
- Relaxationsverhalten und Relaxationsmechanismen,
- Metallische Nanopartikel und
- Modellierung.

### Erfolgreiche Kooperationen

Die Vielzahl der auf Zusammenarbeit begründeten Aktivitäten des SFB soll an einigen herausgehobenen Beispielen verdeutlicht werden.

In Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen Chemie (AG Abicht) und dem MPI

für Mikrostrukturphysik (AG Hesse, AG Woltersdorf) werden Untersuchungen zu Phasenbildungsprozessen ausgeführt, welche bei neuartigen Herstellungsverfahren von Elektrokeramiken mit gezielt verbesserten Eigenschaften ablaufen («Nanotechnisches Konstruieren»). In Abb. 1 und 2 sind zwei elektronenmikroskopische Abbildungen (TEM) wiedergegeben: Mit Hilfe von Modellexperimenten an Einkristallen ist am MPI das Bildungsverhalten von Ba-Ti-O- und Ba-Ti-Si-O-Phasen bei Zusatz von SiO<sub>2</sub> zu BaTiO<sub>3</sub> untersucht worden. Hintergrund ist der Einsatz von SiO<sub>2</sub> als Sinterhilfsmittel bei der Herstellung von Elektrokeramiken.

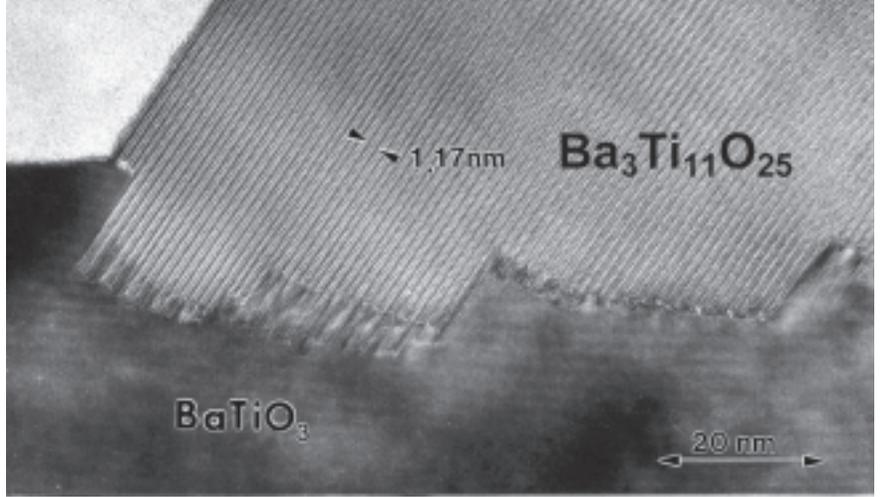


Abb. 2: Hochauflösende TEM-Querschnittsabbildung. Man erkennt eine lamellenartige, mit elastischen Spannungen beauflagte Struktur der Ba<sub>3</sub>Ti<sub>11</sub>O<sub>25</sub>/BaTiO<sub>3</sub>-Grenzfläche, an der das Wachstum der Ba<sub>3</sub>Ti<sub>11</sub>O<sub>25</sub>-Phase in den BaTiO<sub>3</sub>-Einkristall hinein erfolgt.

Strukturen werden über eine intramolekulare Phasenseparation erzeugt (vgl. auch den Beitrag von Mario Beiner und Thomas Thurn-Albrecht in diesem Heft). Durch die Kombination von unterschiedlichen Polymeren auf der Nanometerskala lassen sich damit durch Variation der Zusammensetzung und der molekularen Architektur die

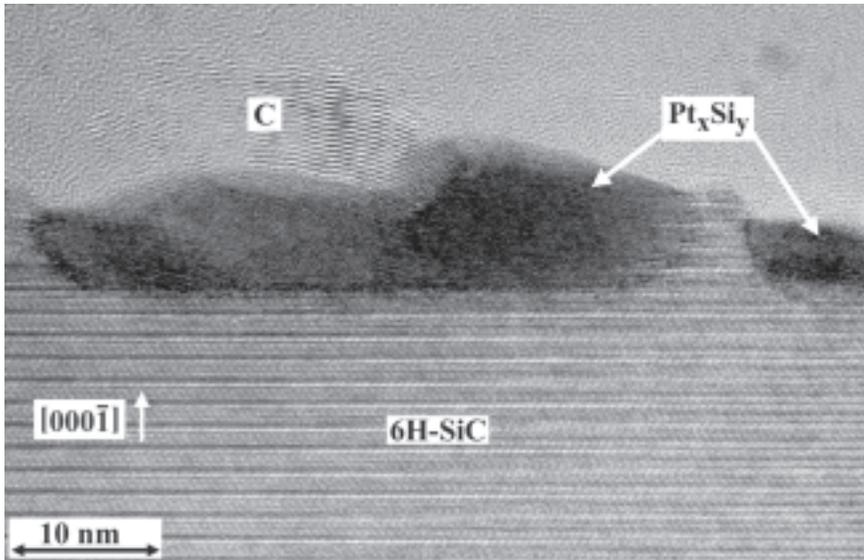


Abb. 3: Atomare Details der Pt-katalysierten Reaktionskinetik im System Si-C.

Im zweiten Beispiel geht es um die Untersuchung strukturbildender Nanoprozesse im technologisch vielseitig nutzbaren System Silizium-Kohlenstoff, das zu hochtemperaturfesten, superharten und darüber hinaus elektronisch interessanten Werkstoffen führt. Abb. 3 zeigt in atomarer Auflösung Einzelheiten der Grenzflächen-Reaktionskinetik im Falle einer Platin-katalysierten Kohlenstoff-Strukturierung. Man erkennt das Hineinwachsen von Platinsilicid-Partikeln (Pfeile) in die oberflächennahen Atomebenen des kristallinen SiC und die gleichzeitige Abscheidung von Graphitatomenebenen («C») auf der dem SiC abgewandten Seite, wodurch die graphitbildende Funktion des Platins illustriert wird. Abb. 4 zeigt ein Beispiel für Nanostrukturen in Polymeren – sogenannte lamellare Blockcopolymerer, wie sie am Institut für Werkstoffwissenschaft (AG Michler) untersucht werden. Diese hochgeordneten

makroskopischen Eigenschaften wie z. B. die Zähigkeit maßschneidern.

#### Auswirkungen

Die Arbeit des SFB hat eine nachhaltige Wirkung auf die beteiligten Institutionen ausgeübt. Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeit in den ersten beiden Antragsperioden (1996–1999 und 1999–2002) fanden hohe Anerkennung durch die Gutachter der DFG, die schließlich zu einer erneuten Verlängerung der Arbeit des SFB bis Ende 2005 geführt haben. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen in renommierten Zeitschriften, eingeladenen Vorträgen auf internationalen Fachtagungen sowie in Beiträgen zu aktuellen Problemen der Entwicklung und der Technologie neuer Werkstoffe, z. B. der Optimierung moderner Funktions- und Konstruktionskeramiken,

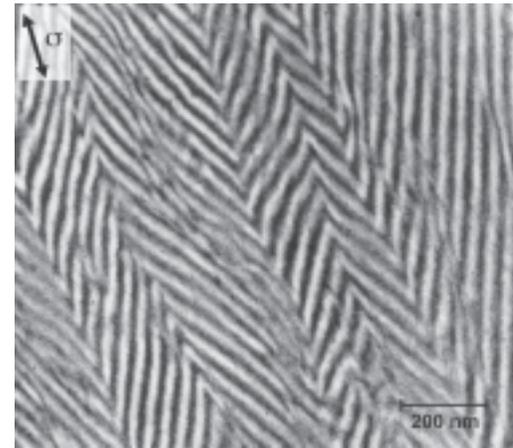


Abb. 4: TEM-Abbildung des typischen Chevronmusters eines Styrol-Dien-Blockcopolymerers. Das Muster bildet sich durch Belastung ( $\sigma$ ) senkrecht zu der Lamellenausrichtung des Blockcopolymerers.

dem atomaren Design von Hochleistungs-Verbundwerkstoffen, der Entwicklung metallischer Nanodrähte und dem Maßschneiden von Beschichtungen und Grenzflächen spiegeln die große Breitenwirkung des SFB wider. Darüber hinaus wurden viele wirksame Kooperationen zwischen den beteiligten Gruppen geknüpft. Die Auswirkung auf das wissenschaftliche Klima und die Lehre sind enorm. Die Attraktivität des SFB dokumentiert sich nicht zuletzt darin, dass es problemlos gelungen ist, Neuanträge in das Forschungskonzept des SFB zu integrieren. Einer erfolgreichen Weiterführung des SFB in einer letzten Antragsperiode ab 2006 sehen wir mit Optimismus entgegen. ■

*Prof. Dr. Horst Schneider studierte Physik in Leipzig, Promotion und Habilitation an der Universität Leipzig, kam über die ehemalige TH-Merseburg an die Uni Halle, Forschung: Festkörper-NMR an weicher Materie.*

*Prof. Dr. Steffen Trimper, Studium der Physik in Leipzig, Promotion und Habilitation an der Uni in Leipzig. An der halleischen Universität Sprecher des SFB 418, Forschung: Statistische Physik und Phasenübergänge.*

# WENN PHYSIKER AN GRENZEN STOSSEN ... FORSCHUNG AN OXIDISCHEN GRENZFLÄCHEN

Ingrid Mertig und Angelika Chassé

Oxide stellen eine außerordentlich umfangreiche Materialklasse dar, die sich durch eine große Breite ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften auszeichnet; deswegen werden sie in vielen Bereichen der Grundlagenforschung untersucht. Ausgehend von den Eigenschaften existiert eine Vielzahl von Anwendungen in der Katalyse, Elektronik, Photonik, Optoelektronik, Photovoltaik und Spintronik. Aufgrund großer wissenschaftlicher Anstrengungen sind die Volumeneigenschaften von Oxiden und der Mechanismus der Oxidation im Allgemeinen recht gut verstanden. Die Anwendungen der jüngeren Zeit beinhalten oft Oxide in reduzierter Dimension, das heißt Oxidfilme und Oxidübergitter. Durch das Vorhandensein von Oberflächen und/oder Grenzflächen verändern sich die physikalischen Eigenschaften der Oxide wesentlich.

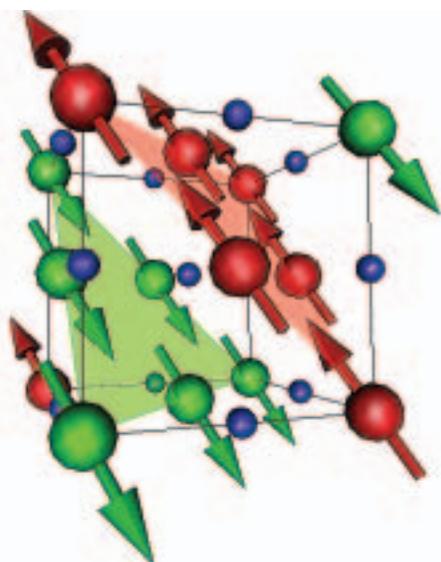


Abb. 1: Geometrische und magnetische Ordnung von NiO.

Forscher der halleschen Universität, des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik Halle und der Universität Leipzig haben sich die Aufklärung von Oxidischen Grenzflächen zum Ziel gestellt. Seit Juni 2000 existiert ein überregionaler Forschungsverbund, die Forschergruppe 404 (FOR404), die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Im September 2003 wurden durch eine Gutachtergruppe der DFG die Weichen für die zweite Förderperiode bis 2006 gestellt. Der Gruppe wurde bereits in der gegenwärtigen Phase eine internationale Spitzenstellung in einigen Bereichen bescheinigt, zu denen die dünnen magnetischen Schichten, die ferroelektrischen Schichten sowie das neu hinzukommende System Zinkoxid (ZnO) gehören. Die FOR404 stelle ein exzellentes Forschungsnetzwerk in Mitteldeutschland dar, das international konkurrenzfähig sei, so die Gutachter. Die Thematik Oxidische Grenzflächen sei international von großer Bedeutung und aktuell sowohl hinsichtlich der Grundlagenforschung als auch der Anwendung.

Die Klasse der Oxide umfasst eine Vielzahl von Systemen. Die Arbeiten in der FOR404 konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Übergangsmetalloxide. Diese sind durch die teilweise Besetzung der d-Zustände eine besondere Herausforderung, da sich die elektronischen Eigenschaften mit außergewöhnlichen magnetischen bzw. ferroelektrischen Eigenschaften verbinden. Während der Schwerpunkt der Untersuchungen in der ersten Förderperiode auf Übergangsmetalloxiden wie NiO (Abb. 1) oder CoO und deren Grenzflächen lag, verschiebt sich das Interesse nun zu strukturell komplexeren Metall-Metalloxid-Systemen wie MnO und Fe-Oxiden. Das Modellsystem Fe/MgO spielt eine Schlüsselrolle in der Spintronik. Hierbei geht es um die Entwicklung neuer elektronischer

Bauelemente, die sowohl die Ladung des Elektrons als auch seinen quantenmechanischen Spin ausnutzen, um so eine Integration von Informationsspeicherung und Informationsverarbeitung zu erreichen. Nahziel ist die Entwicklung eines nichtflüchtigen Speicherelementes – magnetic random access memory (MRAM) (siehe Abb. 2). Dieser Speicher würde ein Einschalten des Computers ohne lästige Wartezeiten ermöglichen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen an ferroelektrischen Oxiden stehen Materialien, die derzeit für einen Einsatz in FRAMs (ferroelectric random access memory) und ultradünnen Kondensatoren favorisiert werden. Eine innovative Perspektive bietet die Grenzfläche zwischen oxidischen Ferroelektrika und oxidischen Halbleitermaterialien. Die Kombination aus schaltbaren und nichtschaltbaren Polarisationsladungen in transparenten Materialien, deren Leitfähigkeit gezielt eingestellt werden kann, eröffnet völlig neue Anwendungsmöglichkeiten als drei-dimensionale elektro-optische Speicherbausteine. Neu im Spektrum der Arbeiten der FOR404 sind Untersuchungen am System ZnO. Die Mischbarkeit des Halbleiters

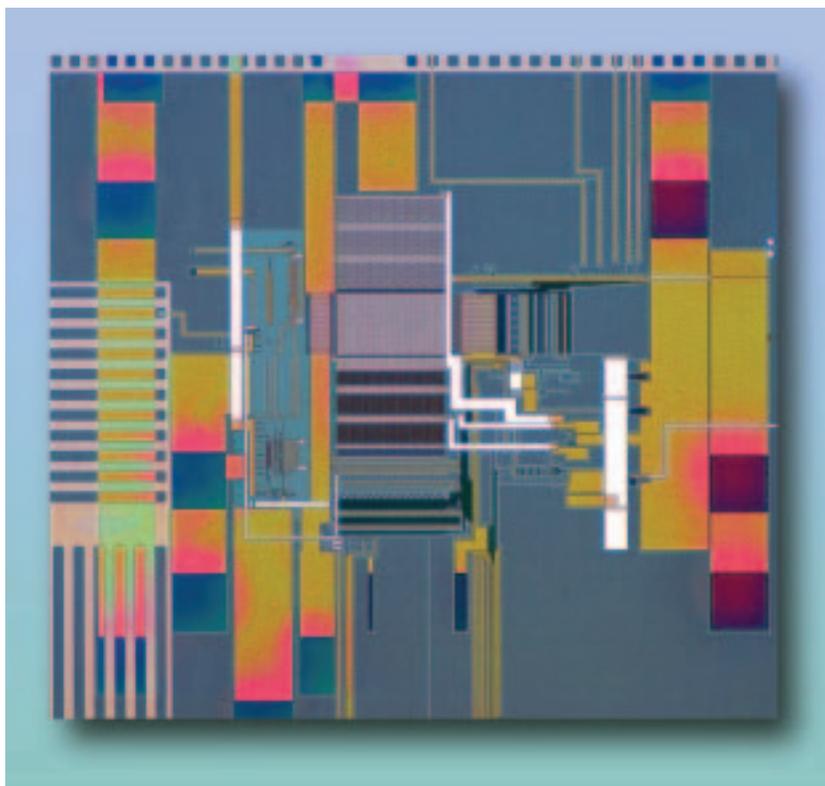


Abb. 2: Nichtflüchtige Speicherbausteine basierend auf ferromagnetischen Schichtstrukturen: magnetic random access memory (MRAM).  
Bild: <http://www.ibm.com>

18

ZnO mit Cd und Mg erlaubt die Herstellung von niedrigdimensionalen Heterostrukturen und von Bragg-Spiegeln, die für die Optoelektronik interessant sind. Die Dotierung mit Ga oder Al führt zu Schichten mit hoher Leitfähigkeit, die für transparente Kontakte in Solarzellen, genutzt werden. Die Dotierung mit zweiwertigen Übergangsmetallen, z. B. Fe, Co, Ni, verspricht, gerade in Verbindung mit Heterostrukturen, eine interessante Materialbasis für Spintronik und Magnetooptik. Die FOR404 ist in zwei Bereiche mit jeweils inhaltlich verwandten Teilprojekten gegliedert. Im Projektbereich A mit dem Titel »Struktur und Magnetismus« ist das Hauptanliegen die Aufklärung des Zusammenhangs zwischen der elektronischen und geometrischen Struktur einschließlich von magnetischen Ordnungsphänomenen. Erwiesenermaßen ist die elektronische Struktur von oxidischen Grenzflächen und der grenzflächennahen Bereiche sehr empfindlich von der geometrischen und chemischen Ordnung der Probe abhängig, wodurch wiederum die magnetische und ferroelektrische Struktur bestimmt wird. Der Projektbereich B mit dem Titel »Struktur und Dynamik« beinhaltet die Untersuchung dynamischer Eigenschaften als Funktion der Grenzflächenstruktur. Dazu gehören Transporteigenschaften und Schaltverhalten ferromagnetischer und ferroelektrischer Systeme. Zwischen den beiden Projektbereichen der FOR404 »Struktur und Magnetismus« und »Struktur und Dynamik« besteht eine sehr enge Beziehung. Die möglichst genaue strukturelle und elektronische Charakteri-

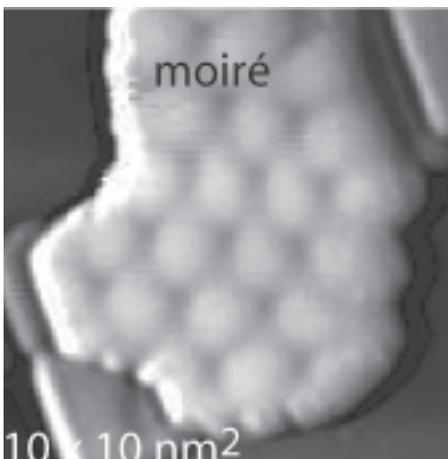


Abb. 4: Rastertunnelmikroskopische Aufnahme von CoO auf einer Silberoberfläche. (1 nm= 1 Millionstel Millimeter)

Foto: R. Shantyr

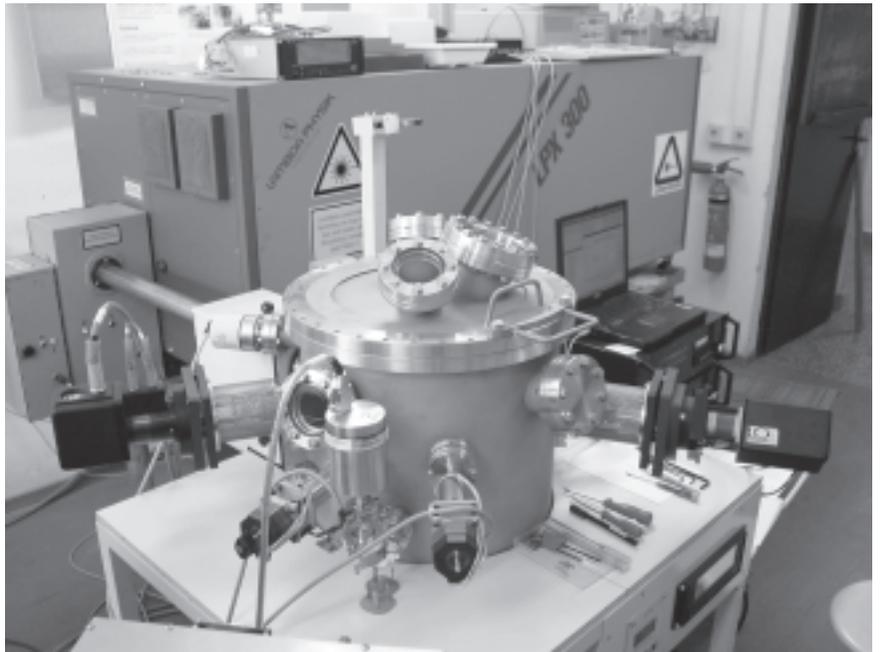


Abb. 3 Apparatur zur Herstellung dünner Oxidfilme mittels pulsed laser deposition (PLD).

Foto: Michael Lorenz, Leipzig

sierung der Oxidgrenzflächen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Interpretierbarkeit der gemessenen dynamischen und Transporteigenschaften. Fernziel ist das Materialdesign, das heißt, Einstellung der gewünschten dynamischen Eigenschaften durch spezielle Präparation der Grenzflächen.

Die Herstellung dünner Oxidfilme und Übergitter ist die Grundlage der wissenschaftlichen Arbeiten und das verbindende Element der Teilprojekte der FOR404, da derartige Proben kommerziell nicht erhältlich sind. Um wohl definierte Proben herzustellen, wird epitaktisches Wachstum auf ein-kristallinen Substraten verfolgt. Dazu wird die Methode der Laserdeposition und des reaktiven Verdampfens eingesetzt (Abb. 3). Das Spektrum der Herstellungsmethoden wird durch metallorganische Gasphasenepitaxie und durch kontrolliertes Wachstum dünner Oxidschichten durch Oxidation von Metalloberflächen erweitert. Zur Charakterisierung der Grenzflächen wird eine Vielzahl traditioneller und neuartiger spektroskopischer und abbildender Verfahren eingesetzt. Diese Verfahren gestatten es, das Wachstum Atom für Atom (Abb. 4) zu verdeutlichen und die Verteilung der Elektronenladung zu verstehen.

Ganz wesentlich für die Deutung neuer Eigenschaften ist neben der Kombination verschiedener Experimente Auch das Wechselspiel zwischen Experiment und Theorie. Da wir die oxidischen Grenzflächen möglichst mit atomarer Auflösung verstehen wollen, müssen auch die theore-

tischen Modelle auf atomarer Ebene beginnen. Die Quantenmechanik erlaubt uns heute eine parameterfreie Beschreibung, man nennt das eine ab initio Beschreibung, die die Belange der Materialzusammensetzung in vollem Umfang berücksichtigt. So kann man berechnen, wie sich die Elektronen an der oxidischen Grenzfläche räumlich verteilen, welches magnetische Moment einem Atom zugeordnet wird (Abb. 1) und welche Elektronen in der Lage sind, die Oxidschicht zu durchdringen. Jedoch kann man derartige Probleme nur mit Hilfe leistungsfähiger Computer lösen. Computerpower, methodisches Know-How und interessante Physik werden dazu im Zentrum für Computational Nanoscience (CNS) in Halle gebündelt. ■

*Ingrid Mertig studierte Physik in Dresden, 1982 Promotion an der TU Dresden, danach wissenschaftliche Mitarbeiterin in Dresden und Dubna (Russland), 1995 Habilitation, Leiterin der Arbeitsgruppe Magnetoelktronik. Seit 2001 ist sie Professorin am Fachbereich Physik, seit 2003 Prodekanin.*

*Angelika Chassé absolvierte ein Physikstudium an der Universität Halle, 1984 Promotion, danach wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachbereich Physik in der Arbeitsgruppe Quantentheorie des Festkörpers, 2000 Habilitation. Forschungsschwerpunkte: Elektronen- und Realstruktur von Festkörpern, Spinpolarisation und Dichroismus, Realstruktur und Magnetismus.*

## DIE OBJEKTE SIND WINZIG – DIE CHANCEN RIESIG

### DAS INNOVATIONSFORUM »NANOSTRUKTURIERTE MATERIALIEN«

**Hartmut S. Leipner**

Im November 2003 veranstaltete das Interdisziplinäre Zentrum für Materialwissenschaften gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie das Innovationsforum »Nanostrukturierte Materialien«. Mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des Landes Sachsen-Anhalt bildete es den Auftakt zu einer engen regionalen Vernetzung wissenschaftlicher Kompetenzen auf dem Gebiet der Nanotechnologie.

Ziel des Forums war es, die Potenzen von Forschungseinrichtungen sowie kleiner und mittelständischer Unternehmen im Bereich der Nanotechnologie in einem regionalen Netzwerk zu vereinen. Damit sollten weitere Schritte unternommen werden, vielversprechende materialwissenschaftliche Zukunftstechnologien am Standort Halle zu etablieren – ähnlich wie das mit der Biotechnologie gelungen ist.

Das Innovationsforum ist Bestandteil der Initiative »Interregionale Allianzen für die Märkte von morgen«, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ausgeht und der Innovationsförderung im Osten Deutschlands dient. Partner bei der Organisation des Nanoforums waren die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, das Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, das Fraunhoferinstitut für Werkstoffmechanik, die Gesellschaft für Technologietransfer und Innovationsförderung Magdeburg und das Technologie- und Gründerzentrum Halle. Das Land Sachsen-Anhalt und die Stadt Halle unterstützten nachhaltig das Forum, als Schirmherr fungierte der Arbeits- und Wirtschaftsminister Dr. Horst Rehberger. Das gut besuchte Innovationsforum – die Zahl registrierter Teilnehmer lag bei 150 – lieferte nicht nur einen umfassenden Über-

blick über Nanotechnologien, sondern zeigte darüber hinaus den Stand und die Möglichkeiten der Vernetzung der regionalen Forschungseinrichtungen und Unternehmen auf diesem Gebiet. Besonders wurde deutlich, dass die interdisziplinäre Zusammenarbeit, eine der wesentlichsten Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung von Nanotechnologien, am Forschungsstandort Halle bereits sehr ausgeprägt ist. Einen großen Stellenwert besaß die Problematik der Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in Produkte. Neben den Plenarsitzungen waren die Hauptelemente des Innovationsforums Workshops, eine Industrieausstellung, Postersitzungen, eine europäische Kooperationsbörse und eine öffentliche Abendveranstaltung. Zu den wichtigsten Themen, die diskutiert wurden, gehörten die Ionenspurtechnik, eingebettete Nanopartikel, die Nanostrukturierung von Polymerwerkstoffen und die Nanoimprint-Lithographie.

Die Nanotechnologie ist ein interdisziplinäres Arbeitsgebiet par excellence und erfasst alle Wissenschaftsbereiche von der Physik bis zur Medizin. Das Treffen sollte mit dem Fokus auf die Interdisziplinarität auf die Möglichkeiten für die Gründung von kleinen und mittleren Nano-Unternehmen hinweisen.



Dabei darf man nicht vergessen, dass es bereits eine Reihe erfolgreicher Unternehmensgründungen gegeben hat. Firmen wie Boraglas, Angaris, Sonotec, Codixx, Novosom, F.O.B., Fractal u. a. nutzten die Gelegenheit, ihre aktuellen Entwicklungen und ihre Kompetenzen vorzustellen. Das Innovationsforum gab einen entscheidenden Impuls für die Entwicklung des *weinberg campus* Halle als Netzwerk zwischen kleinen und mittleren Unternehmen und öffentlichen Forschungseinrichtungen. Deutlich konnten die Themenfelder der Zusammenarbeit im zukünftigen Nanotechnologiezentrum (TGZ III) aufgezeigt werden, das bis 2006 errichtet wird. ■

*Autoreninfo Seite 10.*



Der *weinberg campus* in Halle

Foto: signum

# WENN ELEKTRONEN DURCH DIE WAND GEHEN ...

## SPINPOLARISIERTES TUNNELN IN MAGNETISCHEN NANOSTRUKTUREN

Dirk Sander, Wolfgang Kuch und Jürgen Kirschner

20

Der Elektronentransport durch magnetische Nanostrukturen führt zu einer Reihe von neuen und interessanten Effekten. Besonders das sogenannte Tunneln von Elektronen zwischen zwei magnetischen Strukturen, ein quantenmechanischer Effekt, bei dem Elektronen eine nichtleitende Barriere überwinden, ist für Anwendungen in der Datenspeicherung wichtig. Im Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik werden Nanostrukturen aus magnetischen Metallen und nichtleitenden Oxiden hergestellt, und der Einfluss der atomaren Grenzflächenstruktur auf die Tunneleigenschaften der Elektronen wird untersucht.

Stellen Sie sich vor, Sie schalten Ihren Computer ein, und alles ist schon da. Kein lästiges Warten auf das Laden des Betriebssystems und der Programme, Sie machen direkt dort weiter, wo sie das letzte Mal aufgehört haben.

Zahlreiche Firmen arbeiten mit Hochdruck daran, dass dies keine Zukunftsvision bleibt, sondern vielleicht schon in wenigen Jahren zur Normalität gehört. Dazu werden sogenannte MRAM-Speicherbausteine (MRAM, magnetic random access memory) entwickelt, die schon bald den jetzigen DRAM (dynamic random access memory) ablösen könnten. In diesem MRAM wird die Information magnetisch gespeichert, und sie geht beim Abschalten des Computers, im Gegensatz zum jetzigen DRAM, nicht verloren.

Magnetische Datenspeicherung ist uns von der Computerfestplatte – aber auch von Tonbändern – wohl vertraut und man blickt auf Jahrzehnte Erfahrung zurück. Warum kommt es dann erst jetzt zum Einsatz erster MRAM-Speicherbausteine? Der Grund ist, dass die im MRAM eingesetzten magnetischen Vielfachschichten, bei denen die einzelnen Schichtdicken nur noch wenige Atomdurchmesser betragen, erst in den achtziger Jahre erforscht wurden. Diese Forschungen haben gezeigt, dass der elektrische Widerstand eines Schichtstapels aus magnetischen und nicht-magnetischen

Materialien, wie er in Abb. 1(a) gezeigt ist, von der relativen Orientierung der Magnetisierung in den übereinander liegenden Schichten abhängt: Ist die Magnetisierung parallel ausgerichtet, so ist der Widerstand gering; ist die Ausrichtung entgegengesetzt, so ist der Widerstand hoch. Der Clou dieses Sandwiches aus magnetischen Schichten ist, dass die Magnetisierung in den Schichten – und damit der elektrische Widerstand – gezielt eingestellt werden kann.

### Magnetische Nanostrukturen als Speicherzellen

Beim MRAM erfolgt dieses Einstellen der Magnetisierungsrichtung durch das Magnetfeld, das von einem Strom in der Nähe der Schichtstruktur erzeugt wird. Schaltet man den Strom ab, so bleibt die Magnetisierung des Schichtsystems erhalten. Erst durch einen Stromfluss in umgekehrter Richtung kann die Magnetisierung der Schicht verändert werden. Ordnet man diese Schichtstapel an den Kreuzungspunkten stromführender Leitungen an, so erhält man ein Feld einzelner ansprechbarer Speicherelemente, siehe Abb. 1(b), in denen die Information binär (1: hoher Widerstand, 0: niedriger Widerstand) gespeichert ist. Ein entscheidendes Detail dieser Sandwichstruktur ist, dass die magnetischen Schich-

ten durch eine äußerst dünne, elektrisch isolierende Oxidschicht voneinander getrennt sind. Dennoch können die Elektronen, die für den Stromfluss durch die Schichtstruktur verantwortlich sind, diese nur wenige Atomlagen dünne Oxidschicht durchdringen: Der quantenmechanische Tunneleffekt ermöglicht diesen Elektronendurchgang.

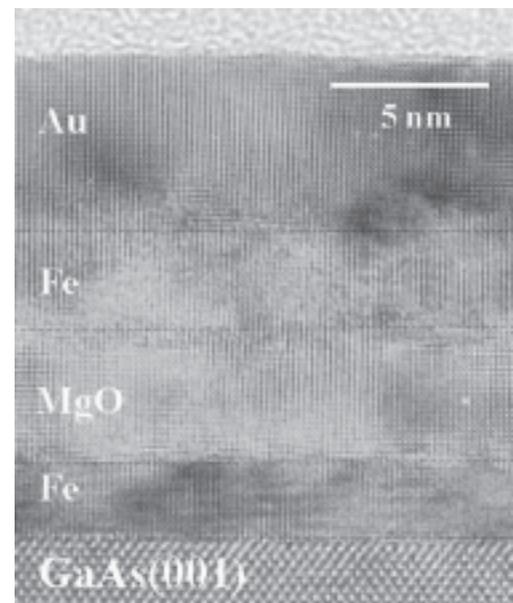


Abb. 2: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts durch ein magnetisches Schichtsystem (Fe), getrennt von einer Oxidschicht (MgO). Die gestrichelte Linie verdeutlicht die atomar scharfen Grenzflächen.

### Atomar geordnete Grenzflächen

Im Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik wird untersucht, wie die Atome in der Nähe der Grenzfläche zwischen magnetischer Schicht und Oxid angeordnet sind, und welchen Einfluss die atomare Struktur auf die physikalischen Eigenschaften der Schicht hat. Dabei kommen eine Reihe von speziellen Untersuchungsmethoden wie die Transmissionselektronenmikroskopie, die Rastertunnelmikroskopie und die Oberflächenröntgenbeugung zum Einsatz, und die Ergebnisse werden im Zusammenhang mit Berechnungen der Theorieabteilung des Max-Planck-Instituts ausgewertet.

Da die elektronischen Transporteigenschaften beim Tunneln empfindlich von der Beschaffenheit und Breite der Oxidbarriere und der Struktur der Grenzflächen abhängen, werden kristallin wohlgeordnete

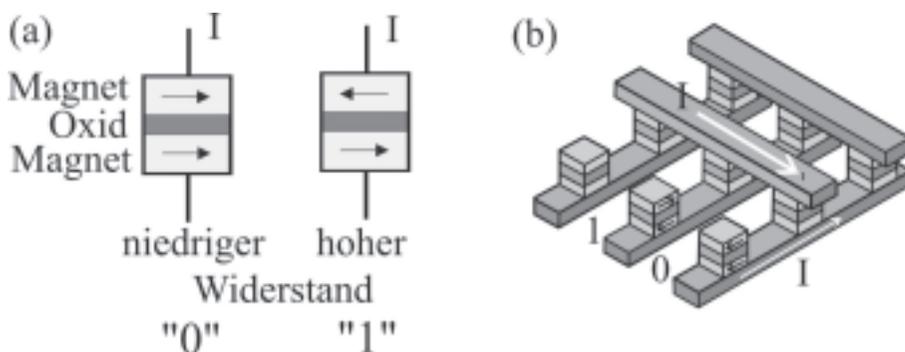


Abb. 1: Schema einer MRAM Zelle. (a) Bei paralleler Magnetisierungsrichtung der Magnetschichten ist der elektrische Widerstand für den Strom I niedrig, bei entgegengesetzter hoch. So wird über den Widerstand die binäre Information 0 und 1 magnetisch gespeichert. (b) Anordnung mehrerer MRAM Zellen an den Kreuzungspunkten von Strompfaden I ergibt frei adressierbaren Speicher.

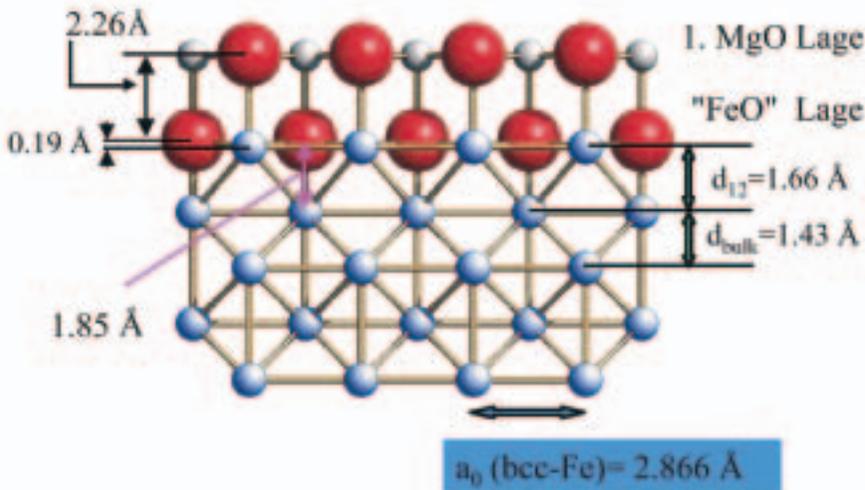


Abb. 3: Strukturmodell einer Fe-MgO Grenzfläche. Ergebnis einer Oberflächenröntgenbeugungs-Strukturanalyse am Synchrotron. Zwischen Fe und MgO hat sich eine FeO Schicht gebildet. Abstände in Å = 0.1 nm.

Proben untersucht, bei denen die Atome auf definierten Gitterplätzen regelmäßig angeordnet sind. Abbildung 2 zeigt eine Transmissions-Elektronenmikroskopie Aufnahme eines Querschnitts durch ein Eisen-Magnesiumoxid-Eisen Schichtsystem auf Gallium-Arsenid, das mit einer Goldschicht abgedeckt wurde. Die Aufnahme zeigt, dass die einzelnen Schichten von atomar scharfen Grenzflächen getrennt sind und kristallin gut geordnet sind. Doch wo genau sitzen die einzelnen Atome? Diese Frage wird mit der Röntgenbeugung geklärt.

**Auf einen hundertstel Nanometer genau**

Ein atomares Strukturmodell, das aus einer detaillierten Strukturanalyse mit Oberflächenröntgenbeugung an einem Synchrotron gewonnen wurde, ist in Abb. 3 dargestellt. Die atomaren Positionen werden mit einer Genauigkeit von 0.01 nm, ein Zehntel des Durchmessers eines Wasserstoffatoms (1 Å=0.1 nm), bestimmt. Im Gegensatz zur Erwartung einer scharfen Grenzfläche zwischen ferromagnetischer Schicht und Oxid findet man, dass die oberste Eisen-schicht einem Eisenoxid zuzuordnen ist. Diese Entdeckung hat große Bedeutung für die Beschreibung des Tunnelvorgangs durch die Eisen- und Magnesiumoxid Schicht. Elektronen mit verschiedener Spin-Orientierung tunneln mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zwischen den magnetischen Schichten. Der Tunnelstrom hängt davon ab, wie die Magnetisierung in den magnetische Strukturen ausgerichtet ist. Zur Untersuchung des spinpolarisierten Tunnelns in magnetischen Nanostruk-

turen wird die Rastertunnelmikroskopie verwendet. Wie erfolgt das Schichtwachstum bei geringen Bedeckungen, und wie verhält sich dann der magnetisierungsabhängige Tunnelwiderstand? Diese Fragen werden mit einem im Max-Planck-Institut entwickelten Rastertunnelmikroskop zur Messung des Elektronenspin-abhängigen Transports untersucht. Abbildung 4 zeigt das Anfangsstadium des Wachstums von Eiseninseln (hellgrün) auf einer Magnesiumoxid-Schicht auf einem Eisenkristall. Das Eisen wächst in Form zahlreicher Inseln mit einem Durchmesser von 4 nm, und bei dieser Bedeckung wird noch kein geschlossener Eisenfilm gebildet. Der Spin-abhängige Tunnelstrom durch diese Eisen-Nanostrukturen wird untersucht. ■

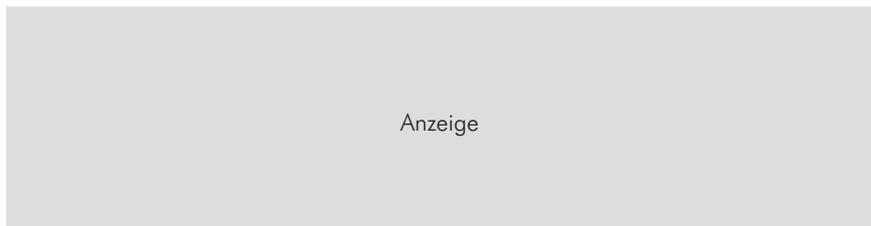
Dirk Sander wurde 1992 an der RWTH Aachen promoviert und erhielt für seine Dissertation die Borchers-Plakette der RWTH. 1992–1993 arbeitete er am IBM Forschungszentrum in Yorktown Heights, New York, bevor er 1993 an das MPI für Mikrostrukturphysik wechselte. Er habilitierte sich 1999 in Halle an der Martin-Luther-Universität. 2000–2001 war er mehrere Monate als Gast-Professor an die Universität Marseille eingeladen. Er wurde 2004 mit dem Gaede-Preis der Deutschen Vakuum Gesellschaft ausgezeichnet.

Wolfgang Kuch studierte 1984–1989 Physik an der Johann Wolfgang von Goethe-Universität in Frankfurt am Main und wurde 1993 an der Universität Stuttgart promoviert. Seit 1993 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle, unterbrochen von einem Auslandsaufenthalt 1996 am IBM Almaden Research Center in San Jose (U.S.A.). 2002 Habilitation an der Universität Halle. Kuch beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Erforschung magnetischer Schichtstrukturen mit Synchrotronstrahlung.

Jürgen Kirschner wurde 1974 an der Technischen Universität München promoviert und arbeitete zunächst am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, bevor er 1974–1988 am Institut für Grenzflächenforschung und Vakuumphysik des Forschungszentrums Jülich als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war. 1982 habilitierte er sich an der RWTH Aachen. Ihm wurde 1986 der (erste) Gaede-Preis der Deutschen Vakuum Gesellschaft verliehen. 1988 folgte er einem Ruf an die Freie Universität Berlin auf eine C4-Professur für Experimentalphysik. Seit 1993 ist er Professor an der Martin-Luther-Universität und beurlaubt an das Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik.



Abb. 4: Rastertunnelmikroskopische Aufnahme von Fe-Inseln auf MgO. Bildgröße 100 x 100 nm<sup>2</sup>, die höchsten Strukturen sind 1.5 nm hoch.



Anzeige

# VIRTUELLES LABOR: FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG AM COMPUTER

Arthur Ernst und Patrick Bruno

22

Die kontrollierte Berechnung physikalischer Eigenschaften von elektronischen Systemen, virtuelles Materialdesign, ist gegenwärtig eine der zentralen Herausforderungen der modernen Festkörperphysik. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik entwickeln neue numerische Verfahren für Simulationen neuer Probleme der Festkörperphysik.

Die Entwicklung neuer Materialien stellt heute eines der wichtigsten naturwissenschaftlich-technischen Arbeitsfelder dar, zu dem die Physik einen bedeutenden Beitrag leistet. Viele Materialien kann man am Computer simulieren und deren Eigenschaften präzise voraussagen, wie in einem virtuellen Laboratorium. Computerprogramme, die diese Simulationen am Rechner ermöglichen, beruhen auf Grundlagen der Festkörperphysik und werden von Theoretikern schon lange entwickelt. Ein besonderes Vorteil numerischer Simulationen ist, dass man abstrakte Modelle aufbauen kann, für die kein Gegenstück in der Natur existiert. Die Erzeugung und Untersuchung solcher künstlicher Modellsysteme erlaubt es, grundlegenden Fragestellungen nachzugehen. Der Einsatz von Höchstleistungsrechnern, z. B. dem IBM SP 4 Supercomputer im Rechenzentrum Garching (Abb. 1), ermöglicht heutzutage nicht nur mikroskopische Systeme zu untersuchen, sondern auch aktuelle Probleme aus der mesoskopischen Physik, d. h. Phänomene, die im Nanometerbereich auftreten. Letzterer ist die Größenordnung von elektroni-

schon und magnetischen Bauelementen, wie sie z. B. in heutigen Computern verwendet werden. Im Folgenden soll an konkreten Beispielen gezeigt werden, wie sich die entwickelten Rechenmethoden zur Erforschung neuer Materialien einsetzen lassen.

## Spinelektronik: Elektronik mit Drall

»Spinelektronik« ist in der Physik ein aktuelles Schlagwort. Sie hat zum Ziel, die Verarbeitung und Codierung von Informationen nicht nur auf der Basis von elektrischer Ladung durchzuführen, sondern auch unter der Ausnutzung des Spins, d. h. der Eigenrotation von Elektronen. Eine interessante Möglichkeit für die Spinelektronik bietet die Injektion spinpolarisierter Ladungsträger von Ferromagneten in Halbleiter. Letztere unterscheiden sich fundamental von den metallischen und oxidischen Systemen der Spinelektronik. Deren Leitfähigkeit kann über einen weiten Bereich variiert werden, in dem man Fremdatome einbringt (dotiert). In der herkömmlichen

Halbleiterelektronik kann man den Spin noch nicht zur Steuerung verwenden, da gleich viele Elektronen jeder Spinrichtung vorkommen. Erst wenn es gelingt, dieses Gleichgewicht aufzuheben, wird Spintransport und somit ein so genannter »Spintransistor« möglich. Dazu möchte man über einen Kontakt mit einem ferromagnetischen Metall einen Überschuss von Elektronen mit Spins einer Richtung in den Halbleiter injizieren. Noch gibt es allerdings Schwierigkeiten, einen spinpolarisierten Elektronenstrom mit ausgerichteten Spins zu erzeugen und diese Spins gezielt in die Halbleiterschicht zu bringen. Legt man an ein ferromagnetisches Metall eine Spannung an, so erhält man zwar einen Strom mit teilweise ausgerichteten Spins, aber beim Übergang der Elektronen vom Metall in den Halbleiter geht diese Ausrichtung größtenteils verloren, da sich die elektrischen Eigenschaften von Metallen und Halbleitern stark unterscheiden. Deshalb versuchen Forscher, die Metallschicht durch eine Schicht aus einem magnetischen Halbleiter zu ersetzen. Magnetische Halbleiter werden durch Dotierung mit magnetischen Atomen hergestellt und besitzen eine Leitfähigkeit, die vergleichbar mit der von herkömmlichen nichtmagnetischen Halbleitern ist. In diesem Fall können die Elektronen leichter von einem Material in das andere gelangen. Doch die bisher gefundenen magnetischen Halbleiter sind nur bei außerordentlich tiefen Temperaturen ferromagnetisch. Oberhalb einer kritischen Temperatur, der Curie-Temperatur, werden sie nichtmagnetisch. Deswegen versuchen Forscher magnetische Halbleiter zu entwickeln, die kritische Temperaturen größer als die Raumtemperatur zeigen. Dabei können theoretische Computersimulationen die Kosten als auch die Zeit zur Entwicklung dieser Materialien und Systeme erheblich reduzieren. Eine eindrucksvolle Illustration, wie theoretische Studien den Experimentalphysikern helfen können, demonstriert eine Untersuchung der kritischen Temperaturen in mangan-dotiertem Galliumarsenid. In einem undotierten Halbleiter kommt der elektrische Strom durch die gerichtete Bewegung seiner Leitungselektronen (Elektronenstrom, n-Leitung) und die scheinbare, entgegengesetzt gerichtete Bewegung seiner Löcher (Löcherstrom, p-Leitung) zustande. Durch die Dotierung mit Manganatomen erhält Galliumarsenid zusätzliche Ladungsträger, die ebenfalls für einen Ladungstransport zur Verfügung stehen. In Computersimulationen kann man



Abb. 1: Der fünfgrößte Supercomputer der Welt im Rechenzentrum Garching der Max-Planck-Gesellschaft, an dem auch halleische Physiker Berechnungen ausführen.

Foto: Rechenzentrum Garching der MPG

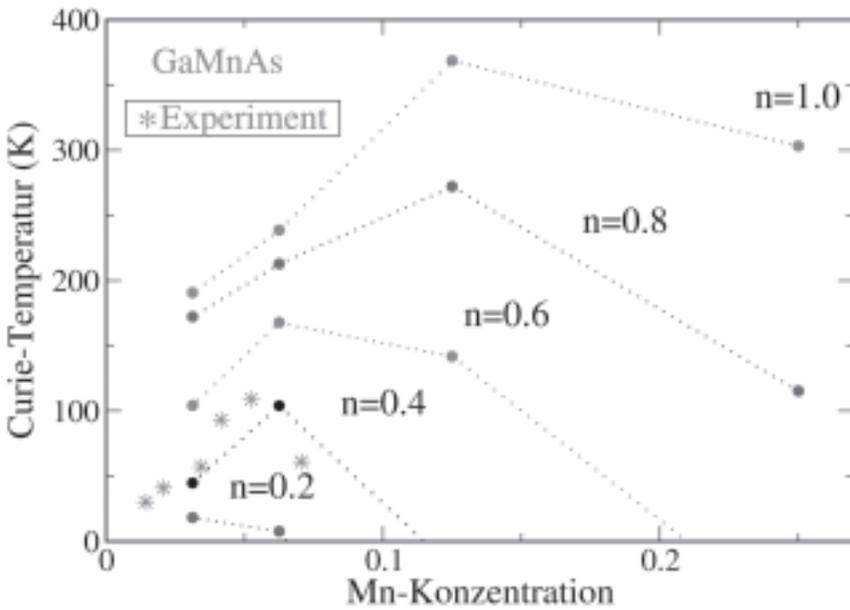


Abb. 2: Berechnete (Punkte) und experimentelle (Sternchen) kritische Temperaturen für mangandotiertes Galliumarsenid, wobei  $n$  die Anzahl der manganinduzierten Löcher pro Mn-Atom bezeichnet.

die Zahl dieser Ladungsträger variieren und die kritische Temperatur als Funktion der Mn-Konzentration berechnen (Abb. 2). Dabei sieht man, dass theoretisch berechnete Curie-Temperaturen die Raumtemperatur erreichen können, wenn die Zahl der manganinduzierten Löcher nahe an eins ist ( $n=1$  pro Mn-Atom ist ein Idealfall). Die experimentellen Werte ergeben sich in der Theorie bei wesentlich kleineren Zahlen der Löcher. Die Erklärung dafür ist, dass Defekte und Unordnung in experimentell erforschten Proben die Anzahl der Ladungsträger verringern und deshalb die kritischen Temperaturen reduzieren. Diese Tatsache, die rein theoretisch gefunden wurde, ist inzwischen experimentell bestätigt worden.

### Quanteninterferenzen auf Oberflächen

Eines der wichtigsten Themen für die Mikroelektronik ist die Physik der Adsorption von Atomen und Molekülen auf Oberflächen. Das Verständnis der elektronischen und geometrischen Struktur atomarer und molekularer Adsorbate ist von wachsendem Interesse für viele Bereiche der Oberflächenphysik und der Materialwissenschaften. Fein ausbalancierte elektrostatische und elektrodynamische Kräfte können bewirken, dass sich Atome auf Oberflächen zu selbstorganisierenden Systemen zusammenfügen. Um diese Prozesse und ihre Ergebnisse zu verstehen, bedarf es

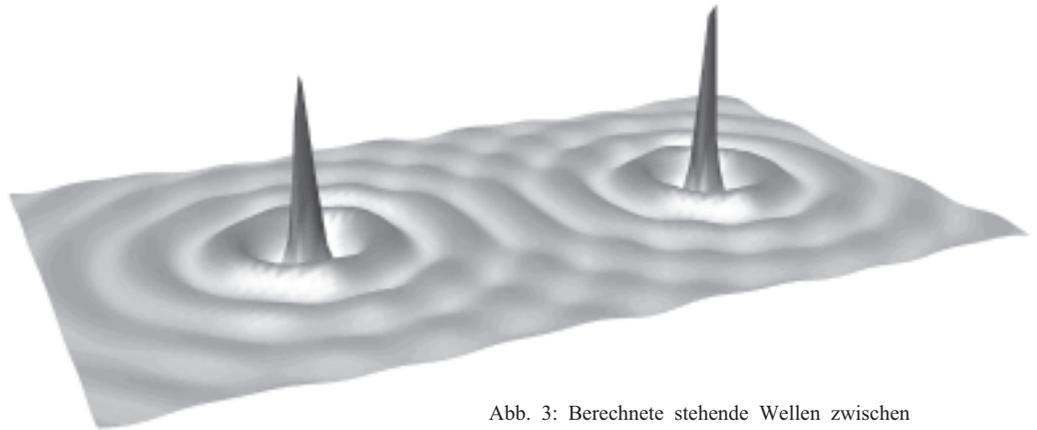


Abb. 3: Berechnete stehende Wellen zwischen zwei Co-Atomen auf einer Cu (111) Oberfläche

deshalb der Detailkenntnis interatomarer Wechselwirkungen. Computersimulationen ermöglichen detaillierte Aussagen über das zu erwartende physikalische Verhalten dieser Strukturen. Ein faszinierendes Beispiel dafür ist eine Untersuchung der Quanteninterferenz auf Edelmetalloberflächen. Dort bilden die Elektronen ein zweidimensionales Elektronengas, wobei sich die Elektronen in diesem Gas wie Wellen verhalten. Adsorbate oder Defekte führen zur Bildung stehender Wellen, die man mit dem Rastertunnelmikroskop beobachten kann (Abb. 3). Theoretische Untersuchungen beschreiben nicht nur experimentelle Ergebnisse, sondern erklären auch die physikalischen Prinzipien dieses Effekts. Die detaillierte Analyse zeigt, dass zwischen Adsorbaten auf der Oberfläche eine langreichweitige Wechselwirkung aufgrund dieser

Verfahren gilt natürlich nicht nur in der Physik, sondern auch bei multidisziplinären Anwendungen. ■

*Patrick Bruno studierte Physik an der École Normale Supérieure (Saint-Cloud, Frankreich) und der Université Pierre et Marie Curie (Paris, Frankreich). Er wurde 1989 an der Université Paris-Sud, Orsay (Frankreich) promoviert. Seit 1998 ist er Direktor der Theorie-Abteilung am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle und seit 1999 Honorar-Professor an der Martin-Luther-Universität. Seine wissenschaftlichen Interessen sind die elektronischen und magnetischen Eigenschaften von Festkörpern und die Vielteilchenphysik.*

*Arthur Ernst studierte 1985–1991 Physik an der Universität Tomsk in Russland, Promotion 1997 an der Technischen Universität Dresden. Seit 1999 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle. Arthur Ernst beschäftigt sich mit der Erforschung magnetischer und elektronischer Eigenschaften von endlichen und ausgedehnten Systemen.*

# PORÖSE STRUKTUREN ZUR HERSTELLUNG VON NANODRÄHTEN UND NANORÖHREN

Kornelius Nielsch, Reinald Hillebrand und Ulrich Gösele

24

Dieser Beitrag behandelt die Herstellung und Anwendung von geordneten Porenstrukturen im Submikrometerbereich. Für Aluminiumwafer wird eine neuartige Imprint-Lithographie beschrieben, mit der großflächig nanoporöse Strukturen realisiert werden können. Durch Füllen oder Beschichten der hexagonalen Porenstrukturen gelingt es, Nanostäbe und Nanoröhrchen herzustellen.

Seit Beginn der 90er Jahre nimmt die Entwicklung von nanostrukturierten Materialien einen breiten Rahmen in der Materialforschung ein. Für eine Reihe von Substanzen, wie Gold,  $\text{SiO}_2$  oder einige Polymere, sind kommerzielle Nanopartikel in definierten Größen erhältlich und werden vielfältig genutzt. In den letzten drei Jahren geht die Materialentwicklung von sphärischen Partikeln in die Richtung von Nanostäben und Nanoröhrchen, die mehr Gestaltungs- und Funktionalisierungsmöglichkeiten bieten. Die im Folgenden beschriebenen Verfahren erfordern im ersten Schritt die Herstellung hochgeordneter zweidimensionaler Porenstrukturen, die als Template für die weiteren Prozessschritte dienen. Infrage kommt dabei poröses Aluminiumoxid, das durch elektrochemisches Ätzen routinemäßig hergestellt werden kann.

## Herstellung der $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Porenstrukturen

Am MPI für Mikrostrukturphysik Halle wird seit 1996 an der Herstellung hochgeordneter  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Strukturen mittels Selbstorganisation gearbeitet. Es entstehen Porenstrukturen mit einer 2D-polykristallinen hexagonalen Anordnung der Poren und einer geringen Varianz des Durchmessers für Porenabstände von 50 nm bis 500 nm. Nach weiterführenden Forschungsarbeiten konnten mittels Imprint-Lithographie großflächig perfekte Porenanordnungen mit einem Abstand von 500 nm realisiert werden. Hierfür wurde auf der Basis von 4 Zoll Siliziumscheiben (Wafer) ein neuartiger Imprint-Stempel entwickelt, der aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Pyramiden mit periodischer Anordnung besteht.

In Abb. 1 werden die einzelnen Schritte des beschriebenen Verfahrens, beginnend bei Aluminiumscheiben bis hin zum Füllen der Porenarrays, gezeigt. Die durch den Imprint-Stempel erzeugten periodischen Vertiefungen dienen als Ätzkeime für die Porenbildung bei der elektrochemischen Umwandlung von Aluminium zu einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Membranstruktur. Die Schritte 3a und 3b zeigen das Füllen bzw. Benetzen der porösen Matrix mit den entsprechenden Materialien, die zum Abschluss aus dem  $\text{Al}_2\text{O}_3$

herausgelöst werden, und dann in Lösung vorliegen. Einen räumlichen Eindruck des Imprint-Stempels vermittelt Abb. 2(a). Abb. 2(b) zeigt eine REM-Abbildung, die typisch für die hergestellten Porenstrukturen ist. Die hexagonale Anordnung der Poren ist perfekt ausgeprägt.

## Füllen der Porenkanäle mittels elektrochemischer Abscheidung

Im Folgenden seien exemplarisch einige wesentliche Aktivitäten zu diesem Thema aufgezählt: Im Rahmen einer Doktorarbeit konnte erstmalig eine vollständige Porenfüllung selbstgeordneter  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Porenstrukturen mit Ni, Co, Fe oder NiFe demonstriert werden. Theoretische Untersuchungen und darauf folgende Experimente haben potenzielle Anwendungen solcher Strukturen für hochdichte magnetische Speichermedien klar nachgewiesen. Die Abb. 3(a) zeigt eine perfekt geordnete  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Membran, deren Poren mit Nickel gefüllt wurden. Gemeinsam mit der Universität Erlangen wurde das Abscheidungsverfahren auf die Herstellung von Silber-, Kupfer- und Gold-Nanostäbe übertragen.

## Beschichtung der Porenwände mit Polymeren

In Zusammenarbeit mit M. Steinhart und J. H. Wendorff (Philipps-Universität, Marburg) wurde ein Verfahren zur Polymerinfiltration der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Porenkanäle entwickelt. Erstmals konnten Nanoröhrchen aus Teflon und Polymeren mit einem sehr großen Molekulargewicht synthetisiert werden. Diese Technik eignet sich auch zur Herstellung von Metall-Nanoröhrchen. In Zusammenarbeit mit C. A. Ross (MIT, Cambridge, USA) ist es in den vergangenen Monaten gelungen, ferromagnetische Nanoröhrchen herzustellen. Die Abb. 3(b) zeigt mehrere 300 bis 1000 nm lange Kobalt-Nanoröhrchen mit einem Durchmesser von 160 nm liegend auf einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Porenstruktur. Aufgrund der geringen Wandstärke von ca. 3 nm sind diese magnetischen Nanoröhrchen extrem leicht und eignen sich besonders als Vehikel für den Transport von Arzneimitteln in Biotechnologie und Medizin.

## Zukünftige Entwicklungen am Standort Halle

Unter gemeinsamer Federführung von M. Zacharias (MPI für Mikrostrukturphysik Halle) und A. Greiner (Philipps-Universität Marburg) wurde ein DFG-Schwerpunktprogramm zum Thema: »Nanodröhte

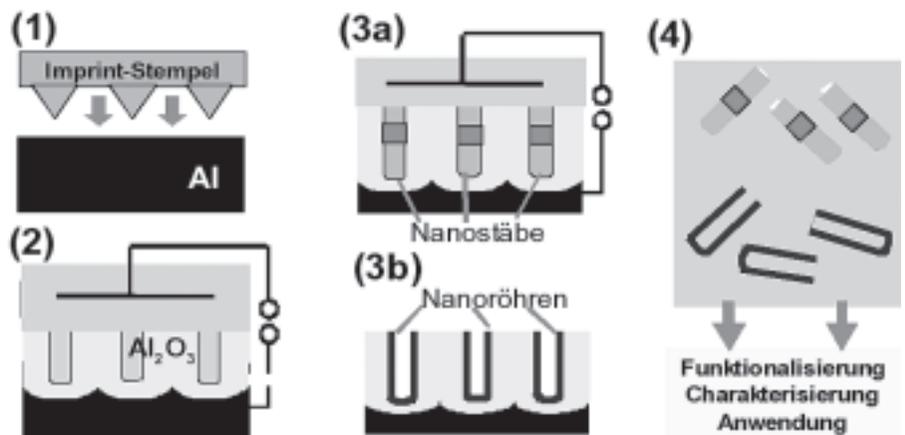


Abb. 1: (1) Al-Substrat und Imprint-Stempel, (2) Ätzprozess, Umwandlung in eine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Membran. (3a) Elektrochemische Abscheidung von Metallen, (3b) Benetzung der Porenwände mit Polymeren, Metallen- oder Kompositen (4) Herauslösen der Nanodröhte/Nanostäbe aus der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix.

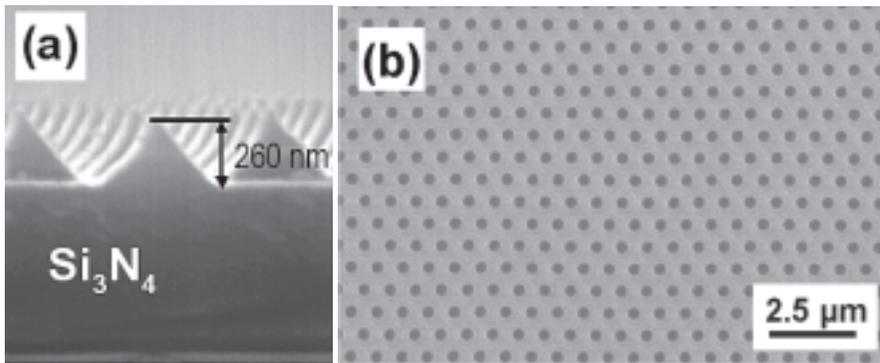


Abb. 2: (a) Imprint-Stempel, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM). (b) REM-Bild einer perfekt geordneten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Porenstruktur, hergestellt mittels Imprint-Lithographie.

und Nanoröhren – Von kontrollierter Synthese zur Funktion« ins Leben gerufen. Von den bundesweit 30 geförderten Projekten sind vier am Standort Halle angesiedelt. Im Oktober 2003 wurde unter der Leitung von K. Nielsch am MPI Halle mit dem Aufbau der BMBF-Nanotechnologie-Nachwuchsgruppe »Multifunktionale Nanostäbe und Nanoröhren« begonnen. Durch dieses BMBF-Projekt werden in Halle fünf Wissenschaftlerstellen für die Dauer von fünf Jahren geschaffen. Ein neuer Schwerpunkt der Gruppe wird die Entwicklung thermoelektrischer Nanostrukturen sein. Thermoelektrische Werkstoffe, wie z. B. Peltierelemente, werden als Mikroühlelemente oder zur Stromerzeugung in Satelliten seit Jahrzehnten genutzt. Der Wirkungsgrad heutiger Peltierelemente (ca. 6%) ist relativ gering. Zahlreiche theoretische Arbeiten haben gezeigt, dass die Effizienz um das zwei- bis dreifache gesteigert werden kann, wenn Peltierelemente aus niederdimensionalen Nanostrukturen, wie z. B. Nanostäben (1D) und Nanopartikeln (0D) aufgebaut werden. Die Entwicklung von thermoelektrischen Nanostrukturen mit Strukturgrößen im sub-50nm Bereich soll zu neuartigen kompakten und effizienteren Kühlelementen führen. In enger Zusammenarbeit zwischen der Martin-Luther-Universität und dem MPI für Mikrostrukturphysik sollen in Zukunft interdisziplinäre Anwendungsmöglichkeiten für multifunktionale Nanostäbe und Nanoröhren in den Bereichen Medizin, Biotechnologie, Magnetismus und Nanoelektronik entwickelt werden. ■

*Kornelius Nielsch studierte 1993–1997 Physik an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg. Die Dissertation erfolgte am MPI für Mikrostrukturphysik zum Thema: »Hochgeordnete ferromagnetische*

*Nanostabensembles«. Von Oktober 2002 bis September 2003 war Nielsch als wissenschaftlicher Mitarbeiter am MIT in Boston (USA) tätig. Seit Oktober 2003 leitet er eine interdisziplinäre Forschergruppe am MPI für Mikrostrukturphysik zum Thema »Multifunktionale Nanostäbe und Nanoröhren«.*

*Reinold Hillebrand wurde 1987 in Halle zum Thema »Computersimulation der elektronenmikroskopischen Hochauflösungsabbildung« promoviert. Seit 1992 arbeitet er am MPI für Mikrostrukturphysik. Sein aktuelles Arbeitsgebiet ist die Theorie »Photonischer Kristalle«. Daraus entwickelte sich eine sehr intensive Zusammenarbeit mit W. Hergert, Universität Halle-Wittenberg.*

*Ulrich Gösele wurde 1975 an der Universität Stuttgart promoviert. Im Jahre 1985 wurde er zum Full Professor of Materials Science an der Duke University in den USA ernannt. Davor arbeitete er in den Forschungslabors von Siemens in München, von IBM in New York, von NTT in Japan und in der Atomenergiebehörde Südafrika. Seit 1993 ist er Direktor am MPI für Mikrostrukturphysik in Halle und Honorarprofessor an der halleischen Universität.*

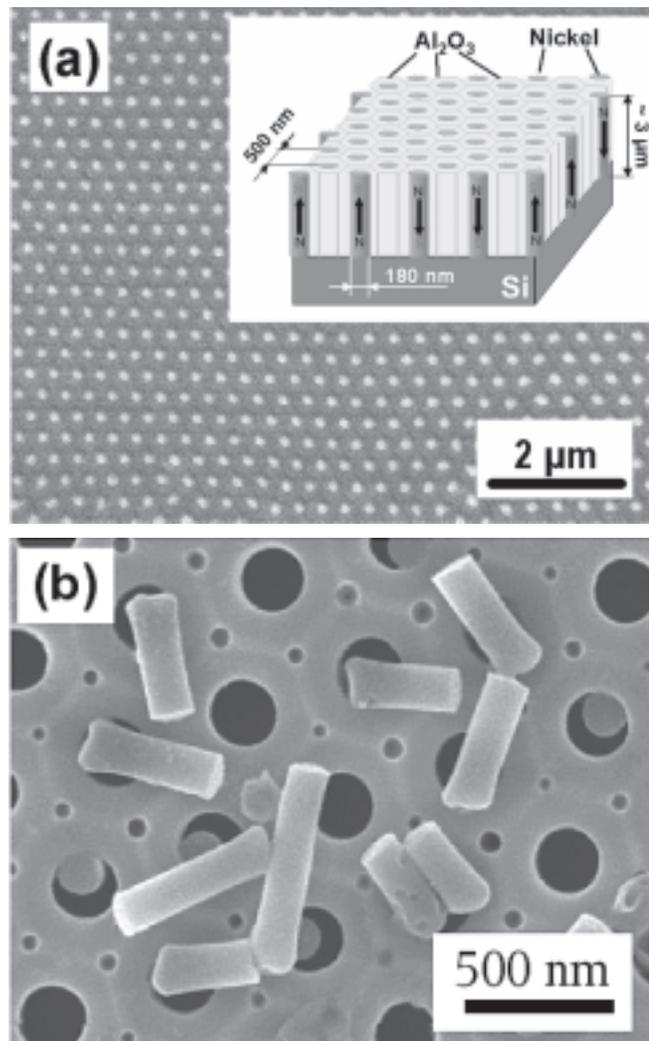


Abb. 3: REM-Abbildungen zeigen (a) ein perfekt geordnetes Nickel-Nanostabensemble eingebettet in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix und (b) Kobalt-Nanoröhren liegend auf einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Porenstruktur.

## ZIELGENAUE PRÄPARATION VON PROBEN FÜR DIE TRANSMISSIONSELEKTRONENMIKROSKOPIE

Frank Altmann und Dieter Katzer

26

Die Charakterisierung und Fehlerdiagnose höchstintegrierter elektronischer Bauelemente mit ihren immer kleiner werdenden Strukturen erfordern Untersuchungen mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), um strukturell bedingte elektronische Ausfallursachen zu finden. Für die TEM-Untersuchungen ist die schnelle und zielgenaue Präparation von elektronentransparenten Lamellen von der Ausfallregion im integrierten Schaltkreis mit Dicken im 100 nm-Bereich notwendig. Derartige Lamellen können mit Hilfe der fokussierenden Ionenstrahltechnik (focused ion beam – FIB-technology) effektiv hergestellt werden. Diese Technik erlaubt einen gezielten Materialabtrag mit einer lateralen Auflösung von bis zu 10 nm.

Technisch realisiert wird eine derartige FIB-Anlage durch den zusätzlichen Einsatz einer fokussierenden Gallium-Ionenquelle in einem hochauflösenden Rasterelektronenmikroskop. Mit dem fokussierten Ionenstrahl wird lokal Material abgetragen. Durch die Einbringung von verschiedenen Precursor-Gasen (metallorganischen Verbindungen) ist es zudem möglich, mit dem Ionenstrahl auch lateral aufgelöst dünne Metall- und Oxidschichten ioneninduziert auf den Substratoberflächen abzuschneiden (ioneninduzierte chemische Gasphasenabscheidung – CVD). Zusätzlich kann mit verschiedenen Ätzgasen ein materialspezifischer Abtrag erreicht werden. Die fokussierte Ionenstrahltechnik stellt somit ein universelles Werkzeug zur Materialbearbeitung im Mikro- und Nanometerbereich dar.

präparation direkt auf dem Probenmaterial hergestellt und herausgetrennt. Nach Einbringen der Probe in die FIB-Anlage wird in einem ersten Präparationsschritt mittels ioneninduzierter CVD-Abscheidung eine lokale Schutzschicht, bestehend aus Pt, W oder  $\text{SiO}_2$ , über der Zielstelle aufgebracht, die dadurch für die nachfolgenden Bearbeitungsschritte markiert und geschützt wird. Anschließend wird die TEM-Lamelle an der markierten Stelle durch schrittweisen Materialabtrag auf beiden Seiten hergestellt. Unter einem Probenkippwinkel von mindestens  $45^\circ$  wird dann die Lamelle an den Seiten fast vollständig abgetrennt. Das bei diesem Präparationsschritt an die TEM-Lamelle gelangte Rücksputtermaterial wird im folgenden entfernt, wobei die TEM-Lamelle auf die erforderliche Zieldicke weiter abgedünnt wird. Zum Abschluss der FIB-Arbeiten wird die TEM-Lamelle unter  $0^\circ$  Kippung vollständig vom Probenkörper getrennt. Die freiliegende TEM-Lamelle wird auf einen kohlebeschichteten Cu-Netzhalter transportiert und kann so im TEM untersucht werden. Die Abbildung zeigt ein Beispiel einer derartigen FIB-Lamelle mit einer im Querschnitt sichtbaren Antastnadel aus Si.

In der Halbleiterindustrie ermöglicht die Nadelmanipulationstechnik eine hochauflö-

sende in-line Prozesskontrolle, in dem unter Reinstraumbedingungen den Silicium-Wafern nach ausgewählten Prozessschritten TEM-Proben entnommen werden können, ohne die Wafer zerstören zu müssen. Der Wafer kann anschließend weiter prozessiert werden. Aber auch im Bereich der Materialwissenschaften bietet die Präparationstechnik neue Anwendungsfelder. So können mit geringem Aufwand beispielsweise aus zugbelasteten Stahlproben in mehreren Schritten gezielt TEM-Präparate entnommen werden. Außerdem können mit der beschriebenen Zielpräparation bisher nur schwer zugängliche Probengeometrien, wie z. B. Hohlfasern, Bruchflächen mit ausgeprägten Topographieschwankungen und Zahnoberflächen bearbeitet und TEM-Lamellen höchster Qualität für die umfassende elektronenmikroskopische Materialbewertung hergestellt werden. ■

*Dipl.-Phys. Frank Altmann absolvierte von 1991–1996 ein Physik-Studium an der TU Dresden und arbeitet seit 1996 am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Halle (Fachgruppenleiter Diagnostik für die Mikroelektronik).*

*Prof. Dr. Dieter Katzer studierte an der halleischen Universität Physik (1966–1970) mit anschließendem Forschungsstudium bis 1973, danach war er wissenschaftlicher Assistent am Institut für Festkörperphysik und Elektronenmikroskopie, 1976 Promotion auf dem Gebiet der Festkörperphysik. Seit 1992 ist er am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Halle tätig und seit 1996 Leiter des Institutsteils. 2002 wurde er zum Honorarprofessor für Mikrosystemtechnik berufen.*

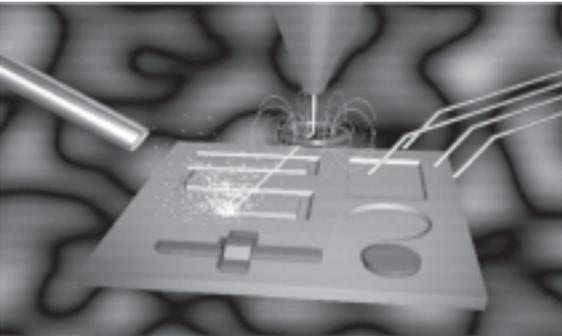


Abb. 1 Prinzipskizze zur Focused Ion Beam Technologie: Der Ionenstrahl trägt lokal Material ab. Die entstehenden Sekundärelektronen werden für eine rasterelektronenmikroskopische Abbildung verwendet. Durch den Ionenstrahl können aus metallorganischen Precursoren lokalisiert Metallnanostrukturen hergestellt werden.

Bei der konventionellen FIB-Querschnittspräparation wird aus dem elektronischen Schaltkreis ein Streifen mechanisch herauspräpariert und anschließend die TEM-Lamelle mittels FIB-Bearbeitung auf die gewünschte Durchstrahlstärke feinpoliert. Bei der neuen Nadelmanipulationstechnik wird die TEM-Lamelle ohne mechanische Vor-

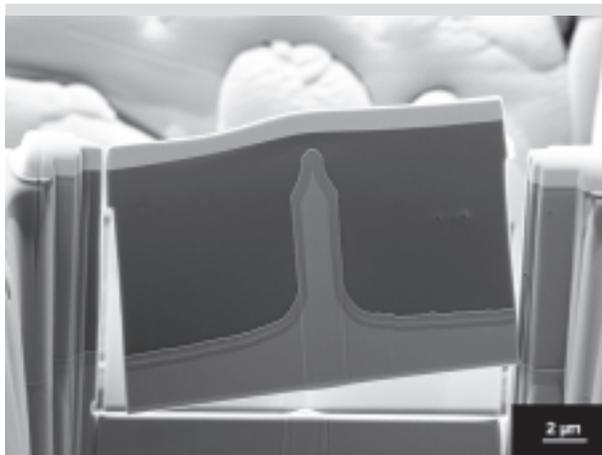


Abb. 2 Präparierte Lamelle mit einer mechanischen Antastnadel aus beschichtetem Si

# GROSSE MOLEKÜLE UND KLEINE STRUKTUREN

Mario Beiner und Thomas Thurn-Albrecht

Forschungsschwerpunkt der Fachgruppe Experimentelle Polymerphysik am Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität ist die Untersuchung selbstorganisierender Strukturen auf der Nanoskala in makromolekularen Materialien. Anhand einiger Beispiele werden typische Fragestellungen erläutert und experimentelle Methoden vorgestellt. Das Forschungsgebiet ist geprägt durch eine Kombination von grundlegenden Fragestellungen und anwendungsorientierten Aspekten.

## Was ist Polymerphysik?

Polymere sind lange kettenförmige Moleküle, die in der chemischen Synthese durch eine Aneinanderreihung niedermolekularer Bausteine – den Monomeren – erzeugt werden. Kunststoffe, wie auch viele biologische Materialien, bestehen aus Polymeren. Die Polymerphysik ist ein Teilgebiet der Physik der weichen Materie, ihr primärer Gegenstand sind die Eigenschaften polymerer Materialien, die sich in allgemeiner Art auf den Kettencharakter der Polymere zurückführen lassen. Ein weitgehendes Verständnis ist in vielen Fällen auch ohne explizite Berücksichtigung von molekularen Details möglich.

## Forschungsthemen

Ein einzelnes Kettenmolekül in einer polymeren Flüssigkeit kann man sich als ein knäuelartiges Gebilde mit einer typischen Größe von einigen zehn Nanometern vorstellen. Damit existiert in polymeren Sys-

temen eine neue Strukturgröße, die zirka einen Faktor 100 größer ist als die typischen Längen in niedermolekularen Systemen. Dementsprechend findet man in Polymeren häufig *Strukturen auf der »Nanoskala«* (ca. einige Nanometer bis einige zehn Nanometer). Zwei grundlegende Mechanismen für solche Strukturbildungsprozesse seien hier beispielhaft genannt, die *Kristallisation von Polymeren* und die sogenannte *Mikrophasenseparation*:

- Polymere kristallisieren typischerweise in Form sehr dünner Schichtkristallite (Dicke ca. 10nm), die umgeben sind von einer amorphen, flüssigkeitsartigen Schicht (Abb. 1). Die Kristallisation bleibt von daher immer unvollständig, man spricht auch von teilkristallinen Polymeren.
- Bei der sogenannten Mikrophasenseparation handelt es sich um lokale Entmischungerscheinungen, die man in Blockcopolymeren findet. Dies sind Polymere in denen sich die einzelnen Ketten aus chemisch unterschiedliche Teilketten zusammensetzen. Die Entmischung zwischen den Teilketten geht einher mit der spontanen Ausbildung regelmäßig geordneter Strukturen (Abb. 2).

Die Untersuchung derartiger Strukturen und der Prozesse, die zu ihrer Bildung führen, sind ein Forschungsschwerpunkt der Fachgruppe Experimentelle Polymerphysik. Unser besonderes Interesse gilt dabei der Frage, inwieweit sich die Strukturbildungsprozesse durch *externe Felder* beeinflussen oder gar steuern lassen. Findet z. B. eine Mikrophasenseparation in einem (genügend starken) elektrischen Feld statt, so bilden sich makroskopisch einheitlich orientierte Strukturen (Abb. 3, Seite 28). Diese selbstorganisierenden Muster stellen ein interessantes Werkzeug zur Herstellung kleinster Strukturen dar. Diese sind viel kleiner als die mit den heute gebräuchlichen Methoden, z. B. der Lithographie in der

Abb. 1: Kristallisation von Polymeren: Schematische Darstellung eines Polymers im (A) amorphen und (B) teilkristallinen Zustand. Der Schichtkristallit (Lamelle) ist von einer amorphen, flüssigkeitsartigen Schicht umgeben.

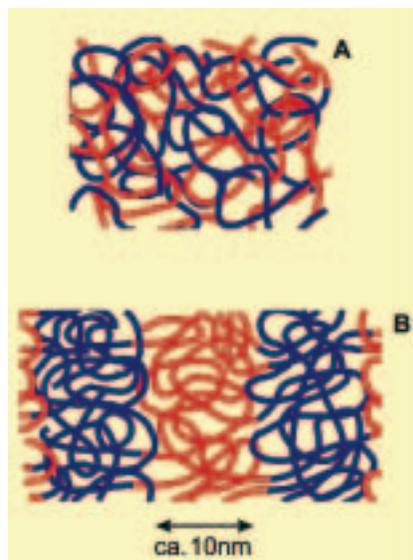
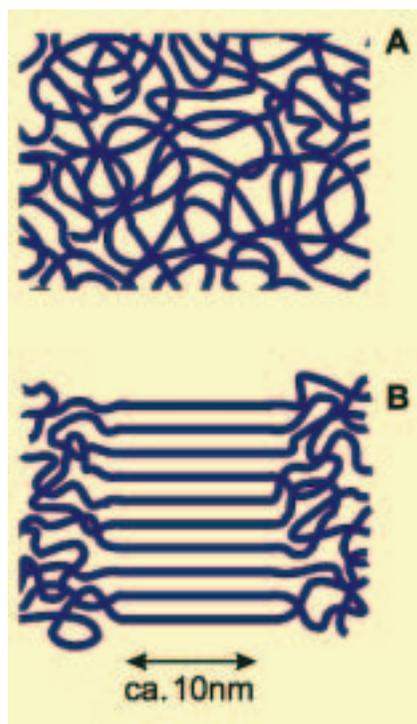


Abb. 2: Mikrophasenseparation: Schematische Darstellung eines Blockcopolymers im (A) ungeordneten, gemischten und (B) mikrophasenseparierten Zustand. Die verschiedenen Farben symbolisieren die chemisch unterschiedlichen Teilketten (Blöcke).

Mikroelektronik, herstellbaren Nanostrukturen. Auf eine ähnliche Weise lassen sich auch teilkristalline Polymere während der Kristallisation durch ein Magnetfeld orientieren, wobei jedoch der zugrunde liegende molekulare Mechanismus ein anderer ist. In der Fachgruppe werden grundlegende Fragen zum Verständnis dieser Orientierungsmechanismen untersucht und mögliche Anwendungen im Bereich der Strukturierung erforscht.

Durch Kombination der oben beschriebenen grundlegenden Strukturbildungsmechanismen lassen sich auch Materialien mit *komplexeren Strukturen* erzeugen, z. B. wenn die Kristallisation innerhalb einer mikrophasenseparierten Blockcopolymerstruktur stattfindet. An einem Verständnis derartiger Prozesse wird an Hand von Modellsystemen gearbeitet (Abb. 4, Seite 28). Allerdings sind auch diese komplexeren Materialien im Vergleich zu heterogen strukturierten Materialien natürlicher Herkunft immer noch sehr einfach aufgebaut. Zur Durchführung der Untersuchungen an Polymeren wird eine Reihe von *experimentellen Methoden* eingesetzt und weiterentwickelt. Während die optische Mikroskopie ein unentbehrliches Hilfsmittel für viele Routinearbeiten darstellt, sind die meisten der beschriebenen Strukturen zu klein, um mit sichtbarem Licht noch abge-



bildet werden zu können. Hier kommen Röntgenbeugungs- bzw. streuexperimente zum Einsatz, zum Teil werden auch Neutronen als Sonde eingesetzt. Zur Erzeugung direkter Abbildungen wird die Rasterkraftmikroskopie verwendet. Die Methoden zur Strukturuntersuchung werden durch eine Reihe von Methoden zur Untersuchung der kalorimetrischen Eigenschaften und der mikroskopischen Dynamik (Relaxationsspektroskopie) ergänzt.

**Einbindung in die Forschungslandschaft**

Die Polymerphysik am Fachbereich Physik ist Teil des Forschungsschwerpunkts Materialwissenschaften der Universität Halle und Mitglied des Sonderforschungsbereiches 418 »Struktur und Dynamik nanoskopischer Inhomogenitäten in kondensierter Materie«. Bei der Entwicklung von Methoden zur Herstellung kleinster Strukturen gibt es eine Vielzahl von Anknüpfungspunkten an die Arbeiten des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik. Gemeinsame Interessen bestehen darüber hinaus mit den Fachbereichen Ingenieurwissenschaften sowie Chemie und Pharmazie. In der Lehre beteiligt sich die Fachgruppe neben der Ausbildung der Physiker

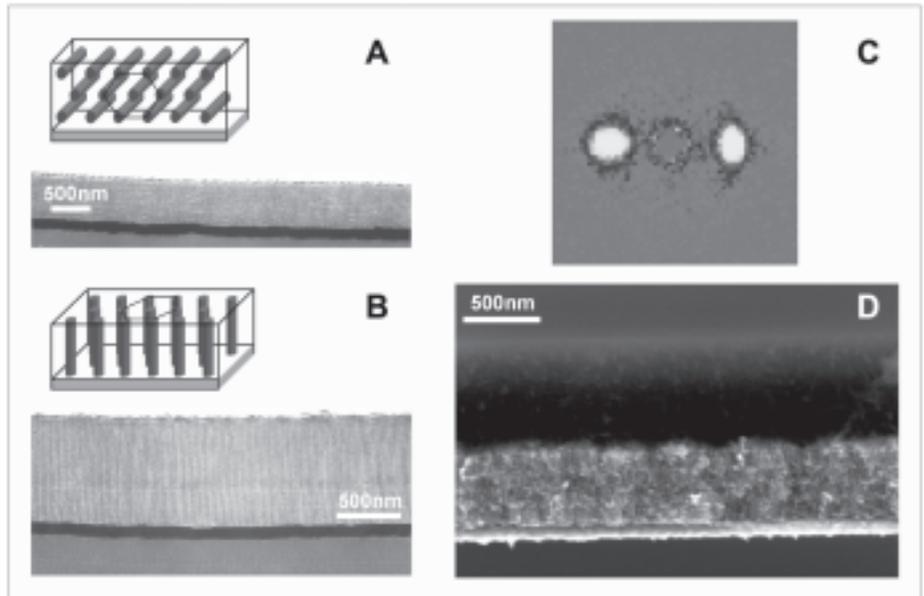


Abb. 3: Strukturierung auf Basis von PS-b-PMMA Blockcopolymeren: Dünne Blockcopolymerenschichten im mikrophasenseparierten Zustand mit Zylindermorphologie. Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen Zylinder, die (A) parallel bzw. (B) unter dem Einfluss elektrischer Felder senkrecht zur Substratoberfläche orientiert sind. Neutronenstreubilder für die senkrecht orientierten Zylinder sind in (C) gezeigt. Die orientierten Zylinder aus (B) können selektiv entfernt werden, die geordnete, nanoporöse Struktur dient als Templat zur Herstellung von Nanodrahtarrays. (D) zeigt einen zur Hälfte mit Cobalt-Nanodrähten (helle Struktur) gefüllten Film. PS-b-PMMA: Poly(styrol-block-methylmethacrylat)

und Naturwissenschaftler auch an dem internationalen Masterstudiengang »Applied Polymer Science«.

*Thomas Thurn-Albrecht studierte Physik an den Universitäten Freiburg und Edinburgh und wurde im Jahr 1994 promoviert. Nach knapp drei Jahren am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz und einem Auslandsaufenthalt in den Jahren 1998–1999 an der University of Massachusetts, Amherst, USA habilitierte er sich im Jahre 2000 an der Universität Freiburg. 2003 folgte er dem Ruf auf die Professur für Experimentelle Physik (Polymerphysik) an die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.*

*Mario Beiner studierte Physik an der Technischen Hochschule Merseburg und wurde 1995 an der Universität Halle promoviert. Nach einem Forschungsaufenthalt am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz und am FORTH Heraklion in Griechenland in den Jahren 1996–1997 und der Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Fachbereich Physik habilitierte er sich im Jahre 2003 an der Universität Halle. Seitdem ist er Privatdozent in der Fachgruppe Polymerphysik.*

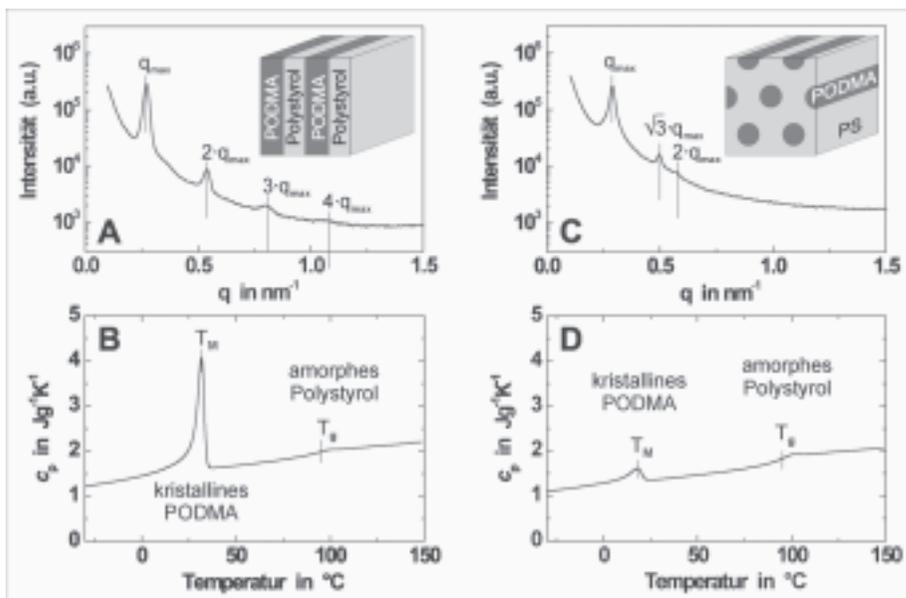


Abb. 4: Komplexe Blockcopolymerstrukturen: Röntgenkleinwinkelstreuung und kalorimetrische Messungen für zwei teilkristalline Blockcopolymeren. Die Röntgenstreuendiagramme zeigen, dass sich in Abhängigkeit von der relativen Länge der Blöcke unterschiedliche mikrophasenseparierte Strukturen ausbilden (A, C). In den kalorimetrischen Messungen (B, D) sind die Schmelztemperaturen  $T_M$  des kristallinen Blocks und die Glasübergangstemperatur  $T_g$  des amorphen Blocks gekennzeichnet. Durch die stärker einschränkende Zylindergeometrie wird die Kristallisation deutlich unterdrückt. (PODMA: Poly-n-octadecylmethacrylat)

# NANOPARTIKELHALTIGE GLÄSER: NEUE PERSPEKTIVEN FÜR EIN ALTES MATERIAL

Klaus-Jürgen Berg und Heinrich Graener

Die wahrscheinlich älteste Anwendung künstlich erzeugter nanostrukturierter Materie diente der Herstellung farbiger Gläser. Sphärische Nanopartikel aus Gold bzw. Silber verursachen das brillante Rot des aus dem Kunsthandwerk bekannten Goldrubinglases und die durch das so genannte Silberbeizen erzeugbaren Gelb- und Brauntöne. Darüber herrscht Gewissheit, seit auf der Basis der Mieschen Theorie Absorptionsspektren der in Glas eingebetteten Metallpartikel berechnet werden können. Sie stimmen sehr gut mit experimentell ermittelten Spektren überein. Gustav Mie war übrigens von 1917 bis 1924 Ordinarius für Physik in Halle. Auch direkt zu den alten Färbungsmethoden lässt sich eine Verbindung der Universität Halle-Wittenberg finden. Johann Kunckel von Löwenstern, der von 1677 bis 1679 an der Universität Wittenberg lehrte, gelang als Erstem die hüttenmäßige Erzeugung von Hohlglas, also Bechern, Pokalen, Flaschen usw., aus Goldrubin. Noch über 200 Jahre älter als das Goldrubinglas ist das Silberbeizen, mit dem Glasscheiben für Kirchenfenster gefärbt wurden (J. Griesinger, Ulm 1460). Bei diesem Verfahren wird auf das Glas eine silbersalzhaltige Paste aufgebracht, und danach eine Erwärmung auf Temperaturen oberhalb der Glastransformationstemperatur  $T_g$  durchgeführt.

Aus heutiger Sicht laufen beim Silberbeizen mindestens drei verschiedene Prozesse ab:

1. Ein Austausch von Natriumionen des Glases gegen Silberionen aus der Paste,
2. eine Reduktion der Silberionen zu Atomen durch »glaseigene« Reduktionsmittel, z. B. zweiwertige Eisenionen, die in üblichem Flachglas stets enthalten sind, und
3. die Zusammenlagerung von Silberatomen zu Partikeln, die unter dem Einfluss der Grenzflächenspannung sphärische Form annehmen und typischerweise Durchmesser um 20 nm aufweisen. Die Gelbfärbung kann auch in zwei getrennten Schritten vorgenommen werden. Der Natrium-Silber-Ionenaustausch deutlich unterhalb  $T_g$  – heute vorteilhaft in Salzschmelzen durchgeführt – lässt das Glas noch farblos, während Reduktion und Partikelbildung und damit die Färbung erst bei einer nachfolgenden Temperaturbehandlung des Glases nahe  $T_g$  stattfinden.

## Neue Einsatzmöglichkeiten

Aus dem zweistufigen Prozess wurde die Idee abgeleitet, durch lokal begrenzte Partikelbildung infolge Beschränkung der Erwärmung auf bestimmte Glasbereiche eine Farbstrukturierung zu erzeugen. Bei Verwendung fokussierter Laserstrahlung zur Glaserwärmung sollten dann Mikrostrukturierungen möglich sein, mit denen den metallpartikelhaltigen Gläsern eine Vielzahl neuer Einsatzmöglichkeiten erschlossen würden. Zwei Patente schützen inzwischen diese Idee (R. Borek, T. Rainer, K.-J. Berg). Sie entstanden im Rahmen von zwei aufeinander folgenden, vom Land Sachsen-Anhalt geförderten Forschungsprojekten. Im ersten wurde nachgewiesen, dass sich in handelsüblichem Flachglas unter Verwendung von  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung Pixel mit minimalen Durchmessern von 20  $\mu\text{m}$  und einer Tiefenausdehnung von weniger als 1  $\mu\text{m}$  in weniger als 1 Sekunde erzeugen lassen. Sie lassen sich computergesteuert zu Markierungen und Beschriftungen, aber auch zu Halbtonbildern zusammensetzen. Weil sich diese Strukturen innerhalb des Glases befinden, sind sie mechanisch und chemisch so beständig wie das Glas selbst. Thermisch sind sie stabil bis dicht unterhalb  $T_g$  und außerdem unempfindlich gegenüber UV-Strahlung, auch über sehr lange Zeiten. Das eigentliche Problem bei dieser Entwicklung bestand darin, eine geeignete Kombination von Laserleistung und Bestrahlungsdauer sowie Fokusdurchmesser zu ermitteln. Sie sollte einerseits die Feuerpolitur der ursprünglichen Oberfläche nicht beeinträchtigen und weder zur Ausbildung von Rissen noch zum lokalen Aufschmel-

zen der Gläser führen, aber andererseits so hohe Temperaturen erzeugen, dass die Partikelbildung genügend schnell für technologische Prozesse abläuft.

29

## Firma boraglas entstanden

In dem zweiten Projekt hatten zwei junge Mitarbeiter (R. Borek, T. Rainer) die Gelegenheit, parallel zur Arbeit an ihrer Dissertation die Gründung einer Firma vorzubereiten, die die wissenschaftlichen Ergebnisse kommerziell nutzt, Produkte und Verfahren entwickelt und vermarktet. In diesem Rahmen wurden neue Laserstrahlquellen eingesetzt und die minimale Pixel-



Abb. 1: Foto eines chemisch modifizierten Objektträgers (Bioslide), der durch  $\text{Na}^+$ - $\text{Ag}^+$ -Austausch und  $\text{CO}_2$ -Laserbestrahlung mit einem Barcode versehen wurde.

Foto: Melms

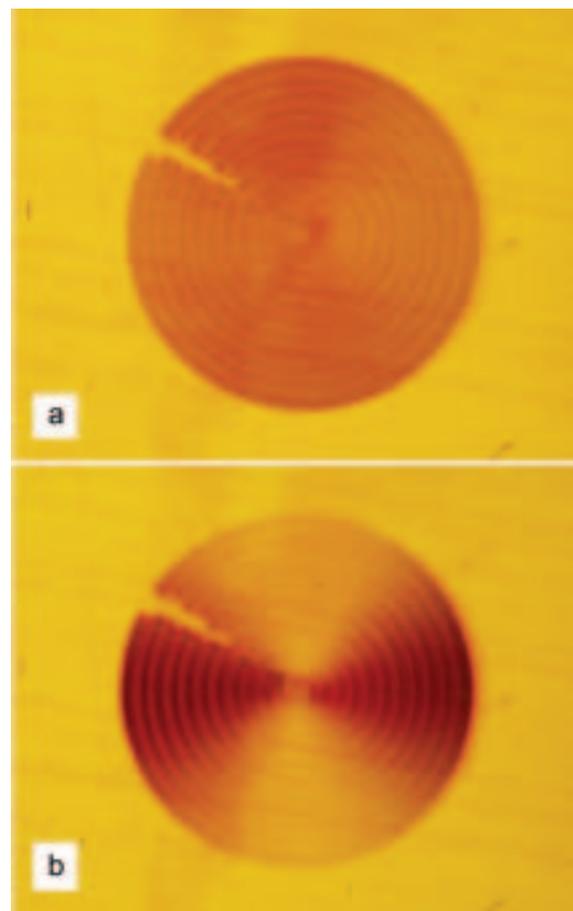


Abb. 2 : Fotos eines silberpartikelhaltigen Flachglases, in dem durch Bestrahlung mit fs-Laserimpulsen ein polarisierender kreisförmiger Bereich erzeugt wurde. Die gleichmäßige Färbung des Kreises in unpolarisiertem Licht (a) und seine markante Farbstruktur in senkrecht polarisiertem Licht (b) zeigen, dass die Durchlassrichtung in jedem Punkt parallel zum Durchmesser liegt.

Foto: Mitzschke

größe dadurch auf unter  $1\ \mu\text{m}$  und die Bestrahlungsdauer auf weniger als  $1\ \text{ms}$  gedrückt sowie erste Technologien entwickelt und mögliche Einsatzgebiete dafür erkundet. Sie reichen von der dekorativen Glasgestaltung über technische Markierungen im Bauglasbereich, bei der Fahrzeugverglasung und auf gläsernen Probenträgern für Medizin und Biotechnologie (siehe Abb. 1), die Herstellung von optischen Elementen, wie Strich- und Eichplatten sowie Amplitudengittern, bis zur Anwendung des Materials zur optischen Datenspeicherung. Zur Untersuchung der letztgenannten Möglichkeit wurde ein Förderantrag im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit getragenen Programms Futour 2000 gestellt.

Die inzwischen existierende Firma boraglas GmbH untersucht in dem genehmigten Futour 2000-Projekt auch die Möglichkeit der technischen Nutzung eines weiteren Komplexes wissenschaftlicher Ergebnisse. Dessen Erarbeitung wurde erst nach der Entscheidung des Fachbereichs Physik zum Aufbau einer Fachgruppe Optik und deren Ausrichtung auf die Untersuchung ultraschneller Prozesse in kondensierter Materie unter Ausnutzung ultrakurzer Laserimpulse durch den neu berufenen Leiter (H. Graener) möglich.

Schon die ersten »Kontakte« der ultrakurzen Laserimpulse mit den nanoskopisch kleinen Metallpartikeln führten zu einem sehr überraschenden Ergebnis. Ein einziger in die Absorptionsbande von sphärischen Silberpartikeln eingestrahler Laserimpuls von nur  $150\ \text{Femtosekunden}$  Dauer verändert die optischen Eigenschaften drastisch. Sie ähneln danach denen von Gläsern, die rotationsellipsoidförmige Silberpartikel einheitlicher Orientierung enthalten. Deren Erzeugung durch Zugdeformation von Gläsern, die zunächst sphärische Partikel enthalten, war unter der Leitung von Gunnar Berg in den 1990er Jahren in Halle ausführlich untersucht worden. Solche Systeme zeigen im Gegensatz zum isotropen Verhalten der eingebetteten sphärischen Partikel unterschiedliche Absorptionsbanden für Licht, das parallel bzw. senkrecht zur Längsachse der Rotationsellipsoide polarisiert ist. Wegen der damit verbundenen verschiedenen Farben im unterschiedlich polarisierten Licht wird diese Eigenschaft Dichroismus genannt.

Dichroitische Gläser wirken im Bereich der beiden Absorptionsbanden als Polarisatoren. Die durch Einwirkung von Laserim-

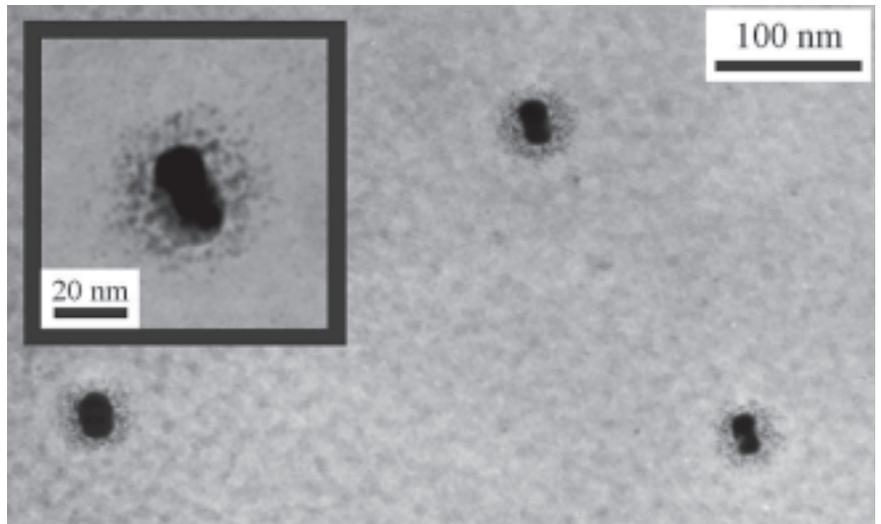


Abb. 3: Elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahme eines silberpartikelhaltigen Glases nach Bestrahlung mit einem Laserimpuls von  $150\ \text{fs}$  Dauer und Ausschnittsvergrößerung mit einem einzelnen Partikel.  
Foto: Hofmeister

pulsen erzeugten können nun, gesteuert durch die Polarisationsrichtung des Laserimpulses, hinsichtlich der Durchlassrichtung strukturiert und sogar mikrostrukturiert werden. Dadurch werden neue optische Elemente herstellbar, deren Realisierung bisher auf keine andere Weise gelingt. Als Beispiel dafür zeigen die Farbfotos in Abb. 2 einen kreisförmigen Polarisator, bei dem für die Wellenlänge  $550\ \text{nm}$  die Durchlassrichtung in jedem Punkt parallel zum Durchmesser durch den gewählten Punkt liegt. Ein solches Element kann z. B. Ellipsometern, die zur Prozesskontrolle in der Halbleiterindustrie weit verbreitet sind, wesentlich erweiterte Einsatzmöglichkeiten verschaffen.

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass neben den hier behandelten anwendungstechnischen Aspekten natürlich auch die physikalischen Grundlagen der besprochenen Effekte untersucht werden. So konnte z. B. in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik (H. Hofmeister) elektronenmikroskopisch nachgewiesen werden, dass die ultrakurzen Laserimpulse tatsächlich eine Verformung der ursprünglich sphärischen Metallpartikel bewirken. Abb. 3 zeigt in der Ausschnittsvergrößerung ein einzelnes längliches Partikel und in geringerer Vergrößerung, dass die Längsachsen aller Partikel zueinander parallel liegen. Außerdem sind alle Partikel von einer Hülle aus sehr vielen, viel kleineren Silberpartikeln umgeben. Welchen Einfluss diese

Hülle und die nicht streng Rotationsellipsoiden entsprechende Form der Zentralpartikel auf die Absorptionsspektren hat und wie die Deformation und Hüllenbildung unter der Einwirkung der ultrakurzen Laserimpulse im Detail abläuft, ist ebenso wie der Elementarprozess der eingangs diskutierten laserstrahlinduzierten Erzeugung sphärischer Partikel Gegenstand von Untersuchungen im Sonderforschungsbereich 418 der Deutschen Forschungsgemeinschaft. ■

*Heinrich Graener studierte Physik in Bochum (1972–1978), Promotion: 1982 in Bayreuth, Habilitation: 1992 ebenfalls in Bayreuth. Von 1982–1995 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Bayreuth, danach folgte er dem Ruf auf die Professur für Experimentalphysik an die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg mit den Spezialisierungen Erzeugung und Anwendung ultrakurzer Laserimpulse, Struktur und Dynamik kondensierter Materie.*

*Klaus-J. Berg studierte 1959–1965 Physik in Halle, Promotion: 1973. Seit dem ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Halle-Wittenberg mit den Spezialisierungen Farbzentren in Ionenkristallen, Physik anorganischer Gläser und Clusterphysik.*

## ... ABER DER TEUFEL ERSCHUF DIE OBERFLÄCHEN

### OBERFLÄCHEN- UND GRENZFLÄCHENPHYSIK AN DER MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT

**Wolf Widdra**

Das Zitat von Wolfgang Pauli, einem der Pioniere der modernen Physik zu Beginn des 20. Jahrhunderts, »Gott erschuf die Festkörper, aber der Teufel die Oberflächen« verdeutlicht das Spannungsfeld zwischen der Faszination der kristallinen Festkörper und der Schwierigkeit der theoretischen und experimentellen Beschreibung ihrer Oberflächen. Erst in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelten sich – eng gekoppelt an die Entwicklungen der Vakuumtechnologie zu dieser Zeit – die experimentellen Voraussetzungen, um einkristalline Oberflächen hinreichend zu präparieren und deren Zusammensetzung zu kontrollieren. Bis heute expandiert dieses Forschungsgebiet an der Grenze zwischen Physik und physikalischer Chemie heftig und hat ein fein abgestimmtes Instrumentarium physikalischer Mess- und Präparationsmethoden entwickelt, das nun eine »verteufelt« vielseitige und gezielte Modifikation von Oberflächeneigenschaften zulässt. Heute bildet die Oberflächenphysik und Dünnschichttechnologie die Basis für viele Bereiche der modernen Hochtechnologien, von integrierten elektronischen Bauelementen über die heterogene Katalyse bis hin zu Sensorik, Tribologie, Korrosionsschutz und Biokompatibilität.

Mit der aufkommenden wirtschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie für das beginnende 21. Jahrhundert werden die Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften eine materialwissenschaftliche Schlüsselstellung einnehmen, wenn Nanomaterialien mit gezielt eingestellten elektrischen, magnetischen und optischen Eigenschaften realisiert werden.

#### Neue Perspektiven

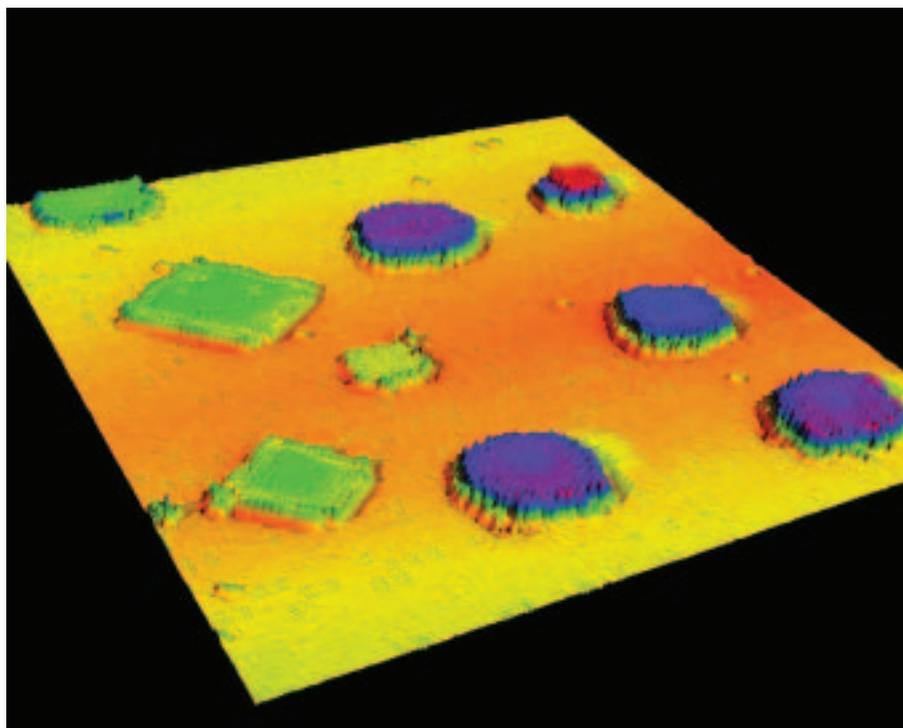
Zwei Beispiele, die eng mit der Forschung in Halle verbunden sind, sollen dies illustrieren: Metalloxide finden Anwendung in vielen modernen Technologien, z. B. in der Gassensorik, der heterogenen Katalyse, im Korrosionsschutz, aber auch in magneto-optischen Speichermedien und als Hochtemperatursupraleiter. Als ultradünne, wenige Atomlagen dicke Schichten (»Nanolayers«) weisen solche Materialien neue, von der reduzierten Dimensionalität und von Grenzflächeneffekten getriebene Eigenschaften auf. Dies eröffnet neue Perspektiven für die Entwicklung maßgeschneiderter Anwendungen. (Siehe Beitrag der Forschergruppe »Oxidische Grenzflächen«, Seite 17.)

Am Anfang einer solchen Entwicklung steht die kontrollierte Präparation der neuen Materialstruktur und die Klärung der Struktur-Funktionalitäts-Beziehung. Hier kommt das weitentwickelte Instrumentarium der Oberflächenphysik zum Einsatz. Bei der in den achtziger Jahren entwickelten Rastertunnelmikroskopie (STM) tastet eine atomar scharfe Metallspitze die zu untersuchende Oberfläche ab und zeichnet die Höhenkorugation auf. Mit dieser Technik und der eng verwandten Rasterkraftmikroskopie (AFM) ist es in vielen

Fällen möglich, die geometrische Struktur an der Oberfläche mit atomarer Genauigkeit abzubilden. Treten geometrische Strukturen periodisch auf, lassen sich komplementär Beugungsmethoden mit Elektronenstrahlen einsetzen, um die Atomposition teilweise bis auf ein Hundertstel eines Atomdurchmessers genau zu bestimmen. Das nebenstehende Beispiel eines STM-Bildes zeigt die zu Beginn des Wachstums einer CoO-Doppellage auftretenden Inselstrukturen.

Die Charakterisierung der Morphologie

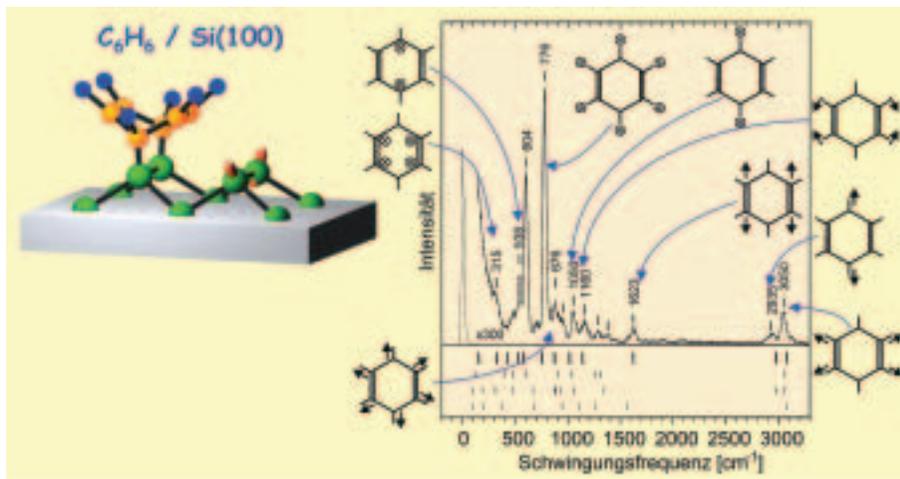
und der atomaren Struktur sowie deren Korrelation mit den Wachstums- und Präparationsbedingungen sind eine wesentliche, für jede weitere Untersuchung notwendige Voraussetzung. Welche chemischen, elektronischen oder magnetischen Eigenschaften daraus folgen und warum gerade diese Struktur ausgebildet wird, kann mit komplementären Methoden aufgeklärt werden. Die elektronische Struktur der obersten Atomlagen sowie von Adsorbatmolekülen ist über die UV- und Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (UPS, XPS) oft sogar quantitativ zugänglich. Energetische Verschiebungen der Molekülorbitale zeigen dabei geänderte chemische Bindungen auf. Schwingungsspektroskopie erlaubt neben einer Identifizierung von Molekülfragmenten eine Charakterisierung von Verspannungen in der Oberfläche und in adsorbierten Molekülen. In all diesen Fällen ist für die Klärung der Struktur-Funktionalitäts-Beziehung neben dem Einsatz von verschiedenen experimentellen Methoden eine enge Zusammenarbeit mit theoretischen Arbeitsgruppen wesentlich, um zu einem weitgehenden Verständnis neuer Funktionalitäten zu kommen.



Rastertunnelmikroskopische Aufnahme von Kobaltoxidinseln auf einer Silberoberfläche. Der Durchmesser der Inseln beträgt etwa 6–8 nm. Die Schichtdicke entspricht ein, zwei und drei Monolagen (grün, blau und rot). Einzelne Atome in den CoO-Inseln können abgebildet werden.

## 32 Maßgeschneiderte Eigenschaften

Ein zweites Beispiel aus dem Themenbereich organischer Moleküle an Oberflächen: Ungesättigte und insbesondere konjugierte organische Moleküle werden als aktive Elemente in diversen elektronischen und optoelektronischen Bauelementen, wie z. B. Leuchtdioden, Feldeffekttransistoren und photovoltaischen Zellen, verwendet. Zu den Vorteilen solcher »organic devices« gehören unter anderem einfache Präparation, mechanische Flexibilität und geringe Kosten. Mit kleiner werdenden Strukturen solcher Bauelemente werden die Eigenschaften der Grenzflächen der Molekülschicht zum Halbleitersubstrat bzw. zur Oxidschicht wesentlich, über die z. B. Ladungsträger injiziert oder elektrische Felder kontrolliert werden. Die Grenzfläche bestimmt auch die Qualität des Schichtwachstums. Die Forschungsarbeiten reichen von der Untersuchung der Oberflächen-Molekül-Wechselwirkung für kleine Moleküle mit isolierten funktionellen Gruppen (einzelne  $\pi$ -Bindung, konjugierte und aromatische  $\pi$ -Bindungen) – dies auch mit Blick auf Anwendungen in der heterogenen Katalyse – bis zum Schichtwachstum von großen organischen Molekülen mit einem ausgedehnten  $\pi$ -Elektronensystem, wie sie in der Optoelektronik eingesetzt werden. Die oben stehende Abbil-

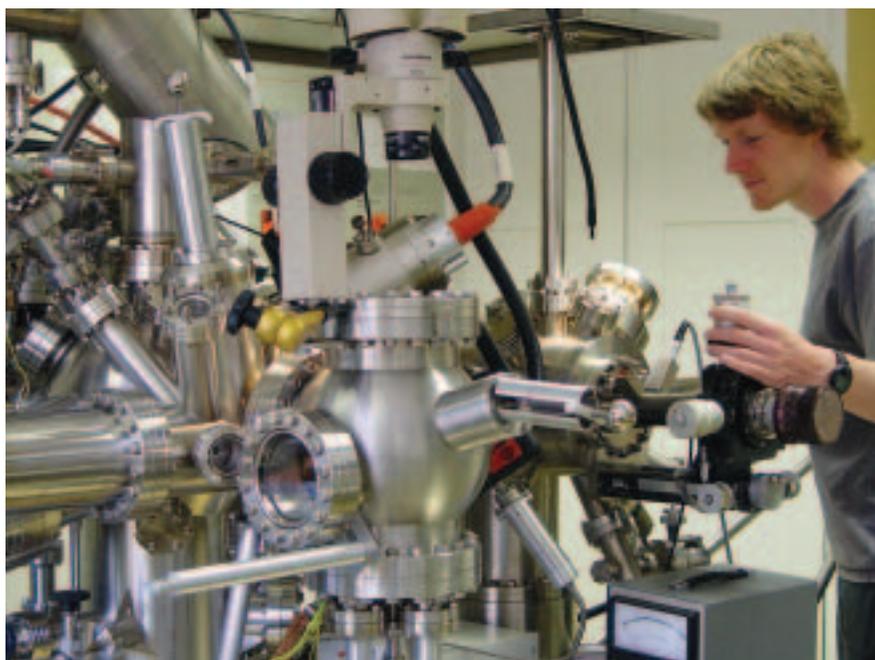


Modell und Schwingungsspektrum für Benzol adsorbiert auf einer Siliziumoberfläche. Die verschiedenen Bewegungen des schwingenden Moleküls sind durch Pfeile veranschaulicht. Berechnete Frequenzen sind unten als Balken dargestellt.

dung zeigt die Adsorptionsstruktur, die sich auf der Halbleiteroberfläche Si(100) für das kleinste Molekül mit aromatischen  $\pi$ -Bindungen, Benzol, ergibt. Mit Hilfe der UV-Photoelektronenspektroskopie und der hochauflösten Schwingungsspektroskopie konnten hier Adsorptionsstruktur und -mechanismus aufgeklärt werden. Solche Modellsysteme bilden die Basis für das Verständnis größerer organischer Moleküle. Laterale Strukturierung, die intrinsisch durch das Substrat bzw. extern kontrolliert durch Oberflächenterrassierung vorgegeben wird oder sich durch die Molekül-Molekül-Wechselwirkung selbst organisiert, kann zu modifizierten Eigenschaften führen. Hierzu zählt die Ausbildung von eindimensionalen Molekülketten mit sehr anisotropen elektronischen Eigenschaften. Solche und ähnliche Konzepte von selbst organisiertem Wachstum führen schon heute

zu maßgeschneiderten Materialeigenschaften dünner Filme.

In der Fachgruppe Oberflächen- und Grenzflächenphysik des Fachbereichs Physik konzentrieren sich die Forschungsarbeiten auf Übergangsmetalloxid-Oberflächen bzw. die Metalloxid-Metall-Grenzfläche und auf die Adsorption von organischen Molekülen auf diesen Oberflächen. Das in der Fachgruppe eingesetzte methodische Instrumentarium reicht dabei von Rastertunnelmikroskopie und -spektroskopie über Photoelektronenspektroskopie mit Synchrotronstrahlung und Schwingungsspektroskopie bis zu geplanter Ultrakurzzeitspektroskopie und -mikroskopie. Letztere Methode, die zwei Femtosekunden-Laserpulse zur Zweiphotonen-Photoemission verwendet, kann mit Photoelektronenmikroskopie kombiniert eine extrem hohe Zeitauflösung bei Nanometer-Ortsauflösung erreichen. Dies erlaubt die Dynamik photoinduzierter elektronischer Anregungen an nanostrukturierten Oxidoberflächen und Adsorbatstrukturen in Echtzeit zu verfolgen. Mit diesem methodisch breiten Ansatz will die Fachgruppe ihren Beitrag zum materialwissenschaftlichen Schwerpunkt in Halle leisten. ■



Ein Student an einer Ultrahochvakuum-Apparatur zur Charakterisierung einer Oxidoberfläche mit Rastertunnelmikroskopie.

Der Autor absolvierte 1982–1988 ein Physikstudium an der Philipps-Universität Marburg, wurde dort und am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg 1991 promoviert. Nach zwei Jahren Postdoc am Chemical Engineering Department der UC Santa Barbara, USA kam er 1994 als Assistent an die TU München. Nach Habilitation im Jahr 2000 nahm er 2001 einen Ruf der TU Berlin auf eine Professur für experimentelle Physik, verbunden mit der Abteilungsleitung am Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie an. 2003 folgte er dem Ruf an die Martin-Luther-Universität und leitet seither die Fachgruppe Oberflächen- und Grenzflächenphysik.

# EINZELNE MOLEKÜLE ALS BAUSTEINE UND SONDEN ZUR ANALYSE VON NANOSTRUKTUREN

Johannes Hohlbein und Christian G. Hübner

Die Natur hat nach den heute etablierten Theorien schon vor Milliarden Jahren die ersten nanostrukturierten Materialien hervor gebracht: Organische Makromoleküle, die in der Lage waren, sich selbst zu replizieren. Seitdem hat die Evolution natürliche Nanostrukturen hervor gebracht, gegen die sich die von Menschen geschaffenen künstlichen Nanostrukturen fast primitiv ausnehmen. Während die ersten Ansätze zur künstlichen Herstellung von Nanostrukturen von einem so genannten »Top-down«-Konzept ausgingen, das heißt der sukzessiven Verkleinerung mikroskopischer Strukturen, wird heute vermehrt – nach dem Vorbild der Natur – der umgekehrte Ansatz verfolgt: In einem »Bottom-Up«-Prozess sollen die Nanostrukturen aus ihren Grundbausteinen – Atomen bzw. Molekülen – entweder durch Selbstorganisation oder gezielte Manipulation hergestellt werden. Um einen solchen Prozess verfolgen und steuern zu können, muss man in der Lage sein, die einzelnen Bausteine – die Moleküle – direkt zu beobachten. Dies ist mit der in den letzten zehn Jahren entwickelten Methode der Einzelmolekül-Fluoreszenzdetektion und -spektroskopie möglich. In diesem Artikel sollen schlaglichtartig die Besonderheiten dieser Methode sowie Anwendungen bei der Untersuchung von Nanostrukturen vorgestellt werden.

## Einzelmolekül-Fluoreszenzdetektion

Seit dem ersten Experiment im Jahr 1990, bei dem die Fluoreszenz eines einzelnen Moleküls nachgewiesen werden konnte, hat die Methode der Einzelmolekül-Fluoreszenzdetektion, abgekürzt SMD (»Single Molecule Detection«), eine stürmische Entwicklung erfahren. War man bisher zur Beobachtung einzelner Atome oder Moleküle mittels Raster-Tunnel- und Raster-Kraft-Mikroskopie auf Oberflächen beschränkt, erlaubt die SMD Einblicke in das Innere von Materialien, solange diese transparent sind. Diese Voraussetzung wird von vielen natürlichen Materialien (z. B. Zellwände, Zell-Innere) sowie einer Reihe von künstlichen Polymeren (Kunststoffen) erfüllt. Methodisch ist sie nah mit der Fluoreszenzmikroskopie verwandt. Gegenstand der Untersuchung sind so genannte Fluorophore, also Moleküle, die aufgrund ihrer elektronischen Struktur zur Fluoreszenz angeregt werden können. Solche – synthetisch hergestellten – Moleküle sind zum Beispiel in den Tinten von Textmarkern in hoher Konzentration enthalten, wodurch diese ihre intensive Farbe erhalten. Es gibt jedoch auch natürliche Fluorophore, wie zum Beispiel das grün fluoreszierende Protein **GFP**, das aus einer Tiefseequalle gewonnen werden kann (siehe Abb. 1). Bei dem Licht, das von den bei uns im Frühsommer zu beobachtenden Leuchtkäfern abgegeben wird, handelt es sich jedoch nicht um Fluoreszenz, sondern um Biolumineszenz. Die zum Leuchten notwendige Energie wird dabei nicht wie bei der Fluoreszenz durch Einstrahlung von Licht, sondern durch eine biochemische Reaktion gewonnen. Zur Untersuchung einzelner Fluorophore

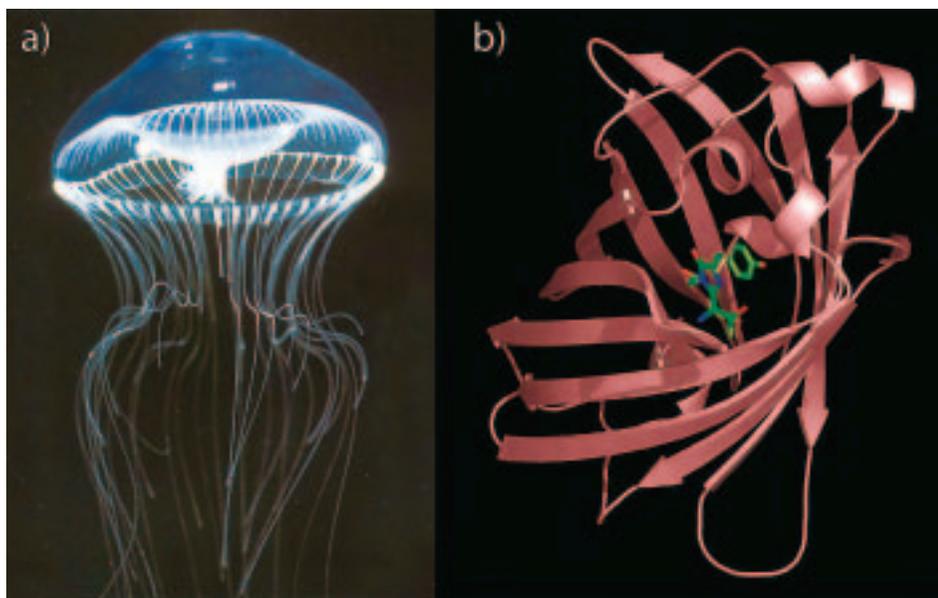


Abb. 1: Lumineszierende Qualle *Aequorea Victoria* (a) und dreidimensionale Struktur des grün fluoreszierenden Proteins (GFP). Die zusammengefaltete Aminosäurekette ist schematisch dargestellt. Im Inneren des Proteins ist der eigentliche Fluorophor zu sehen, also der Teil des Proteins, der die Fluoreszenz verursacht.

werden diese in einem Mikroskop mit dem Licht eines Lasers zur Fluoreszenz angeregt. Um das sehr schwache Licht eines einzelnen Moleküls mit einer Leistung von etwa 40 fW (vergleichbar mit dem Licht einer 100-W-Glühlampe in 1 500 km Entfernung) überhaupt registrieren zu können, werden hochempfindliche Photodioden bzw. Kameras eingesetzt. Prinzipiell ist es sogar möglich, einzelne Moleküle im Mikroskop mit dem Auge zu sehen, wenn man sich ausreichend lange in einem dunklen Raum aufgehalten hat. Aus dem mikroskopischen Bild kann man dann unter anderem die Anordnung der Moleküle oder deren Ausrichtung im Material bestimmen.

## Proteine in Nanoporen

33

Proteine (von dem griechischen Wort *protos* = zuerst) sind die wichtigsten Grundbausteine aller Lebewesen. Keine andere Klasse von Zellbestandteilen hat so vielfältige Funktionen: von der Katalyse chemischer Reaktionen über den Transport von Stoffwechselpro- und edukten oder Ionen durch die Zellmembran, die mechanische Stabilisierung, aber auch aktive Bewegung bis hin zur Signalweiterleitung reicht das Spektrum ihrer Aufgaben. Diese ungeheure Vielseitigkeit wird durch den Aufbau der Proteine, die chemisch gesehen zu den

Makromolekülen gehören, ermöglicht. Entscheidend ist dabei die Reihenfolge – Sequenz – der aneinandergereihten Aminosäuren, aus denen die Proteine bestehen. Aus der Sequenz folgt eine ganz bestimmte dreidimensionale Struktur (**Konformation**), deren Entstehung aus der ungeordneten Kette von Aminosäuren als **Faltung** bezeichnet wird. Bis heute ist nicht verstanden, wie das Makromolekül aus der unglaublich großen Anzahl möglicher Konformationen die »richtige« findet. Bekannt ist, dass es eine Klasse von Proteinen, die so genannten Chaperonine, gibt, die die Faltung anderer Proteine begünstigen. Als ein Wirkmechanismus dieser Chaperonine,

die man sich als kleine Fässer vorstellen kann, wird die Einschränkung des Raumes, die der ungefalteten Aminosäurekette zur Verfügung steht, vermutet. Auf diese Weise wird die Zahl möglicher Konformationen verringert, so dass leichter die native Konformation gefunden werden kann. In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik und der Max-Planck-Forschungsstelle Enzymologie der Proteinfaltung werden künstliche Nanoporen – künstliche Fässer gewissermassen – auf ihre Eignung untersucht, Chaperonin-Eigenschaften nachzubilden, indem sie ebenfalls den Konformationsraum einschränken.

Die Experimente zur Faltung werden an dem oben erwähnten grün fluoreszierenden Protein (GFP) der *Aequorea Victoria* (siehe Abb. 1) durchgeführt. Dabei macht man sich zu Nutze, dass das GFP nur im gefalteten Zustand fluoresziert, im entfalteten – auch als denaturiert bezeichneten – Zustand jedoch nicht. Man kann also die Faltung/Entfaltung einfach anhand des Fluoreszenzsignals verfolgen. Abb. 2 zeigt eine mikroskopische Aufnahme einzelner GFP-Moleküle in nanoporösem Aluminiumoxid. Da die Auflösung des Mikroskops begrenzt ist, sind die Moleküle (ein Molekül ist etwa eine Million mal kleiner als ein Haar) lediglich als helle Flecke sichtbar. Eine detaillierte Untersuchung der Änderung der Fluoreszenzintensität mit der Zeit lässt dann Rückschlüsse auf das Faltungsverhalten zu. Die starke Wechselwirkung zwischen der Porenwand und dem GFP führt zu einer raschen Entfaltung des GFP. Durch gezielte Modifikation der Porenwand, zum Beispiel durch Beschichtung mit Polymeren, soll dieser ungewünschte Effekt ins Gegenteil verkehrt werden.

### Moleküle als Zeiger

Bei der Untersuchung nanostrukturierter Polymerwerkstoffe stellt sich oft die Frage nach der Ausrichtung von Polymerketten. Dabei können isolierte Fluorophore als Reporter der Orientierung hilfreich sein. Man kann einen solchen Fluorophor nämlich recht gut als winzig kleine Antenne (eine Milliarde mal kleiner als eine UKW-Antenne) beschreiben. So, wie der Empfang des Radios davon abhängt, wie man die Antenne zum Sender ausrichtet, kann man durch clevere Experimente die Ausrichtung der

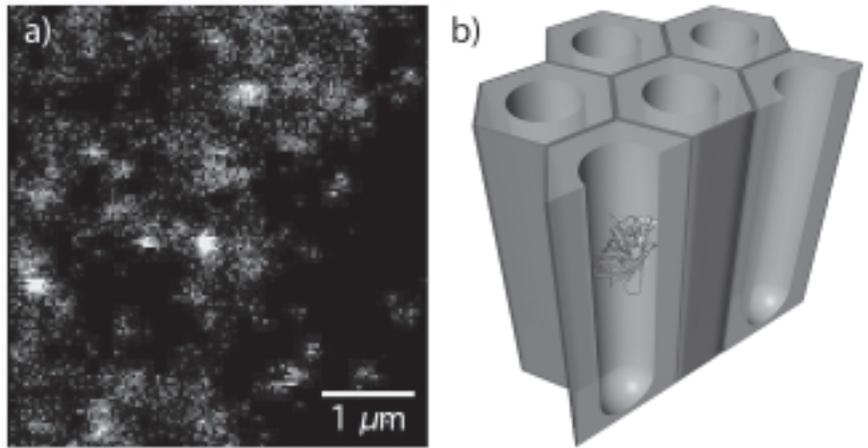


Abb. 2 (a) Fluoreszenz einzelner GFP-Moleküle in nanoporösem Aluminiumoxid. Jeder helle Fleck entspricht einem GFP-Molekül. (b) Schematische Darstellung der Aluminium-Oxid-Poren mit dem GFP (nicht maßstabsgetreu).

»Einzelmolekül-Antennen« in der Probe feststellen. Abb. 3 zeigt ein Bild, das ähnlich wie in Abb. 2 die Fluoreszenz einzelner, in einen Polymer-Film (in diesem Fall das vielen bekannte Plexiglas) eingebetteter Moleküle. Durch einen speziellen Trick ist das Bild eines Moleküls nicht, wie in Abb. 2, eine heller Fleck, sondern ein ganz charakteristisches Muster. Für jede Orientierung des Moleküls gibt es ein spezielles Muster. In Abb. 3 haben die Moleküle zufällige Orientierung, so dass es auch zufällige Muster gibt. In einem nanostrukturieren Polymer erwartet man, dass zum Beispiel ein bestimmtes Muster regelmäßig wiederkehrt. Diese Methode ist natürlich auch hervorragend geeignet, geordnete Strukturen in natürlichen »Nanomaterialien« zu untersuchen. ■

*Johannes Hohlbein studiert Medizinphysik am Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität. Zur Zeit arbeitet er an seiner Diplomarbeit.*

*Christian Hübner studierte von 1989 bis 1994 Physik in Halle und wurde hier 1998 auf dem Gebiet der Festkörperphysik promoviert. Von 1998 bis 2001 war er Assistent am Physikalisch-Chemischen Institut*

*der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Die dort begonnenen Arbeiten zur Einzelmolekülspektroskopie führte er an der Universität Mainz am Institut für Physikalische Chemie fort. Seit 2003 ist er Juniorprofessor für Biophysik am Fachbereich Physik der Martin-Luther-Universität.*

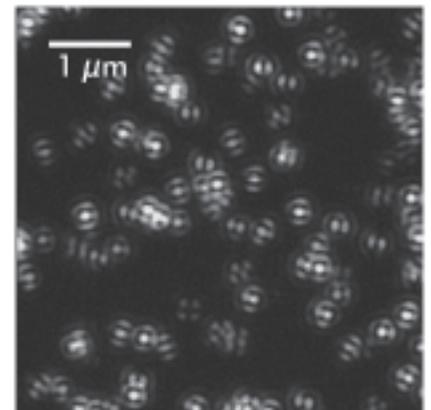


Abb. 3 Fluoreszenz einzelner Farbstoffmoleküle in einem dünnen Plexiglas-Film. Die unterschiedlichen Muster spiegeln die verschiedenen Ausrichtungen der Moleküle in dem Polymerfilm wider.

# STUDIERN AM FACHBEREICH PHYSIK

**Angelika Chassé, Martin Diestelhorst und Detlef Reichert**

Zu Beginn der Geschichte der Universität Halle war die Physik zunächst an der Medizinischen Fakultät angesiedelt. 1716 wurde der Lehrstuhl für Physik dem Mathematiker und Philosophen Christian Wolff übertragen. Erst unter J. S. C. Schweigger wird die Physik Mitte des 19. Jahrhunderts in Halle ein selbständiges Fachgebiet an der Philosophischen Fakultät.



Hauptgebäude am Friedemann-Bach-Platz 6  
Foto: Voigt

Zur Zeit der stürmischen Umwälzung der Physik im 20. Jahrhundert lieferte der Physiker Dorn wesentliche Beiträge auf neuen Gebieten wie Röntgenstrahlung, Radioaktivität und Quantenphysik. Nach Dorn prägten Physiker wie Gustav Mie (Mie-Effekt) und Adolf Smekal (theoretische Vorhersage des Raman-Effektes) die Physik in Lehre und Forschung in Halle. Auch Gustav Hertz gehörte von 1925 bis 1927 der Universität Halle an.

Heute kann man am Fachbereich Physik (Diplom), Medizinische Physik (Diplom), Lehramt Physik (Gymnasium) und Lehramt Physik (Sekundarschule) sowie den Ergänzungsstudiengang Lehramt Astronomie absolvieren.

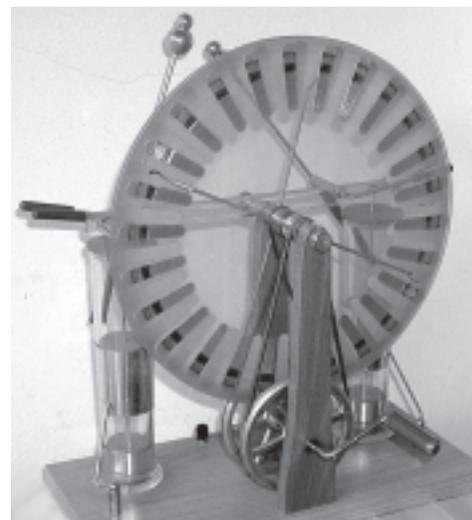
## Studiengang Physik (Diplom)

Es existiert eine breite Grundlagenausbildung in Physik und insbesondere Mathematik mit der Verknüpfung von Experiment und Theorie. Die Schwerpunkte am Fachbereich bilden Festkörperphysik und Materialwissenschaften. Ausbildungsziele

des Physikstudiums sind Vielseitigkeit, die Fähigkeit zur Einarbeitung in neue Fragestellungen und wissenschaftliche Selbstständigkeit.

Mit Abschluss des Studiums erhält man den akademischen Grad »Diplom-Physiker« bzw. »Diplom-Physikerin«. Die Vielseitigkeit des Studienganges Physik ermöglicht eine Berufswahl in sehr verschiedenen Gebieten: Physikalische Forschung in Industrie und Instituten, Lehre und Forschung an Universitäten und Hochschulen, Entwicklung, Produktion und Vertrieb in der Industrie, Hard- und Software-Entwicklung, aber auch in Planung und Leitung in Wirtschaft und staatlicher Verwaltung.

35



Historische Influenzmaschine

## Studiengang Medizin-Physik (Diplom)

Den Studiengang Medizinische Physik gibt es in dieser Form in Deutschland nur an der Martin-Luther-Universität in Halle. Bereits im Grundstudium werden hier naturwissenschaftliche Grundlagen der Medizin vermittelt. Im Hauptstudium liegt der Schwerpunkt auf der Strahlenschutz Ausbildung, die ein wesentliches Einsatzgebiet der Medizinphysiker in der klinischen Medizin bildet.

Mit Abschluss des Studiums erhält man den akademischen Grad »Diplom-Physiker (Medizinphysik)« bzw. »Diplom-Physikerin (Medizinphysik)« und zusätzlich zwei staatlich anerkannte Strahlenschutzbescheinigungen (Grundkurs und Beschleunigerkurs). Damit kann man als Strahlenschutzbeauftragte(r) in der Medizin und in anderen Tätigkeitsfeldern eingesetzt werden.



»Lange Nacht der Wissenschaften« im Großen Hörsaal des Fachbereichs

Fotos (2): Krause-Rehberg

## 36 Studiengang Physik (Lehramt)

Es wird eine breite naturwissenschaftliche Grundlagenausbildung in enger Verknüpfung zur Fachdidaktik und zu den Erziehungswissenschaften vermittelt. Umfassende schulpraktische Studien garantieren einen hohen Praxisbezug in allen Ausbildungsphasen.

Das Studium wird mit dem Ersten Staatsexamen für das Lehramt Physik in der gewählten Schulform abgeschlossen. In einem Ergänzungsstudium kann das Erste Staatsexamen auch für das Lehramt Astronomie abgelegt werden. ■

Angelika Chassé – Autoreninfo Seite 18.

Martin Diestelhorst studierte Physik in Halle, 1985 Promotion, seit 1980 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Physik in der Arbeitsgruppe Ferroische

Materialien. Besondere Interessen: Nicht-lineare Schwingungen, Chaos und stochastische Prozesse.

Detlef Reichert studierte Physik an der Technischen Hochschule in Merseburg, 1990 Promotion am Fachbereich Physik in Halle, 2000 Habilitation in Experimentalphysik. Er ist seit 1993 Mitarbeiter am Fachbereich Physik (Leiter NMR-Labor) und arbeitet seit 2003 in der Biophysik-Gruppe mit Schwerpunkt NMR-Untersuchungen der meso- und nanoskopischen Struktur und Dynamik von Festkörpern.

Angelika Chassé, Martin Diestelhorst und Detlef Reichert sind seit 2002 Studienfachberater am Fachbereich Physik.

Bild unten: Beim Hochschulinformationstag (HIT) im März 2004 auf dem Uni-Platz  
Foto: Norbert Kaltwaßer



## PERSONALIA

### Hallesche Wissenschaftlerin hoch geehrt

Zum 1. März 2004 wurde **Prof. Dr. Heidi Foth**, Direktorin des Instituts für Umwelttoxikologie der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität, vom Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Jürgen Trittin, für die kommenden vier Jahre in den Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) berufen. Dieser Rat ist ein wissenschaftliches Beratungsgremium der Bundesregierung. Sein Auftrag lautet, die Umweltsituation und Umweltpolitik in der Bundesrepublik Deutschland und deren Entwicklungstendenzen darzustellen und zu begutachten sowie umweltpolitische Fehlentwicklungen und Möglichkeiten zu deren Vermeidung oder Beseitigung aufzuzeigen.

### Magdeburger Recht wird erforscht

Am 1. April 2004 nahm eine Forschungsstelle zum Magdeburger Recht in Magdeburg ihre Arbeit auf. Betreut wird sie von **Prof. Dr. Heiner Lück**, Lehrstuhl für Bürgerliches Recht, Europäische, Deutsche und Sächsische Rechtsgeschichte, an der Juristischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig.

### Hallescher Doktorand erhält international renommierten Fritz-Winter-Preis

Für seine von **Prof. Dr. Rainer Enskat** (Institut für Philosophie) betreute Dissertation über Erkenntnistheorie, Ontologie und Wissenschaftstheorie des ungarisch-englischen Philosophen und Nobelpreisträgers für physikalische Chemie, Michael Polanyi, erhielt **Dr. Helmut Mai** den international sehr renommierten, mit 12 500 Euro dotierten Fritz-Winter-Preis 2004.

### Seit Sommersemester 2004 im Ruhestand

Zum 31. März 2004 wurden folgende ProfessorInnen in den Ruhestand versetzt:

- **Prof. Dr. Heinz Sahner** (FB Geschichte, Philosophie und Sozialwissenschaften, Institut für Soziologie),
- **Prof. Dr. Jürgen Leirich** (FB Musik-, Sport- und Sprechwissenschaft, Institut für Sportwissenschaft),
- **Prof. Dr. Horst Schneider** (FB Physik, FG Hochfrequenzspektroskopie),
- **Prof. Dr. Helmut Müller** (FB Chemie, Institut für Analytik und Umwelt)
- **Prof. Dr. Jürgen Lasch** (Medizinische Fakultät, Institut für Physiolog. Chemie)
- **Prof. Dr. Traute Mende** (Medizinische Fakultät, Universitätsklinik und Poliklinik für Nuklearmedizin).

### Von Halle nach Münster

Zum Beginn des Sommersemesters 2004 folgte **Prof. Dr. Werner Freitag** (FB Geschichte, Philosophie und Sozialwissenschaften, Institut für Geschichte) einem Ruf an die Universität Münster.

## BERUFUNGEN, GREMIEN, EHRUNGEN ETC.



LANDWIRTSCHAFTLICHE  
FAKULTÄT

### Prof. Dr. oec. troph. Gabriele Stangl

Universitätsprofessorin für Humanernährung (C3) an der Landwirtschaftlichen Fakultät seit 1. April 2004.

Geboren am 11. Juli 1964 in Erbendorf/Tirschenreuth

#### Wissenschaftlicher/beruflicher Werdegang:

- 1984–1990 Studium d. Ökotrophologie an d. TU München-Weihenstephan  
1990–1993 Wiss. Mitarb. am Institut f. Ernährungswissenschaften d. o. g. TU, Studium d. Philosophie an d. Ludwig-Maximilians-Universität  
1993 Promotion zum Dr. oec. troph.  
1993–2000 Hochschulass. am Institut f. Ernährungswiss. an d. o. g. TU  
1998 Habilitation  
2000–2003 Studium der Humanmedizin an der LMU München  
2003 Ruf an die Universität Wien  
2003–2004 Universitätsprof. in Hamburg  
2004 Universitätsprofessorin in Halle

#### Wissenschaftspreise:

- 1995 Wiss. Auszeichnung durch die H. Wilhelm Schaumann Stiftung  
1996 Förderpreis d. Dr. Heinrich-Baur-Stiftung  
1998 Förderpreis d. Henneberg-Lehmann Stiftung

#### Arbeits- und Forschungsschwerpunkte:

Experimentelle Studien zur Eisen-, Nickel-, Cobaltinteraktion, Membranveränderungen durch Fettsäuren aus d. Nahrung, alimentäre Einflüsse auf d. Lipoprotein- u. Plasmahomocysteinspiegel, Stoffwechselwirkungen konjugierter Linolsäuren

#### Publikationen (Auswahl):

- Stangl GI, Roth-Maier DA, Kirchgessner M (2000) Vitamin B-12 deficiency and hyperhomocysteinemia are partly ameliorated by cobalt and nickel supplementation in pigs, *J. Nutr.* 130, 3038–3046
- Stangl GI (2000) High levels of a conjugated linoleic acid mixture alter hepatic glycerophospholipid class profile and cholesterol-carrying serum lipoproteins of rats. *J. Nutr. Biochem.* 11, 184–191
- Stangl GI (2000) Conjugated linoleic acids exhibit a strong fat-to-lean partitioning effect, reduce serum VLDL lipids and redistribute tissue lipids in food-restricted rats. *J. Nutr.* 130, 1140–1146



FACHBEREICH  
PHARMAZIE

### Prof. Dr. rer. nat. Peter Imming

Universitätsprofessor für Pharmazeutische Chemie (C3) am FB Pharmazie seit 1. April 2004.

Geboren am 31. März 1958 in Kassel.

#### Wissenschaftlicher/beruflicher Werdegang:

- 1977–1981 Studium der Pharmazie an der Philipps-Universität Marburg  
1982 Approbation als Apotheker  
1982–1983 Studium der Chemie in Marburg  
1985 Diplom in Chemie  
1981–1988 Wiss. Hilfskraft, wiss. Ass.  
1987 Promotion zum Dr. rer. nat.  
1994 Apotheker für Pharm. Analytik  
1988–1989 Forschungsaufenthalt als DFG-Stipendiat bei Prof. J. E. Baldwin an d. Univ. Oxford  
1989–1990 Wiss. Angest. im FB Pharmazie d. Univ. Marburg  
1990–1996 Wiss. Assistent (C1)  
1995 Habilitation in Pharm. Chemie  
1995 Ernennung zum Privatdozenten  
1999–2001 Lehrstuhlvertr. Pharmazeutische Chemie an d. Univ. Münster  
8–10/2001 Gastprofessor an d. Yanbian University in Yanji, VR China  
2002 Ernennung zum apl. Professor an d. Univ. Marburg  
2004 Universitätsprofessor in Halle

#### Arbeits- und Forschungsschwerpunkte:

Entwicklung, Isolierung u. Abwandlung v. Wirk- u. bes. Naturstoffen. Gepl. in Halle: chem. Reaktionen dieser Stoffe im u. mit dem Körper, Arzneistoffwirkungen; derzeit: (1) Isolierung, in-vivo-Analytik, Charakterisierung, Modellstudien u. Pharmakokinetik v. Matricin u. Chamazulencarbonsäure, (2) Synthese u. Testung potenzieller Profen- u. Fenac-Metabolite als Cannabis- u. Vanilloid-Rezeptor-Liganden, (3) Einfluss d. Zuckerrestes auf d. Spaltbarkeit u. Resorption v. Glykosiden am Beisp. v. Salix-Inhaltsstoffen; (4) Synthese, Abwandlung u. pharmazeut. Profilierung v. Protopin-Alkaloiden

#### Publikationen (Auswahl):

- P. Imming, B. Klar, D. Dix, Hydrolytic Stability vs. Ring Size in Lactams - New Perspectives for the Development of Lactam Antibiotics and other Serine Protease Inhibitors *J. Med. Chem.* 2000, 43, 4328–4331
- Chamazulencarbonsäureverbindungen und deren Verwendung. Ger. Offen. DE 10065683 A1 5 Jul 2001



MEDIZINISCHE  
FAKULTÄT 37

### Prof. Dr. med. Ralph G. Grabitz

Universitätsprofessor für Pädiatrische Kardiologie (C3) an der Medizinischen Fakultät seit 1. April 2004.

Geboren am 14. September 1955 in Dresden.

#### Wissenschaftlicher/beruflicher Werdegang:

- 1976 Studium der Veterinärmedizin an d. FU Berlin  
1977–1981 Studium d. Humanmedizin an d. Philipps-Universität Marburg  
1982 Staatsexamen und Approbation  
1982–1987 Assistenzarzt an d. Klinik f. Kinder u. Jugendliche in Fulda  
1987 Promotion zum Dr. med.  
1987–1991 Assistenzarzt an d. Klinik f. Pädiatr. Kardiologie d. Klinikums d. RWTH Aachen  
1991–1992 Research Fellow University of Alberta/Edmonton, Canada  
1993–1998 Wiss. Ass. an der Klinik für Pädiatr. Kardiologie in Aachen  
1998 Habilitation und Venia legendi  
1988–2004 Ltd. Oberarzt, d. Kl. f. Kinder kardiol. u. Biomedizin. Technik, Univ.klinikum Schleswig-Holst.  
2004 Universitätsprofessor in Halle

#### Wissenschaftspreise:

- 1998 Forschungspreis d. Deutschen Gesell. f. Pädiatr. Kardiologie

#### Arbeits- und Forschungsschwerpunkte:

Pränatale Diagnostik u. Therapie angeborener Herzfehler; angeb. Herzfehler im Jugend- u. Erwachsenenalter; hämodynam. Krankheitsmodelle im intakten Tiermodell, Entwickl. u. Biokompatibilität v. Implantaten zur interventionellen Therapie d. Vitium cordis

#### Publikationen (Auswahl):

- Grabitz RG, et al. Double-helix coil for occlusion of large patent ductus arteriosus: evaluation in a chronic lamb model. *J Am Coll Cardiol.* 1998 Mar 1; 31(3): 677–83
- Sigler M, Handt S, Seghaye MC, v. Bernuth G, Grabitz RG. Evaluation of in vivo biocompatibility of different devices for interventional closure of the patent ductus arteriosus in an animal model. *Heart.* 2000 May; 83(5): 70–73
- Kong X, Grabitz RG et al. Effect of biologically active coating on biocompatibility of Nitinol devices designed for the closure of intra-atrial communications. *Biomaterials.* 2002 Apr; 23(8): 1775–83

## WETTEN, SIE WISSEN'S NICHT ...

38 Zeigt das Foto

- a) Details eines Rasenmähers aus besonderem Blickwinkel
- b) Teile eines Kugelschreibers oder
- c) etwas ganz Anderes und wenn ja, was?

Wer uns als erste(r) die richtige Lösung übermittelt (per Telefon, Fax oder Mail), erhält ZWEI FREIKARTEN – wahlweise für ein Konzert des Instituts für Musikpädagogik / Collegium musicum oder für eine Aufführung der Sprechbühne des Instituts für Sprechwissenschaft / Phonetik.

## AUTORINNEN DIESER AUSGABE:

**Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg  
Interdisziplinäres Zentrum für  
Materialwissenschaften  
Hoher Weg 8, 06120 Halle (Saale)**

Prof. Dr. Hans-Reiner Höche  
Tel.: 0345 55-25450  
E-Mail: hoeche@physik.uni-halle.de  
PD Dr. Hartmut S. Leipner  
Tel.: 0345 55-25453  
E-Mail: leipner@cmat.uni-halle.de  
Dr. Frank Heyroth  
Tel.: 0345 55-25364  
E-Mail: heyroth@cmat.uni-halle.de  
Dr. Bodo Fuhrmann  
Tel.: 0345 55-25377  
E-Mail: fuhrmann@cmat.uni-halle.de

**Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg  
Fachbereich Physik  
Friedemann-Bach-Platz 6, 06108 Halle**

Prof. Dr. Reinhard Krause-Rehberg  
Tel.: 0345 55-25 567  
E-Mail: krause@physik.uni-halle.de  
Dr. Gerhard Brauer  
E-Mail: g.brauer@fz-rossendorf.de  
Dr. Klaus-Jürgen Berg  
Tel.: 0345 55-25523  
E-Mail: k-j.berg@physik.uni-halle.de  
Prof. Dr. Wolf Widdra  
Tel.: 0345 55-25560  
E-Mail: widdra@physik.uni-halle.de  
Dr. Martin Diestelhorst  
Tel.: 0345 55-25543



Im April-Journal zeigten wir ein Gebäude in der Spiegelstraße (Foto: Margarete Wein). Wenn man die Freitreppe links vom Melanchthonianum nach unten geht, kommt man genau darauf zu.

E-Mail: diestelhorst@physik.uni-halle.de  
PD Dr. Detlef Reichert  
Tel.: 0345 55-25593  
E-Mail: reichert@physik.uni-halle.de  
Prof. Dr. Horst Schneider  
Tel.: 0345 55-25590  
E-Mail: schneider@physik.uni-halle.de

**Von-Seckendorff-Platz 1, 06120 Halle**  
Prof. Dr. Wolfram Hergert  
Tel.: 0345 55-25445  
E-Mail: hergert@physik.uni-halle.de  
Prof. Dr. Steffen Trimper  
Tel.: 0345 55-25432  
E-Mail: trimper@physik.uni-halle.de  
Prof. Dr. Ingrid Mertig  
Tel.: 0345 55-25430  
E-Mail: mertig@physik.uni-halle.de  
PD Dr. Angelika Chassé  
Tel.: 0345 55-25436  
E-Mail: chasse@physik.uni-halle.de

**Hoher Weg 8, 06120 Halle**  
Prof. Dr. Thomas Thurn-Albrecht  
Tel.: 0345 55-25341  
E-Mail: thurn-albrecht@physik.uni-halle.de  
PD Dr. Mario Beiner  
Tel.: 0345 55-25350  
E-Mail: beiner@physik.uni-halle.de  
Prof. Dr. Heinrich Graener  
Tel.: 0345 55-25310  
E-Mail: graener@physik.uni-halle.de  
Dr. Christian G. Hübner, Juniorprofessor  
Tel.: 0345 55-25329  
E-Mail: ch.huebner@physik.uni-halle.de

**Max-Planck-Institut für  
Mikrostrukturphysik  
Weinberg 2, 06120 Halle**

*Experimental Department I (J. Kirschner)*  
Prof. Dr. Jürgen Kirschner  
Tel.: 0345 55-82 655/656  
E-Mail: sekrki@mpi-halle.mpg.de

PD Dr. Dirk Sander  
Tel.: 0345 55-82 660/659/754  
E-Mail: sander@mpi-halle.mpg.de  
Dr. Wolfgang Kuch  
Tel.: 0345 55-82 615  
E-Mail: kuch@mpi-halle.mpg.de  
*Theory Department (P. Bruno)*  
Prof. Dr. Patrick Bruno  
Tel.: 0345 55-82 763  
E-Mail: bruno@mpi-halle.mpg.de  
Dr. Arthur Ernst  
Tel.: 0345 55-82 666  
E-Mail: aernst@mpi-halle.mpg.de  
*Experimental Department II (U. Gösele)*  
Prof. Dr. Ulrich Gösele  
Tel.: 0345 55-82 657  
E-Mail: goesele@mpi-halle.mpg.de  
Dr. Kornelius Nielsch  
Tel.: 0345 55-82 902  
E-Mail: knielsch@mpi-halle.mpg.de  
Dr. Reinald Hillebrand  
Tel.: 0345 55-82 911/627  
E-Mail: hi@mpi-halle.mpg.de  
Dr. Peter Werner  
Tel.: 0345 55-82 629/677/737  
E-Mail: werner@mpi-halle.mpg.de  
Johannes Hohlbein  
Tel.: 0345 55-82 979  
E-Mail: hohlbein@mpi-halle.mpg.de

**Fraunhofer-Institut für Werkstoff-  
mechanik Halle  
Heideallee 19, 06120 Halle**

Prof. Dr. Dieter Katzer  
Tel.: 0345 55-89 100  
E-Mail: katzer@iwmm.fraunhofer.de  
Dipl.-Phys. Frank Altmann  
Tel.: 0345 55 89 139  
E-Mail: altmann@iwmm.fraunhofer.de

# VEREINIGUNG DER FREUNDE UND FÖRDERER DER MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE–WITTENBERG E.V.

Ehrenvorsitzender des Kuratoriums: Senator e. h. Dr. h. c. mult. Hans-Dietrich Genscher

## Auf den Spuren des hallischen Pietismus

VFF unterstützt Seminar zur Kirchengeschichte in Hinterpommern

16 Lehrende und Studierende der Theologischen Fakultät der Martin-Luther-Universität sind kürzlich zu einer Exkursion ins polnische Hinterpommern aufgebrochen. Gemeinsam mit Kunsthistorikern und Studierenden der Universität Wroclaw (Breslau) erforschen sie den Einfluss des hallischen Pietismus auf die Geschichte und Gestaltung der Kirchen dieser Region. Die Vereinigung der Freunde und Förderer hat die Exkursion finanziell unterstützt.

Das einstige Hinterpommern – heute Westpommern – spielte in der Kirchengeschichte seit der Reformation mehrfach eine zentrale Rolle. „Der hallische Pietismus fasste hier offenbar nachhaltiger Fuß als in Halle selbst, wie man noch heute an den Bildprogrammen der Dorfkirchen ablesen kann“, erzählt Prof. Dr. Udo Sträter. „Außerdem erlebte dieses Gebiet im 19. Jahrhundert eine intensive Erweckungsbewegung. In Verbindung mit den Auseinandersetzungen um die Einführung der preußischen Union ergab sich eine einmalige frömmigkeitsgeschichtliche Konstellation.“

Das Projekt mit dem Titel „Pietismus, Erweckungsbewegung und Kirchenkampf in Hinterpommern und ihre Einbettung in



Vom hallischen Pietismus beeinflusste Deckenmalerei in der Dorfkirche Wierzbno (Werben) Foto: Marcus Heydecke

die reformatorische Tradition“ ist eine Initiative des Instituts für Historische Theologie. „Unser Ziel war es, die zentralen Bewegungen im Kontext der protestantischen Tradition dieser Region aufzudecken und zu diskutieren“, sagt Dr. Veronika Albrecht-Birkner.

Das Seminar fand vom 1. bis 5. Juni an der Europäischen Akademie Kulice (Külz) statt. Zahlreiche Vorträge und Exkursionen

zu den erhaltenen Zeugnissen reformatorischer Kirchenkunst wurden organisiert.

„Die Veranstaltung war ein großer Erfolg und wichtig für die Förderung der deutsch-polnischen Beziehungen“, sagt Udo Sträter. „Durch die finanzielle Unterstützung der VFF konnten wir den Beitrag vor allem für die Studierenden niedrig halten. Sonst hätte sicherlich der eine oder andere nicht mitfahren können.“

Vorsitzender des Kuratoriums: Senator e. h. Dr. Gerhard Holland

Präsident: Senator e. h. Dr. Wolfgang Röller

Geschäftsführer: Dr. Heinz Bartsch, Wolfgang Grohmann, Peter Weniger  
c/o Martin-Luther-Universität Halle–Wittenberg, 06099 Halle (Saale)

Telefon: (03 45) 55-2 10 24/25

Telefax: (03 45) 55-2 70 85

e-mail: PWeniger@vff.uni-halle.de

Internet: <http://www.uni-halle.de/vff/>

Für Mitgliedsbeiträge und Spenden wurden folgende Konten eingerichtet:

Dresdner Bank Halle,

Konto-Nr. 857 362 100, BLZ 800 800 00

Stadt- und Saalkreissparkasse Halle,

Konto-Nr. 386 300 762, BLZ 800 537 62

Spenden zur Verwirklichung der Ziele der Vereinigung und zum Nutzen der Universität sind jederzeit willkommen. Diese Spenden können an eine Zweckbestimmung gebunden sein. Die Vereinigung ist berechtigt, steuerwirksame Spendenbescheinigungen auszustellen.

