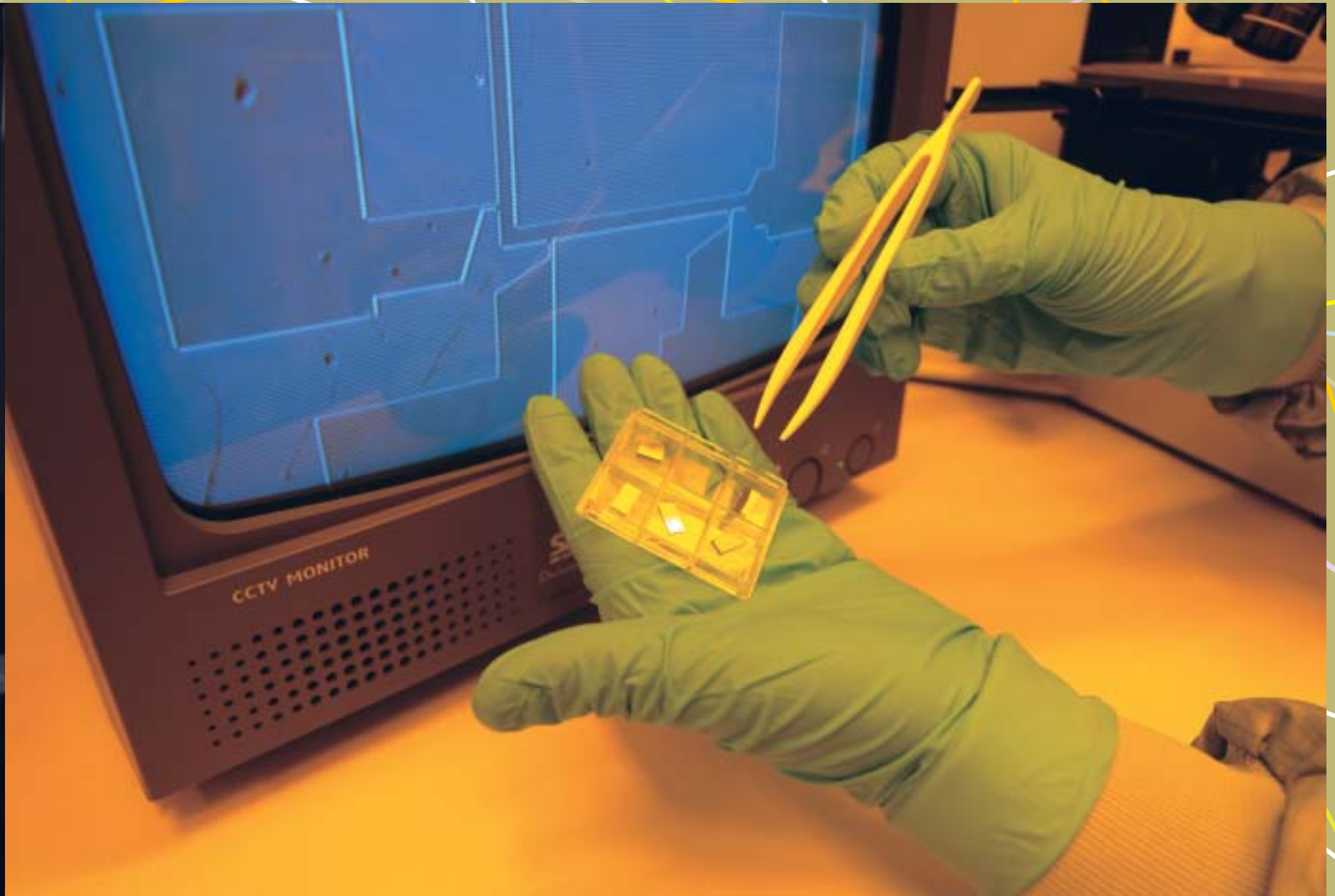
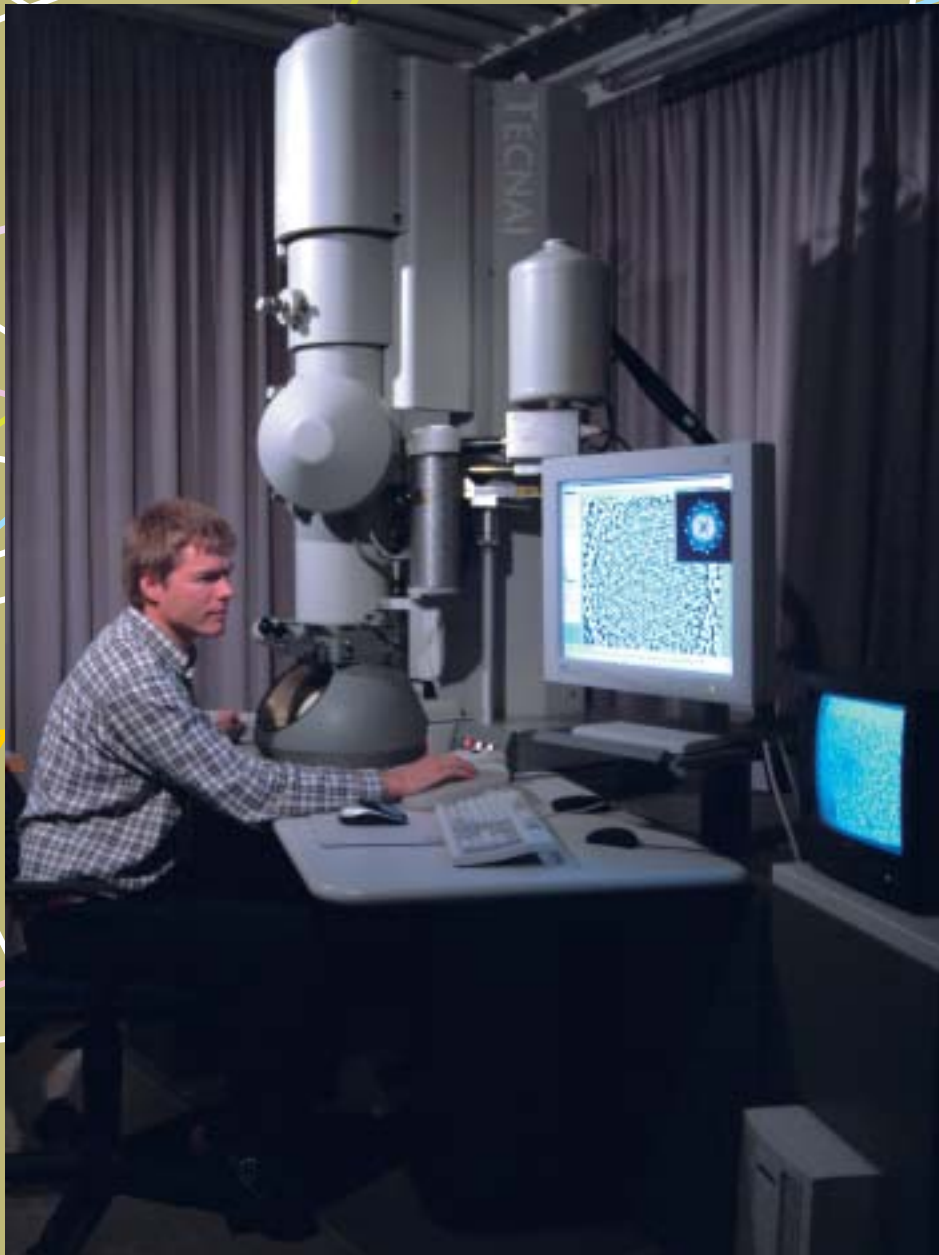




Vielfalt des Nanokosmos

Vielfalt des Nanokosmos

Bremsen muss gelernt sein. Von klein auf...



So sind wir groß geworden. Denn mehr als 100 Jahre Forschung sind für uns nicht Vergangenheit, sondern der Weg für die Innovationen der Zukunft. Mit über 3.000 Mitarbeitern in Deutschland und mehr als 500 Millionen Euro Umsatz weltweit ist WABCO heute führender Anbieter von Brems- und Steuersystemen in Nutzfahrzeugen.

WABCO-Produkte leisten bei allen bedeutenden Nutzfahrzeugherstellern einen entscheidenden Beitrag zu mehr Sicherheit und Wirtschaftlichkeit auf der Straße. Zu unserer Produktpalette zählt das ABS genauso wie dessen Weiterentwicklung, das elektronische Bremssystem EBS, und eine Vielzahl von Komponenten und Steuerungssystemen.

Dieser sehr hohe Grad von innovativer Forschung, Entwicklung und Produktion – speziell auf dem Gebiet der Mikroelektronik sowie in den Bereichen Systemtechnik, Mechatronik und angewandte Regelungstechnik – braucht ständig junge, engagierte, kreative Köpfe mit interdisziplinärem Know-how, die sich bzw. ihre Ideen verwirklichen wollen, um die Welt ein Stück sicherer zu machen.

WABCO

WABCO
Personaldienste
Am Lindener Hafen 21 · 30453 Hannover
Telefon (05 11) 9 22-18 17 oder -18 75
www.wabco.de

Für diese verantwortungsvollen Aufgaben haben wir Einsatzgebiete z. B. in den Teams:

Konstruktion, Versuch, CAD-Betreuung (Pro/E), System-, Software- und Hardware-entwicklung, Einkauf, Patente- und Schutzrechte, Vertrieb und Produktion.

Haben Sie Lust auf Teamarbeit, Teamgeist, Gestaltungsfreiheit, eigenverantwortliches Arbeiten, auf berufliche und persönliche Entwicklungschancen? Reizen Sie flache Hierarchien, finanzielle und soziale Leistungen eines internationalen Unternehmens?

Helfen Sie mit, die Straßen der Welt ein Stück sicherer zu machen. Wir brauchen Sie als:

- **Diplomingenieure Maschinenbau**
- **Diplomingenieure Elektrotechnik**
- **Diplomingenieure Mechatronik**
- **Diplom-Wirtschaftsingenieure**

Fühlen Sie sich angesprochen? Schreiben Sie uns, rufen Sie uns an. Wir freuen uns, interessierte Damen und Herren kennen zu lernen.



Aus dem Inhalt

Impressum

Herausgegeben im Auftrag des Rektors:
Dezernat Presse und Öffentlichkeit der RWTH Aachen
Templergraben 55
52056 Aachen
Telefon 02 41/80-9 43 27
Telefax 02 41/80-9 23 24
Pressestelle@zhv.rwth-aachen.de
<http://www.rwth-aachen.de>

Redaktion:
Christof Zierath

Verantwortlich:
Toni Wimmer

Redaktionelle Mitarbeit:
Marion E. Franke
Thorsten Herrig
Renate Kinny
Thomas von Salzen

Titel:
Im Monitor des optischen Mikroskops erkennbare mikrostrukturierte Leiterbahnen und Kontaktflächen aus ferromagnetischem Material.

Rücktitel:
Hochauflösendes Analytisches Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM) des Gemeinschaftslabors für Elektronenmikroskopie GFE der RWTH Aachen.

Fotos:
Peter Winandy

Art direction:
Klaus Endrikat

Satz:
Goffintext, Aachen

Druck:
Druckerei Emhart
Verlautenheidener Straße
52080 Aachen

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Das Wissenschaftsmagazin „RWTH-Themen“ erscheint einmal pro Semester. Nachdruck einzelner Artikel, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Redaktion. Für den Inhalt der Beiträge sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

Sommersemester 2004

Einleitung

Einblicke in das Reich der Zwerge	6
Die Vielfalt des Nanokosmos	10

Herstellung/Strukturierung

Selbstorganisation im Nanokosmos	14
Nanostrukturierung von Oberflächen durch Ionenstrahlen	18
Gutenbergs Erben im Nanokosmos	20
Bis ins kleinste Detail	24

Charakterisierung

Einblicke in die aller kleinsten Dimensionen	27
Nanoanalytik mit harter Röntgenstrahlung	32

Eigenschaften

Duktile keramische Nanolamine: Eine ganz neue Werkstoffklasse	36
Metallische Nanodrähte	39
Quantentransport und Quantenkohärenz in mesoskopischen Systemen	42
Schwacher Ferromagnetismus in Kristallen und Nanokristallen	45
Optische Eigenschaften metallischer Nanopartikel	48

Anwendungen

Neue Trägermedien für Therapeutika und Pharmaka	51
Nanopartikel in der Sensorforschung	54
Wer schreibt, der bleibt - Phasenwechselmedien als universelle Datenspeicher	58
Tief in die Nanowelt der Halbleiterspeicher	62
Nanomagnetismus	64
Schalten und Walten im Nanokosmos	69
Rechnen mit Spins	72
Nanostrukturen bei Blutpumpen	76
Nano, Mikro, Makro....	80
Glossar	83
Die Mitglieder des NanoClubs	86

Aus der Redaktion

Namen und Nachrichten	88
Wie Hellhörigkeit vor Delfinen schützt	98
Bücher	99
Gemeinsamer Diplom- und Lehramtsstudiengang Maschinenwesen	100
Mit Großrechnern ins Zeitalter der globalisierten Produktentwicklung	101

Denken ist Handeln.



Wir suchen Praktikanten, die keine sind.

In einem Beruf, der mehr als ein Job ist, ist auch ein Praktikum mehr als ein Praktikum. The Boston Consulting Group steht als weltweit führende strategische Unternehmensberatung für innovative Lösungen, die wir gemeinsam mit unseren Kunden in die Praxis umsetzen. Diese Einheit von Denken und Handeln ist Leitlinie für jeden unserer Mitarbeiter und begründet den Erfolg unserer Kundenarbeit. Für unser Visiting Associate-Programm suchen wir Studierende aller Fachrichtungen mit herausragenden Leistungen und einem abgeschlossenen Vordiplom. Übernehmen Sie Verantwortung in einem

konkreten Kundenprojekt und stellen Sie sich allen Herausforderungen eines Unternehmensberaters bei BCG. Während Ihres gesamten Einsatzes werden Sie intensiv von uns betreut. Sie verlassen BCG mit einem detaillierten Feedback zu Ihren Leistungen – vielleicht, um nach Ihrem Studium wiederzukommen. Bewerben Sie sich bei: **Sandra Eichkorn (089) 23 17-43 61** oder **Ute Worgull (02 11) 30 11-35 08, www.bcg.de/visitingassociate**

BCG

THE BOSTON CONSULTING GROUP

Vorwort

Zu Beginn dieses Jahres ist in die Diskussion über die Zukunft der deutschen Hochschulen Bewegung gekommen. Das Wort von der „Eliteuniversität“ macht die Runde. Die Bundesregierung hat sich vorgenommen, ausgesuchte Hochschulen zu fördern und sie mittelfristig zu „deutschen Harvards“ zu gestalten. Unter den fünf oder sechs Hochschulen, die in diesem Zusammenhang immer wieder genannt werden, ist stets die RWTH Aachen. Das macht uns stolz, es wundert uns aber nicht. Unsere Hochschule gehört seit Jahren zu den Spitzen-Universitäten Deutschlands. Dieser Erfolg kommt nicht von heute auf morgen, sondern ist das Ergebnis zielgerichteter, abgestimmter und kontinuierlicher Anstrengungen. Die Technische Hochschule Aachen hat sich schon vor Jahren konsequent mit ihrem Leistungsangebot und dessen Qualitätssicherung, mit studentischer wie industrieller Nachfrage sowie vorausschauender Marktsondierung befasst. Die RWTH ist seit Jahren in Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft ein Begriff – sie ist eine Marke. Studierende, Absolventen und Forschungspartner sind Zielgruppen, denen klar umrissene Produkte angeboten werden. Der Begriff der Marke dient dabei ebenso als Identifikation für die Hochschulangehörigen wie auch als Shareholder-Value bezeichneter Wert im Feld der Konkurrenten. Die Bereitschaft zu differenziertem Benchmarking, der Ausbau von Controlling-Instrumenten sowie der Mut zu neuen Vorgehensweisen und Inhalten führten mit der Marke RWTH zu herausragenden Ergebnissen, die in zahlreichen Rankings immer wieder äußerst positiv bewertet werden.

Der Erfolg unserer Hochschule beruht auch auf ihren Stärken in zahlreichen und für die Entwicklung der gesamten Gesellschaft entscheidenden Forschungsfeldern. An der RWTH Aachen sind wir seit langem darauf bedacht, Schnittstellen zwischen verschiedensten Wissenschaftsgebieten zu entwickeln und auszubauen. Beispielhaft ist hier der im Jahre 2002 gegründete NanoClub, in dem sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Biochemie, der Chemie, der Physik, der Elektrotechnik, der Medizin, und aus den Ingenieurwissenschaften zusammengefunden haben. Er hat sich die Aufgabe gestellt, die Vernetzung dieser Disziplinen auf dem Gebiet der Nanowissenschaften und der Nanotechnologie voranzutreiben. Neben der Bündelung der breit gestreuten Kompetenzen in den einzelnen Fakultäten der RWTH soll der NanoClub eine effiziente Plattform für regionale Aktivitäten sowie auch auf Landes-, Bundes- und Europaebene aufbauen. Insbesondere sollen durch Kooperationen mit dem Forschungszentrum Jülich, den Fraunhofer-Instituten und der Wirtschaft deutliche Zeichen sowohl für die Region als auch für das Land Nordrhein-Westfalen gesetzt werden. Die Initiatoren des NanoClubs haben die Bedeutung der Nanowelt als Motor der Wissenschaftsgesellschaft frühzeitig erkannt. Das „Kleine“ wird „große“ Forschungsergebnisse induzieren.

Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut
Rektor

Marion E. Franke, Gernot Güntherodt

Einblicke in das „Reich der Zwerge“

Eine kurze Einführung in die Nanotechnologie

Die Bezeichnung Nanotechnologie leitet sich vom griechischen Wort „nanos“ (Zwerg) ab und bezieht sich auf Strukturen mit unvorstellbar kleinen Abmessungen im Bereich von Nanometern (nm). Ein Nanometer ist der milliardste Teil eines Meters (1 Nanometer = 10^{-9} Meter = 0,000 000 001 Meter) und somit etwa zehnmal so groß wie ein Wasserstoffatom oder fünfzigtausendmal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares (Bild 1). Zur Veranschaulichung der Dimension ist der folgende Vergleich hilfreich: Ein Nanopartikel ist im Verhältnis zu einem Fußball so groß wie der Fußball im Vergleich zur Erde.

Die typische Längenskala der Nanotechnologie beginnt unterhalb von 100 Nanometern und umfasst demnach den Bereich zwischen einzelnen Atomen oder Molekülen und größeren Gruppen von Molekülen. Doch Nanotechnologie ist weit mehr als nur die nächste Stufe der Miniaturisierung und das Vordringen in immer kleinere Dimensionen. Im Nanokosmos werden die Gesetzmäßigkeiten der klassischen Physik aufgehoben. Die Nanoobjekte haben neuartige physikalische oder chemische Eigenschaften, die man bei größeren makroskopischen Objekten nicht beobachtet. Auf dieser Skala sind die Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik verbindlich. Ziel der Nanowissenschaften und der Nanotechnologie ist demnach, die Ursachen dieser neuen Eigenschaften und Effekte aufzuklären sowie dieses Wissen in technische Entwicklungen und Anwendungen umzusetzen. Diese beiden Aspekte – Strukturgröße und Funktion – erschweren allerdings eine scharfe Definition des Begriffs „Nanotechnologie“, da es viele Grenzfälle gibt. Die folgende Beschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gilt als weitreichend akzeptiert:

„Unter Nanotechnologie wird der Aufbau, die Analyse und die Anwendung von funktionalen Strukturen, Molekülen oder auch inneren und äußeren Grenzflächen verstanden, die sich im Größenmaßstab unterhalb von 100 Nanometern bewegen. Gleichzeitig müssen diese Strukturen neue Funktionen oder Eigenschaften besitzen, die unmittelbar an die Größenskala gekoppelt sind und so in der Makrowelt nicht realisierbar wären.“

Zunächst muss man sich mit der Problematik auseinandersetzen, wie die winzigen Nanostrukturen herzustellen sind. Zum Ziel führen dabei zwei grundsätzlich voneinander unterschiedliche Wege. Man kann Strukturen und Objekte bis zur gewünschten Größe verkleinern (Top-Down-Ansatz) oder sie durch kontrollierte Manipulation einzelner Atome oder Moleküle aufbauen (Bottom-Up-Ansatz). Ein wichtiges Werkzeug ist dabei die Selbstorganisation von Nano-Objekten. Dabei organisieren sich die molekularen Bausteine ohne äußeren Einfluss zu geordneten, wohl definierten Strukturen und neuartige, maßgeschneiderte Materialien oder Bauteile – vom Polymer bis zum elektronischen Schaltkreis – können auf diesem Weg synthetisiert werden.

Aber warum überhaupt so klein? Zunächst muss man unterscheiden, in wie vielen Dimensionen das System nanostrukturiert ist:

- in einer Dimension nanostrukturierte Systeme (zum Beispiel ultradünne Schichten)
- in zwei Dimensionen nanostrukturierte Systeme (zum Beispiel Quanten- oder Nanodrähte)
- in drei Dimensionen nanostrukturierte Systeme (zum Beispiel Nanopartikel oder Quantenpunkte)

Anhand von Nanopartikeln sollen im Folgenden kurz die Besonderheiten von „nano“ erläutert werden. Eine Eigenschaft von Nanopartikeln ist offensichtlich und von einfachen geometrischen Gegebenheiten abhängig: Ein großer Teil der Atome eines so kleinen Partikels befindet sich an seiner Oberfläche. Bei Nanopartikeln mit einem Durchmesser von 1,4 Nanometern, bestehend aus 55 Atomen, befinden sich beispielsweise mehr als 75 Prozent der Atome an der Oberfläche. Diese Oberflächenatome sind chemisch äußerst aktiv, weshalb ungeschützte Nanopartikel vehement zueinander streben und aggregieren. Abhilfe kann eine schützende (Ligand)-Hülle aus organischen Molekülen schaffen. Der quantenmechanische Effekt lässt sich anhand der Elektronen beschreiben. Diese können sich in makroskopischen Festkörpern nahezu ungehindert im gesamten Volumen bewegen. In den eingeschränkten Dimensionen von Nano-Objekten hingegen werden sie in ihrer Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt und schließlich in diskrete quantisierte Zustände gezwungen. Daher können Nanopartikel unterschiedlicher Größe verschiedene Farben haben. Mit Hilfe von Quantenpunkten können beispielsweise Laser konstruiert werden, deren Wellenlänge („Farbe“) durch die Größe der Quantenpunkte in gewünschter Weise eingestellt werden kann. Diese neuartigen, über die Partikelgröße beeinflussbaren optischen sowie elektrischen, magnetischen und katalytischen Eigenschaften machen Nanopartikel so interessant für die Grundlagenforschung und eröffnen neue Anwendungsmöglichkeiten, die mit konventionellen Materialien nicht realisierbar sind.



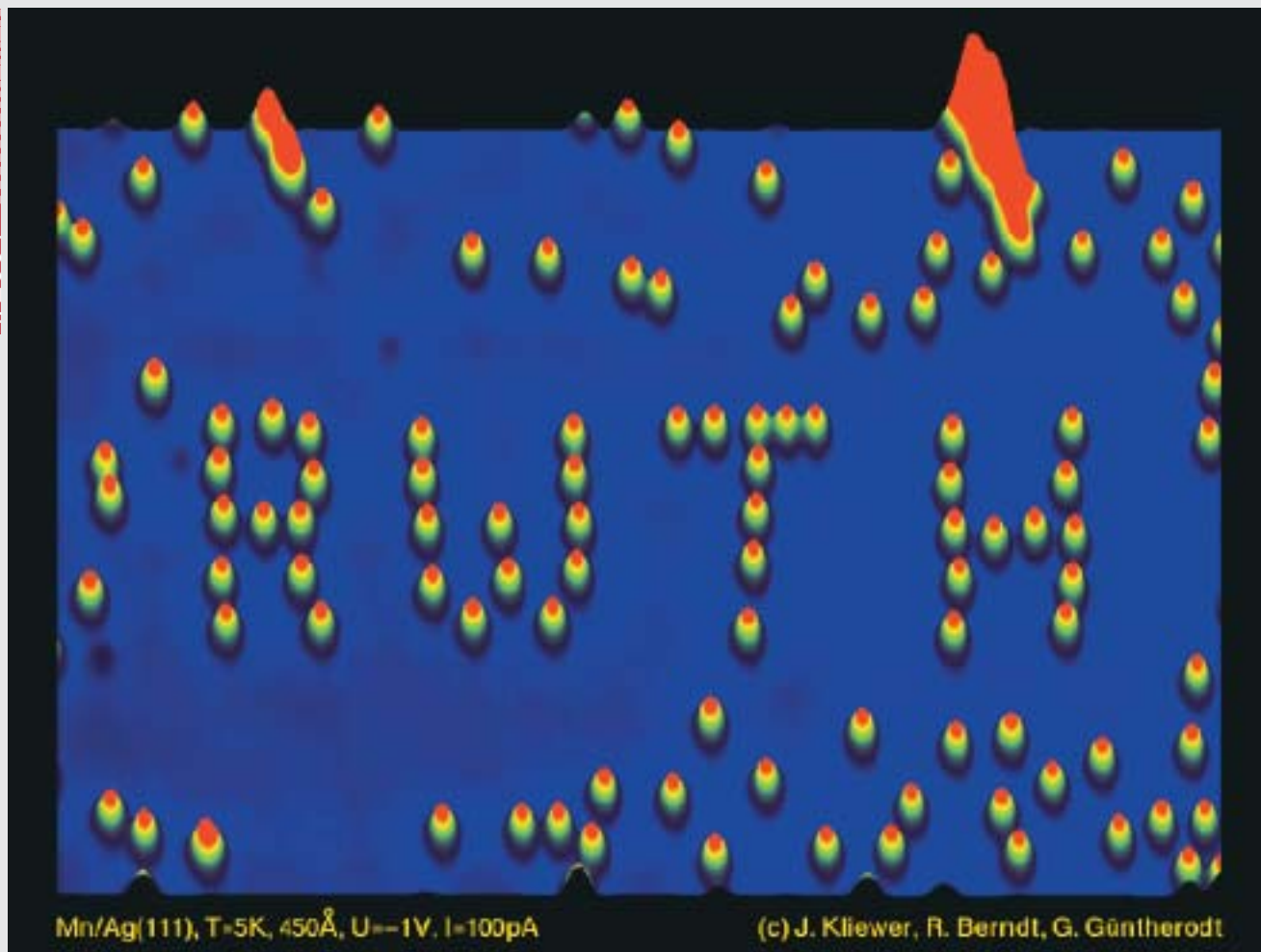
Die Entwicklung nanotechnologischer Anwendungen setzt selbstverständlich auch eine geeignete Analyse derartiger kleiner Strukturen voraus. Da die Nanoobjekte kleiner sind als die Wellenlänge des optischen Lichts, ist die Auflösung herkömmlicher optischer Mikroskope unzureichend. Daher wurden neue Methoden zur Analyse nanoskaliger Objekte notwendig. Zu den wichtigsten zählen dabei die Elektronenmikroskopie und Rastersondenmethoden. Beide stellen lateral und vertikal hochauflösende Sonden dar, die sowohl topographische als auch elektrische, chemische und magnetische Analysen auf der Skala von wenigen Nanometern zuverlässig ermöglichen. Ein bahnbrechendes Gerät für die Nanoanalyse ist das Rastertunnelmikroskop, für dessen Erfindung 1986 der Nobelpreis

vergeben wurde. Darauf aufbauend wurden weitere Rastersondenmikroskope, wie das Rasterelektronenmikroskop, für unterschiedlichste Anwendungen entwickelt.

Bild 1: Wie klein ist ein Nanometer? Die Skala hilft, anhand von Größenvergleichen in das „Reich der Zwerge“ vorzudringen.

Nano

Bild 2: RWTH-Logo aus Manganatomen, das mit einem Rastertunnelmikroskop auf einer Silberoberfläche „geschrieben“ wurde.



Neben der Analyse eignen sich Rastertunnel- oder Rasterkraftmikroskope auch zur gezielten Manipulation auf atomarer Ebene. Einzelne Atome können „angefasst“, transportiert und zu künstlichen Strukturen zusammengebaut werden. Bild 2 zeigt, wie mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops einzelne Manganatome bei tiefen Temperaturen auf einer Metalloberfläche zum RWTH-Logo angeordnet wurden. Eine andere und neue Möglichkeit zur Materialbearbeitung im Nanometer-Maßstab ist die FIB(Focused Ion Beam)-Technologie, bei der mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls Strukturen mit Dimensionen bis unter zehn Nanometern generiert werden können.

Für die kommerzielle Nanostrukturierung, insbesondere die Fertigung von elektronischen Bauelementen, werden heute üblicherweise Lithografiertechniken eingesetzt. Da diese allerdings in Zukunft an ihre wirtschaftlichen und technischen Grenzen stoßen werden, sucht die Halbleiterindustrie verstärkt nach kostengünstigen alternativen Lithographieverfahren wie beispielsweise das neuartige mechanische Prägeverfahren „Nanoimprint“.

Bereits heute ist die Funktionsweise des Computers auf engste verknüpft mit den physikalischen Gegebenheiten und Dimensionen der Nanowelt. So sind zum Beispiel die Leiterbahnen in den Prozessoren neuester Generation etwa 100 Nanometer breit. Allerdings wird bei fortschreitender Miniaturisierung die Grenze der herkömmlichen Elektronik in absehbarer Zeit erreicht sein. Die Gesetze der Quantenphysik

werden greifen, sobald die Abmessungen vergleichbar werden mit der Wellenlänge der Elektronen. Dann wird man neue Chips bauen müssen, die solche Effekte gezielt nutzen und die Gesetze der Quantenphysik für die Elektronik nutzbar machen. Von der so genannten Nanoelektronik wird eine deutliche Steigerung der Rechenkapazität und Geschwindigkeit von Computern erwartet. Denkbar wäre beispielsweise auch, nicht die Ladung der Elektronen als Informationsträger zu nutzen sondern deren Spin, also die Rotation des Elektrons um sich selbst. Der Spin ist schneller und auch leichter manipulierbar als die Ladung der Elektronen. Daher wird derzeit intensiv auf dem Gebiet der Spin-Elektronik geforscht, die eines der Prinzipien zur Realisierung des Quantencomputers darstellt. Auch bei Entwicklungen im Bereich der Datenspeicherung spielt der Spin bezie-

hungsweise die Magnetisierung eine wichtige Rolle. Die bisher hauptsächlich verwendeten Arbeitsspeicher (Dynamic Random Access Memories, DRAMs) für Computer basieren auf Ladungsspeicherung und haben den Nachteil, dass sie einen hohen Leistungverbrauch haben und dabei so genannte flüchtige Speicher sind: Die Information geht mit dem Ausschalten des Computers verloren. Die zukünftig als Computer-Arbeitsspeicher eingesetzten magnetischen RAMs (MRAM = Magnetic Random Access Memory) beruhen auf der remanenten Magnetisierung und sind daher nicht-flüchtige Speicher. Der Übergang von herkömmlichen Bits zu Quanten-Bits (Qubits) ist ebenfalls auf der Basis von zum Beispiel Spins der Elektronen realisierbar. Kohärente (langlebige) Quantenzustände lassen sich beispielsweise durch einzelne Spins in Quantenpunkten realisieren. Die

Überlagerung zweier solcher Quantenzustände zu einem Qubit lässt sich dann durch Kopplung zweier Quantenpunkte realisieren. Wenngleich die Realisierung mancher Konzepte auf der Nanometerskala noch Zukunftsmusik ist, Nanotechnologie prägt bereits heute unseren Alltag. Nanopartikel helfen in der Sonnencreme, die Haut vor ultravioletter Strahlung und Sonnenbrand zu schützen, oder sie lassen als Pigmente in Emulsionen besondere Farbfekte entstehen. Durch den Einsatz von Nanopulvern lassen sich Bauteile mit großer innerer Oberfläche erzeugen für leichte, leistungsfähige Batterien und Brennstoffzellen sowie für neuartige Katalyse- und Elektrolyseaktoren. Auch kratzfeste Autolacke sowie Licht und Wärme reflektierende Windschutzscheiben oder „sich selbst reinigende“ Oberflächen beruhen auf Nanotechnologie. Neuartige Wirk-

stoffe und Pharmaka, die in Nanopartikel eingebettet sind und von außen gesteuert freigesetzt werden (drug release), stehen kurz vor ihrem Einsatz in der Therapie. Einiges steckt noch in den Kinderschuhen, doch besitzt die Nanotechnologie als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts das Potenzial, weitreichende Veränderungen in Technik, Wirtschaft und Gesellschaft zu erzielen.

Autoren:

Dr. rer.nat. Marion E. Franke ist Leiterin der Geschäftsstelle des RWTH-NanoClubs. Univ.-Prof. Dr. sc.nat. Gernot Güntherodt ist Inhaber des Lehrstuhls Experimentalphysik II A und Leiter des II. Physikalischen Instituts, Sprecher des RWTH-NanoClubs sowie Koordinator des NanoClub-Schwerpunktes „Quanteninformation/Informationstechnologie“.



DER EIGENE WEG

GRÜNENTHAL ist ein unabhängiges, forschendes und international tätiges Pharmaunternehmen. Die Zukunftssicherung durch innovative Forschung ist ein wesentlicher Bestandteil unserer Unternehmensphilosophie. Mit hohem Engagement konzentrieren wir uns auf unseren eigenen Weg: dem Schmerz-Management in relevanten Indikationen.

Sie suchen breite Aufgaben- und Verantwortungsbereiche in einem internationalen Umfeld, in das Sie Ihre eigenen Ideen einbringen und verwirklichen können? Sie sind begeisterungsfähig, Neuem gegenüber aufgeschlossen und wollen Dinge bewegen?

Mediziner, Naturwissenschaftler, Diplom-Kaufleute (m/w)

Wir bieten jungen, engagierten Praktikanten, Diplomanden, Berufseinsteigern, Young Professionals oder Trainees die Chancen und Möglichkeiten, die Sie suchen.

Nähere Informationen erhalten Sie unter:
www.grunenthal.com
absolventen@grunenthal.de

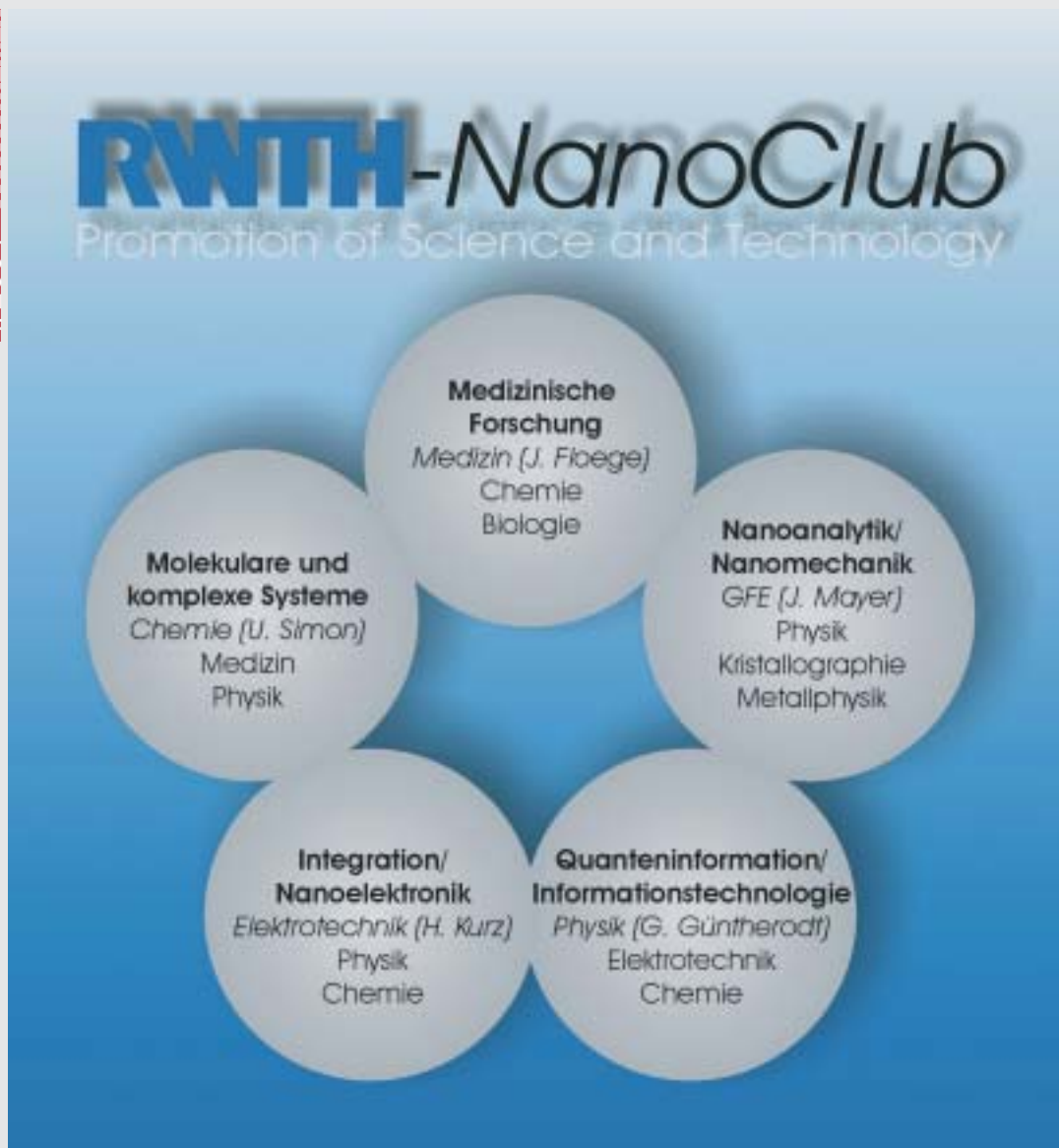


Jürgen Floege, Marion E. Franke, Gernot Güntherodt, Heinrich Kurz, Joachim Mayer, Ulrich Simon

Die Vielfalt des Nanokosmos

NanoClub vernetzt die Kompetenzen an der RWTH Aachen

Die Koordinatoren des RWTH-NanoClubs von links nach rechts: Joachim Mayer, Jürgen

Floege, Gernot Güntherodt, Ulrich Simon und Heinrich Kurz.
Foto: Peter Winandy

Nanotechnologie als Querschnittstechnologie erfordert ein hohes Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit, da auf der Nanoebene Aspekte der Physik, Chemie und Biologie sowie den Ingenieurwissenschaften miteinander verschmelzen. Zur erfolgreichen Vernetzung der vorhandenen Kompetenzen an der RWTH wurde am 12. Februar 2002 auf Initiative von Gernot Güntherodt, Heinrich Kurz, Joachim Mayer und Ulrich Simon der RWTH-NanoClub gegründet. Im Dezember 2002 wurde die Struktur des NanoClubs um den Themenschwerpunkt „Medizinische Forschung“ erweitert, der von Jürgen Floege koordiniert wird. Der NanoClub soll der interdisziplinären Forschung an der RWTH Aachen im Bereich der Nanotechnologie und Nanowissenschaften als Kompetenz- und Kooperationsplattform dienen. Die derzeit 39 beteiligten Arbeitsgruppen gehören den Fakultäten für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, für Elektrotechnik und Informationstechnik, für Maschinenwesen, für Georessourcen und Materialtechnik sowie der Medizinischen Fakultät an. Unter dem Dach des NanoClubs verbinden sich die folgenden fünf thematischen Schwerpunkte:

Quanteninformation/Informationstechnologie (Koordinator: Gernot Güntherodt)

Im Zeitalter der Informationstechnologie wächst der Bedarf an Datenspeicherung in Massenspeichern oder nicht flüchtigen Computer-Arbeitsspeichern mit zunehmend höheren Speicherdichten uneinge-



schränkt. Neben magnetischen Festplatten sucht man nach alternativen Konzepten, wie zum Beispiel nach optischen Datenspeichern auf der Basis von Phasenwechselmedien (Phase Change (PC) Media). Diese Medien, die unter Lasereinstrahlung zwischen einem kristallinen und amorphen Zustand schalten und dabei ihre optischen Eigenschaften ändern, werden am I. Physikalisches Institut und am Lehrstuhl für Werkstoffchemie hinsichtlich der Materialoptimierung untersucht.

Nichtflüchtige Speicherkonzepte, beruhend auf der remanenten Magnetisierung dünner Schichten, werden im II. Physikalisches Institut auf der Grundlage des magnetischen

RAM (MRAM = Magnetic Random Access Memory) erforscht, das auf dem Magnetwiderstand beim Tunneln von Elektronen zwischen magnetischen Elektroden basiert und demnächst als Sensor in avancierten Leseköpfen für Festplatten eingesetzt wird.

Die bisherige Zweiteilung von Informationsverarbeitung in Halbleitertransistoren und von Datenspeicherung in magnetischen Medien wird von der Spinelektronik überwunden, indem neben der Ladung des Elektrons auch dessen Spin als zusätzliche Information genutzt wird. Diese neue, doppelte Funktionalität wird beispielsweise in Hybridstrukturen von Halbleitern mit ferromagnetischen Halbleitern erfüllt.

Die Funktionalität der Spins in solchen Halbleiterhybridstrukturen wird am II. Physikalisches Institut mittels optischer Pump-/Abfrage-Technik unter Einsatz von Femtosekunden-Laserpulsen untersucht. Das optische Pumpen von langlebigen (kohärenten) Spins führt auch zu deren Ankopplung an die Kernspins, also an die Präzession der Atomkerne um ihre eigene Achse. Unter diesen Bedingungen konnte eine Überlagerung kohärenter Spinzustände zu Spin-QuBits (Quanten-Bits) in Form von Quantenschwebungen beobachtet werden.

Integration/Nanoelektronik (Koordinator: Heinrich Kurz)
Der Übergang von Mikro- zu Nanoelektronik, der heute weltweit von den führenden Chipherstellern vorangetrieben wird, ist von außerordentlich wirtschaftlicher Bedeutung für die eigentliche Informationstechnik. Er sorgt auch in den Bereichen Life Science und Energietechnik für große Entwicklungssprünge. Das Hauptziel des Clusters „Integration/Nanoelektronik“ ist die Integration nanoelektronischer Komponenten mit der CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)-dominierten „Außenwelt“. Darüber hinaus ist das vorrangige Ziel des Clusters die Bereitstellung technologischer Verfahren und Kon-

Bild 1: Struktur des RWTH-NanoClubs.

Nanokosmos

zepte, die den Übergang von Mikro- zur Nanoelektronik in konkreten technischen Schritten ermöglichen. Die Herausforderung in der Nanoelektronik besteht darin, dass nicht nur eine höhere Integrationsdichte der einzelnen Komponenten, sondern auch höhere Funktionalitäten erreicht werden müssen, bis hin zu den Grenzen der Skalierbarkeit von Materialeigenschaften.

Das Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik II (IWE II) beschäftigt sich im Rahmen der nichtflüchtigen Speicher vor allem mit der Frage, welche Grenzen der Skalierung ferroelektrischer Strukturen aufgrund inhärenter physikalischer Eigenschaften gesetzt sind. Das Institut für Halbleitertechnik (IHT) lotet in enger Zusammenarbeit mit AMICA (Advanced Microelectronic Center Aachen) die Grenzen der Silizium-Nanoelektronik aus und exploriert die Möglichkeiten über die zukünftigen CMOS Generationen hinaus. Von besonderem Interesse dabei sind nichtflüchtige Speicherkonzepte extremer Skalierbarkeit, die auf einen Phasenwechsel in bestimmten ternären Legierungen beruhen (Phase Change Random Access Memory/PC-RAM). Ein weiterer wesentlicher Punkt der Zusammenarbeit dieser beiden Institute ist die Entwicklung eines UV-Licht stimulierten Nanoimprintverfahrens, das die kostengünstige Herstellung von Nanostrukturen ermöglicht.

Nanoanalytik/Nanomechanik (Koordinator: Joachim Mayer)

Das gemeinsame Ziel der verschiedenen Verfahren der Nanoanalytik ist die Charakterisierung des Aufbaus der untersuchten Nanomaterialien bis hinunter zu den atomaren Strukturen, ihrer chemischen Zusammensetzung sowie ihrer elektronischen Struktur. Viele dieser Verfahren sind an verschiedenen Instituten der RWTH Aachen vorhanden. Ziel des NanoClubs ist in diesem Bereich, die bestehenden Kompetenzen zusammenzufassen. Aufgrund der nanoskaligen Struktur und Geometrie der Objekte ist mit den Methoden der Nanoanalytik häu-

fig neben der Analyse auch die Modifizierung der Nanostrukturen möglich. So ist es mit den Rastersondenverfahren möglich, sogar einzelne Atome an Ort und Stelle zu schieben und damit kleinste Bauelemente und Strukturen herzustellen. Von großer Bedeutung sind auch lithografische Verfahren, die auf Verwendung von Elektronen- und Ionenstrahlen beruhen.

Die Palette der an der RWTH zu diesem Zweck zur Verfügung stehenden Geräte wurde in jüngster Zeit entscheidend verstärkt durch die Installation zweier Instrumente der neuesten Gerätegeneration, eines hochauflösenden analytischen Transmissions-elektronenmikroskops und einer Focused Ion Beam Workstation am Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE). Die RWTH Aachen gehört damit zu den ersten Universitäten in Deutschland, in denen diese Gerätekombination zur Verfügung steht.

Des Weiteren gehört die Nanomechanik zu diesem Themenbereich. Während man bei dem Schlagwort Nanotechnologie häufig nur an schnellere und leistungsfähigere elektronische Bauelemente denkt, reichen die vielfältigen Einsatz- und Anwendungsfelder bis zur Möglichkeit, durch gezielt erzeugte Nanostrukturen auch die mechanischen Eigenschaften von Bauelementen oder Werkstoffen in entscheidendem Masse zu verbessern. So gelingt es einerseits, Metalle zu härten, und andererseits Keramiken die Sprödigkeit zu nehmen, also ihre Bruchzähigkeit zu erhöhen, ohne die Härte zu reduzieren. Vor allem im Bereich von Beschichtungen sind diese Möglichkeiten inzwischen auch von großem industriellen Interesse.

Molekulare und komplexe Systeme (Koordinator: Ulrich Simon)

Die chemische Synthese nanostrukturierter Materialien hat sich in den letzten Jahren mehr und mehr zu einem bedeutenden und explorativen Arbeitsgebiet der nanowissenschaftlichen Forschung entwickelt. Ausgehend von atomaren oder molekularen Vorstufen sind

Nanostrukturen einheitlicher Form und Größe im sub-10-Nanometer-Bereich zugänglich. Exemplarisch genannt seien hier Metall- und Halbleiternanopartikel sowie nanoporöse Ionen- und Halbleiter, wie sie am Institut für Anorganische Chemie synthetisiert und charakterisiert werden. Durch hoch entwickelte Synthesetechnik sowie durch Methoden der Selbstorganisation sollen einzelne funktionelle Moleküle oder komplexe Assoziate aus Metallnanopartikeln, wie Ketten, Schichten oder Netzwerke, beispielsweise in mikroelektronische Schaltungen integriert werden und dort Schalt- oder Speicherfunktionen übernehmen, die mitunter auf konventionellem Wege der Halbleiterstrukturierung nicht zugänglich sind. Andere Anwendungsmöglichkeiten finden sich in der Oberflächenfunktionalisierung von Werkstoffen oder in der Gassenso-rik.

Generelles Ziel ist die experimentelle und theoretische Analyse von Nanomaterialien sowie die Entwicklung molekularer Konstruktionstechniken, mit denen durch gezielte Verknüpfung nanoskaliger anorganischer und organischer Bausteine neue Eigenschaften hervor gebracht werden. Dabei werden die Erkennungseigenschaften großer, organischer Moleküle, wie sie etwa von der DNA bekannt sind, mit der größenabhängigen Funktion (elektrisch, optisch, magnetisch) anorganischer, nanostrukturierter Bausteine (Metall- und Metallchalkogenidcluster, Riesenmoleküle, Nanoröhren) verknüpft. Dies bezieht sich sowohl auf Assoziate einiger weniger Bausteine als auch auf den Aufbau komplexer Architekturen. Dadurch wird der Zugang zu komplexen Funktionalitäten ermöglicht, die von sensorischen, katalytischen und motorischen Funktionen bis hin zur Steuerung von Signaltransduktion reichen können.

Der Kooperationsbereich „Molekulare und komplexe Systeme“ stellt ein zentrales Bindeglied zwischen den klassischen Forschungsdisziplinen Biologie, Chemie, Physik, Medizin und den Ingenieurwissenschaften dar.

Medizinische Forschung (Koordinator: Jürgen Floege)

In der Medizin fokussieren die NanoClub-assozierten Forschungsaktivitäten auf die Bereiche Bildgebung, neue Diagnostik- und Therapieverfahren sowie technische Optimierung von Blutpumpen.

In Zusammenarbeit mit dem Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik werden am Lehrstuhl für Experimentelle Radiologie bioverträgliche Magnetit-Nanopartikel entwickelt, die als Kontrastmittel oder zur gezielten Freisetzung von Medikamenten dienen können. Die Option einer gezielten Lokalbehandlung, beispielsweise von Tumoren, würde in der Medizin neue Therapieverfahren ermöglichen sowie die Wahrscheinlichkeit systemischer Nebenwirkungen von medizinischen Wirkstoffen senken.

Am Helmholtz Institut für Biomedizinische Technologien wird an der Verbesserung von Blutpumpen gearbeitet, die in vielen Bereichen wie Operationen am offenen Herz oder in der Dialyse zum Einsatz kommen. Durch geeignete Nanostruktur-Beschichtungen soll eine bessere Blutverträglichkeit erreicht werden und damit die Notwendigkeit des Einsatzes gerinnungshemmender Medikamente verringert werden.

In einer Kooperation zwischen der Medizinischen Klinik II und dem GFE werden Methoden aus der Materialwissenschaft erstmals für Analysen menschlicher Gewebe angewandt. Dabei wird „Kalk“ aus großen Schlagadern oder dem Herzen in Nanometer dicke Scheiben zerlegt und deren chemische Zusammensetzung analysiert, wodurch grundlegende neue Erkenntnisse über die „Verkalkung“ des Menschen gewonnen werden sollen.

Neben den technischen Weiterentwicklungen in der Medizin erfolgt jedoch auch

die kritische Auseinandersetzung mit den neuen Möglichkeiten der Nanotechnologie. Finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) läuft derzeit die Studie „Nanotechnologie pro Gesundheit: Chancen und Risiken“. Hier finden Experten-Workshops sowie öffentliche Podiumsdiskussionen statt, wie im Oktober 2003 die Veranstaltung „Ewiges Leben aus der Nanowerkstatt?“, die die Akzeptanz neuer nanotechnologischer Entwicklungen sowie deren Risikoabschätzung verbessern sollen.

Neben der Vernetzung innerhalb der RWTH soll ein deutliches Zeichen der Schwerpunkt- und Profilbildung in der Region durch die Gründung eines „Regionalen Forschungsverbundes“ zwischen dem NanoClub der RWTH und dem Center for Nanoelectronics and Information Technology (CNI) am Forschungszentrum

Jülich gesetzt werden. Diese regionale Kooperation, deren Basis bereits drei virtuelle Institute im Rahmen des „Impuls- und Vernetzungsprogramms“ der Helmholtz-Gesellschaft bilden, soll neben Synergieeffekten auch der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen, insbesondere von Technologie-großgeräten dienen. Eine neue und beispielgebende Kooperation zwischen dem Forschungszentrum Jülich und der RWTH Aachen stellt das 2004 gegründete „Ernst-Ruska-Centrum“ für höchstauflösende Elektronenmikroskopie dar. Dies ist eine neuartige optimale, komplementäre Ergänzung hinsichtlich Kompetenzen und Geräteausstattung.

Autoren:

Univ.-Prof. Dr. med.Jürgen Floege ist Direktor der Medizinischen Klinik II sowie Koordinator des NanoClub-Schwerpunktes „Medizinische Forschung“. Dr. rer.nat. Marion E. Franke ist Leiterin der Geschäftsstelle des RWTH-NanoClubs. Univ.-Prof. Dr. sc.nat. Gernot Güntherodt ist Inhaber des Lehrstuhls Experimentalphysik II A und Leiter des II.Physikalischen Instituts, Sprecher des RWTH-NanoClubs sowie Koordinator des NanoClub-Schwerpunktes „Quanteninformation/Informationstechnologie“. Univ.-Prof. Dr. phil. Heinrich Kurz ist Inhaber des Lehrstuhls für Halbleitertechnik, Leiter des Instituts für Halbleitertechnik sowie Koordinator des NanoClub-Schwerpunktes „Integration/Nanoelektronik“. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Joachim Mayer ist Leiter des Gemein-

schaftslabors für Elektronenmikroskopie (GFE) der RWTH Aachen sowie Koordinator des NanoClub-Schwerpunktes „Nanoanalytik/Nanomechanik“. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Ulrich Simon ist Inhaber des Lehrstuhls für Anorganische Chemie und Elektrochemie, Leiter des Instituts für Anorganische Chemie sowie stellvertretender Sprecher des RWTH-NanoClubs und Koordinator des NanoClub-Schwerpunktes „Molekulare und Komplexe Systeme“.



Hier erfahren Sie mehr – Porsche Online: Telefon 01805 356 - 911, Fax - 912 (EUR 0,12/min) oder www.porsche.com.

Für Massenhersteller ist es eine Nische.
Für uns Lebensinhalt.

Der 911 GT3.



PORSCHE

Thomas Bobek, Carlos Martínez, Bernd Spangenberg

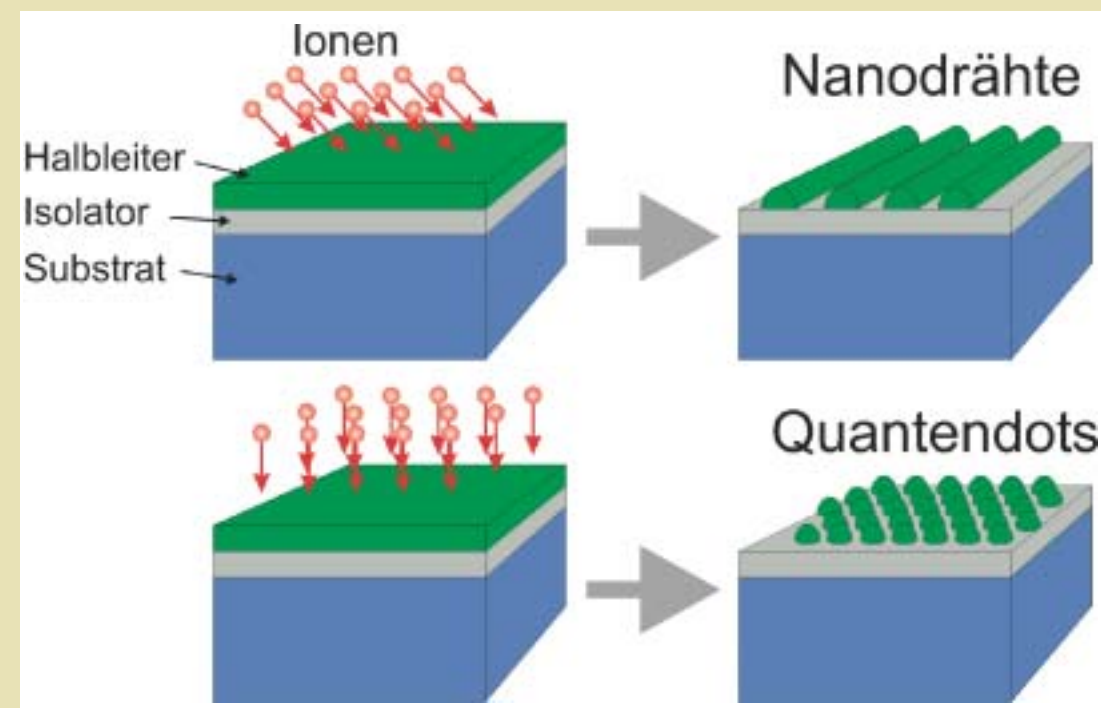
Selbstorganisation im Nanokosmos

Periodische Punktmuster durch Ionenerosion

1/2004 RWTH THEMEN

In der Halbleitertechnologie ist die Miniaturisierung der Bauelemente inzwischen bei Dimensionen angelangt, deren weitere Reduktion nur noch durch sehr hohen technischen und finanziellen Aufwand möglich ist. Die bislang verwendeten optisch-lithographischen Techniken, die zusammen mit der anschließenden Strukturübertragung eingesetzt werden, formen das gewünschte elektronische Bauelement – zum Beispiel den Transistor – auf dem Substrat (englisch wafer). Diese Vorgehensweise vom Großen zum Kleinen wird als Top-down-Methode bezeichnet. Damit können jedoch nur schwer Strukturen unterhalb von 100 Nanometern erzeugt werden, da die Lichtbeugung die Erzeugung von Strukturen verhindert, die viel kleiner als die dabei verwendete Wellenlänge sind. Eine Verkleinerung der Wellenlänge (Verwendung von extrem kurzwelligem UV-Licht [EUV] mit einer geplanten Wellenlänge von nur 13 Nanometern anstelle der bisherigen 190 Nanometer) ist jedoch mit immensen Kosten verbunden. Eine andere Methode, die in der Lage ist, Strukturen kleiner als 100 Nanometer flexibel zu erzeugen, ist die Elektronenstrahl-Lithographie. Aufgrund ihrer seriellen Arbeitsweise weist diese Technik allerdings noch eine zu geringe Fertigungsgeschwindigkeit auf.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Vorgehensweisen wird seit einigen Jahren versucht, die Ordnungsprinzipien der Natur für die Nanotechnologie auszunutzen. Durch diese Selbstorganisation findet eine Strukturbildung statt, bei der sich die Atome oder Moleküle zu strukturierten Gebilden oder Mustern ordnen, die dann als Bausteine für elektronische Bauelemente verwendet werden können. Diese Herangehensweise an die Herstellung von Nanometerstrukturen wird im Gegensatz zur etablierten Methode als Bottom-up-Ansatz bezeichnet.



Selbstorganisation wird im Lexikon als „spontane Strukturbildung in dynamischen Systemen“ beschrieben. In der Tat beobachtet man in der Natur viele Prozesse, die aus einem homogenen, strukturlosen Zustand heraus spontan geordnete Strukturen bilden. Dieser Prozess kann auf fast allen Größenskalen beobachtet werden. Beispiele für diese Ordnungsphänomene sind die Formation von Sandwellen im Wüstensand durch die Einwirkung des Windes. Man beobachtet auch in Flüssigkeiten die Bénard-Konvektion, bei der ein Temperaturgradient zwischen Unter- und Oberseite zur Ausbildung von Konvektionsmustern führt, die häufig eine sechseckig angeordnete Bienenwabenstruktur bilden.

Während die genannten Beispiele mit dem bloßen Auge beobachtet werden können, wurden Selbstorganisationsprozesse im Nanometerbereich erst in den letzten Jahren entdeckt. Dies wurde ermöglicht durch die Verfügbarkeit von hochauflösenden Abbildungstechniken wie der Rasterkraftmikroskopie (englisch Atomic Force Microscopy, AFM) und der Raster-Elektronenstrahl-Mikroskopie (REM). Durch das kontinuierliche Erodieren von festen Oberflächen mit be-

schleunigten Ionen (Sputtern), beispielsweise mit Argon-Ionen, entsteht unter geeigneten Bedingungen nicht nur eine zufällige Aufrauung der Oberfläche, sondern ein geordnetes, periodisches Muster. Bei schrägem Einfall der Ionen beobachtet man dabei eine Wellenstruktur, ähnlich den Mustern im Sand (Bild 1 rechts oben). Eine potenzielle Anwendung dieser Strukturen wären optische Gitter für kurzwellige elektromagnetische Strahlung oder Nanodrähte, die eine Breite von lediglich zehn bis 100 Nanometer haben. Bei senkrechtem Einfall der Ionen entsteht ein regelmäßiges Muster von Erhebungen (Bild 1 rechts unten). Diese Erhebungen (Punkte) ordnen sich in einer „hexagonal dichten Kugelpackung“ an, bei der sich die benachbarten Punkte berühren (Bild 2). Einzelne Domänen perfekter hexagonaler Ordnung sind getrennt durch „Kristallfehler“ wie Linienversetzungen, Fehlstellen oder Zwischengitterplätze. In Bild 2a ist die REM-Aufnahme einer solchen Materialoberfläche nach Argon-Ionenbeschuss gezeigt. Die hellen Punkte entsprechen Erhebungen auf der Oberfläche, die dunklen Punkte illustrieren tiefer liegende Regionen. Das

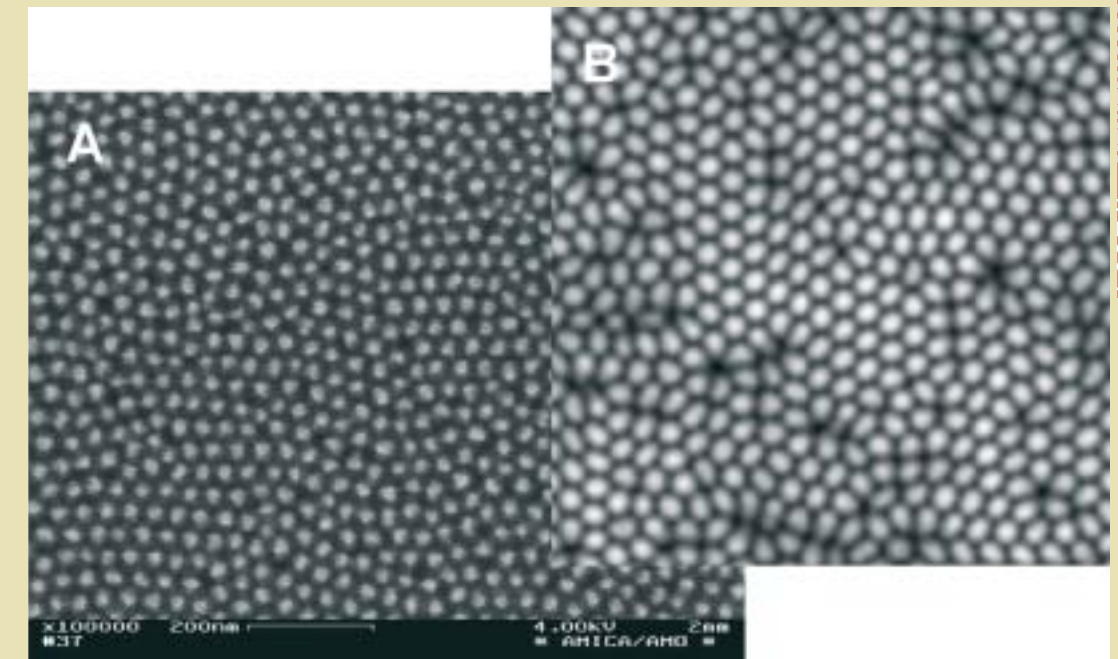
Bild 1: Schematische Darstellung der Strukturerzeugung während des Sputtervorganges. Bei schrägem Ioneneinfall entstehen wellenartige Strukturen, bei senkrechtem Einfall Punktmuster.

theoretische Modell (Kontinuumsmodell), welches für diesen Prozess entwickelt wurde, liefert in Simulationsrechnungen fast identische Strukturen wie im Experiment. In Bild 2b sieht man, dass sogar die erwähnten Defektstellen in den numerischen Rechnungen wiedergegeben werden. Die Beschreibung dieses Effektes findet im Rahmen der Sputtertheorie statt, die eine Abhängigkeit der Sputterausbeute von der lokalen Krümmung der Oberfläche am Eintreffpunkt des Ions vorhersagt. Die Sputterausbeute ist die Menge der aus dem Material herausgeschlagenen Atome pro einfallendem Ion. Sie ist proportional zur Energiedichte, die durch die Ionen in Oberflächennähe deponiert wird. In Vertiefungen der Oberfläche haben nahegelegene Ioneneignisse mehr Einfluss auf die lokale Energiedichte als auf Erhebungen, so dass Vertiefungen schneller abgetragen werden als Erhebungen. Dies bewirkt eine Zunahme der Ober-

flächenrauigkeit, die jedoch wiederum durch Diffusionsprozesse teilweise gedämpft wird. Das Zusammenspiel dieser zwei Prozesse hat die Verstärkung einer definierten Modulationswellenlänge zur Folge. Zusätzlich wird die hexagonale Anordnung des Musters durch eine Wiederanlagerung eines Teils der gesputterten Atome an der Oberfläche stabilisiert. Es konnte gezeigt werden, dass das Kontinuumsmodell, basierend auf der so genannten Kuramoto-Sivashinsky Gleichung, die Punktmusterentstehung erfolgreich nachbildet.

In Bild 2a sieht man die REM-Aufnahme eines solchen Punktmusters. Der Abstand zwischen den einzelnen Punktstrukturen beträgt circa 40 Nanometer. Durch Variation der Sputterzeit und der kinetischen Energie der Ionen kann sowohl der Abstand als auch die Periode des Musters im Bereich von 15 bis 100 Nanome-

Bild 2: Experimentelle Oberflächenstruktur (Teil A) im Vergleich mit numerischen Rechnungen (Teil B).



RWTH THEMEN 1/2004

www.euromold.com

EUROMOLD

„Vom Design über den Prototyp bis zur Serie“

Weltmesse für Werkzeug- und Formenbau, Design und Produktentwicklung

1. - 4. Dezember 2004

Messegelände Frankfurt / Main

*Neue Ausstellungsbereiche
Simulation
Werkstoffe
Luft- und Raumfahrt*

EuroMold 2003:
1.530 Aussteller aus 38 Ländern!
57.200 Besucher aus 64 Ländern!

Werden Sie Aussteller!

Veranstalter: DEMAT GmbH
Postfach 11 06 11
D-60041 Frankfurt / Main
Tel. + 49-(0) 69 - 27 40 03-0
E-mail: euromold@demat.com
Fax + 49-(0) 69 - 27 40 03-40

Bitte senden Sie uns Unterlagen für:

☐ Aussteller ☐ Besucher

Firma _____

Name _____

Straße _____

PLZ/Ort _____

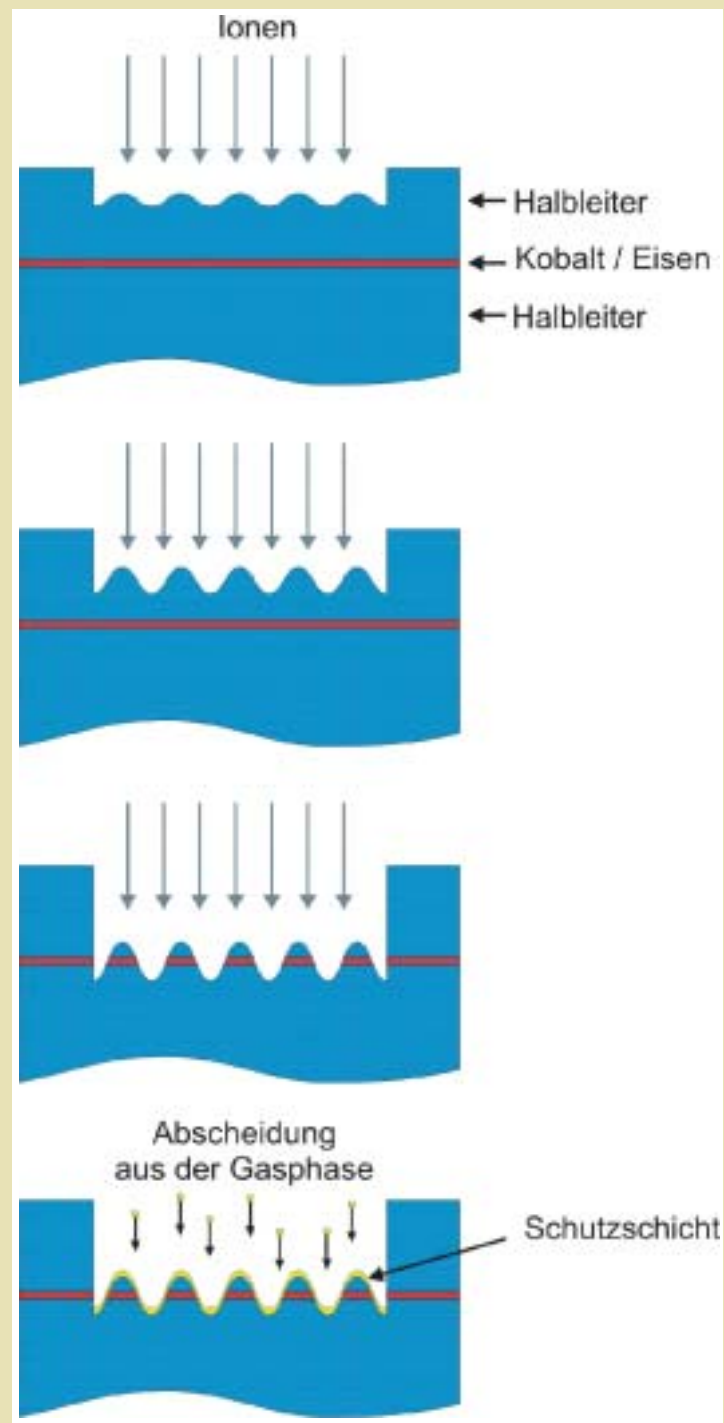
Land _____

Tel. _____

Fax _____

E-mail _____

Bild 3: Erzeugung von Nanomagneten mittels Ionenbeschuss einer Schichtstruktur, die eine 5 bis 10 nm dünne ferromagnetische Schicht aus Kobalt und Eisen enthält.



Schicht zu stoppen (Bild 3 unten). Das erzeugte Oberflächenprofil durchtrennt die magnetische Schicht, so dass ein Flächenfeld aus voneinander getrennten Nanomagneten entstanden ist. Die favorisierte potenzielle Anwendung solcher Schichten werden voraussichtlich hochdichte magnetische Speicher mit Speicherdichten im Terabit-Bereich ($\approx 10^{12}$ bit) pro Quadratzentimeter sein. Um die Langzeitstabilität dieser Nanomagnete zu gewährleisten, beschichtet man sie zum Schluss mit einer ultradünnen, verschleißfesten Schutz- beziehungsweise Passivierungsschicht.

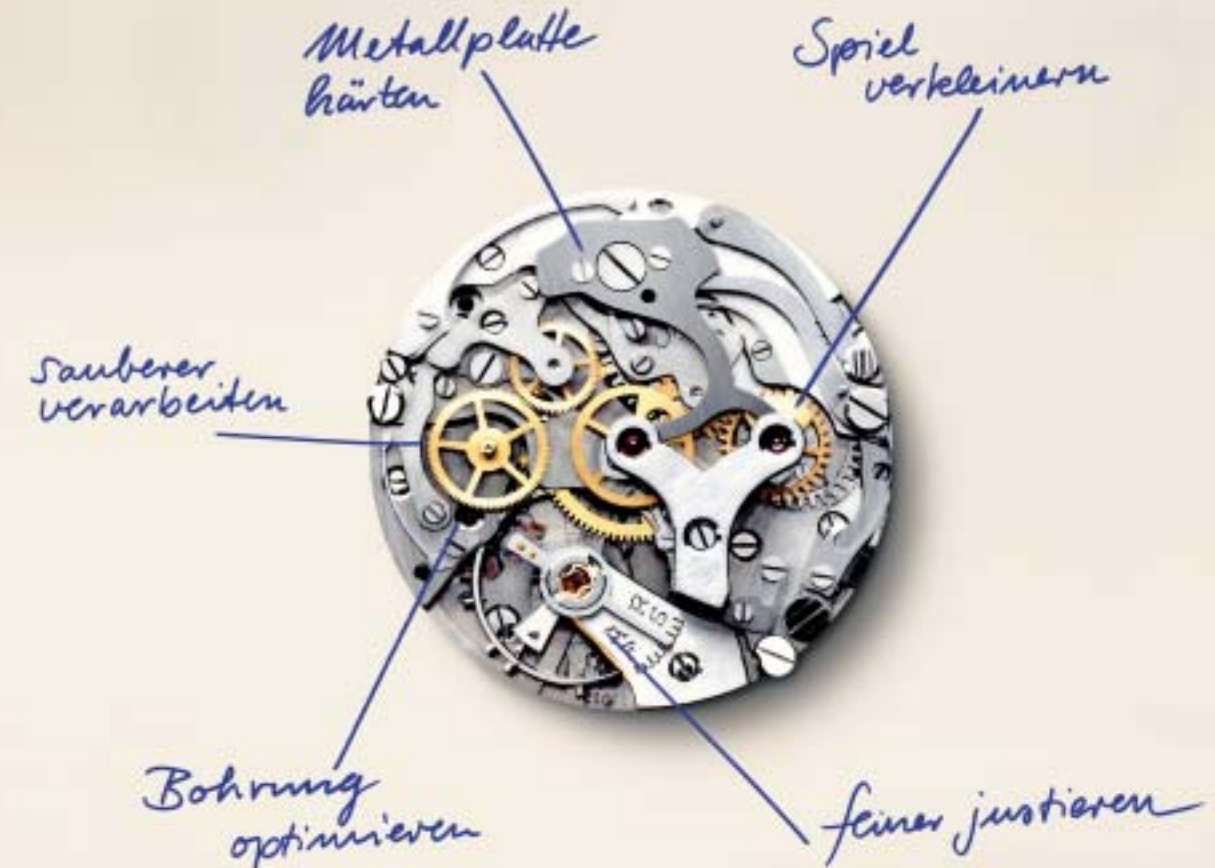
Autoren:

Dipl.-Phys. Thomas Bobek ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Halbleitertechnik.

Dipl.-Phys. Carlos Martínez ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstoffchemie.

Dr. rer.nat. Ing. Bernd Spangenberg ist Leiter des Forschungsbereichs Nanotechnologie am Institut für Halbleitertechnik.

03/M FC/03-12



Der neue Ford**FocusC-MAX**.
Qualität weitergedacht.



Jetzt probefahren:
01805/31 16 16 (0,12 €/Min.)

www.ford.de

Der neue Ford**FocusC-MAX**

Besser ankommen



Henri Hansen, Sebastian Meßlinger, Thomas Michely, Celia Polop

Nanostrukturierung von Oberflächen durch Ionenstrahlen

Musterbildung durch Beschuss mit energiereichen Atomen

Zur Bearbeitung von Oberflächen auf atomarer Skala werden bereits seit vielen Jahren Ionenstrahlen verwendet. Dabei handelt es sich um Strahlen von Atomen, die zunächst ionisiert und anschließend durch elektrische Spannungen beschleunigt werden. Im Laboralltag sind Ionenstrahlen mit Energien von einigen 100 bis 1000 Elektronenvolt üblich. Dies sind Strahlen von Ionen, die mit elektrischen Spannungen von einigen 100 bis einigen 1000 Volt beschleunigt wurden. Werden Oberflächen solchen Ionenstrahlen ausgesetzt, ist die Wirkung mit einem fortgesetzten Beschuss einer Wand mit einer Schrotflinte vergleichbar. Die Ionen dringen in die Oberfläche ein, zerstäuben Oberflächenatome und rauhen die Oberfläche auf.

Die technischen Anwendungen solcher Ionenstrahlen in der Oberflächenbearbeitung und -analyse sind vielfältig. Man kann sie beispielsweise verwenden, um Material von einer Oberfläche abzustauben und mit diesem Material ein Werkstück zu beschichten. Oder man kann anhand kleiner Mengen des abgestäubten Materials die chemische Zusammensetzung der Oberfläche bestimmen. Eine andere interessante Anwendung ist der Beschuss von Oberflächen vor oder während einer Beschichtung zur Verbesserung der Haftung der Schicht auf der Oberfläche. Diesen Effekt macht man sich auch bei biomedizinischen Implantaten zunutze, deren Oberflächen durch Ionenstrahlen zur Erhöhung der Biokompatibilität aufgeraut werden.

Eine neue Anwendung für Ionenstrahlen ist die Herstellung von so genannten nanostrukturierten Template. Ein nanostrukturiertes Template ist eine Oberfläche, die auf der Nanometerskala mit einem regelmäßigen Muster versehen wurde. Dieses Templatemuster soll wiederum dazu dienen, einem „Etwas“, das auf dem Template abgeschieden wird, eine gemusterte und damit nützliche Struktur zu verleihen. Die Verwendung dieser nanostrukturierten Template kann beispielsweise in der Realisie-

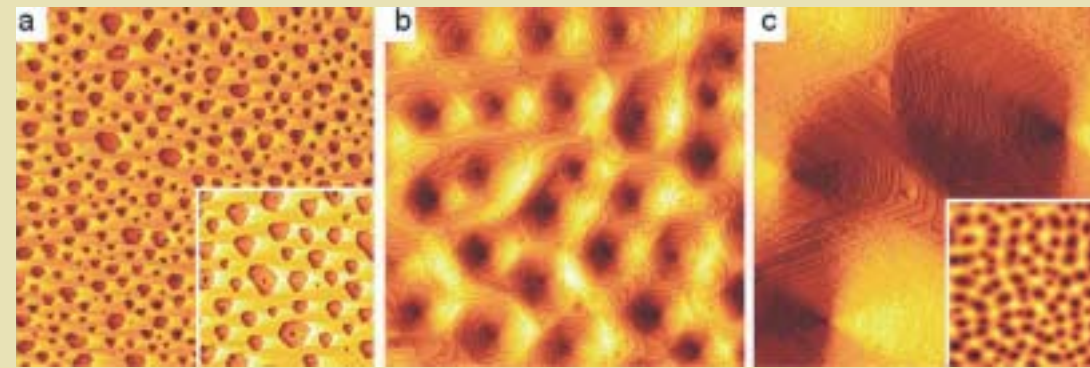


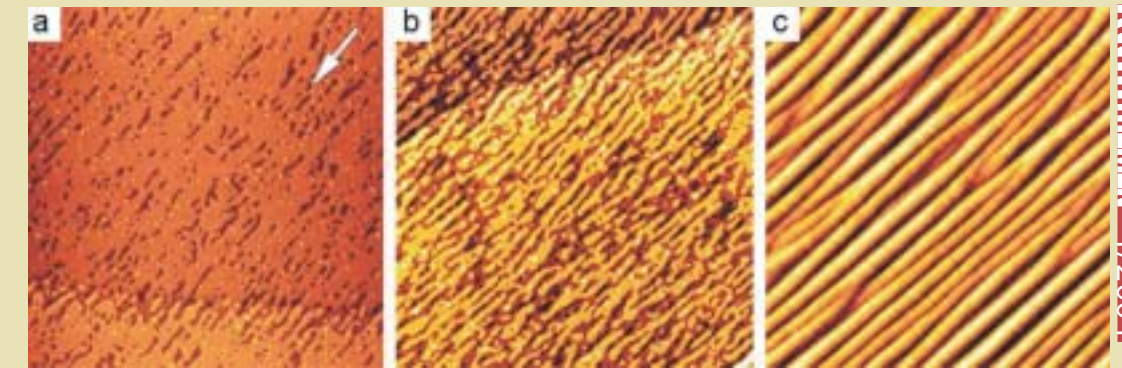
Bild 1: Rastertunnelmikroskop-aufnahmen von Platinoberflächen nach Abtragung von (a) 0,25, (b) 6 und (c) 450 atomaren Lagen durch senkrechten Ionenbeschuss. Die Bildgröße ist stets 160 nm x 160 nm. Der Einsatz in (a) ist eine Vergrößerung (Bildgröße 40 nm x 40 nm) und der Einsatz in (c) eine Übersicht (Bildgröße 600 nm x 600 nm). Der Einsatz in (c) ist ein Grauwertbild, ansonsten ist der Bildeindruck korrekt, wenn die Beleuchtung als streifend von links vorgestellt wird.

schuss werden Oberflächena-tome zerstäubt und zurück bleiben Oberflächenleerstellen, also fehlende Atome in der Oberfläche. Diese Leerstellen sind bei der Beschusstemperatur von 380 Grad Celsius mobil und lagern sich zu Leerstelleninseln zusammen, die als dunklere Löcher in der Abbildung zu erkennen sind und von einer in sich geschlossenen atomaren Stufe umrandet sind. Auf dem Boden einer Leerstelleninsel wird nun bevorzugt wieder eine neue Leerstelleninsel gebildet, die als kleiner schwarzer Punkt in der Mitte einer Insel zu erkennen ist. Denn in einer Insel erzeugte Leerstellen können sehr schlecht in die aufwärts gelegene Stufenkante der Insel eingebaut werden. Diese bevorzugte Bildung von Leerstelleninseln in Leerstelleninseln führt bereits nach Abtragung von etwa sechs atomaren Lagen zu einem Muster von Kratern (Bild 1b). Durch weiteren Beschuss lässt sich die mittlere Kratertiefe vergrößern, dabei steigt allerdings auch der Kraterabstand, was in Bild 1c zu erkennen ist. Der Einsatz hier

gibt einen Eindruck von der Regelmäßigkeit der Kraterlandschaft auf der Längenskala von 600 Nanometern nach Abtragung von 450 atomaren Lagen.

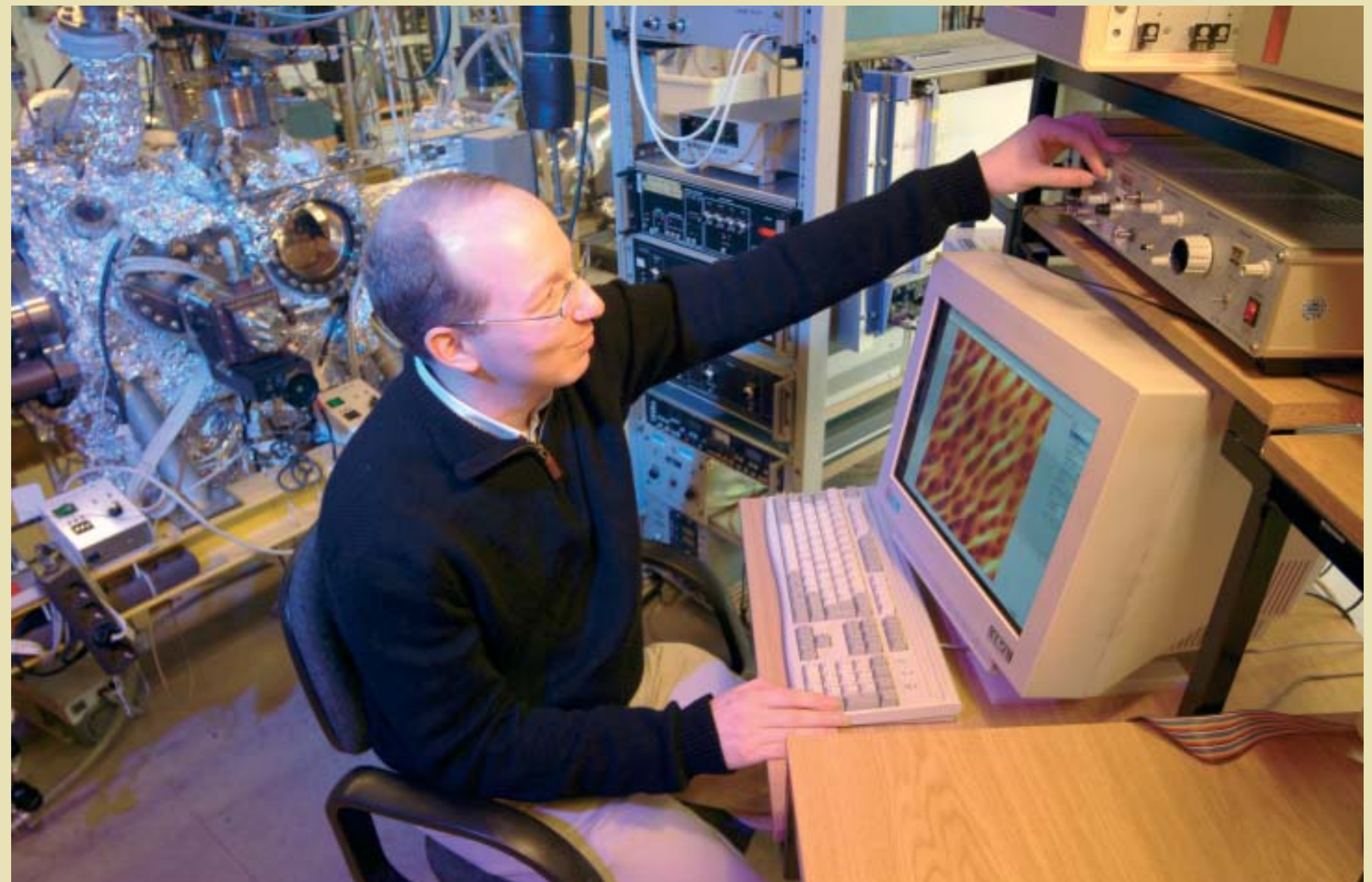
Im zweiten Fall werden Argon-Ionen mit einer Energie von 5000 Elektronenvolt fast streifend, mit einem kleinen Winkel von nur sieben Grad auf die Probenoberfläche geschossen. Anders als beim senkrechten Beschuss werden anfänglich die allermeisten Ionen an der glatten Oberfläche reflektiert ohne Atome zu zerstäuben. Daher dauert es sehr lange, bis sich erste kleine Leerstelleninseln bilden. Sind solche Inseln allerdings einmal gebildet, stellen die quer zur Strahlrichtung verlaufenden aufwärts führenden Stufen eine Trefferfläche dar und die Inseln werden durch nachfolgend eintreffende Ionen zu langen Löchern vorangetrieben (Bild 2a). Ebenfalls erkennbar sind in dieser Abbildung kleine helle, so genannte Adatominiseln. Sie entstehen

Bild 2: Rastertunnelmikroskop-bilder aufgenommen nach Abtragung von ca. (a) 0,1, (b) 0,5 und (c) 15 atomaren Lagen durch streifendem Ionenbeschuss. Die Flugrichtung der Ionen ist durch den Pfeil oben rechts in (a) gekennzeichnet. Die Bildgröße beträgt jeweils 250 nm x 250 nm.



Rechnergestütztes Analysieren atomarer Prozesse auf einer Platinoberfläche im I. Physikalisches Institut der RWTH Aachen.

Foto: Peter Winandy



Markus Bender, Andreas Fuchs, Martin Otto, Bernd Spangenberg, Boris Vratzov

Gutenbergs Erben im Nanokosmos

550 Jahre nach Erfindung des Buchdrucks ebnet ein Nano-Prägeverfahren neue Wege in die Informationstechnologie

Wellenlänge (der mittlere Abstand zweier Wellenberge) ist durch die Ionenenergie und die Abtragungsdauer einstellbar. Die Wellenlänge in Bild 2c beträgt 18 Nanometer.

Autoren:

Dipl.-Phys. Henri Hansen ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am I. Physikalischen Institut. Sebastian Meßlinger ist Dipl.-Ing. am I. Physikalischen Institut. Apl. Prof. Dr. rer. nat. Thomas Michely lehrt und forscht am I. Physikalischen Institut. Dr. rer. nat. Celia Polop ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am I. Physikalischen Institut.

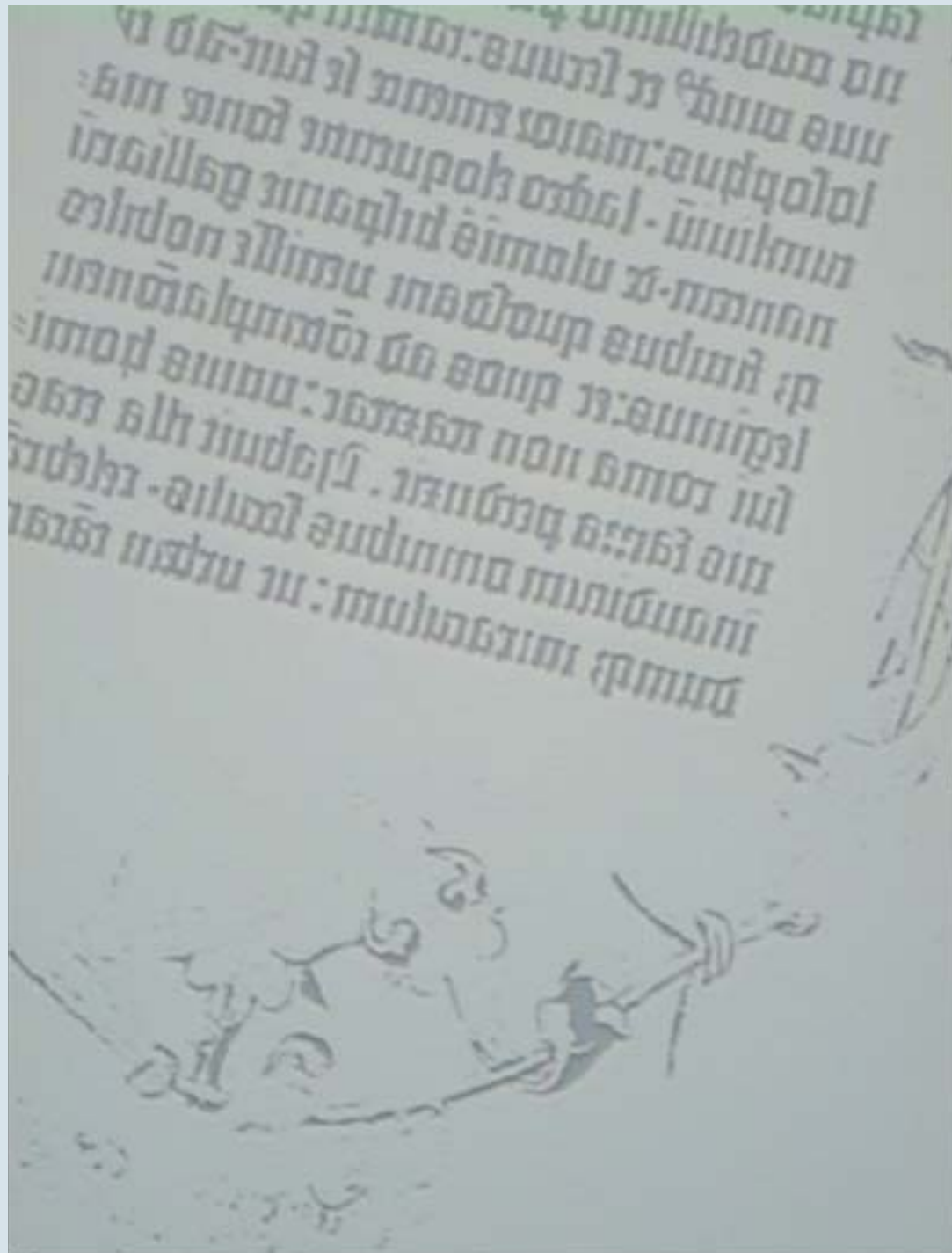


Bild 1: Mikroskopaufnahme eines Prägestempels, als Vorlage wurde die erste Seite der 42zeiligen Bibel von Gutenberg verwendet.

Die Lithographietechniken, die für die Fertigung von elektronischen Bauelementen eingesetzt werden, stoßen in Zukunft an ihre wirtschaftlichen und technischen Grenzen. Das Limit der erreichbaren Strukturgrößen liegt bei der dominierenden optischen Durchsatz-Lithographie bei circa 50 bis 70 Nanometern. Dieses Ziel kann nach dem heutigen Kenntnisstand nur mit einer rapide einhergehenden Kostensteigerung erkaufte werden. Direkte, seriell ablaufende Verfahren der Elektronen- und Ionenstrahlolithographie erschließen zwar noch kleinere Strukturbereiche, sind jedoch aufgrund ihres Funktionsprinzips nicht produktiv genug. Aus diesen Gründen sucht die Halbleiterindustrie verstärkt nach kostengünstigen alternativen Lithographieverfahren. In Anlehnung an das von Johann Gutenberg im Jahre 1452 erfundene Buchdruckverfahren wird am Institut für Halbleitertechnik und der Aachener AMO GmbH seit einigen Jahren ein neuartiges mechanisches Prägeverfahren (englisch Nanoimprint) entwickelt, mit dem inzwischen Strukturen und Bauelemente mit minimalen Dimensionen von bis zu 20 Nanometern äußerst kostengünstig hergestellt werden können.

Hierbei erfolgt die Herstellung der Strukturen durch das Einprägen eines lichttransparenten und geeignet strukturierten Stempels in einen extrem flüssigen Prägelack (englisch Resist), der zuvor auf einer Siliziumscheibe aufgebracht wird. Bereits bei minimalen Anpressdrücken quillt der Lack bei Raumtemperatur in die Vertiefungen des Stempels ein und das dabei entstehende Lackrelief entspricht der umgekehrten Replik des jeweils verwendeten Prägestempels. Das so entstandene Strukturgebilde wird anschließend mittels ultravioletter Lichteinstrahlung durch den Stempel nachträglich verfestigt. Nach der rückstandslosen Entformung des Stempels kann die geprägte Lackstruktur entsprechend der vorgesehen Anwendung weiterverarbeitet werden. Entscheidend für die

Güte des Prägeabdruckes ist in erster Linie die Qualität des Stempels. Dieser wird zu Beginn mittels Elektronenstrahl-Lithographie und Trockenätztechnik hergestellt. Bild 1 zeigt exemplarisch einen mit Nano-Schriftzügen versehenen Stempel. Die Vorlage für diese sogenannten Nano-Letters wurde der Bibel Gutenbergs entnommen.

Da die Präparation des Nano-Prägestempels relativ aufwändig ist, muss gewährleistet sein, dass er beliebig oft für die Prägungen verwendet werden kann. Dies wird erreicht, indem er nach seiner Herstellung mit einer extrem dünnen Antihafschicht schützend passiviert wird. Bisherige Ergebnisse belegen, dass somit mehr als 1.000 Abdrücke mit einem Stempel ohne Reinigungsschritte und messbare Abnutzungserscheinungen hergestellt werden können. Zur Demonstration der Anwendbarkeit des Verfahrens wurde die stark verkleinerte Originaltextseite der ersten Seite der 42zeiligen Bibel von Gutenberg

geprägt. In Bild 2 sind Aufnahmen der im Prägelack abgebildeten Bibelseite dargestellt. Diese Bibelseite hat eine Gesamtfläche von $100 \times 200 \mu\text{m}^2$ und beinhaltet kleinste Strukturdimensionen von nur 27 Nanometern. Bezogen auf eine Scheibe mit einem Durchmesser von 150 Millimetern könnten mit dieser Technik mehr als 1.200.000 Buchseiten gedruckt und gespeichert werden. Eines dieser Nanobücher mit den Gutenbergschen Bibelseiten wurde für das Deutsche Museum in München hergestellt und kann dort in der Abteilung für Elektronenmikroskopie besichtigt werden.

Für die kommerzielle Anwendung des Nanoimprint-Verfahrens ist die Entwicklung eines reproduzierbaren seriellen Prägeprozesses (englisch step&repeat) auf Scheibenebene erforderlich. Dazu wurde, in Zusammenarbeit mit der Firma Raith GmbH in Dortmund, eine Präge-Maschine entwickelt, mit der es möglich ist, eine Vielzahl von einzelnen Druckvorgängen auf einer Silizium-

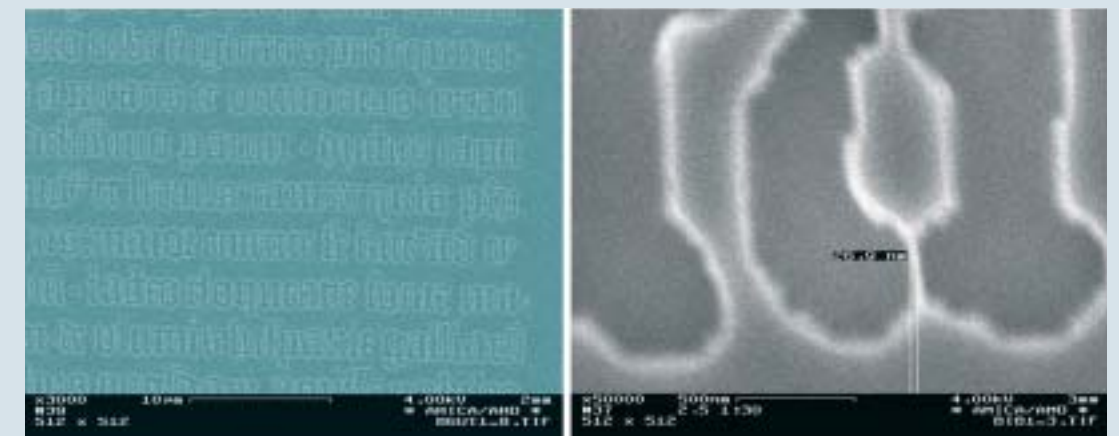


Bild 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der im Prägelack hergestellten Bibelseite.

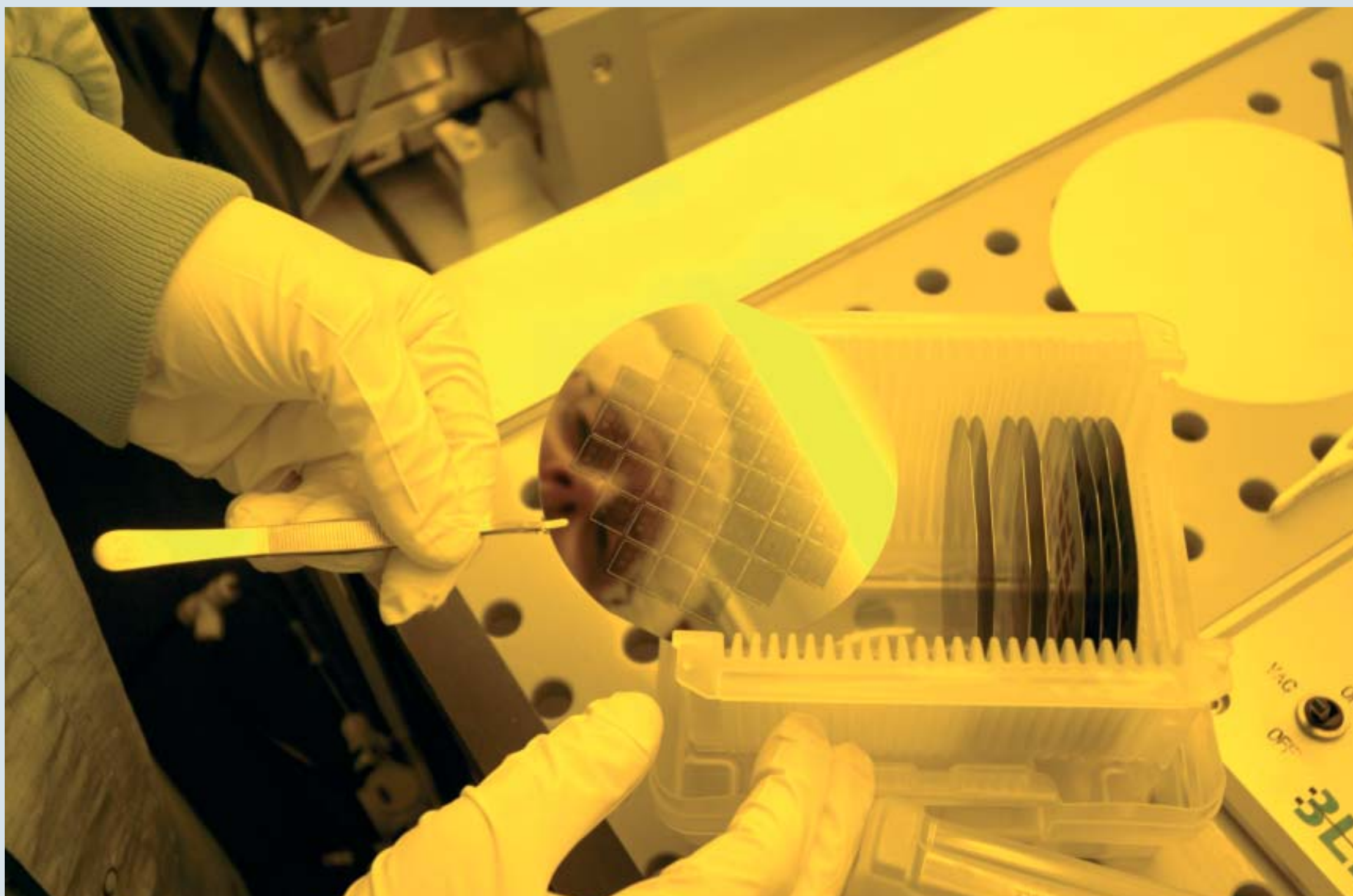


*Bild 3: Blick auf einen im Nanoimprint-Verfahren geprägten Wafer mit Teststrukturen im Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen.
Foto: Peter Winandy*

Scheibe nacheinander durchzuführen. In Bild 3 ist eine mit „unsichtbaren“ Transistor-Nanostrukturen bedruckte Silizium-Scheibe mit 37 einzelnen Stempelabdrücken dargestellt. Bild 4 ist eine Vergrößerung eines Abdruckes von Bild 3 und enthält Details der 80 Nanometer breiten Transistorstrukturen.

Das Nanoimprint-Verfahren besitzt aufgrund seiner hohen Auflösung, Flexibilität und seines erheblichen Kostenvorteils gute Chancen für ein enorm breites Anwendungsspektrum. In Forschungslaboren der Mikro- und Nanoelektronik kann es jetzt schon zur Herstellung von Strukturen bis in den Zehn-Nanometer-Bereich eingesetzt werden. Mit zusätzlichen, noch zu realisierenden Justagetechniken sind in Zu-

kunft komplette Bauelemente-Serien herstellbar. Im Bereich der integrierten Optik können damit Ringresonatoren und Wellenleiter für die optische Datenübertragung mit extrem kleinen Bauelementdimensionen kosteneinsparend hergestellt werden. Ein besonders attraktiver Markt wird im Bereich der Bio-Sensorik erwartet. Nanoimprint bietet sich hier besonders bei Strukturdimensionen kleiner als 100 Nanometer an, zumal es auch auf billigen Kunststoffsubstraten angewendet werden kann. Weitere potenzielle Einsatzgebiete lassen sich auch für die Bereiche der Mikrosystemtechnik und chemischen Analytik prognostizieren. ●

Autoren:

Dr.-Ing. Markus Bender ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der AMO-GmbH Aachen.
Dipl.-Ing. Andreas Fuchs ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der AMO-GmbH Aachen.
Dipl.-Ing. Martin Otto ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Halbleitertechnik.
Dr. rer.nat. Ing. Bernd Spangenberg ist Leiter des Forschungsbereichs Nanotechnologie am Institut für Halbleitertechnik.
Dr.-Ing. Boris Vratzov ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der AMO-GmbH Aachen.

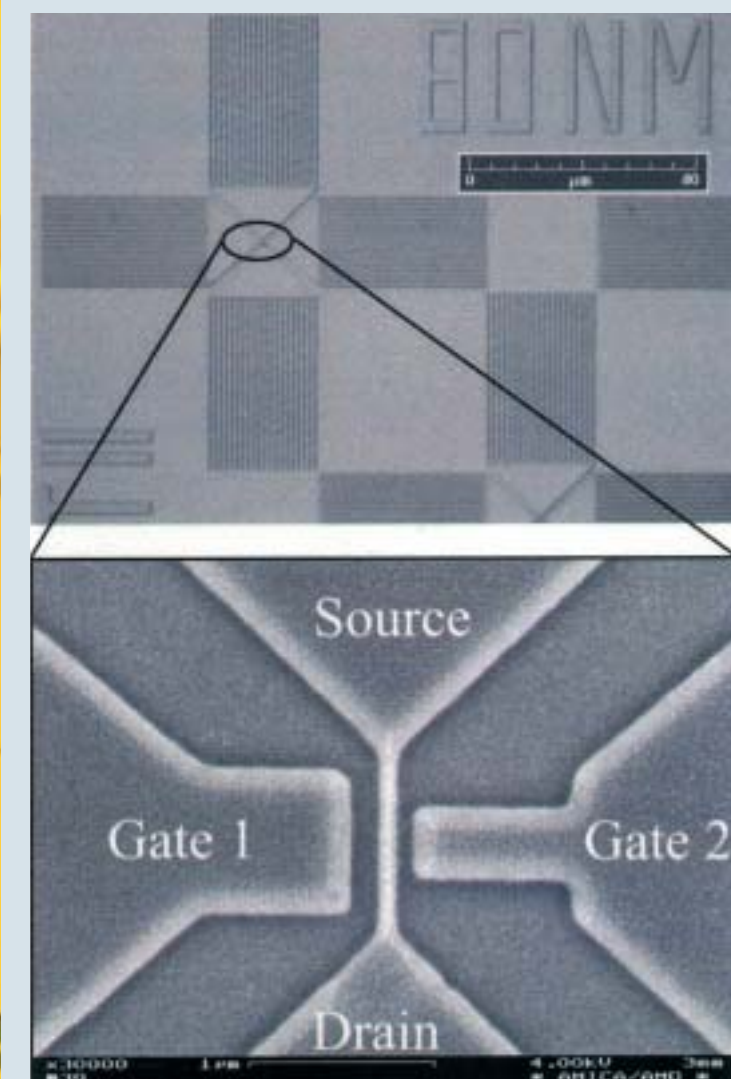


Bild 4: Detail-Aufnahme von Nanostrukturen eines geprägten Quantendraht-Transistors aus Bild 3.

Martin Möller, Marcel Ott

Bis ins kleinste Detail

Nanolithographie mit selbstorganisierenden Blockcopolymeren

Die Forschungsschwerpunkte unserer Arbeitsgruppe auf dem Gebiet der Nanotechnologie sind selbstorganisierte Oberflächenstrukturen und ihre Kombination mit konventionellen lithographischen Techniken. Dies beinhaltet die Synthese und Handhabung nanometergroßer Funktionseinheiten, deren gezielte räumliche Anordnung auf Substraten sowie den Einsatz dieser Substrate als Template für weiterführende Anwendungen, zum Beispiel als Masken für Ätzprozesse in der Halbleitertechnik. Ziel ist es, eine Verbindung zwischen kleinsten Funktionseinheiten wie Molekülen und konventioneller Mikrotechnik zu schaffen und damit Applikationen auf der Längenskala von zehn bis 100 Nanometer zu realisieren.

Prinzipiell existieren zwei unterschiedliche Ansätze, Nanostrukturen herzustellen. Konventionell werden Mikrostrukturen für elektronische und optische Bauelemente mit Hilfe verschiedener Lithographietechniken präpariert, also durch große Maschinen, welche in der Lage sind, kleine Strukturen zu schreiben. Die typischen Abmessungen liegen dabei im Bereich von einigen Mikrometern bis zu typisch etwa 100 Nanometern. Diese Vorgehensweise wird auch als „Top-down approach“ bezeichnet und stellt heutzutage das Standardverfahren zur Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen dar. Prinzipiell basieren sämtliche Halbleiterbauelemente und ihre Applikationen wie Computerchips, Mikrosensoren und Festplatten auf diesem Verfahren. Nachteilig ist der immense Aufwand, die diese Verfahren erfordern. Strukturen unter 100 Nanometer sind bisher in größerem Rahmen mit dieser Methodik kaum realisiert.

Die Natur arbeitet mit einem anderen Prinzip, dem so genannten „Bottom-up approach“. Kleinste Funktionseinheiten organisieren sich hierbei selbsttätig zu größeren Strukturen und entwickeln neue Eigenschaften. Obwohl dieser Ansatz in der Natur sehr erfolgreich praktiziert wird (man denke nur an unsere DNA und

den Zellkern als Träger sämtlicher Information zur Herstellung eines Menschen) gelingt die technische Umsetzung bisher nur auf Längenskalen weniger Nanometer. In unserer Arbeitsgruppe kombinieren wir beide Verfahren, um Strukturgrößen von zehn bis 100 Nanometern für die konventionelle Mikrosystemtechnik zu erschließen. Im Vergleich mit dem weit verbreiteten „Top-down approach“ erlaubt uns dies, kleinere Strukturen mit wesentlich geringerem Aufwand zu erzeugen. Dies wird im Folgenden anhand von mit Gold dekorierten Siliziumsubstraten verdeutlicht.

Bild 1 skizziert den Prozessablauf, bestehend aus vier Arbeitsschritten zur Herstellung aperiodischer Strukturen aus Goldclustern. Erster Schritt auf dem Weg zu unseren Nanostrukturen ist die Templatherstellung. Unter Template versteht man dabei die Vorgabe einer räumlich begrenzten Geometrie, die das Wachstum, die Struktur und die Anordnung des darauf aufgebauten Systems bestimmt. Dies wird durch die Prozessierung eines polymerbasierten Resists auf Silizium erreicht. Wird dieser lokal belichtet, so vernetzt er oder es werden wie in unserem Falle Polymer-Bindungen aufgebrochen. Legt man die derart belichteten Strukturen dann in ein Lösungsmittel, so werden die belichteten Bereiche ausgewaschen. Übrig bleibt eine von Gräben und Löchern analog der Belichtung strukturierte Schicht aus Polymeren auf Silizium. Dies ist die so genannte Resist-Maske. Dieses Verfahren ist im Prinzip eine vereinfachte Darstellung eines Top-down Prozesses wie er jeden Tag zur Herstellung von Computerchips verwendet wird. Wir erreichen mit diesem Verfahren eine kleinste mögliche Strukturgröße von 200 Nanometern, unsere Gräben und Löcher haben also eine minimale Ausdehnung von 200 Nanometer ansonsten aber eine variable Geometrie. Bild 2 zeigt einen Schnitt durch derartige Gräben. Die Grabenhöhe ist mit 800 Nanometern durch die Dicke der Lackschicht vorgegeben, die Geometrie und Anordnung der



Bild 1: Verfahren zur Abscheidung von Goldclustern in aperiodischen Mustern.

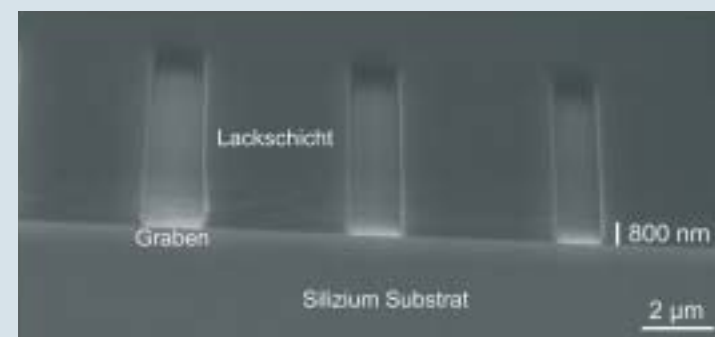


Bild 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Resistmaske.

Gräben ist fast beliebig wählbar. Im nächsten Arbeitsschritt werden diese Gräben oder diverse andere Lochstrukturen mit Mizellen befüllt. Diese Mizellen sind aus Blockcopolymeren aufgebaut, die sich in geeigneten Lösungsmitteln selbstständig zu kugelförmigen Gebilden von 50 bis 200 Nanometer Durchmesser anordnen. Hier kommt also die Selbstorganisation kleiner Funktionseinheiten, der „Bottom-up approach“ zum Tragen. Anschaulich kann man sich die Mizellen als weiche doppelwandige Hohlkugeln gefüllt mit Edelmetallsalzen vorstellen. Verdampft das Lösungsmittel nach Aufbringen auf das Substrat, so lagern sich diese Mizellen je nach Konzentration, Mizellgröße und Grabentiefe entweder überall oder in schmalen Linien entlang den Grabenkanten ab. Bild 3 zeigt eine Seitenansicht zweier Mizellen auf Silizium. Im rechten Teilbild wurde eine Mizelle durch Kapillarkräfte an der unteren Kante eines Grabens abgeschieden. Schön zu erkennen ist die Deformation der Mizelle an der Kante, die schwarzen Punkte in der Mizelle stellen kleine Goldkörnchen dar. Im letzten Arbeitsschritt wird nun der Resist vom Siliziumsubstrat gelöst. Dies gelingt durch ein Bad in Aceton. Sämtliche auf dem Resist haftenden Mizellen werden mit entfernt. Einzig jene in direktem Kontakt zum Substrat, also jene in den Gräben verbleiben auf der Silizium-Oberfläche. Nun bleibt nur noch die Umwandlung der goldsalzbeladenen Mizellen in elementare Goldteilchen. Dies gelingt durch einen Plasmaprozess. Im Prinzip ist dies nichts anderes als das Abbrennen der Polymerhülle der Mizelle durch Sauerstoff, dabei wird auch das Goldsalz zu elementarem Gold reduziert.

Die Bilder 4a bis 4c zeigen diverse Muster, die mit dieser neuartigen kombinierten Strukturierungstechnik hergestellt wurden. Sowohl flächige Bedeckung wie auch Linien aus einzelnen Nanoclustern sind möglich. Alle Aufnahmen erfolgten mittels eines Elektronenmikroskops. Die gezeigten Cluster bestehen aus elemen-

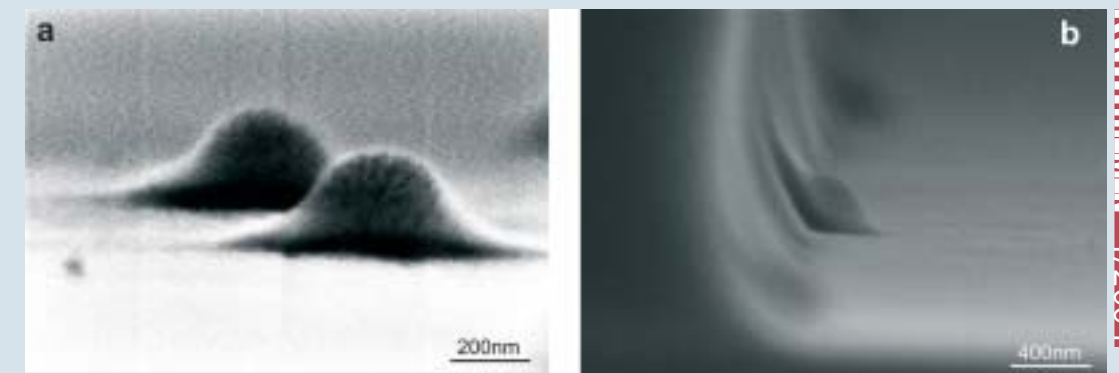


Bild 3: (a) Mizellen abgeschieden auf Silizium. (b) Mizelle angelagert an der unteren Grabenkante.

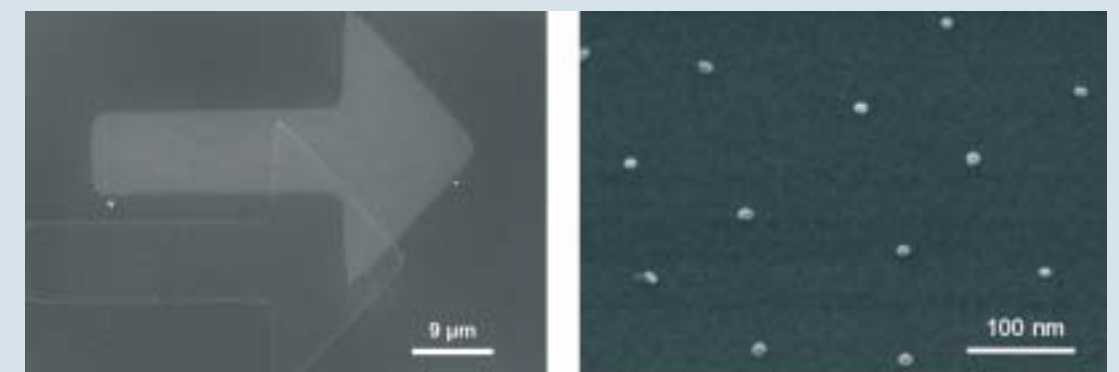


Bild 4a: Links: Pfeil bedeckt mit 30 nm Goldschicht und etwas versetzt die gleiche Struktur bedeckt mit

10 nm hohen Goldclustern. Rechts: Einzelne Goldcluster durch Selbstorganisation angeordnet in hexagonalem Muster.

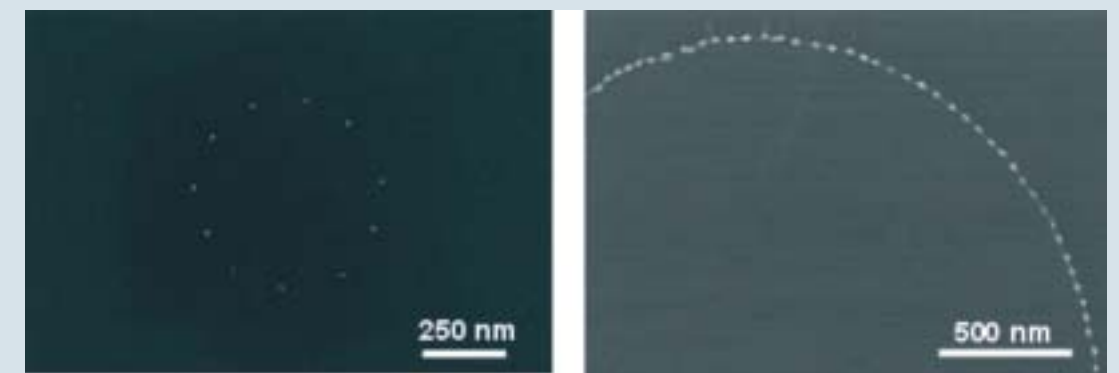


Bild 4b: Variation der Mizellkonzentration bei Belegung von Lochstrukturen. Im rechten Bild ist die Konzentration um einen Faktor 10 größer als links.

Matthias Bückins, Joachim Mayer, Thomas Weirich

Einblicke in die aller kleinsten Dimensionen

Rasterionenstrahl- und Transmissionselektronenmikroskope sind wichtige Werkzeuge der Nanotechnologie

1/2004 **RWTH THEMEN**

tares Gold. Bild 4a demonstriert anschaulich die Reduktion der typischen, durch die Belichtung vorgegebenen Strukturgröße. Beide Pfeile im linken Bild wurden mit identischen Resistmasken erstellt. Das obere Templat wurde anschließend mit 30 Nanometer Gold bedampft, in das untere Pfeiltemplat wurden Mizellen eingefüllt. Im Gegensatz zum bedampften Gold bilden die Goldcluster nur den Umriss des Pfeils ab und ermöglichen so filigranere Strukturen. Der rechte Bildausschnitt zeigt die hexagonale Anordnung von Goldclustern auf einem ebenen Substrat. Dieses Muster entsteht beim Verdampfen des Lösungsmittels durch die dichteste Kugelpackung der Mizellen. Schön zu erkennen ist die wohldefinierte Nahordnung, aus jeder Mizelle entsteht exakt ein Goldcluster definierter Größe. Bild 4b zeigt den Einfluss der Parameter Konzentration und Mizellgröße auf. Mizellen aus langkettigen Blockcopolymeren führen zu einer Kette aus Einzelpartikeln während kleinere Mizellen dichter packen und zu einer verbundenen Linie aggregieren können.

Bild 4c zeigt im Gegensatz zu den vorangegangenen Bildern links eine flächige Bedeckung. Dies kann durch eine Verkleinerung der Grabentiefe erreicht werden. Der rechte Bildausschnitt zeigt eine rasterkraftmikroskopische Aufnahme eines größeren Bildausschnittes. Mit diesem Verfahrens können die Clusterhöhen durch Abtasten ermittelt werden.

Zusammenfassend erlaubt uns also die Kombination von „Bottom-up“ Selbstorganisation und konventioneller „Top-down“ Lithographie eine Verkleinerung der typischen Strukturgrößen um ein bis zwei Zehnerpotenzen und die gezielte Anordnung kleinster Edelmetallcluster in beliebigen Strukturen. Dies erreichen wir ohne jenen apparativen Mehraufwand, welcher erforderlich ist, um mittels konventioneller Lithographie in Bereiche unter 100 Nanometer Strukturgrößen vorzustoßen.

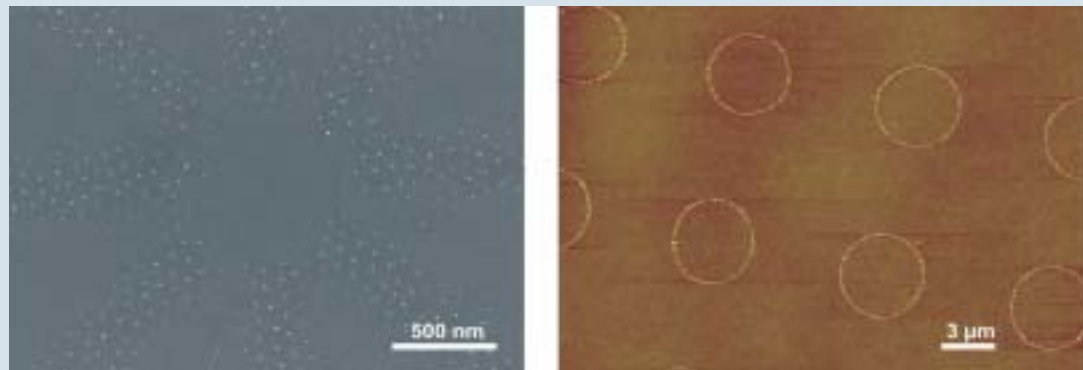


Bild 4c:
*Links: Sternmuster flächig belegt mit Clustern von 10 nm Höhe
Rechts: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme, diese Methodik erlaubt, die Höhe der Goldcluster durch Abtastung mit einer feinen Nadel zu bestimmen.*

Autoren:

Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Martin Möller ist Inhaber des Lehrstuhls für Textilchemie und Makromolekulare Chemie sowie Leiter des Deutschen Wollforschungsinstituts (DWI). Dipl.-Phys. Marcel Ott ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Deutschen Wollforschungsinstituts (DWI).

Der Veranstaltungsort der Region.

Ob Kongress, Tagung, Konzert, Ballettaufführung, Ball oder Ausstellung: hier finden Sie stets den richtigen Rahmen.

Top-Technik, variables Raumangebot, Spitzen-gastronomie, Kongress-Service etc. sind hier selbstverständlich!

Das gewisse "Mehr" bei uns: Individueller Service.

Wir informieren Sie!

Eurogress Aachen
Monheimsallee 48
52062 Aachen
Telefon 0241/9131-230
Telefax 0241/9131-200
info@Eurogress-Aachen.de

Bei der Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen der Nanotechnologie und bei der Optimierung bestehender nanotechnologischer Systeme spielt die Nanoanalytik eine entscheidende Rolle. Verschiedene, sich größtenteils ergänzende Verfahren erlauben eine effiziente Charakterisierung der nanoskaligen Strukturen – einschließlich ihrer Kristallographie und chemischen Zusammensetzung sowie ihrer physikalischen Eigenschaften – bis hinunter auf die atomare Ebene. Die Nanoanalytik liefert damit den Schlüssel zum Verständnis der Eigenschaften der Nanostrukturen. Für eine Optimierung der nanotechnologischen Systeme, für die Fehlerdiagnose und auch für die Einschätzung möglicher Gefahrenpotenziale ist die Nanoanalytik unverzichtbar.

Die wichtigsten nanoanalytischen Verfahren sind heute die verschiedenen Techniken der Rastersondenmikroskopie sowie die elektronenmikroskopischen Techniken und bei letzteren insbesondere die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM). Im vorliegenden Beitrag wollen wir Beispiele aus unseren Arbeiten mit dem am Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE) neu installierten hochauflösenden analytischen Transmissionselektronenmikroskop vorstellen. Die exemplarischen Anwendungen stammen aus Kooperationen mit anderen RWTH-Instituten und sollen das Potenzial dieser neuen Methoden verdeutlichen.

Eine besondere Rolle spielt hierbei auch ein weiteres neues Gerät am GFE, ein Rasterionenstrahlmikroskop – besser bekannt unter der englischen Bezeichnung Focused Ion Beam Workstation (FIB). Die FIB-Workstations sind in der Halbleiterindustrie seit einigen Jahren unentbehrliche Werkzeuge zur Defektanalyse und Chipreparatur, sowohl in den Entwicklungslabors als auch in den Produktionslinien. Die exzellenten Möglichkeiten zur Materialbearbeitung im Nanometer-Maßstab haben der FIB-Technologie aber auch ein breites Feld anderer Einsatzmöglichkeiten eröffnet, wie

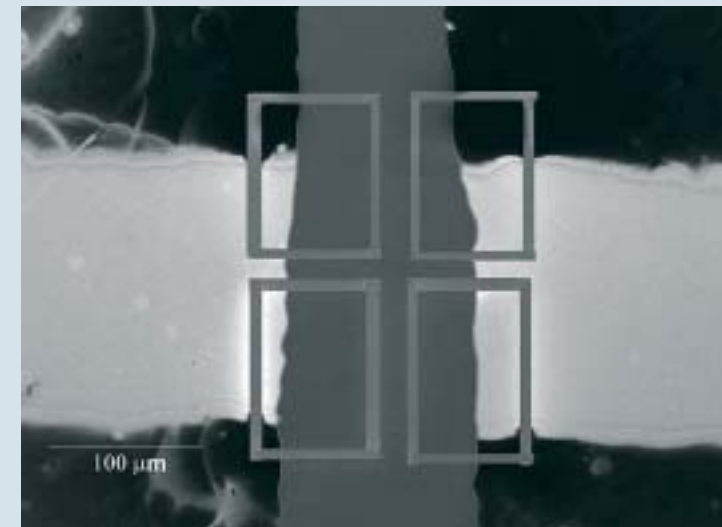


Bild 1: Einsatz der FIB Workstation zur Strukturierung eines MRAM-Kontakts. Der ursprüngliche Kontakt wurde durch eine Schattenmaske aufgedampft.

FIB-Schnitte bis zum Substrat unterbrechen die elektrisch leitfähige Verbindung, so dass nur noch das zentrale Kreuz zum Tunnelwiderstand beiträgt.

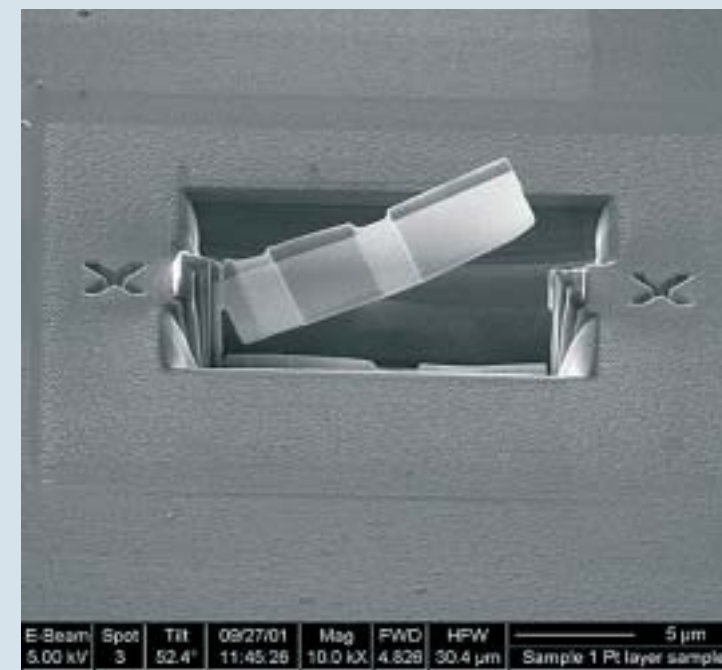


Bild 2a: Beispiel für die Präparation einer dünnen TEM-Lamelle aus einer MRAM-Teststruktur wie der in Bild 1 gezeigten, die aus zwei gekreuzten Co-Leiterbahnen besteht. Zwei Kreuze markieren den Bereich aus denen durch Präparation von zwei tiefen Gräben die FIB-Lamelle herauspräpariert wird.

zum Beispiel die Bearbeitung magnetischer Festplatten-Leseköpfe, die auf dem Giant-Magnetoresistance (GMR)-Effekt beruhen, oder die Herstellung besonders scharfer Spitzen für die Rastersondenmikroskopie. Moderne FIB-Workstations, wie das am GFE installierte Gerät, können heute Strukturen mit Dimensionen bis unter zehn Nanometer generieren und eignen sich damit besonders zur Herstellung von Nanostrukturen an denen man etwa den Spintransport oder auch Quanteneffekte untersuchen kann (Bild 1).

Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld haben die FIB-Geräte in jüngster Zeit auch in der Probenpräparation für die Transmissionselektronenmikroskopie gefunden. Mit Hilfe des fokussierten Ionenstrahls lassen sich gezielt dünne, elektronentransparente Lamellen von fast jedem beliebigen Material anfertigen. Die realisierbaren Probendicken im Bereich zwischen 30 und 100 Nanometer sind dabei ideal für viele verschiedene TEM-Untersuchungsmethoden. Bild 2a zeigt am Beispiel einer MRAM-Probe die grabenförmigen Vertiefungen, die man durch Absputtern des Materials mit Hilfe des Gallium-Ionenstrahls in das Probenstück einbringt. Im Zentrum bleibt die elektronentransparente Lamelle lose stehen, die man anschließend mit Hilfe eines Mikromanipulators auf einen geeigneten TEM-Trägerfilm umsetzen kann (Bild 2b).

Zur Durchführung der TEM-Untersuchungen steht am GFE seit Oktober 2002 das bereits erwähnte Transmissionselektronenmikroskop mit Feldemissionskathode und allen analytischen Zusätzen (Röntgenfluoreszenzanalyse mit EDX-Spektrometer, Energiefilter und Dunkelfelddetektor für Z-Kontrast-Abbildung) zur Verfügung. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Möglichkeiten des Energiefilters, das anhand der charakteristischen Energieverluste der verschiedenen chemischen Elemente in schneller und einfacher Weise erlaubt, ihre zweidimensionale Verteilung abzubilden. Den zugrundeliegenden Prozess wollen wir an ei-

nem einfachen Atommodell (Bild 3) kurz erläutern: Schlägt ein Strahlelektron ein Elektron aus einer inneren Schale eines Atoms in der Probe heraus, so erfährt es dabei einen Energieverlust. Dieser Energieverlust ist aber nicht beliebig, da auf das herausgeschlagene Elektron mindestens seine Bindungsenergie übertragen werden muss, es existiert also eine Schwellenergie für diesen Prozess. Diese äußert sich in einer elementspezifischen charakteristischen Kante im Energieverlustspektrum. Justiert man das Energiefilter auf diese charakteristische Kante, so kann man die Verteilung der betreffenden Elemente direkt und mit hoher Ortsauflösung abbilden.

Im Folgenden soll mit Beispielen aus zwei verschiedenen Anwendungen aus dem Bereich der Nanotechnologie der Einsatz und die Leistungsfähigkeit der neuen Geräte und Methoden demonstriert werden.

MRAM-Speicherelemente

Die MRAM (Magnetic Random Access Memory)-Speicherregister stellen eine vielversprechende Alternative zu den herkömmlichen Computerarbeitspeichern (DRAMs) und eventuell zukünftig sogar zu den Festplattenspeichermedien dar. In diesen neuartigen Speichern wird die Information in ferromagnetischen Domänen und nicht wie bisher als elektrische Ladung gespeichert. Die gespeicherte Information ist somit nichtflüchtig, muss also nach dem Lesen nicht wieder eingespeichert werden und ist nach Abschalten und Wiederinbetriebnahme des Computers sofort wieder verfügbar. Eine MRAM-Zelle besteht im einfachsten Fall aus zwei ferromagnetischen Schichten, die durch eine Tunnelbarriere getrennt sind. Eine in unserem FIB hergestellte Aufnahme einer Teststruktur, die Mitarbeiter am II. Physikalischen Institut der RWTH Aachen hergestellt haben, zeigt Bild 1. Die Struktur besteht aus einer unteren ferromagnetischen Anschlussleiterbahn aus metallischem Kobalt (Co) mit feststehender Magnetisierungsrichtung und einer zweiten darü-



Bild 2b: Lichtmikroskopische Aufnahme der dünnen TEM-Lamelle nach der Entnahme mit-

tels eines Mikromanipulators und Fixierung auf einem TEM-Trägernetzchen.

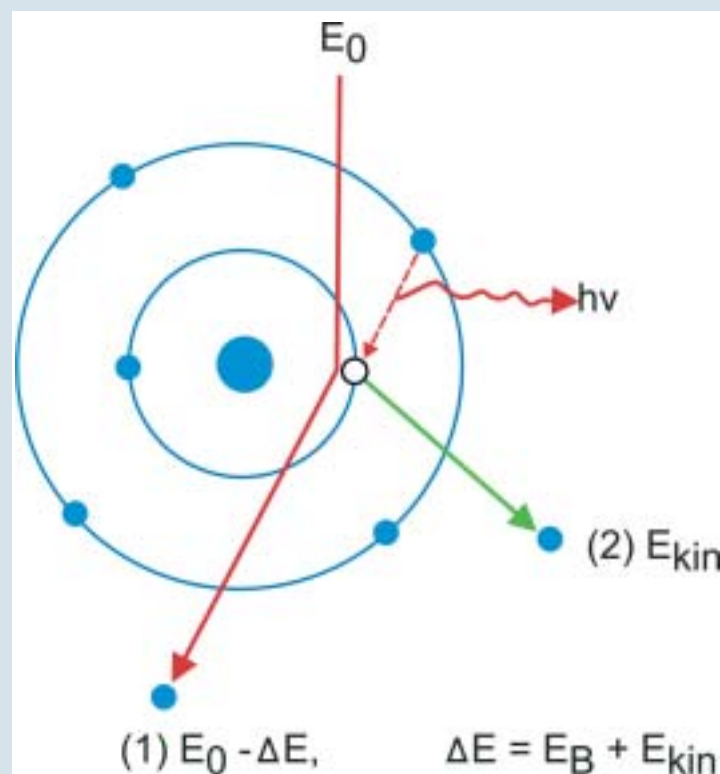


Bild 3: Schematische Darstellung eines inelastischen Stoßprozesses eines Strahlelektrons mit einem Elektron in einer inneren Schale eines Atoms in der Probe.

ber liegenden Co-Leiterbahn mit einer durch ein von außen angelegtes Feld schaltbaren Magnetisierung. Dazwischen liegt eine dünne Tunnelbarriere, welche die Elektronen, um in die obere Schicht zu gelangen, in einem quantenmechanischen Tunnelprozess überwinden müssen. Die relative Widerstandsänderung zwischen den beiden Schaltzu-



ständen der MRAM-Zelle hängt somit stark von der Qualität der Tunnelbarriere ab.

Ziel der TEM-Untersuchungen am GFE war, die Schichtstruktur im Bereich eines Kontakts zwischen zwei Anschlussleiterbahnen mit hochauflösenden und analytischen Verfahren zu charakterisieren. Eine gezielte Probenentnahme im Bereich der eigentlichen

Kontakte war nur mit der FIB-Methode möglich. Bild 2a zeigt eine fertige TEM-Lamelle vor der Entnahme mittels Lift-Out-Prozess. In Bild 4a ist eine Hellfeld-Abbildung der Kontaktstruktur sowie in Bild 4b ein Elementverteilungsbild für Silizium, Kobalt und Sauerstoff für den gleichen Bereich dargestellt. Um die in Bild 4b dargestellte Information zu erhal-

ten, nimmt man zunächst die einzelnen Elementverteilungsbilder mit Hilfe des Energiefilters für die vorhandenen Elemente anhand des oben beschriebenen Prozesses auf. Dann kann man die resultierenden Bilder in drei unterschiedlichen Farben direkt übereinander legen. Die Farben dienen in solchen Bildern also nicht nur der besseren

Einführen eines Probenhalters in das hochauflösende Analytische Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM) des Gemeinschaftslabors für Elektronenmikroskopie GFE der RWTH Aachen.
Foto: Peter Winandy

Veranschaulichung, sondern sie repräsentieren auch direkt das im Experiment erhaltene chemische Signal. Im rot dargestellten Sauerstoff-Verteilungsbild sind die Oxid-Tunnelbarriere und die natürliche Oxid-Schicht auf dem Silizium-Substrat direkt erkennbar. Für die Funktion der Bauelemente ist wichtig, dass es sich um fehlerfreie Schichten mit kon-

Bild 4a: TEM-Abbildung des Querschnitts durch die MRAM-Zelle. Deutlich erkennbar sind das Silizium-Substrat sowie die zwei Kobalt-Schichten (dunkel).

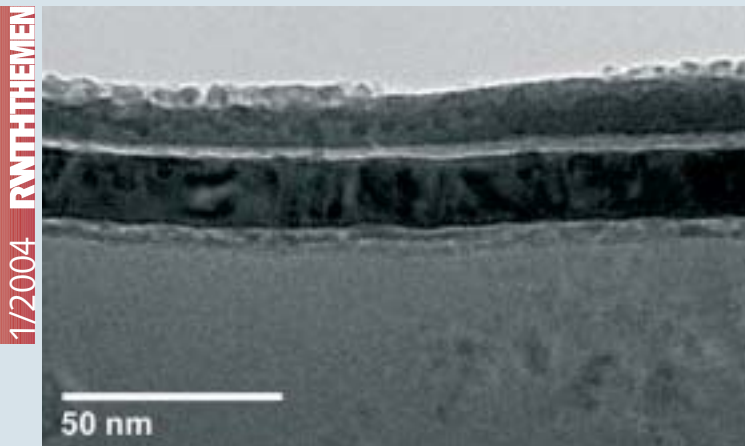
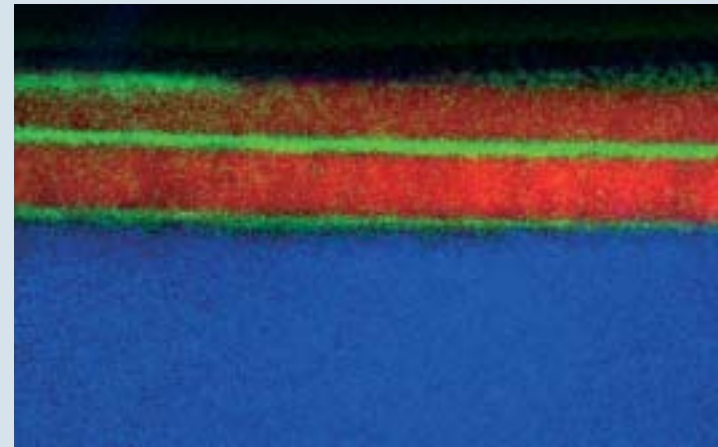


Bild 4b: Elementverteilungsbild für die Elemente Silizium (blau), Kobalt (rot) und Sauerstoff (grün). Besonders deutlich ist der Verlauf und die homogene Schichtdicke der Aluminiumoxid-Tunnelbarriere zwischen den beiden Kobalt-Lagen (rot) zu erkennen.



stanter Dicke handelt. Der Verlauf der Tunnelbarriere mit atomarer Auflösung ist in Bild 5 wiedergegeben. Anhand von solchen Abbildungen lässt sich erkennen, dass die amorphe Aluminiumoxid-Tunnelbarriere zwar eine homogene Schichtdicke von etwa zwei Nanometern besitzt, aufgrund der polykristallinen Natur der angrenzenden Kobaltlagen aber einen leicht gekrümmten Verlauf hat.

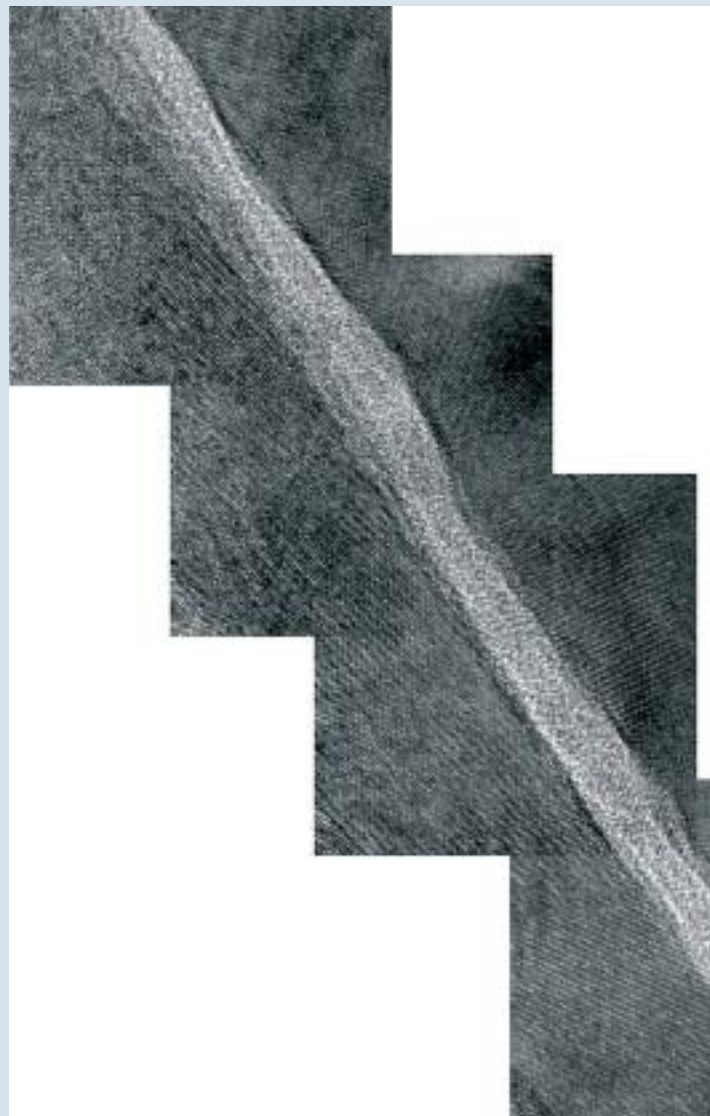


Bild 5: Hochauflösende Abbildung des Verlaufs der Aluminiumoxid-Tunnelbarriere anhand einer Serie von TEM-Abbildungen. Hierbei wurde die Vergrößerung so hoch gewählt, dass atomare Strukturen erkennbar sind. So sind in den Kobaltlagen die Netzebenen der einzelnen Körner zu erkennen, während die Aluminiumoxid-Schicht eine amorphe Struktur besitzt.

Nanotransistoren auf Silizium-Basis

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der neuen präparativen und analytischen Methoden sind Untersuchungen an Feldeffekt-Transistoren mit Dimensionen im Zehn-Nanometerbereich. Auf die besonderen Eigenschaften dieser am Advanced Microelectronic Center Aachen (AMICA) hergestellten Bauelemente wird im Detail im Artikel „Schalten und Walten im Nanokosmos“ in diesem Themenheft eingegangen. Mit dem Transmissionselektronenmikroskop kann man zwar prinzipiell wichtige chemische und strukturelle Informationen über diese kleinsten Transistoren gewinnen, das Hauptproblem ist hierbei jedoch die Probenpräparation. Mit den konventionellen Präparationsmethoden wäre es absolut unmöglich, ein nur wenige zehn Nanometer großes elektronisches Bauteil genau im Querschnitt zu treffen. Dies ist uns nun aber mit Hilfe der FIB-Präparation gelungen und Bild 6a zeigt in der Übersicht einen FIB-Querschnitt durch einen am AMICA hergestellten EJ-MOSFET (Electrically Variable Shallow Junction MOSFET). Die wichtigsten Komponenten dieses nanoskaligen Transistors sind in Bild 6b dargestellt, insbesondere der im Querschnitt als vertikaler Steg erkennbare Gate-Kontakt. Das Elementverteilungsbild in Bild 6c zeigt in rot die Anordnung der aus elementarem Silizium bestehenden Kontakte und in grün das zur ihrer Isolation dienende

Bild 6a: Übersichtsaufnahme eines EJ-MOSFETs im Querschnitt in einer dünnen FIB-Lamelle.

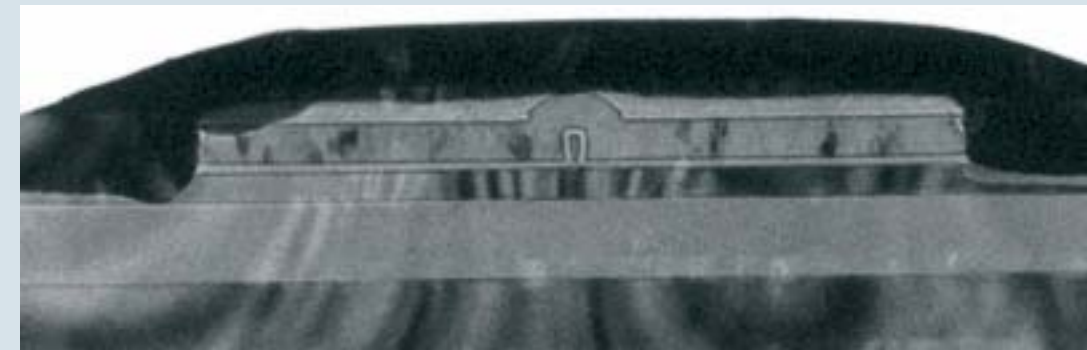
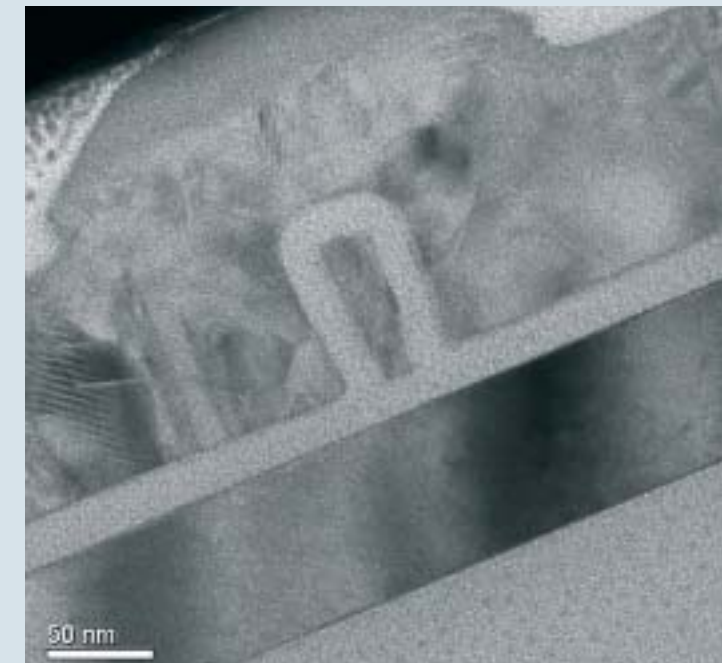


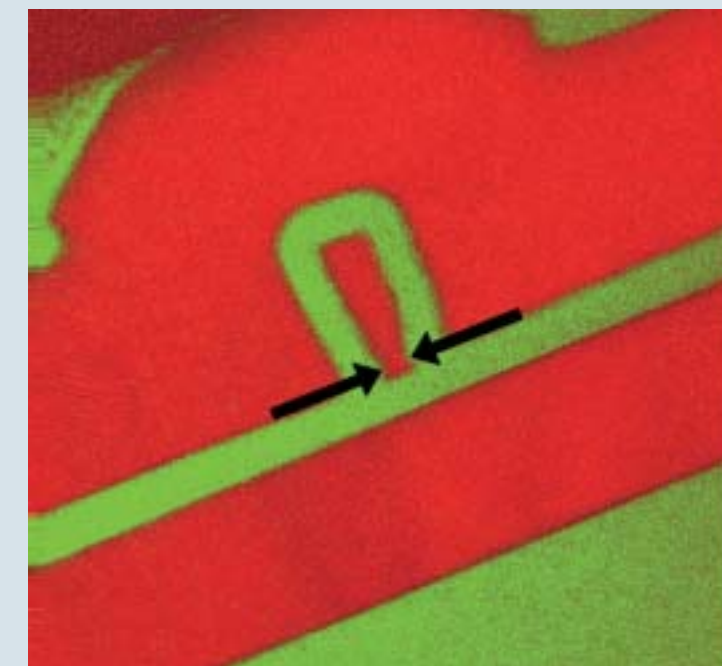
Bild 6b: Vergrößerte Abbildung des zentralen Bereichs des Transistors mit dem vertikalen Gate-Steg, welcher im Querschnitt erkennbar ist.



Oxid. In diesem Elementverteilungsbild kann die für die elektrischen Eigenschaften maßgebliche Dicke des Gate-Stegs direkt oberhalb der Source-Drain Verbindung gemessen werden. Den gemessenen Wert bezeichnet man als die Gate-Länge und es ergibt sich für den gezeigten Transistor ein Wert von zwölf Nanometern.

Die gezeigten Anwendungen illustrieren, dass die Transmissionselektronenmikroskopie in Kombination mit der FIB-Probenpräparation ein wichtiges Werkzeug der Nanoanalytik darstellt. Insbesondere kann man damit den inneren Aufbau der Objekte mit atomarer Auflösung ermitteln und deren chemische Zusammensetzung zweidimensional mit einer Auflösung von unter einem Nanometer analysieren. Erst auf der Basis dieser analytischen Möglichkeiten lässt sich in vielen Fällen der Schlüssel zum Verständnis und zur gezielten Optimierung der Eigenschaften der Nanostrukturen finden. ●

Bild 6c: Elementverteilungsbild für Silizium (rot) und Sauerstoff (grün). Für die mit Pfeilen markierte Gate-Länge ergibt sich ein Wert von 12nm.



Autoren:

Dr. rer.nat. Matthias Bückins ist als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE) der RWTH Aachen verantwortlich für den Bereich FIB-Anwendungen. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Joachim Mayer betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Mikrostrukturanalytik und ist Leiter des GFE. Dr. rer.nat. Thomas Weirich ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am GFE und Gruppenleiter für den Bereich Transmissionselektronenmikroskope am GFE.

Bruno Lengeler, Christian Schroer

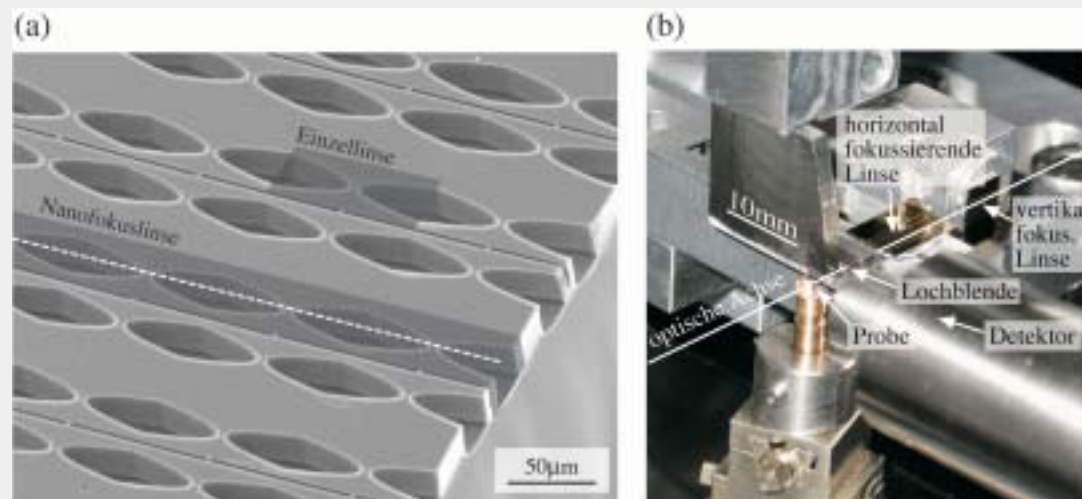
Nanoanalytik mit harter Röntgenstrahlung

Neue Optiken erschließen die Nanowelt

1/2004 RWTH THEMEN

Für moderne Schlüsseltechnologien, wie zum Beispiel die Gentechnik oder die Nanotechnologie, ist das Verständnis des Aufbaus der Materie auf der Nanometerskala unerlässlich. Zur Untersuchung von Strukturen im Nanometerbereich gibt es eine Reihe etablierter Techniken, etwa die Transmissions- und Rasterelektronenmikroskopie sowie die Sondentechniken Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie. Diese Methoden bieten eine hohe Ortsauflösung bis in den atomaren Bereich. Die Transmissionselektronenmikroskopie benötigt jedoch eine aufwendige Probenpräparation, um die Proben bis auf wenige Atomlagen zu dünnen. Die übrigen Sonden sind weitgehend oberflächen sensitiv.

Die Röntgenmikroskopie, die sich in den letzten zehn Jahren rasant weiterentwickelt hat, bietet dazu komplementäre Untersuchungsmöglichkeiten. Eine besondere Stärke der Röntgenstrahlung ist ihr hohes Durchdringungsvermögen in Materie, das es erlaubt, das Innere eines Körpers zerstörungsfrei zu untersuchen. In Kombination mit Tomographie erlaubt die abbildende Röntgenmikroskopie die Bestimmung der dreidimensionalen Struktur komplexer Gebilde mit Submikrometer-Auflösung, ohne dass es einer besonderen Probenpräparation bedürfen würde. Virtuelle Schnitte gestatten es, die Struktur in jeder beliebigen Ebene und die Zusammenhangsverhältnisse in einer Probe zu analysieren. Mit Hilfe einer Röntgenraster sonde ist es zudem möglich, etablierte Röntgentechniken, wie zum Beispiel die Röntgenbeugung, Kleinwinkelstreuung, Fluoreszenzanalyse und Absorptionsspektroskopie, ortsaufgelöst durchzuführen. Dadurch können Struktur, chemische Zusammensetzung, chemische Wertigkeit spezieller Elemente in einer Probe mit einer Ortsauflösung weit unterhalb eines Mikrometers bestimmt werden. Dies ermöglicht zum Beispiel die Analyse von nanokristallinen Materialien und Nanostrukturen. Die Röntgenmikroskopie wurde begünstigt durch die Entwicklung neuer



Röntgenoptiken und die Verfügbarkeit von Röntgenstrahlung aus modernen Synchrotronstrahlungsquellen, wie zum Beispiel der ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) in Grenoble, der APS (Advanced Photon Source) in Argonne, USA, und SPring-8 in Japan.

Am II. Physikalischen Institut B der RWTH Aachen haben wir in den letzten Jahren neue Röntgenoptiken entwickelt, die es gestatten, ein hoch auflösendes Mikroskop für den harten Röntgenbereich zu bauen, das in einem Gesichtsfeld von bis zu einem Millimeter eine Ortsauflösung von 100 Nanometern erreicht. Durch Kombination mit Tomographie entfaltet dieses Mikroskop seine volle Stärke und erlaubt die dreidimensionale Rekonstruktion eines Körpers mit hoher Auflösung. Alternativ können die Optiken zur Erzeugung eines intensiven Mikrostrahls eingesetzt werden, der für Röntgenrasterverfahren benötigt wird.

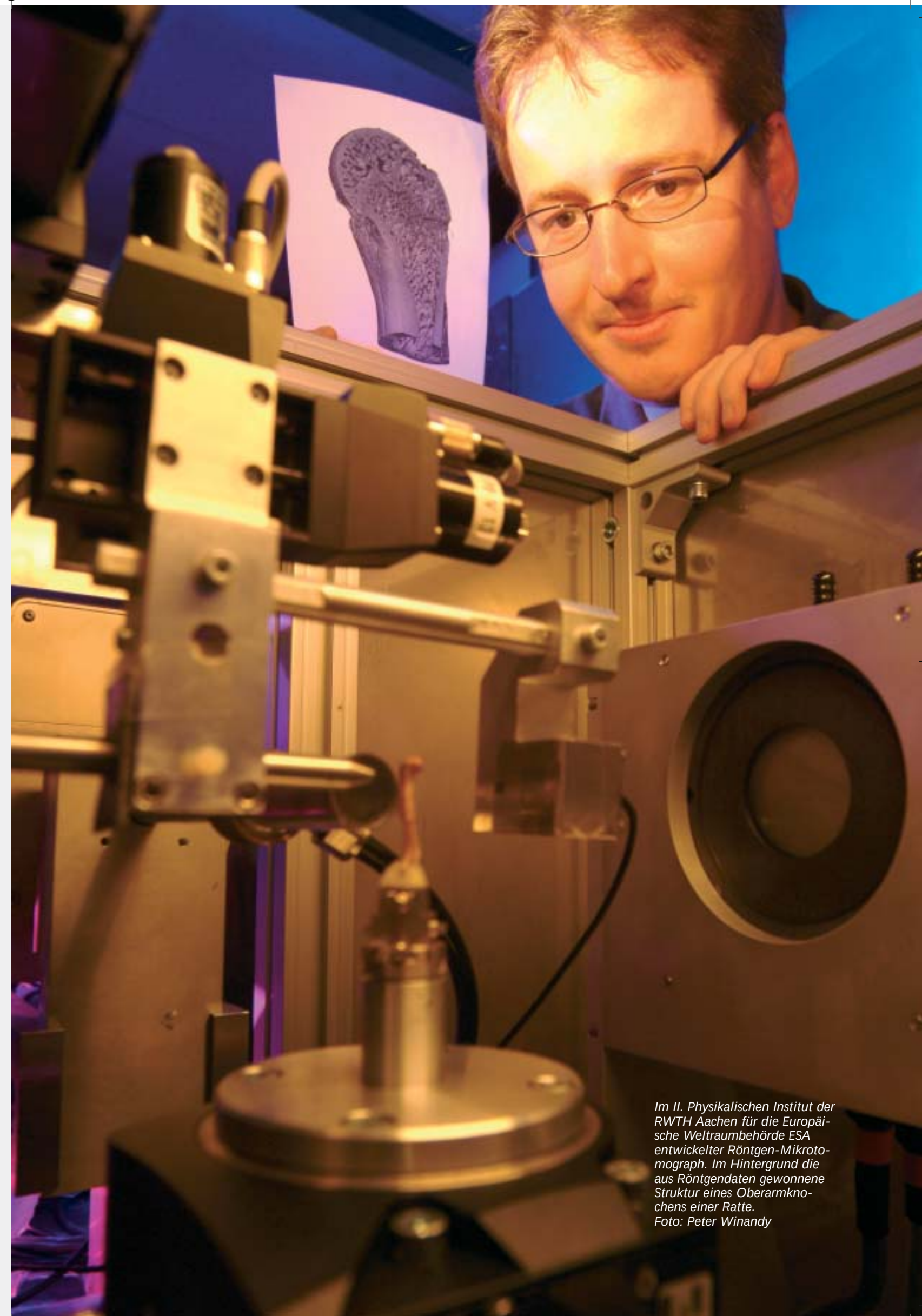
Verglichen mit sichtbarem Licht in Glas erfahren Röntgenstrahlen in Materie nur eine schwache Brechung und relativ starke Absorption. Aus diesem Grund wurden brechende Linsen für Röntgenstrahlen lange Zeit als nicht machbar angesehen. In einer 1996 publizierten Arbeit konnten wir diese Vorstellung widerlegen. In der Zwischenzeit sind im II. Physikalischen Institut B refraktive Röntgenlinsen mit parabolischem Profil entwickelt worden, die eine verzerrungsfreie Abbildung mit

Röntgenstrahlen mit Energien im Bereich von fünf bis 120 Kiloelektronvolt erlauben. Eine solche Linse ist kompakt und besteht aus vielen einzelnen Linsen, deren optische Achsen mit einer Genauigkeit von einem Mikrometer fluchten. Eine typische Fokallänge liegt bei einem Meter. Diese Röntgenlinsen verhalten sich wie Glaslinsen für sichtbares Licht. Allerdings ist die Apertur einer solchen Linse im Vergleich zu ihrer Fokallänge wesentlich kleiner, als das für Glaslinsen im sichtbaren Bereich üblich ist. Aufgrund der parabolischen Form der Linsenflächen tritt bei der Abbildung keine sphärische Aberration auf, so dass man verzerrungsfreie, vergrößernde Abbildungen eines Objektes wie in der normalen Mikroskopie mit sichtbarem Licht herstellen kann. Dazu muss der Gegenstandsabstand leicht größer als die Fokallänge sein, so dass das Bild stark vergrößert weit jenseits der bildseitigen Fokallänge entsteht. Durch die vergrößernde Abbildung sind deutlich höhere Auflösungen zu erreichen, als dies ohne Optik möglich wäre, da durch die röntgenoptische Vergrößerung die Auflösungsgrenzen moderner Röntgenkameras überwunden werden können.

Um mit einer refraktiven Röntgenlinse einen Mikrofokus für die Röntgenanalytik herzustellen, bildet man die Röntgenquelle verkleinert auf die Probe ab. Dabei wird die Verkleinerung um so größer, je weiter sich die Optik von der Quelle entfernt befindet und

Bild 1: Elektronenmikroskopaufnahme von parabolischen Nanolinsen aus Silizium. Da Nanolinsen den Strahl nur in einer Richtung fokussieren, müssen zwei von ihnen gekreuzt werden, um einen Punktfokus zu erhalten.

je kleiner ihre Fokallänge ist. Typischerweise kann man mit einer Röntgenlinse Verkleinerungen im Bereich von 100 zu 1 erreichen. Eine moderne Synchrotronstrahlungsquelle hat eine Größe von einigen hundert Mikrometern horizontal und einigen zehn Mikrometern vertikal, beispielsweise 700 mal 35. Bei einer Verkleinerung von 100 zu 1 ergibt sich damit ein Probenfleck von 7 mal 0.35 Mikrometern. Für eine Reihe von Anwendungen, besonders in der Nanoanalytik, ist dies zu groß. Aus diesem Grund haben wir in Aachen refraktive Röntgenlinsen (so genannte Nanolinsen) mit besonders kurzer Brennweite (von wenigen Zentimetern) entwickelt. Bild 1 zeigt mehrere solcher Linsen, die parallel zu einander angeordnet sind. Wiederum sind in einer Linse viele Einzellinsen hintereinander angeordnet. Wiederum ist die Form parabolisch. Der Krümmungsradius an der Spitze ist jetzt aber etwa hundertmal kleiner als bei den erstgenannten Linsen. Da die Linsen mit Hilfe von Ätztechniken aus Silizium oder Bor hergestellt werden, haben sie eine planare Form und fokussieren daher nur in einer Richtung. Zwei Linsen müssen gekreuzt hin-



Im II. Physikalischen Institut der RWTH Aachen für die Europäische Weltraumbehörde ESA entwickelter Röntgen-Mikrotomograph. Im Hintergrund die aus Röntgendaten gewonnene Struktur eines Oberarmknochens einer Ratte. Foto: Peter Winandy

tereinander angeordnet werden, um Fokussierung in beiden Richtungen zu erreichen. Auf diese Weise wurde ein Mikrostrahl mit einer Breite von 330 mal 110 Nanometern erzeugt, der sich hervorragend für nanoanalytische Anwendungen eignet. Die Weiterentwicklung dieser Optiken verspricht in Zukunft Strahlgrößen bis zu unter 20 Nanometern.

Dreidimensionale Abbildung der internen Struktur eines Halbleiterbauelementes mittels zerstörungsfreier Röntgenmikroskopie

Die zerstörungsfreie dreidimensionale Abbildung der internen Struktur integrierter Halbleiterschaltkreise mittels Röntgenmikroskopie könnte in Zukunft Anwendung in der Produktion und Fehleranalyse von Bauelementen finden. So lassen sich auf diese Weise strukturelle Änderungen bei speziellen Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel Elektromigration, feststellen. In Bild 2a ist ein Tomogramm eines AMD K6 Mikroprozessors dargestellt, das mit vergrößernder Tomographie aufgenommen wurde. Gezeigt ist die zweite Integrationsebene mit vielen Wolfram Verbindungsleitungen (vias), die als feine schwarze Strukturen erscheinen (Bild 2a und b). In Bild 2c ist ein vertikaler virtueller Schnitt durch den Prozessor gezeigt, der durch die Reihe von Verbindungsleitungen geht, die in Bild 2b durch einen Pfeil markiert sind. Der mittlere Abstand zwischen diesen beträgt 860 Nanometer. Die in der Abbildung erreichte dreidimensionale Auflösung beträgt 410 Nanometer. Damit man den Prozessor ohne weitere Probenpräparation dreidimensional abbilden kann, wurden Photonen mit 25 Kiloelektronenvolt Energie verwendet, die genügend hohes Durchdringungsvermögen durch die Halbleiterstruktur haben. Die Messung wurde mit Synchrotronstrahlung bei der ESRF in Grenoble durchgeführt. Sie zeigt exemplarisch die Möglichkeiten der 3D-Röntgenmikroskopie. Unser Röntgenmikroskop wird derzeit mit neuen Berylliumlinsen ausgerüstet, die eine Auflösung von 100

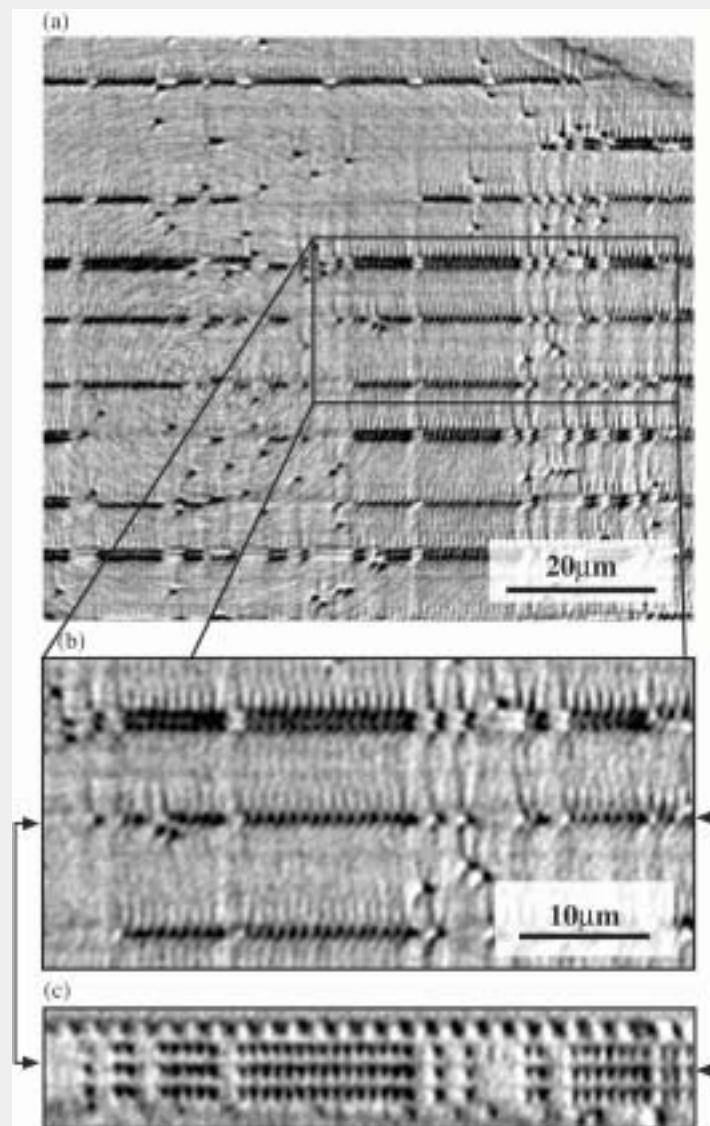


Bild 2: Tomographische Rekonstruktion eines AMD K6 Mikroprozessors. (a) Virtueller horizontaler Schnitt durch die zweite Ebene von Wolframverbindungsleitungen. (b) Vergrößerter Ausschnitt von (a). (c) Virtueller vertikaler Schnitt durch die Reihe von Wolframverbindungsleitungen, die in (b) mit Pfeilen gekennzeichnet ist.

Nanometer erlauben. In Zukunft soll diese Auflösung bis unter 50 Nanometer verbessert werden. Inzwischen gibt es auch kommerzielle Geräte, die mit einer Röntgenröhre statt einem Speicherring arbeiten und die die Verfügbarkeit der Methode deshalb stark verbessern.

Röntgenabbildung eines Mikrometeoriten

Jedes Jahr fallen Meteoriten mit einer Gesamtmasse von 40.000 Tonnen auf die Erde. Mikrometeoriten unter 100 Mikrometer Größe werden so stark in der Luft abgebremst, dass sie unbeschadet zu Boden fallen können. Für Untersuchungszwecke werden einige von ihnen in großer Höhe von Flugzeugen mit Hilfe von Käschnernetzen aufgesammelt. Ein Teil der Meteoriten gehört zum ältesten Material im Sonnensystem, das nur wenig physikalische und chemische Veränderungen erfahren hat. Die Messverfahren zur Untersuchung ihrer Struktur sollten nicht-destruktiv sein, um die

wertvollen Proben nicht zu zerstören und um keine Artefakte bei der Analyse zu erzeugen. Fluoreszenz-Mikrotomographie ist hier die Methode der Wahl, um die chemische Zusammensetzung des Meteoriten auch in seinem Inneren zu ermitteln. Die Fluoreszenztomographie ist eine Röntgenrastersondenmethode, bei der die Probe unter verschiedenen Winkeln durch einen Mikrostrahl gerastert wird, der mit einer Nanolinse erzeugt wird. An jedem Rasterpunkt wird die vom Röntgenstrahl angeregte Fluoreszenzstrahlung mit Hilfe eines energieselektiven Detektors gemessen. Dadurch können die Konzentrationen chemischer Elemente innerhalb der Probe gemessen werden. Die tomographische Rekonstruktion (Bild 3), die die Selbstabsorption der Fluoreszenzstrahlung in der Probe berücksichtigt, zeigt auf einem virtuellen Schnitt durch diesen Eisenmeteoriten eine recht homogene Verteilung folgender Elemente: S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu und Zn. Dabei wurde

eine Auflösung von 600 Nanometern erreicht. Mit Hilfe der in einem Elektronenmikroskop induzierten Fluoreszenz wurden jedoch Cr, Mn, Cu und Zn nicht nachgewiesen. Dieses Beispiel steht stellvertretend für viele Fragestellungen aus der Materialforschung, wo man eine Multielementanalyse mit hoher Ortsauflösung und mit hoher Nachweisempfindlichkeit im Inneren einer Probe durchführen möchte.

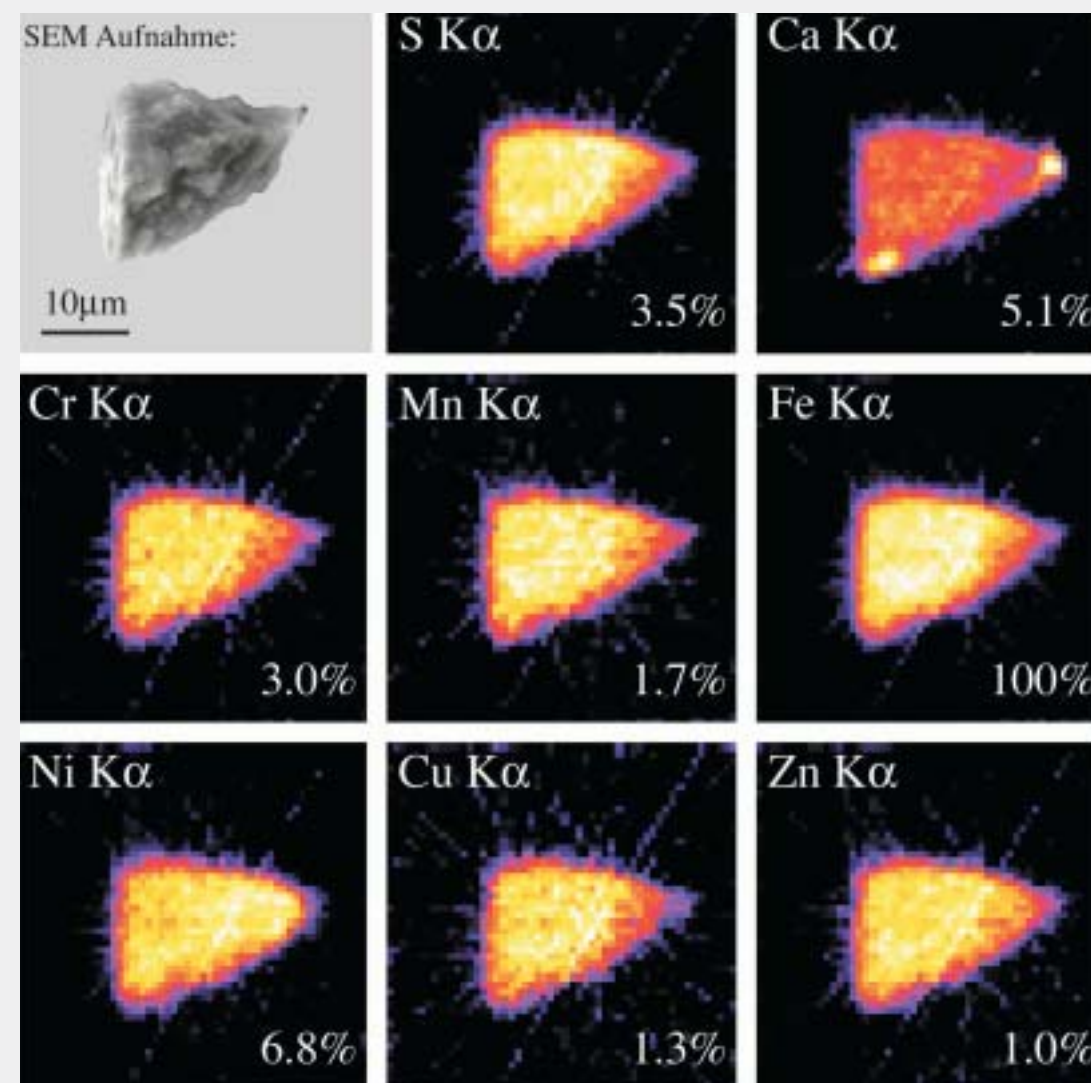


Bild 3: Elektronenmikroskopaufnahme eines Mikrometeoriten und mit Hilfe der Fluoreszenztomographie bestimmte Elementverteilungen auf einem virtuellen Schnitt durch den Meteoriten. In der unteren rechten Ecke jeder Elementverteilung ist die Fluoreszenzintensität relativ zu der von Eisen angegeben.

Autoren:

Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Bruno Lengeler ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik IIB und Leiter des II. Physikalischen Instituts. Dr. rer.nat. Christian Schroer ist Wissenschaftlicher Assistent am II. Physikalischen Institut B.



Durchstarten mit Energie.

Mit uns Ziele erreichen als Student/in oder Absolvent/in der Fachrichtungen Elektrotechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, (Kern-)physik oder Wirtschaftswissenschaften. Erste Karriereschritte als Praktikant, Diplomand oder Werkstudent – durchstarten als Trainee oder im Direkteinstieg.

E.ON Kernkraft GmbH, Tresckowstraße 5, 30457 Hannover

www.eon-kernkraft.com

e-on | Kernkraft

Jochen M. Schneider, Claudia Walter

Duktile keramische Nanolamineate: Eine ganz neue Werkstoffklasse

Verbindung von keramischen mit metallischen Eigenschaften

Die so genannten MAX-Phasen sind eine revolutionäre Entdeckung in der Werkstoffwissenschaft, da sie Eigenschaften miteinander vereinen, die bisher als nicht vereinbar galten, und so eine neue Materialklasse entstehen lassen. Es war bislang angenommen worden, dass gewisse Eigenschaften von Materialien immer gemeinsam auftreten. Keramiken beispielsweise sind hochtemperaturfest und immer auch hart, spröde und nicht spanbar zu bearbeiten. Metalle andererseits sind gut bearbeitbar und duktil, gleichzeitig aber weder hochtemperaturfest noch besonders oxidationsbeständig. Mit der Entdeckung der MAX-Phasen wurde jedoch erstmals ein Werkstoff gefunden, der hochtemperaturfest ist, ohne spröde zu sein, und der sich leicht bearbeiten lässt. Diese Kombination von keramischen und metallischen Eigenschaften ermöglicht ihren Einsatz in Anwendungsgebieten, bei denen Bauteile bei hohen Temperaturen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. In Motoren und Turbinen beispielsweise sind die beweglichen Komponenten so hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, dass statt Keramiken nur Metalllegierungen verwendet werden können. Gleichzeitig arbeiten Motoren und Turbinen umso effizienter, je höher ihre Betriebstemperatur ist. Könnte also die Betriebstemperatur durch die Verwendung eines neuen Werkstoffs erhöht werden, würde dies ihre Wirtschaftlichkeit entscheidend steigern.

Der Name MAX-Phase leitet sich aus ihrer Zusammensetzung ab. Genauer müsste man schreiben $M_{n+1}AX_n$ mit $n=1,2,3$, wobei M ein Übergangsmetall ist, A ein Element der Hauptgruppen IIIA oder IVA des Periodensystems und X entweder Kohlenstoff oder Stickstoff (Bild 1). Materialien mit einer solchen Zusammensetzung wurden erstmals in den sechziger Jahren entdeckt, aber ihre Eigenschaften blieben bis Mitte der neunziger Jahre unerforscht, da es große Schwierigkeiten bereitete, phasenreine Proben herzustellen. Als erstem gelang dies Profes-



Physical Vapour Deposition-Anlage zur Beschichtung von Silizium-Wafern.
Foto: Peter Winandy

36

IA	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
H																		
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac																

M_{n+1}A_nX_n

Diagram illustrating the naming convention for MAX phases based on their composition. The diagram shows a portion of the periodic table with color-coded elements corresponding to the formula components:

- M_{n+1}** (Transition Metals, blue): Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn.
- A_n** (Main Group Elements, green): B, C, N, O, F, Ne, Al, Si, P, S, Cl, Ar, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn.
- X_n** (Carbon/Nitrogen, red): C, N.

Bild 1: Der Name MAX-Phase leitet sich aus ihrer Zusammensetzung ab: M steht für ein Übergangsmetall (blau), A für ein Element aus den Hauptgruppen um IIIA und IVA (grün) und X für entweder Kohlenstoff oder Stickstoff (rot).

sor Barsoum an der Drexel University, USA. Er erzeugte die MAX-Phase Ti_3SiC_2 als phasenreines Bulkmaterial. Zuerst wurde die Oxidationsbeständigkeit dieser Phase getestet und es stellte sich heraus, dass sie bei 1000 Grad Celsius eine sehr gute Oxidationsbeständigkeit aufwies, so wie man sie von einer Keramik erwarten würde. Dementsprechend unerwartet fiel der anschließende Test des Thermoschockverhaltens aus. Dabei wird das Material innerhalb sehr kurzer Zeit um mehrere

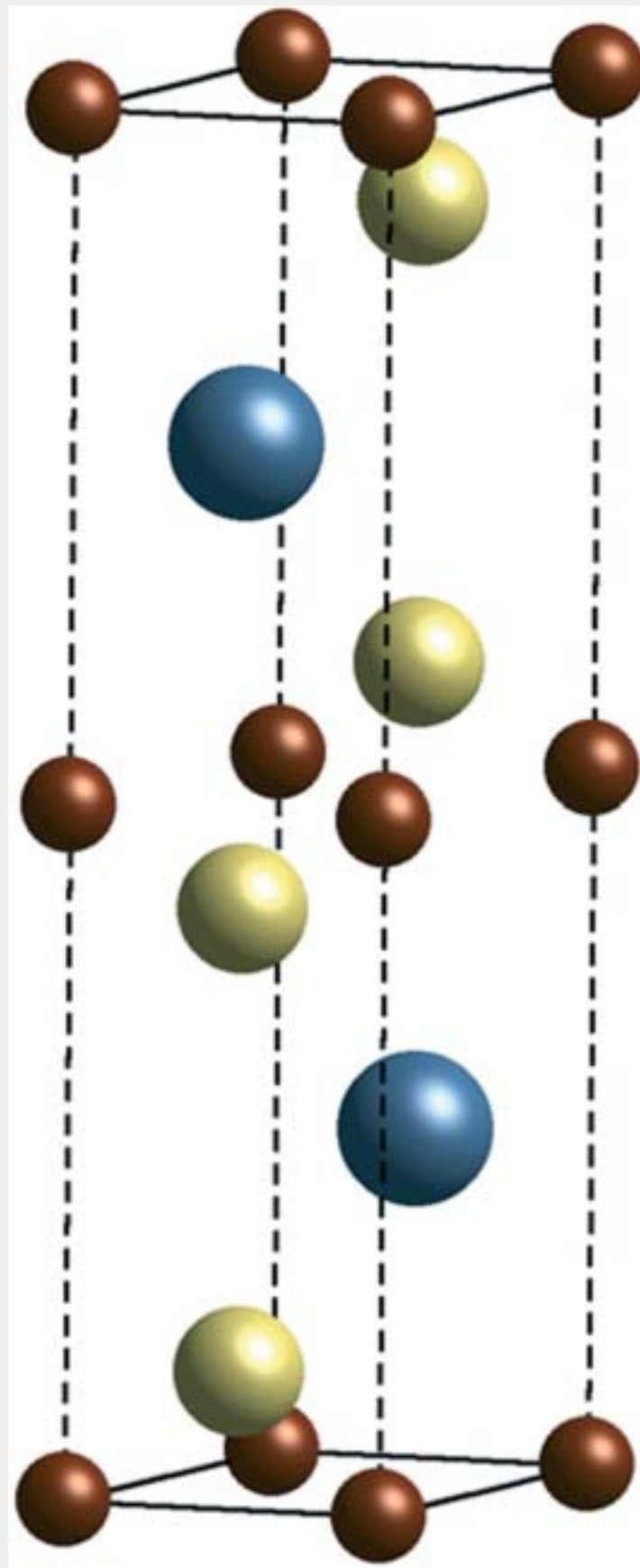
Hundert Grad Celsius abgekühlt. Die meisten Keramiken zerbrechen aufgrund ihrer Sprödigkeit bereits bei einem Thermoschock von weniger als 500 Grad Celsius. Entgegen allen Erwartungen überlebt Ti_3SiC_2 Thermoschocks von 1400 Grad Celsius und mehr, ohne zu zerbrechen. Durch dieses Ergebnis ermutigt, testeten die Forscher, ob das Material sich bearbeiten ließe, indem Sie versuchten, ein Loch hineinzubohren. Tatsächlich ging der Bohrer mit Leichtigkeit durch die MAX-Phase hin-

durch. Ti_3SiC_2 ist also ein Werkstoff, der hochtemperaturfest und oxidationsbeständig ist (keramische Eigenschaften), und gleichzeitig resistent ist gegen Thermoschock und sich gut bearbeiten lässt (metallische Eigenschaften). Hinzu kommt, dass MAX-Phasen im Allgemeinen gute elektrische Leiter und Wärmeleiter sowie schadentolerant sind.

Diese sensationellen Ergebnisse lassen sich durch den atomaren Aufbau der MAX-Phasen erklären. MAX-Phasen haben eine geschichtete Struk-

37

Bild 2: Nanolaminat-Struktur: Schichten aus Atomen des A-Gruppen-Elements (blaue Kugeln) wechseln sich ab mit Übergangsmetallcarbid/nitrid-Schichten (gelbe Kugeln stellen die Übergangsmetallatome dar, braune Kugeln stellen entweder Kohlenstoff- oder Stickstoffatome dar).



rer Hilfe können die Struktur und die elastischen Eigenschaften von Nanolaminaten mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Durch das Know-how in Synthese und Analyse ist der Lehrstuhl für Werkstoffchemie ideal ausgerüstet, um dem Geheimnis der MAX-Phasen auf die Spur zu kommen.

Indem MAX-Phasen hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert werden, wird an der RWTH ein grundlegender Beitrag zur Erforschung dieser neuen Materialklasse geleistet. Die Korrelation der elastischen Eigenschaften mit der chemischen Zusammensetzung trägt zum tiefergehenden Verständnis des Verhaltens dieser Werkstoffe bei, die in so einzigartiger Weise metallische und keramische Eigenschaften kombinieren.

Autoren:

Dipl.-Ing. Claudia Walter ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Werkstoffchemie.

Univ.-Prof. Jochen M. Schneider Ph.D. ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffchemie.

Andreas Graff, Uwe Kreibitz, Dieter Wagner

Metallische Nanodrähte

Nanostrukturierte Materialien mit besonderen Eigenschaften

Nanostrukturierte Materie kann in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften so drastisch von dem entsprechenden massiven Material abweichen, dass es zu Recht angebracht ist, von Neuen Materialien zu sprechen. Das gilt insbesondere für Materie, die aus sehr vielen nanoskaligen Bausteinen zusammengesetzt ist, wie beispielsweise die Nano-Komposite. Solche makroskopischen, auf Nanostrukturen basierenden Materialien kommen in der Natur vor, etwa in Mineralien, sie sind für technische Anwendungen wichtig.

Einzelne Nanobausteine, wie etwa isolierte Nanopartikel, hingegen sind wohl wesentlich nur für die Grundlagenforschung von Interesse. Dort sind sie von großer Bedeutung, weil sie Einblicke in die „Geburt“ der kondensierten Materie ermöglichen, wenn man ihre Teilchengröße variiert. Wir können ganz allgemein sagen: Nanostrukturierte Materie hat die Besonderheit, mit der Bausteingröße einen zusätzlichen Parameter zu besitzen, der es erlaubt, Eigenschaften gezielt zu variieren.

Von allen Nanostrukturen weisen Nanopartikel die ausgeprägtesten Besonderheiten auf, da sie in allen drei Dimensionen klein sind. Für viele technische Anwendungszwecke sind Nanostrukturierungen in einer Dimension, also „dünne Schichten“ wichtig. Dazwischen liegen die in zwei Dimensionen nanometerkleinen Strukturen, die Nanodrähte. Sie sind bislang am wenigsten erforscht, da es wenige Möglichkeiten gibt, sie in guter Qualität herzustellen. Technische Anwendungen sind erst in der Entwicklung. Doch es ist abzusehen, dass sich dies in naher Zukunft rasant ändern wird.

Durch die Entwicklung einer speziellen chemischen Methode ist uns in der Abteilung „Cluster-Physik“ des I. Physikalischen Instituts die Herstellung von Nanodrähten aus Silber gelungen, die bislang wohl einzigartig sind: Sie sind mit Längen bis 0,05 Millimetern fast mit dem bloßen Auge zu sehen, die dünnsten sind aber nur 15 Nanometer dick, was etwa 50 Atomlagen entspricht.

In Bild 1 kann man die Position und grobe „Schleier“ der geometrischen Strukturen unserer Nanodrähte erkennen, wenn man die optische „Zsigmondy-Dunkelfeldmethode“ einsetzt. Erst mit dem Elektronenmikroskop sind aber die wirklichen Strukturen zu sehen (das lichtoptische „Bild“ zeigt nur den vielfach vergrößerten Kegel des an den Nanostrukturen gestreuten Lichtes, ist aber keine echte Abbildung).

Das Besondere unserer Nanodrähte ist, dass sie frei in einer Zuchtflüssigkeit präpariert werden, sie sind also bei der Erzeugung nicht an ein spezielles Substrat gebunden. Man kann sie aus der Lösung herausfischen und in elektronische Systeme einfügen.

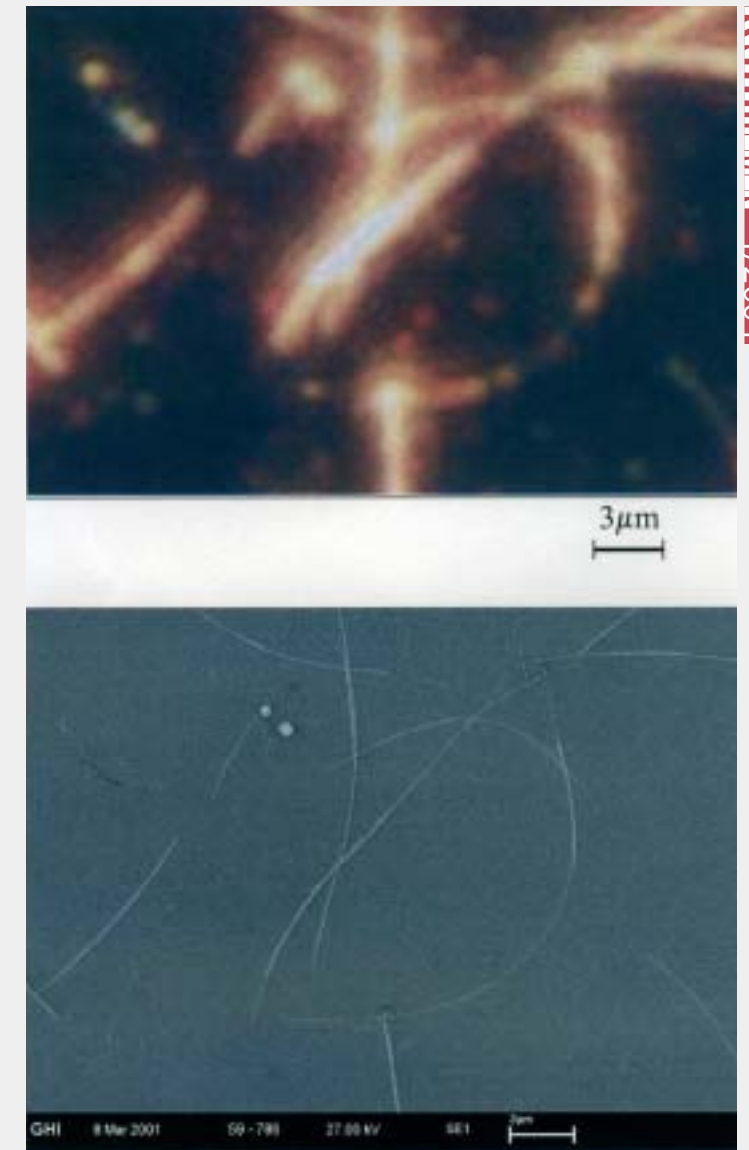


Bild 1: Silber-Nanodrähte: Vergleich von optischer Zsigmondy-(Dunkelfeld-) Mikroskopie mit Elektronenmikroskopie (Raster-Elektronenmikroskop).

Elektronenmikroskopische Analysen haben gezeigt, dass diese Drähte eine sehr überraschende atomare Kristallstruktur besitzen: Sie bestehen aus fünf langgezogenen und fadenförmigen Einkristallen mit dreieckigem Querschnitt, die durch kohärente Korngrenzen miteinander fest verbunden sind. In den Bildern 2a und b sind sie durch die Bereiche mit unterschiedlichen Atomabständen erkennbar. Hier sind auch die Querschnitte und die Orientierungen gegenüber dem einfallenden Elektronenstrahl gezeichnet. Für Kristalle ist die dort sichtbare fünfzählige Symmetrie sehr ungewöhnlich. Sie wurde auch bei Nanopartikeln beobachtet. Solche Partikel können als Keime für das Drahtwachstum angesehen werden. Ihre Fünfer-Symmetrie ist jedoch nicht exakt, vielmehr bilden fünf tetraedrische Einkristalle über kohärente Korngrenzen einen Vielfach-Zwilling, wobei entweder ein Fehlwinkel von etwa zehn Grad übrig bleibt, der mit ungeordneten Atomen zugeschüttet ist, oder aber die Kristallite mit allen fünf Korngrenzen verwachsen sind und dabei verzerrt werden. Bei den Nanodrähten scheint letzteres vorzuherrschen, der Draht reagiert auf die Verzerrung durch eine Krümmung. Auffallend ist, dass die Nanodrähte nur in engem Dickenbereich zwischen 15 und 40 Nanometern bei einem Maximum von 27 Nanometern spontan entstehen (Bild 3), während die Längen offenbar mindestens bis zu der beobachteten Obergrenze beliebig sind. Vermutlich ist bei dickeren Drähten wegen zunehmender Verzerrung die Struktur nicht mehr stabil.

Es ist bis heute rätselhaft, wieso ein Material wie Silber mit einfacher und hochsymmetrischer Gitterstruktur (fcc) und ziemlich isotroper metallischer Bindung sich spontan in solch extremer Drahtform organisiert. Vielleicht wird dies in der Zuchtlösung katalytisch gesteuert.

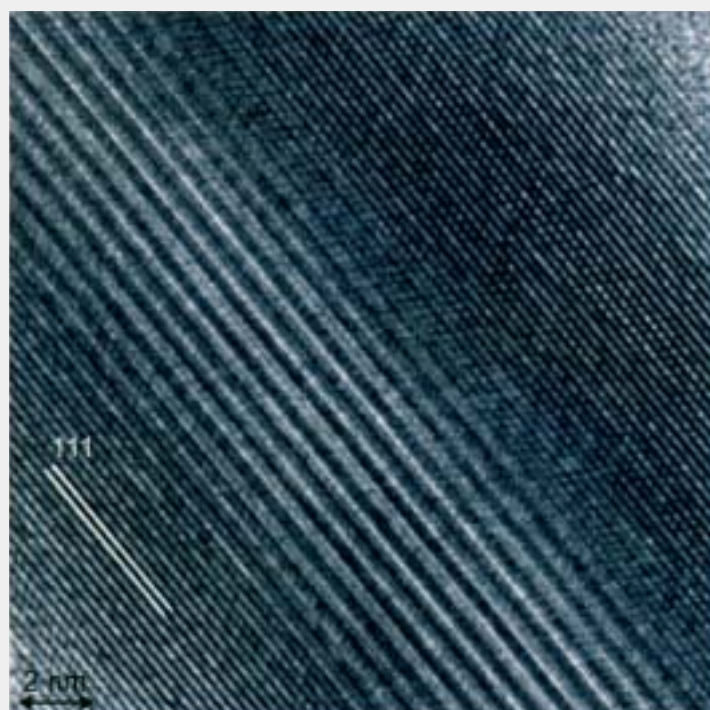
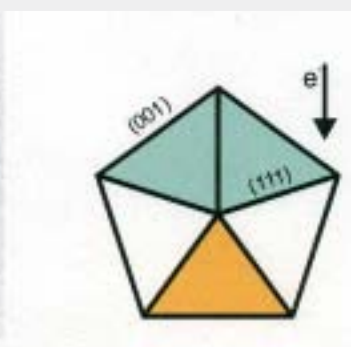


Bild 2: Silber-Nanodrähte: Atomar aufgelöste Transmissionselektronenmikroskop-Bilder, die zugehörigen Beugungsdiagramme und die Darstellung des Drahtquerschnitts und der Orientierung zum Elektronenstrahl e.



(a) symmetrische Orientierung.

Für unsere Drähte sind vielfältige technische Anwendungen denkbar. Seitens der Industrie ist bereits mehrfach Interesse bekundet worden. Zwei mögliche Anwendungen wollen wir im Folgenden vorstellen.

Da unsere Nanodrähte in einer elektrolytischen Flüssigkeit erzeugt werden, können sie aus dieser herausgefischt und zum Beispiel als elektrische Leiterbahnen auf elektrischen Kontakten deponiert werden. Die elektrische Leitfähigkeit sehr dünner Drähte weicht von der des massiven Materials grundlegend ab. Zum Einen verursachen die Oberfläche und innere Korngrenzen extrem verstärkte Elektronenstreuung, die bei den atomar glatten Flächen unserer Drähte wesentlich elastisch erfolgt. Zum Anderen treten bei geringen Dicken neuartige Interferenzeffekte der in die schmalen Drähte eingezwängten Elektronenwellen (Confinement-Effekte) auf, die das Ohmsche Gesetz der Leitfähigkeit außer Kraft setzen.

Bei elektrischen Messungen an Nanodrähten steckt allerdings der Teufel im Detail. Von Nanoröhrchen aus Kohlenstoff ist bekannt, dass ihre Kontaktierung das wesentliche experimentelle Problem sind. Einfache Auflagekontakte haben unter Umständen Übergangswiderstände, die höher als der gesamte Drahtwiderstand und zudem zeitlich nicht konstant sind. In unserer Cluster-Physik-Abteilung wird derzeit mit viel Aufwand eine neuartige Kontaktierung erprobt, die den Übergangswiderstand minimieren soll.

In einem weiteren Projekt, das wir seit zwei Jahren verfolgen, untersuchen wir eine aufregende Anwendungsmöglichkeit, die sich im Bereich der optischen Eigenschaften andeutet. Denn in Nanodrähten sind Nanoeigenschaften und das Verhalten des massiven Festkörpers gemischt. Eine Lichtwelle mit elektrischem Feld senkrecht zur Drahtachse führt, wie Rechnungen von Quinten belegen, bei geeigneter Lichtfrequenz zu resonanten Schwingungen des Elektronenplasmas – und im Quan-



(b) antisymmetrische Orientierung.

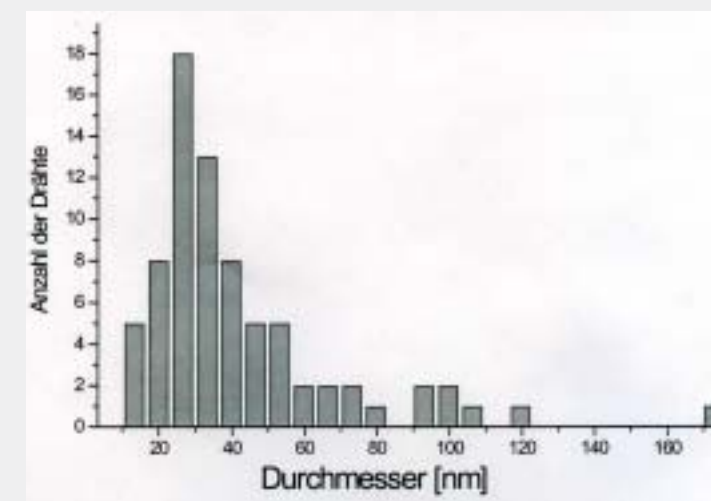
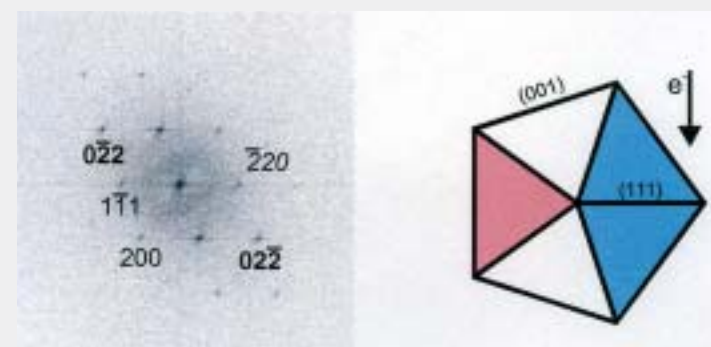


Bild 3: Silber-Nanodrähte: Drahtdurchmesser D aus mehreren Produktionszyklen. Maximum : D = 27 nm.

ten-Modell zur Anregung unterschiedlicher Plasmon-Polariton-Moden, die Mie-Plasmonen in kugelförmigen Nanopartikeln sehr ähnlich sind, welche in einem anderen Beitrag zu diesem Magazin behandelt werden.

Allgemein entstehen Farben, wenn Absorption und Streuung selektiv auf schmale Bereiche des Spektrums weißen Lichtes beschränkt sind wie bei Plasmaresonanzen, und so erscheinen Nanodrähte unter dieser Art der polarisierten Beleuchtung farbig. Anders verhält es sich hingegen, wenn der elektrische Feldvektor in Achsenrichtung schwingt, denn dann gibt es keine Oberflächen, die die in Achsrichtung bewirkte kollektive Schwingung der Elektronen wesentlich einschränken und zu elektrischen Rückstellkräften führen könnten. Das Elektronenplasma verhält sich dann wie im makroskopischen elektrischen Leiter. Dies bedeutet, dass die Resonanzfrequenz auf Null verschoben ist, es gibt keine deutliche Farbe. Unsere Fragestellung ist nun: Wie verhält sich ein Plasmon, das lokal am einen Ende des Nanodrahtes angeregt wird? Wir erwarten, dass es sich längs des Drahtes ausbreitet und daher auch am anderen Drahtende nachweisbar sein sollte. Diese Plasmonenleitung könnte eine interessante

Alternative für die optische Informationsleitung über Glasfasern sein. Vorteile wären, dass Nanodrähte leichter in komplexe mikroelektronische und optoelektronische Bausteine integrierbar wären, und dass ihre Dicke nur etwa zwei Prozent einer Glasfaser beträgt. Allerdings ist nach unseren, inzwischen über 30 Jahre dauernden Untersuchungen zur Plasmonendämpfung in Nanopartikeln sicher vorherzusagen, dass die Laufwege von Plasmonen im Draht sehr kurz sein werden. Derzeit wird diese Laufzeit in Kollaboration mit der Grazer Forschungsgruppe von Aussenegg und Krenn gemessen.

Autoren:

Dr. rer.nat. Andreas Graff ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Dresdener Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW). Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Uwe Kreibitz ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebiets Experimentalphysik am I. Physikalischen Institut (IA-Neue Materialien) und der Abteilung Cluster-Physik. Dipl.-Phys. Dieter Wagner ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Cluster-Physik am I. Physikalischen Institut.

Herbert Schoeller

Quantentransport und Quantenkohärenz in mesoskopischen Systemen

Faszinierende Quanteneffekte von Spin und Ladung

Die Miniaturisierung von elektronischen und magnetischen Systemen führt zu Längenskalen, auf denen die uns aus dem Alltag bekannte makroskopische Physik nicht mehr gültig ist. Es treten Quanteneffekte auf, die mit dem Wellencharakter der Elektronen zusammenhängen. Im mesoskopischen Bereich, im Zwischenbereich der mikroskopischen und makroskopischen Welt, befinden sich zwar immer noch viele Teilchen, aber die Kohärenzlänge L_ϕ der Wellenfunktion wird von der gleichen Größenordnung wie die Systemlänge L . Teilchen propagieren kohärent durch das System, die Phase der ein- und auslaufenden Teilchen ist korreliert. Es treten Interferenzeffekte auf, ähnlich wie man es von der Beugung von Lichtwellen an einem Doppelspalt kennt. Ein elektronisches Analogon ist in Bild 1 dargestellt. Es ist eine Aharonov-Bohm-Geometrie, bei der die Elektronen auf zwei verschiedenen Wegen vom Emitter zum Kollektor gelangen können. Der Phasenunterschied der beiden Wege wird durch den Fluss eines Magnetfelds gesteuert. Die resultierende konstruktive oder destruktive Interferenz führt zur Aharonov-Bohm-Oszillationen des linearen Leitwertes. Auch der Transport durch Halbleiter-Quantenpunkte zeigt die Quantenkohärenz. Eine mögliche Realisierung in vertikalen Halbleiterheterostrukturen ist in Bild 2a dargestellt. Quantenpunkte stellen nulldimensionale Quantensysteme dar, die über Tunnelbarrieren an elektronische Reservoirs angekoppelt sind (Bild 2b). Ein resonanter Leitwert wird beobachtet, wenn die Fermikante der Reservoirs mit einer Einzeileitungsenergie des Quantenpunktes übereinstimmt. Dies bedeutet, dass eine einfallende Welle mit Fermienergie beim einfachen Hin- und Her-Reflektieren zwischen den Tunnelbarrieren eine Phase aufliert, die ein Vielfaches von 2π ist. Genau dann erhält man konstruktive Interferenz und eine Resonanz. Die Resonanzbedingung wird über Gatterspannungen reguliert, die zylindrisch um den vertikalen

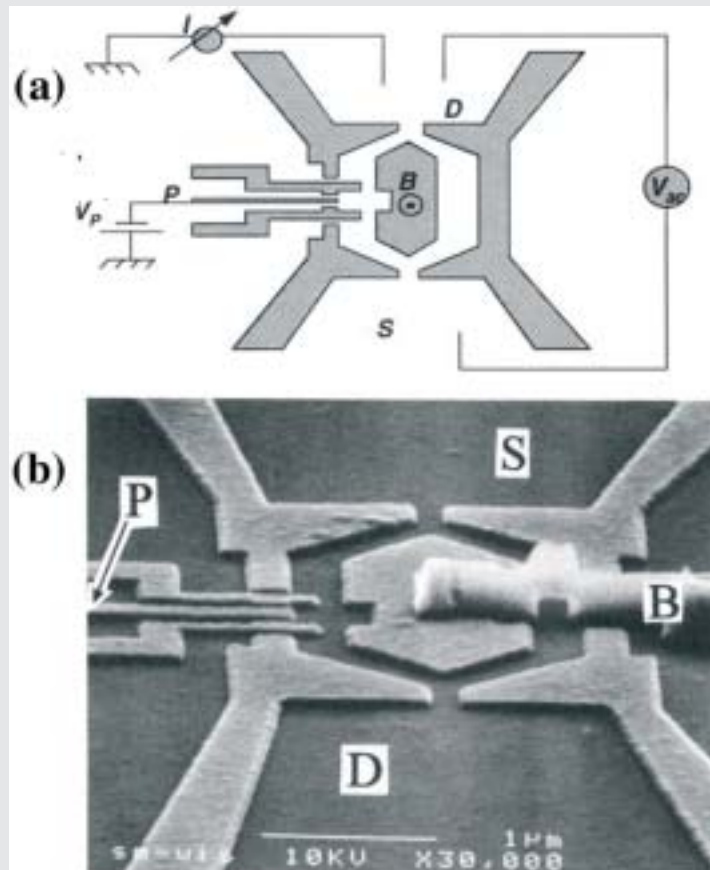


Bild 1: (a) Eine schematische Darstellung einer Aharonov-Bohm Geometrie. Die schattierten Flächen sind metallische Gates, die die Elektronen dort verdrängen. (b) SEM-Bild der Anordnung. Im linken Arm befindet sich zusätzlich noch ein Quantenpunkt. A. Yacoby, M. Heiblum, D. Mahalu, and H. Shtrikman, Phys.Rev.Lett. 74, 4047 (1995).

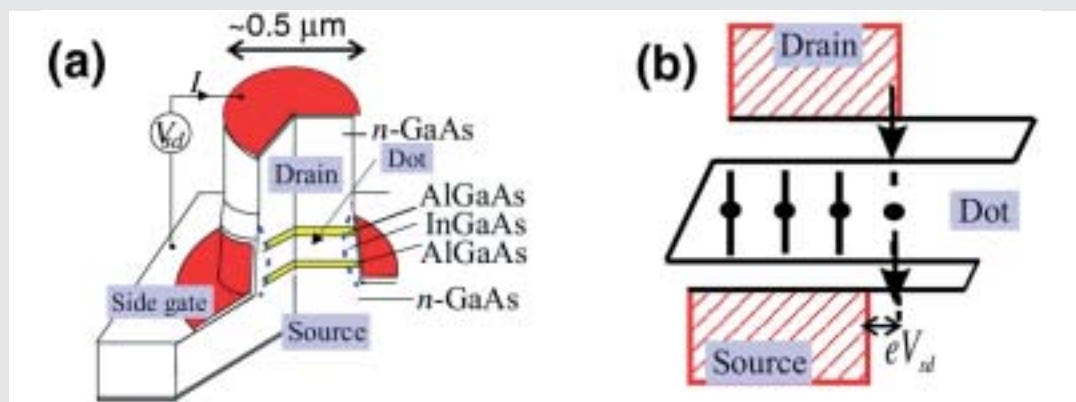


Bild 2: (a) Vertikaler Quantenpunkt in einer Halbleiterheterostruktur. Der Quantenpunkt befindet sich zwischen zwei AlGaAs Tunnelbarrieren. (b) Schematisches Energie-Diagramm. Die Elektronen tunneln resonant durch die diskreten Energieniveaus des Quantenpunktes. L.P. Kouwenhoven, D.G. Austing, and S. Tarucha, Rep. Prog. Phys. 64, 701 (2001).

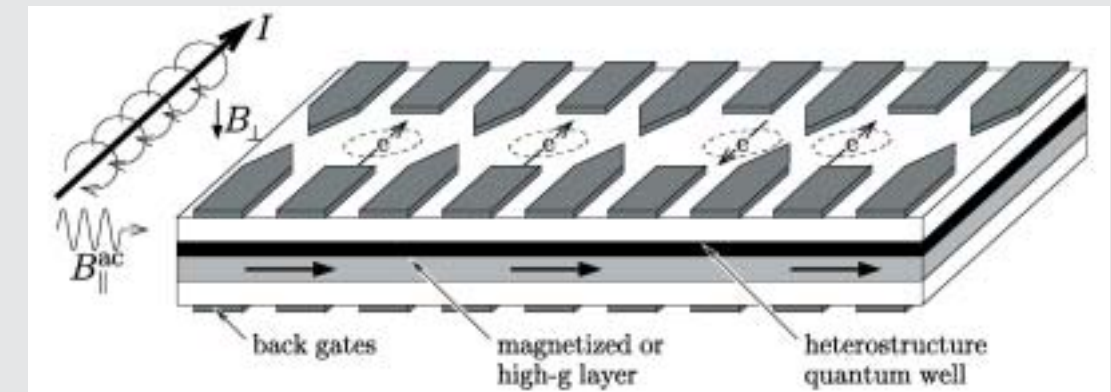
Quantenpunkt angelegt sind. Als Folge ergeben sich Resonanzen bei bestimmten Gatterspannungen, aus deren Positionen Rückschlüsse über die Energie der Orbitale gewonnen werden können. Wie in der Atomphysik kann man darüber Schalenstrukturen und die Hund'sche Regel in Quantenpunkten nachweisen.

Quantenkohärenz in mesoskopischen Systemen könnte zur Entwicklung neuer Bauelemente mit besonderen Funktionalitäten führen. Die interessanteste Perspektive ist die Realisierung von Quantencomputern. Ein möglicher Vorschlag ist in Bild 3 aufgeführt, der sogenannte Loss-DiVincenzo-Quantencomputer. Der Spinzustand von einzelnen Elektronen in Quantenpunkten kann sich in einer kohärenten Superposition von zwei Spinrichtungen befinden. Dies bildet ein so genanntes Q-Bit, welches sich fundamental von einem klassischen Bit unterscheidet, da beide Zustände gleichzeitig mit bestimmten Amplituden vorliegen können. Q-Bits können über äußere Magnetfelder und Modulation der Tunnelbarrieren zwischen den Quantenpunkten gesteuert werden. Interferenzeffekte in solchen Quantenstrukturen machen die Realisierung von Quantenalgorithmen möglich, die exponentiell schneller als klassische Algorithmen sind.

Die Realisierung von Quantenbauelementen ist ein langfristiges Ziel, die Grundlagenforschung steht momentan noch im Vordergrund. Am Institut für Theoretische Physik A (TPA) werden Quantenkohärenz und Quantentransport von Spin und Ladung in mesoskopischen Systemen theoretisch untersucht. Neben resonantem Tunneln, Coulomb-Blockade und Einflüssen von inelastischen Prozessen (dissipative Quantenmechanik) werden insbesondere kollektive Vielteilcheneffekte studiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Festkörpern können letztere in mesoskopischen Systemen experimentell gezielt manipuliert und studiert werden. Im Folgenden werden einige der Projekte an verschiedenen mesoskopischen und molekularen Systemen dargestellt.

Bild 3: Der Loss-DiVincenzo Quantencomputer. Die Spins von einzelnen Elektronen in Quantenpunkten bilden Q-Bits, die über äußere Magnetfelder und variable Tunnelbarrieren kohärent und kontrolliert ge-

steuert werden können. D. Loss and D. P. DiVincenzo, Phys. Rev. A 57, 120 (1998); G. Burkhard, H.A. Engel, and D. Loss, Fortschr. der Physik 48, 965 (2000).



Quantenpunkte:

Ein fundamentales Beispiel für ein mesoskopisches Quantensystem, wo Vielteilcheneffekte in Kombination mit Quantenkohärenz auftreten können, ist ein Quantenpunkt bestehend aus zwei Orbitalen (Bild 4a). Es treten Fluktuationen von Spin- und orbitalen Freiheitsgraden auf, die durch starke Ankopplung an die Reservoirs verstärkt werden können. Dies führt zu kollektiven Vielteilchenzuständen mit starken Korrelationen zwischen Orbitalen des Quantenpunktes und der Reservoirs. Für ein einziges einfach besetztes Orbital auf dem Quantenpunkt (es sind nur Spinfluktuationen zugelassen) erhält man bereits eine erhöhte Zustandsdichte an der Fermikante, der so genannte Kondo-Effekt. Der entsprechende erhöhte Leitwert konnte experimentell in Quantenpunkten nachgewiesen werden. Dies hat für großes Aufsehen gesorgt, da es sehr schwierig ist, den Kondo-Effekt in Festkörpern zu identifizieren und kontrolliert zu steuern. In den am TPA theoretisch studierten Quantenpunkten mit zwei Niveaus wird der Kondo-Effekt mit Interferenzeffekten kombiniert, da die Elektronen über beide Orbitale vom Emitter zum Kollektor gelangen können. Je nach Phasenunterschied der beiden Wege verstärkt oder verringert dies den Kondo-Effekt. Es kann sogar zu Quantenphasenübergängen kommen, je nachdem ob der Grundzustand des Quantenpunktes ein Singlett- oder Triplet-Zustand ist. Bei der Fano-Geometrie in Bild 4b, wo die Elektronen die

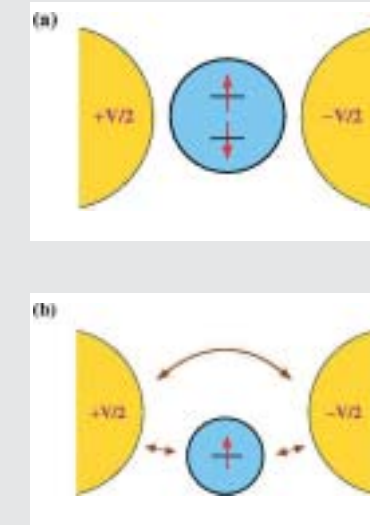


Bild 4: (a) Ein Quantenpunkt mit zwei Niveaus, der an zwei Zuleitungen angekoppelt ist. (b) Ein Quantenpunkt in einer Aharonov-Bohm-Geometrie, s.a. Bild 1a. D. Boese, W. Hofstetter, and H. Schoeller, Phys. Rev. B 64, 125309 (2001); W. Hofstetter and H. Schoeller, Phys. Rev. Lett. 88, 016803 (2002); W. Hofstetter, J. König, and H. Schoeller, Phys. Rev. Lett. 87, 156803 (2001).

Möglichkeit haben, direkt von einem Reservoir zum anderen zu tunneln, führen Interferenzeffekte zu sehr ungewöhnlichen Linienformen. So kann es zum Beispiel bei destruktiver Interferenz passieren, dass der Leitwert ein Minimum hat, obwohl sich das Niveau des Quantenpunktes genau an der Fermikante befindet.

Molekulare Systeme:

Mesoskopische und molekulare Systeme unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Längenskala, in beiden spielt die Quantenkohärenz die dominante Rolle für die physikalischen Eigenschaften. Molekulare Systeme haben den Vorteil, dass sie in einer großen Vielzahl mit Hilfe der supramolekularen Chemie synthetisiert werden können. Auch die Energieskalen sind größer, so dass Quantenphänomene bei Raumtemperatur sichtbar sein sollten. Der Nachteil hingegen

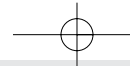
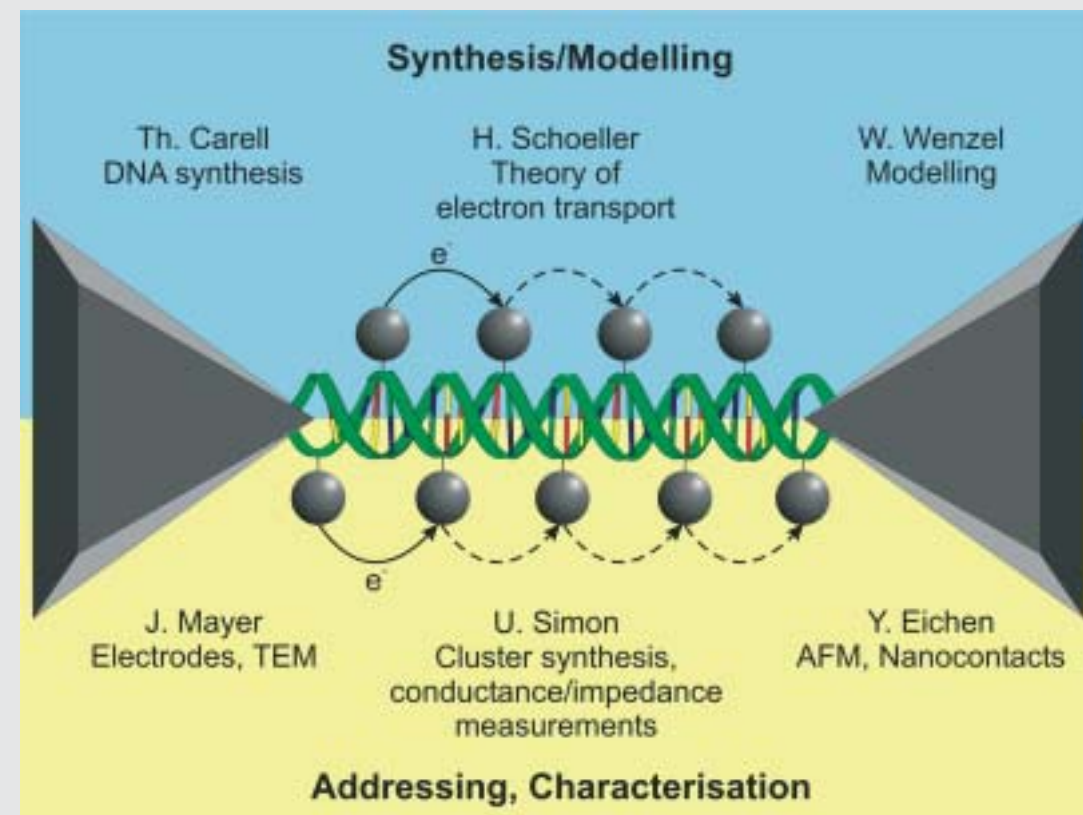


Bild 5: Ein DNA-Strang zwischen zwei Elektroden. Der molekulare Draht wird entweder durch metallische Nanoteilchen gebildet, die an der DNA mit Linker-Molekülen gebunden

werden, oder durch metallische Zentren, die in der DNA angelagert werden. Diese Systeme werden im Rahmen eines interdisziplinären VW-Projektes untersucht.



ist die schwierige Kontaktierung, da supramolekulare Systeme eine Größenordnung von einem bis zehn Nanometern haben. Trotzdem ist es mittels der Nanolithographie und der STM-Technik gelungen, I-V-Kennlinien von einzelnen Molekülen aufzunehmen. Am TPA werden Transporteigenschaften von einzelnen organischen Molekülen, metallorganischen Komplexen und molekularen Drahten untersucht (Bild 5). Wie bei Quantenpunkten tritt resonantes Tunneln durch molekulare Orbitale auf. Die Resonanzen sind aber stark verbreitert, da die π -Orbitale der organischen Moleküle stark mit den Zuleitungen überlappen. Das Ziel ist daher der Einbau von molekularen Tunnelbarrieren zwischen Molekül und Elektrode. Wegen der kleinen Längenskala können die Positionen der Molekülorbitale nur schwer über Gatterspannungen gesteuert werden. Daher wird am TPA untersucht, ob geeignete Liganden die Funktion einer Gatterspannung übernehmen können. Molekulare Systeme mit magnetischen Zentren (molekulare Magnete) zeigen wie Quantenpunkte den Kondo-Effekt. In komplexen Strukturen mit mehreren Metallzentren wurde am TPA gezeigt, dass der Ladungszustand der organischen Liganden Übergänge zwischen antiferromagnetischen und ferromagnetischen Spinzuständen induzieren kann. Als Folge tritt Spinblockade auf, der Transportstrom wird spinabhängig unterdrückt.

Quantendrähte:

Eindimensionale mesoskopische Systeme zeigen sehr ungewöhnliche intrinsische kollektive Eigenschaften. Setzt man eine einzige Störstelle in einen leitenden Quantendraht, so wird der Leitwert durch die Coulombwechselwirkung algebraisch als Funktion der Temperatur und Transportspannung unterdrückt, obwohl eine endliche quantenmechanische Tunnelwahrscheinlichkeit vorliegt. Quantendrähte verhalten sich nicht wie die aus der Festkörperphysik bekannten Fermiflüssigkeiten, sondern wie Luttinger-Flüssigkeiten. Die

Zustandsdichte an Rändern und Störstellen ist algebraisch unterdrückt. Das sich daraus ergebende Skalverhalten des Leitwertes als Funktion der Temperatur und der Transportspannung wird am TPA in endlichen Quantendrähten untersucht. Von Interesse sind hier unter anderem konkurrierende Effekte von Tunnelbarrieren zu Reservoiren und Störstellen innerhalb der Quantendrähte sowie das resonante Tunneln durch mehrere Störstellen. Auch die Kombination von elektronischen und magnetischen Quantendrähten, die über Austauschkopplungen wechselwirken, führen zu interessanten Vielteilcheneffekten, zum Beispiel die Bildung von Spinpolaronen. Im experimentellen Feld der Spinelektronik werden magnetische Eigenschaften von eindimensionalen Systemen mit ferromagnetischen Elektroden untersucht. In diesem Fall hängt der Leitwert stark davon ab, wie die Spinrichtungen der beiden Elektroden relativ zueinander ausgerichtet sind. Dieser so genannte TMR-Effekt (tunneling magnetoresistance) und andere Quantenkohärenzphänomene sind wichtige Forschungsthemen am TPA.

Mesoskopische Systeme sind äußerst faszinierende Quantensysteme. Zum einen eröffnen sie langfristig völlig neue Perspektiven für Quantenbauelemente auf der Basis von Spin- und Ladungseffekten, von denen insbesondere der „Quantencomputer“ eine revolutionäre Entwicklung darstellt. Zum anderen bieten sie eine Herausforderung für die Grundlagenforschung, da sowohl kohärente Quanteneffekte, starke Wechselwirkungen und Nichtgleichgewichtseigenschaften berücksichtigt werden müssen. Dies hat die Entwicklung neuer Vielteilchen-Methoden initiiert, an denen auch das TPA beteiligt ist.

Die mesoskopische Physik schlägt weiterhin eine Brücke zur Physik, Chemie und Biologie. Ebenso eröffnen sich für Informatik und Elektrotechnik neue Dimensionen. Das TPA ist in verschiedene nationale und internationale Schwerpunktsprogrammen und euro-

päische Netzwerke integriert. Gemeinsame Projekte werden mit der Chemie und der Elektrotechnik an der RWTH Aachen sowie mit dem Forschungszentrum Jülich durchgeführt.

Oliver Borgmeier, Rolf Hempelmann, Heiko Lueken, Marcel Roth

Schwacher Ferromagnetismus in Kristallen und Nanokristallen

Magnetische Eigenschaften in Abhängigkeit von Teilchengröße und Struktur

Metallatome mit ungepaarten Elektronen sind magnetische Dipole. Gelingt es auf chemischem Wege, die atomaeren „Magnetnadeln“ in einem Festkörper parallel zu stellen (Bild 1a), kommt es zu spontaner Magnetisierung: Es liegt ein Ferromagnet vor. Bei Antiferromagneten tritt keine spontane Magnetisierung auf. Die magnetischen Dipole kompensieren sich. Im einfachsten Fall sitzen sie auf zwei ineinander greifenden magnetischen Untergittern, von denen das eine in eine ganz bestimmte Richtung magnetisiert ist, das andere in die genau entgegengesetzte Richtung (Bild 1b). Nur wenig weichen davon Materialien mit folgender Besonderheit ab: Die Untergittermagnetisierungen sind nicht streng kollinear ausgerichtet, es resultiert eine sehr kleine spontane Magnetisierung (Bild 1c). Diese Erscheinung wird schwacher Ferromagnetismus genannt.

Bild 1: Anordnung magnetischer Dipole: a) Ferromagnetismus, b) Antiferromagnetismus und c) schwacher Ferromagnetismus

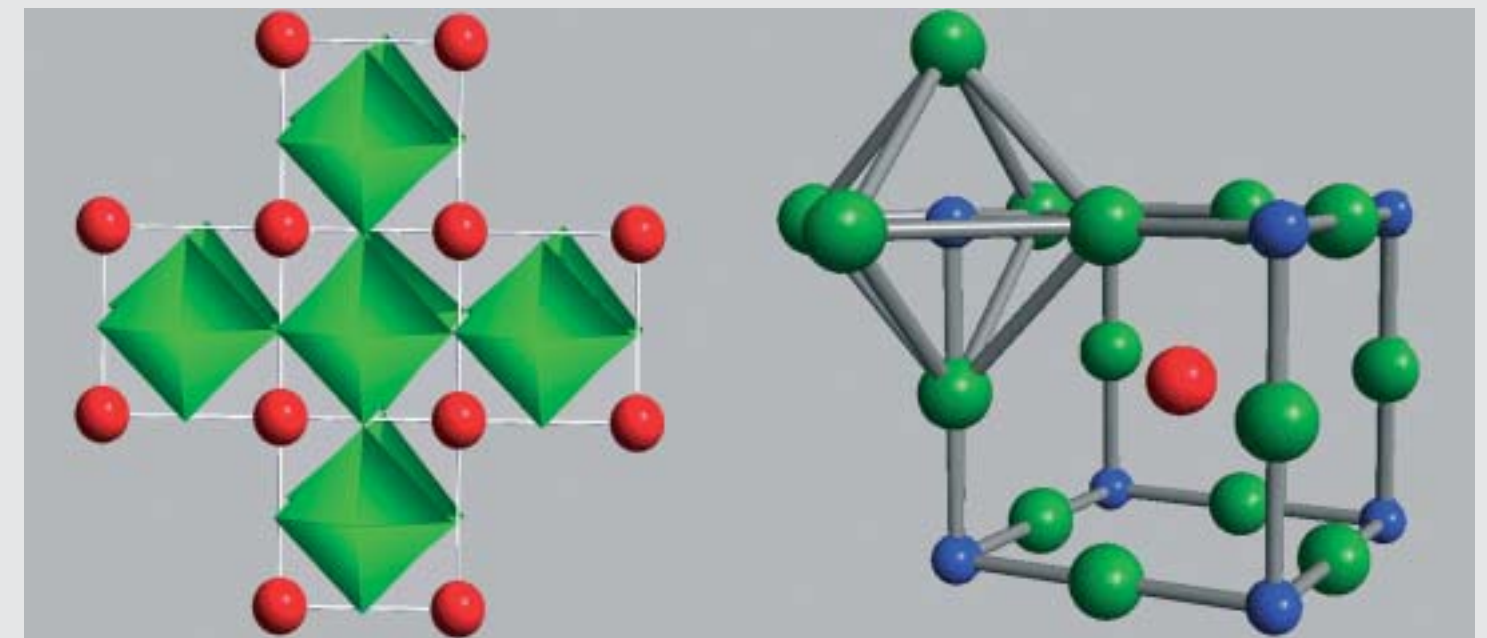
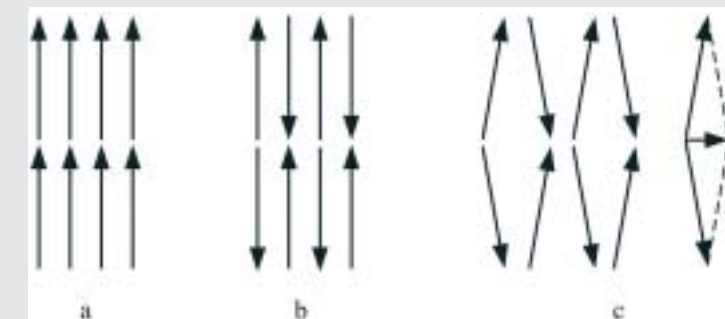


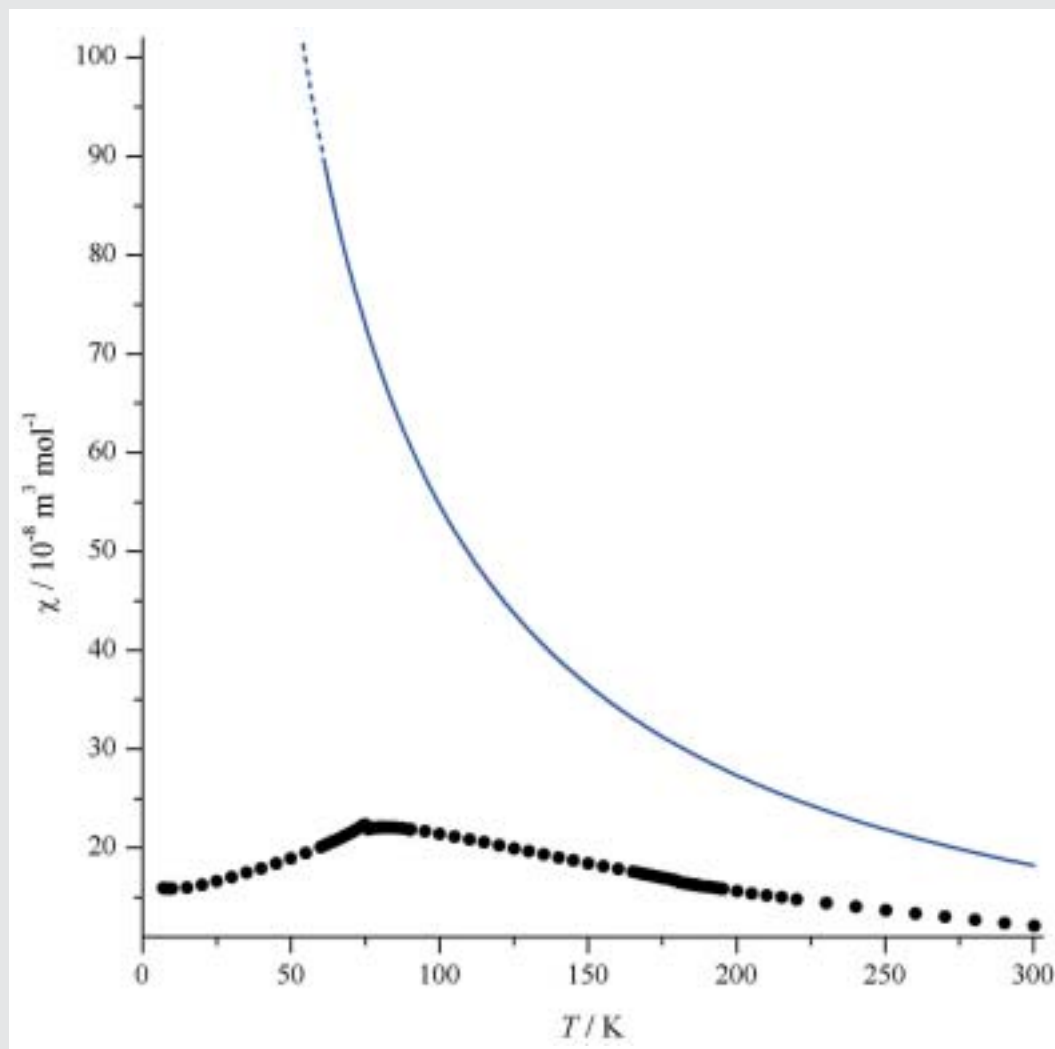
Bild 2: Struktur von NH_4MnF_6 : unterhalb und oberhalb von 181 K (links bzw. rechts)

Partikelgröße und -form magnetischer Materialien haben einen beträchtlichen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften und werden dem Anwendungsbereich entsprechend optimiert. Für Speichermedien in der Audio- und Videotechnik eignen sich mikrokristalline magnetische Nadeln und für den therapeutischen Einsatz in der Hyperthermie nanokristalline Ferromagnetika. Einer entsprechenden Anwendung schwach-ferromagnetischer Materialien steht die extrem geringe spontane Magnetisierung entgegen. Sie sind jedoch als „Sonde“ geeignet, um strukturelle Änderungen der Partikel beim Übergang kristallin $\rightarrow$ nanokristallin zu verfolgen.

Ammoniummanganfluorid mit der chemischen Formel NH_4MnF_6 ist ein schwacher Ferromagnet. Die beiden magnetischen Untergitter werden von Mangan aufgespannt. Kristalle der Verbindung sind aus der in Bild 2 (rechts) gezeigten

würfelförmigen Einheit aufgebaut. Sechs Fluorid-Anionen (F^- , ●) umgeben die Mangan-Kationen (Mn^{2+} , ●) in Form eines Oktaeders. Im Zentrum der Zelle sitzt das Ammonium-Kation (NH_4^+ , ●). Beim Abkühlen auf eine Temperatur unterhalb von 181 Kelvin (minus 92

Bild 3: Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität χ von kristallinem NH_4MnF_3 im Vergleich mit dem Idealverhalten freier Mn^{2+} -Ionen (blaue Kurve)



Grad Celsius) verzerrt sich die Elementarzelle (Bild 2, links). Dabei verkippen und verdrehen sich die Oktaeder gegeneinander.

Die magnetische Suszeptibilität χ misst die Bereitschaft der magnetischen Dipole, sich in Richtung eines Magnetfeldes zu drehen. Die Ablenkung wird jedoch durch verschiedene Faktoren erschwert, in erster Linie durch hohe Temperatur. Wäre nur sie im Spiel, sollte die Manganverbindung das durch die blaue Kurve in Bild 3 beschriebene ideale Temperaturverhalten zeigen. Misst man χ einer kristallinen NH_4MnF_3 -Probe bei sehr kleiner Magnetfeldstärke – um die Dipole möglichst wenig in ihrer freiwillig eingenommenen „leichten“ Richtung zu stören – erhält man Werte, die im gesamten Bereich weit unterhalb der Idealkurve liegen.

Das Resultat ist typisch für das Bestreben benachbarter Dipole, sich antiparallel zueinander auszurichten. Bild 4 zeigt die Einzelheiten in besserer Auflösung. Das relativ breite Maximum bei 82 Kelvin signalisiert, dass die kritische Temperatur fast erreicht ist, unterhalb der die magnetischen Dipole in ihrer Richtung fixiert werden. Darüber hinaus erkennt man beim Abkühlen zwei Stufen zu höheren χ -Werten, eine kleine bei 181 Kelvin, eine größere bei 75 Kelvin. Die Stufe bei 181 Kelvin erklärt sich aus dem Strukturwechsel: Bedingt durch Änderung von Bindungswinkel und -abständen im Strukturelement $\text{Mn}(\uparrow)\text{-F-Mn}(\downarrow)$, wird die antiparallele Kopplung benachbarter Dipole minimal geschwächt.

Am Sprung bei 75 Kelvin erkennt man das Einschalten der „Sonde“. Die Dipole richten sich bezüglich der Oktaederkanten aus, und da die Oktaeder gegeneinander verkippt/verdrehen sind, sind auch die Untergittermagnetisierungen nicht streng kollinear. Sie kompensieren sich also nicht vollständig, schwacher Ferromagnetismus etabliert sich. Versucht man, die Sprunghöhe zu interpretieren, tritt eine Komplikation auf: Die strukturelle Verzerrung unterhalb von 181 Kelvin erfolgt nicht ein-

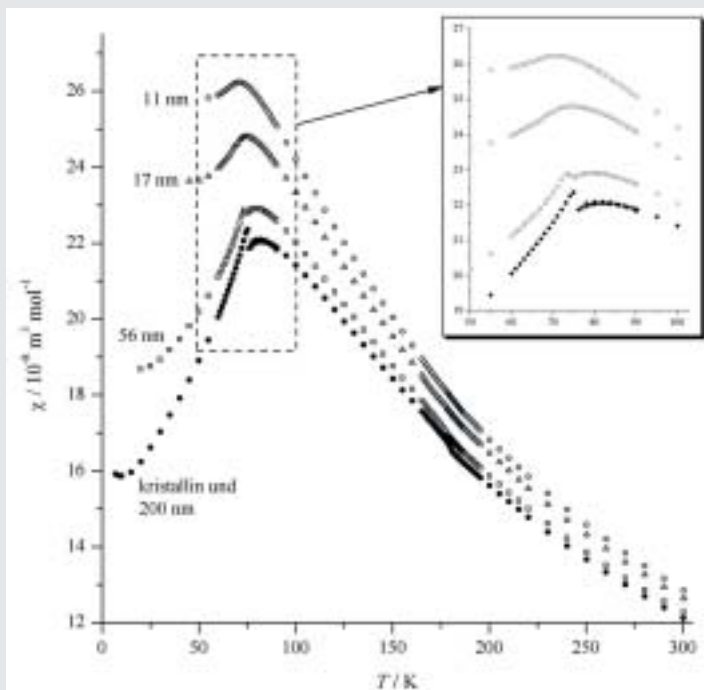


Bild 4: Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität χ von kristallinem und nanokristallinem NH_4MnF_3 .

heitlich im Kristall, sondern nur in kleineren Bezirken (Domänen). Von Domäne zu Domäne in einem Kristall ist die Verzerrung unterschiedlich gerichtet. Dies trifft auch für die mit jeder Domäne verknüpfte schwache spontane Magnetisierung zu. Da ein Sprung in χ nachweisbar ist, muss eine unvollständige Gleichverteilung der magnetischen Domänen vorliegen. Andernfalls würden sich die korrespondierenden Magnetisierungen im Mittel aufheben, die Stufe in der χ -T-Kurve also ausbleiben. Unterhalb von 75 Kelvin ist das magnetische Verhalten normal: Die χ -Werte werden kleiner, denn mit abnehmender Temperaturbewegung wird die Kopplung der Dipole untereinander und ihre Fixierung an die leichten Richtungen immer weniger gestört, ihre Ablenkung durch das Magnetfeld somit zunehmend schwerer.

Nanokristallines NH_4MnF_3 wurde aus Mikroemulsionen von Ammoniumfluorid und Manganacetat in Gegenwart eines Tensids in mittleren Partikeldurchmessern von 200, 56, 17 und 11 Nanometern herge-

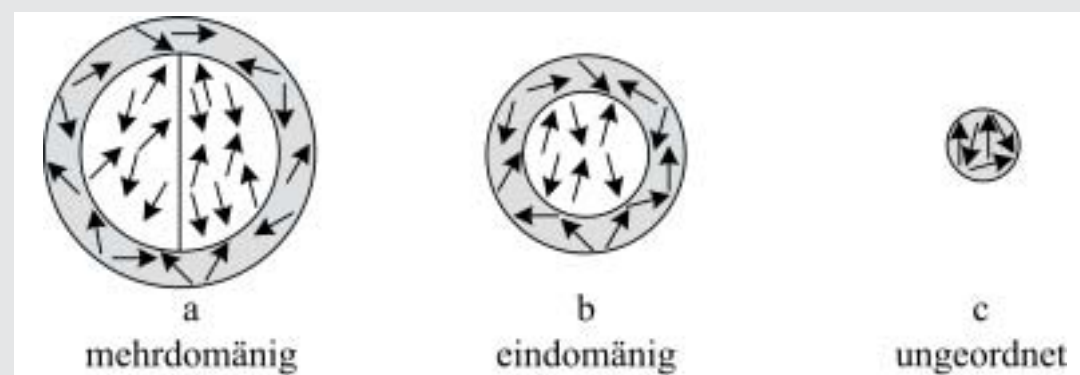


Bild 5: Schema zum Aufbau eines Teilchens vom geordneten Mehrdomänenzustand über den Eindomänenzustand zum ungeordneten Zustand bei abnehmender Teilchengröße.

stellt. Mit abnehmender Teilchengröße sind folgende Änderungen in den magnetischen Eigenschaften zu beobachten: (1) Von Probe zu Probe wird χ insgesamt angehoben und die Temperatur, bei der χ maximal ist, abgesenkt (Bild 4); (2) die Stufe in der χ -T-Kurve bei 181 Kelvin wird systematisch kleiner, und bei 75 Kelvin verschwindet sie schließlich ganz.

Ergebnis (1) dokumentiert, dass beim Übergang kristallin $\rightarrow$ nanokristallin die antiparallele Kopplung benachbarter Dipole schwächer wird. Zur Erklärung teilt man den Kristall in einen inneren geordneten und einen äußeren ungeordneten Bereich auf (Bild 5). Während die Atome im makroskopischen Kristall geordnet sind, ausgenommen die hier zahlenmäßig zu vernachlässigenden Atome an der Oberfläche, ändern sich die Verhältnisse grundlegend bei Teilchen im Nanometerbereich: Die Volumenanteile des ungeordneten Außenbereichs nehmen prozentual gegenüber dem geordneten Innenbereich zu, und bei sehr kleinem Durchmesser sind alle Atome des Teilchens

ungeordnet. Im geordneten Bereich ist die Einheit $\text{Mn}(\uparrow)\text{-F-Mn}(\downarrow)$ nahezu linear und zeigt relativ starke antiparallele Dipol-Kopplung. Der Oberflächenbereich ist verzerrt und die Kopplung der Dipole demzufolge schwächer. Da der ungeordnete Teil mit abnehmender Partikelgröße prozentual zunimmt, ist die aus der Messung ablesbare mittlere Kopplungsstärke umso schwächer, je kleiner die Teilchen sind.

In der Diskussion von Ergebnis (2) ist die Domänenstruktur der Kristallite zu berücksichtigen. Mit zunehmender Feinheit der Partikel sind zwei Situationen zu unterscheiden: Bei ausreichend kleiner Korngröße liegen Eindomänenteilchen vor. Sie werden noch den Strukturwechsel durchlaufen und folglich den Sprung bei 181 Kelvin zeigen, nicht jedoch den bei 75 Kelvin, da für die Eindomänenteilchen keine Vorzugsrichtung existiert. Bei weiterer Verkleinerung ist die „Verunordnung“ vollständig. Ein Strukturwechsel ist nicht zu erwarten, und mit Stufen in der χ -T-Kurve ist nicht zu rechnen.

Bei der Einordnung der Ergebnisse kristallin $\rightarrow$ nanokristallin in das Raster mehrdomänig $\rightarrow$ eindomänig $\rightarrow$ ungeordnet ist zu berücksichtigen, dass die Kristallite einer Probe eine gewisse Korngrößenverteilung aufweisen. Mehrdomänenteilchen liegen in der kristallinen und der Probe mit der Korngröße 200 Nanometer vor; denn Sprünge in der χ -Kurve treten sowohl bei 181 als auch bei 75 Kelvin auf. Bei der 56 Nanometer-Probe ist der Effekt bei 75 Kelvin nur schwach ausgebildet. Nur die Fraktion mehrdomäniger Partikel trägt zu diesem Effekt bei. Die beiden feinkörnigsten Proben zeigen den Sprung bei 75 Kelvin nicht, die Stufe bei 181 Kelvin ist gerade noch zu erkennen. Offensichtlich gibt es hier ein Gemisch von eindomänigen und vollständig ungeordneten Nanopartikeln.

Über die skizzierte magnetische Analyse hinaus lässt sich die Untersuchungsmethode ausweiten, indem man bei verschiedenen starken Magnetfeldern misst. Man erhält Informationen über Domänenwandverschiebung und die kri-

tische Magnetfeldstärke, bei der sich die Dipole aus ihrer Verankerung lösen.

Autoren:

Dr. rer.nat. Oliver Borgmeier war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie und ist nun Betriebsleiter bei der GE Bayer Silicones in Leverkusen. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Rolf Hempelmann lehrt am Institut für Physikalische Chemie der Universität des Saarlandes. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Heiko Lueken ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebiets Anorganische Chemie. Dr. rer.nat. Marcel Roth war Doktorand am Lehrstuhl für Physikalische Chemie an der Universität des Saarlandes und ist jetzt in der Forschungsabteilung der Firma Henkel in Düsseldorf tätig.

Uwe Kreibitz, Gero von Plessen, Ulrich Simon

Optische Eigenschaften metallischer Nanopartikel

Vielfältige Einsatzmöglichkeiten für kleinste Teilchen

Bild 1: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Gold-Nanopartikeln verschiedener Form und Größe.

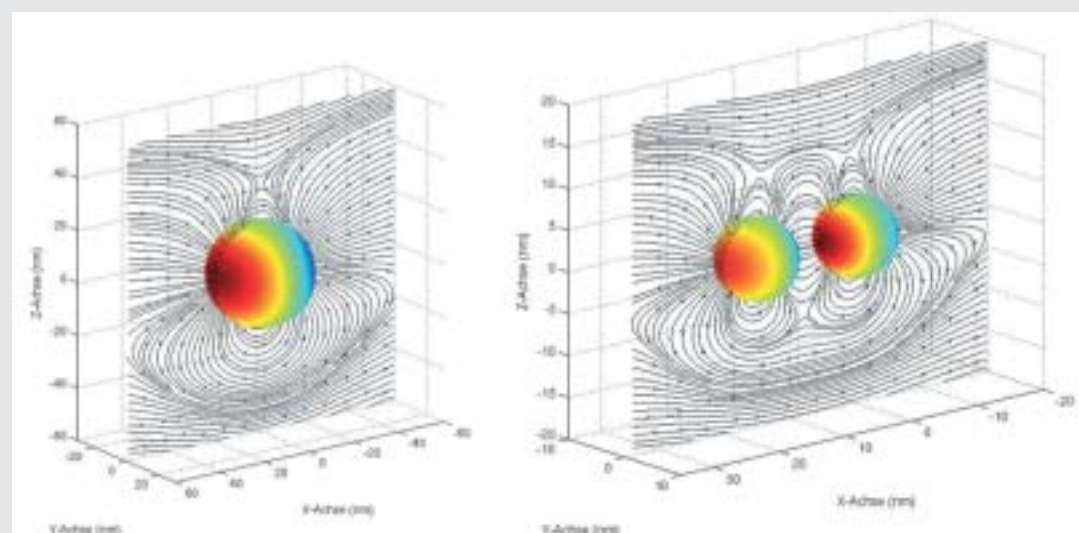
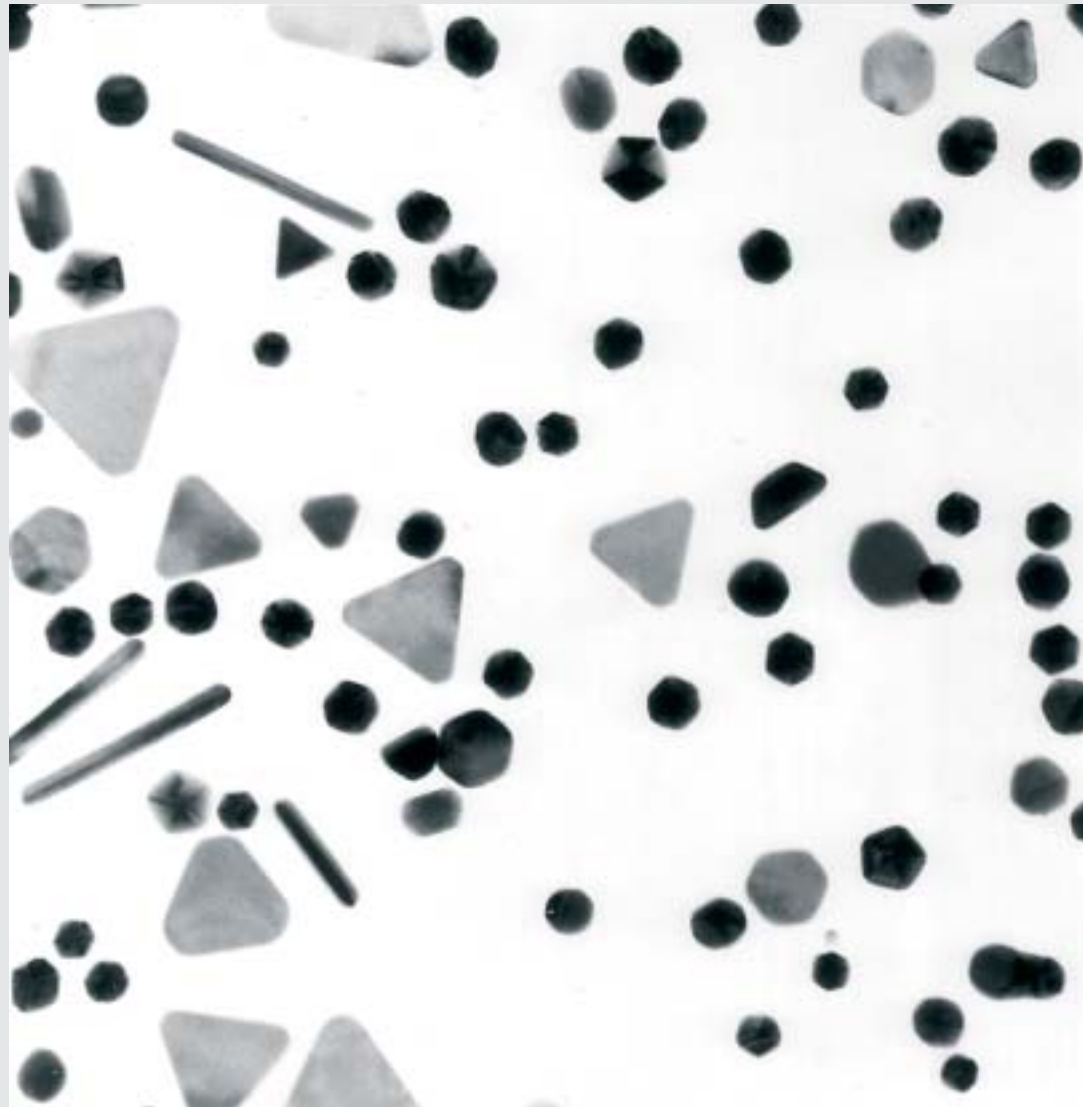
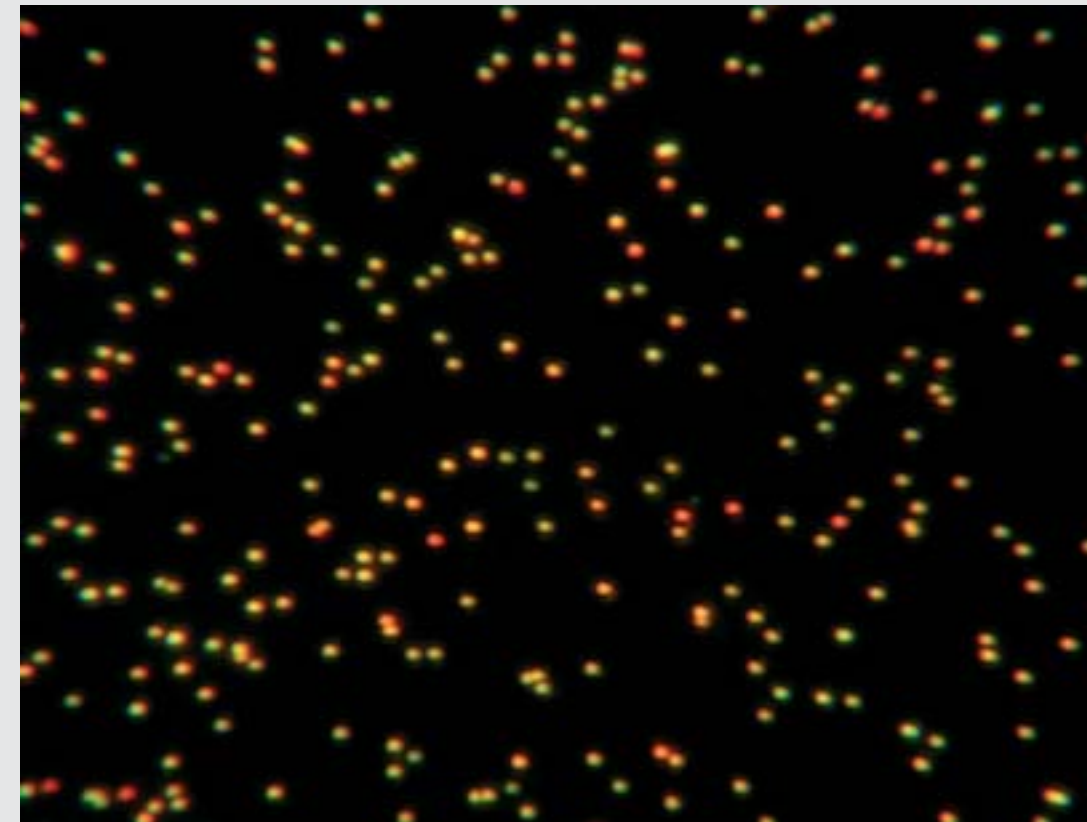


*Bild 2 (a): Berechnete momentane Ladungsverteilung auf der Oberfläche eines 40 nm großen, kugelförmigen Gold-Nanopartikels beim Durchgang einer von unten einfallenden Lichtwelle (blau: negative Oberflächenladung, rot: positive). Die Feldlinien zeigen die Richtung des elektrischen Feldes in einer ausgewählten Ebene durch das Partikel an.
(b): Entsprechend für zwei benachbarte 10 nm große Gold-Nanopartikel.*

Bild 3: Dunkelfeldmikroskopische Aufnahme kugelförmiger Gold-Nanopartikel. Die unterschiedlichen Farben der Partikel sind eine Folge der unterschiedlichen Partikelgrößen.



streut („Sendeantenne“). In der Betrachtungsweise der Quantentheorie werden dabei Oberflächenplasmon-Polaritonen angeregt. Sie sind in Edelmetall-Partikeln besonders stark ausgeprägt und liefern leuchtende Farben. So liegen bei kleinen Nanokugeln aus Silber Lichtabsorption und -streuung im blauen Spektralbereich, das transmittierte (nach der Absorption übrigbleibende) Licht ist also gelb. Goldpartikel absorbieren und streuen im Blaugrünen (Bild 3), und entsprechend ist die komplementäre Transmissionsfarbe das tiefröte „Goldrubin“.

Weil sie mit einer elektrischen Aufladung der Teilchenoberfläche verbunden sind, reagieren die Plasmaschwingungen sehr empfindlich auf alle Änderungen dieser Oberfläche, sei es durch Änderung der Teilchengröße, der Teilchenform oder des Umgebungsmaterials. Dies führt zu einer großen Vielfalt von gezielt erzeugbaren Farben und macht optische Untersuchungsmethoden zu den Methoden der ersten Wahl.

Am I. Physikalischen Institut gehört die Abhängigkeit der Plasmaschwingungen von Teilchengröße und -form zu den Forschungsschwerpunkten. Mit steigender Teilchengröße erfahren die Plasmaschwingungen eine Farbverschiebung in den langwelligen („roten“) Teil des Spektrums, und es werden immer mehr Schwingungsmoden angeregt. Gleichzeitig werden die Partikel als Streustrahler („Sendeantenne“) immer effizienter. Dies hat Strahlungsdämpfung zur Folge: Die Lebensdauer der Plasmonen wird immer kürzer, bis sie bei großen Nanopartikeln nur noch einige Femtosekunden beträgt.

Ein kurioser Effekt zeigt sich bei länglichen, ellipsoidähnlichen Nanopartikeln. Hier ist die Partikelfarbe von der Richtung der Plasmaschwingung abhängig: Schwingen nämlich die Elektronen in der Längsrichtung der Teilchen, ist wegen der spitzen Oberflächenform und des größeren gegenseitigen Abstandes der oszillierenden Oberflächenladungen die Farbe ins Rote verschoben, bei einer Schwingung

Metallteilchen mit Größen im Nanometer-Bereich, also metallische Nanopartikel, haben ungewöhnliche Eigenschaften, die sich für vielfältige technische Anwendungen eignen. So werden ferromagnetische Partikel in Speichermedien und als Ferrofluide in der experimentellen Medizin eingesetzt, Silberpartikel in der Fotografie, Goldpartikel als Marker für die Elektronenmikroskopie von Biomaterialien und Platincluster als Katalysatoren in Kraftfahrzeugen. Einsatz in der technischen Optik finden Metall-Nanopartikel beispielsweise als Farbpigmente, in Lichtpolarisatoren, in Bio-Sensoren, Gas-Sensoren und in der nichtlinearen optischen Spektroskopie. Mehrere dieser technischen Anwendungen werden in unseren Arbeitsgruppen erforscht, wobei die optischen im Vordergrund stehen.

Edelmetall-Nanopartikel – also Teilchen aus Gold, Silber, Kupfer und deren Legierungen – besitzen als eine Besonderheit auffallende Farben, die sich stark von dem metallischen Glanz der massiven Metalle unterscheiden. Bereits in der Antike wurden mit solchen Nanopartikeln wertvolle Glasgefäße gefärbt, und auch die strahlenden roten und gelben Farben mancher mittelalterlichen Kirchenfenster beruhen auf ihnen.

Edelmetall-Nanopartikel weisen ab einer Mindestgröße von etwa 50 Atomen Kristallstruktur auf. Sie können in unterschiedlichen Größen und Formen hergestellt werden (Bild 1), wodurch auch ihre Farben verändert werden. Diese Farben beruhen auf den den Metallen eigenen beweglichen Leitungselektronen, dem Elektronenplasma. Im Nanopartikel kann es durch einfallendes Licht geeigneter Frequenz zu resonanten Schwingungen angeregt werden, wobei sich die Teilchenoberfläche im Takt der Lichtwelle elektrisch auflädt (Bild 2a). Man spricht von den Mie'schen Plasmaschwingungsmoden. Das Partikel wirkt als Antenne, die resonant elektromagnetische Strahlung absorbiert („Empfangsantenne“) und

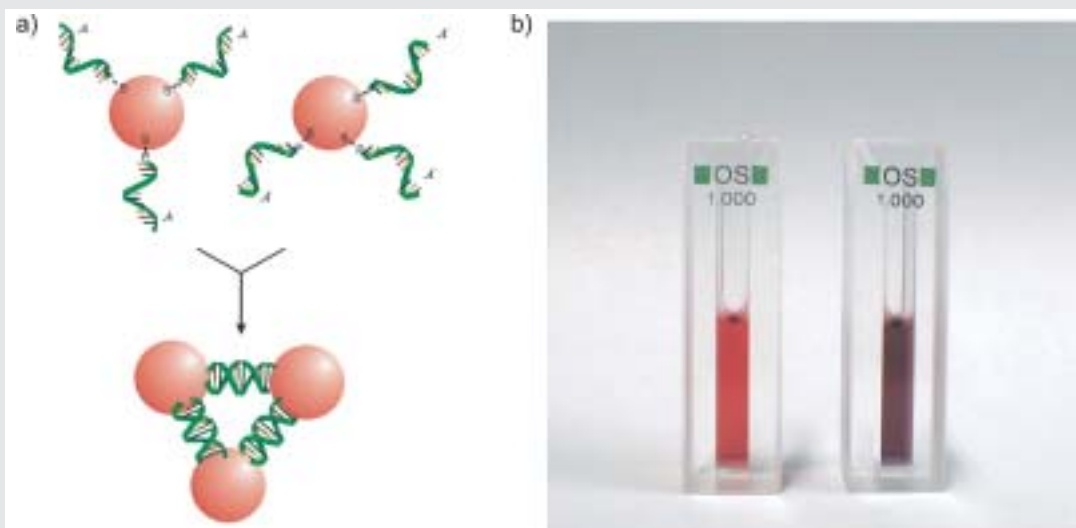


Bild 4: Links: Reaktionsschema für die Vernetzung DNA-funktionalisierter Gold-Nanopartikel. Rechts: Die Lösung der freien Nanopartikel zeigt die charakteristische purpurrote Farbe, während die vernetzten Nanopartikel aufgrund der Kopplung der Plasmonenschwingung blau erscheinen.

Ein einfaches Experiment, welches das Konzept dieser Erkennungsmöglichkeit verdeutlicht, ist die Verknüpfung von Goldnanopartikeln über komplementäre DNA-Stränge (Bild 4). Kommt es zur Hybridisierung der DNA-Einzelstränge, so bildet sich ein Netzwerk aus, in dem der Abstand der Nanopartikel zueinander von der Länge der DNA-Stränge abhängt. Die DNA, die sich bezüglich ihrer Basensequenz und in ihrer Länge exakt maßschneidern lässt, dient daher der Erkennung der Partikel untereinander sowie als Abstandshalter.

In dieser Konstellation kommt es nun zu der zuvor beschriebenen Kopplung der Plasmaschwingungen mit daraus resultierenden neuen optischen Eigenschaften des Netzwerkes. Die Absorptionsbande der Partikel im Verbund verschiebt sich ins Rote, wobei das Ausmaß der Verschiebung vom Partikelabstand (Länge der DNA-Moleküle) als auch von der Netzwerkgröße und -topologie abhängt. Auf die gleiche Weise lassen sich elektrisch leitfähige Schichten erzeugen, in denen der elektrische Transport über Sprungprozesse einzelner Elektronen erfolgt. Diese Eigenschaft lässt sich beispielsweise für den Aufbau elektrischer DNA-Sensoren oder von biomolekular steuerbaren Transistoren nutzen. Damit bietet die Funktionalisierung von Metall-Nanopartikeln mit Biomolekülen ein weit gefächertes Forschungs- und Anwendungspotenzial, welches von der Grundlagenforschung über biomolekulare Materialien bis in den Bereich der medizinischen Diagnostik oder der Informationstechnologie reicht.

Die Liganden können nun chemisch etwa mit Biomolekülen wie DNA verknüpft oder durch diese ersetzt werden. Auf diese Weise entstehen biofunktionalisierte Partikel, die mit den hochspezifischen Erkennungseigenschaften der Biomoleküle ausgestattet sind.

entlang der kurzen Achsen ins Blaue. Solche Nanopartikel werden in Lichtpolarisatoren eingesetzt. Der Extremfall langgestreckter Teilchenform ist bei metallischen Nanodrähten erreicht. Liegen Partikel sehr eng beieinander, so üben die oszillierenden Oberflächenladungen in den Nachbarteilchen elektromagnetische Anziehungs- oder Abstoßungskräfte aufeinander aus (Bild 2b), und ihre Plasmaschwingungen werden miteinander gekoppelt. Dadurch bilden sich neue Schwingungsmoden: Eine Mode, die entlang der Verbindungsachse der Partikel schwingt, ist ins Rote verschoben, während die dazu senkrecht schwingenden Moden blauverschoben sind. Sie lassen sich mit polarisiertem Licht selektiv anregen. Die Modenaufspaltung ist noch ausgeprägter, wenn viele Teilchen zu einer Kette zusammengefügt sind.

Plasmaschwingungen geben als empfindliche Sensoren über atomare Strukturen und elektronische Eigenschaften der Nanopartikel Auskunft. Diese sind besonders interessant, weil beim Wachsen der Partikel quasi die „Geburt“ des Festkörpers, also der Übergang vom Molekül zum kristallinen Festkörper mit seiner typischen elektronischen Bandstruktur beobachtet werden kann. Physikalische und chemische Materialeigenschaften, die bei sehr kleinen Teilchen von deren Größe abhängen,

können für viele technische Zwecke auch gezielt eingestellt werden.

Neben diesen Größeneffekten weisen Nanopartikel eine weitere Besonderheit auf: Je kleiner die Teilchen, desto größer wird nämlich der Anteil der Atome, die ihre Oberfläche bilden, und auch dadurch werden die Materialeigenschaften beeinflusst. Mit dem Oberflächenanteil der Atome steigt auch die dort gespeicherte Oberflächenenergie drastisch. Daher sind viele Nanostrukturen energetisch nicht stabil. Dies ist auch ein Grund dafür, dass Herstellung und Charakterisierung von Nanopartikeln oft großen experimentellen Aufwand erfordern.

Noch komplizierter wird es, wenn Nanopartikel von Materie umgeben sind, wie etwa Goldpartikel in Glas oder Silberpartikel von einer Silbersulfid-Hülle. Dann geht die (freie) Oberfläche in einen viel komplexeren Grenzflächenbereich über, der für jede Umgebungssubstanz anders aufgebaut ist. Solche Grenzflächen sind trotz vielfältiger technischer Nutzung noch immer kaum verstanden. Hier ist ein weites, grundlegend wichtiges Feld auch für künftige Forschung. Speziell die Mie'schen Plasmaschwingungen in Metall-Nanopartikeln reagieren empfindlich auf die Beschaffenheit solcher Grenzflächen. Dies wird am I. Physikalisches Institut zur Erforschung von Grenzflächen-Eigenschaf-

ten und von elektronischen und chemischen Grenzflächenprozessen genutzt, wozu die Art der Umgebungsmedien systematisch variiert wird.

Die chemische Modifizierung der Oberfläche durch die direkte Anbindung so genannter Ligandmoleküle an die Metallnanopartikel wird am Lehrstuhl für Anorganische Chemie und Elektrochemie untersucht. Hier werden Nanopartikel der Metalle Gold, Silber, Platin und Palladium sowie Legierungspartikel durch direkte chemische Synthese hergestellt. Die Synthese erfolgt ausgehend von den entsprechenden Metallsalzen durch Reduktion in Gegenwart geeigneter Liganden (zum Beispiel Zitronensäure), die die hoch reaktiven Nanopartikel davor schützen, direkt nach ihrer Bildung zu größeren Aggregaten und schließlich zum makroskopischen Metall zusammenzuwachsen. Die Liganden erlauben es, die Partikel über längere Zeit in Lösung stabil zu halten. Die Lösungen zeigen dann die für die jeweilige Partikelsorte und -größe charakteristische Farbe aufgrund der zuvor besprochenen Plasmaschwingung.

Die Liganden können nun chemisch etwa mit Biomolekülen wie DNA verknüpft oder durch diese ersetzt werden. Auf diese Weise entstehen biofunktionalisierte Partikel, die mit den hochspezifischen Erkennungseigenschaften der Biomoleküle ausgestattet sind.

Detlef Müller-Schulte, Thomas Schmitz-Rode

Neue Trägermedien für Therapeutika und Pharmaka

Thermosensitive Nano- und Mikropartikel als kontaktfrei steuerbare Pharmakaträger

Trägermedien für Therapeutika beziehungsweise Pharmaka sind in den letzten zwei Jahrzehnten intensiv beforscht worden, da man sich von ihrem Einsatz eine effektivere und nebenwirkungsärmere Therapie verspricht. Ziel des hier vorgestellten Projektes ist die Herstellung und Erprobung sphärischer Nano- und Mikropolymerpartikel (Beads), die als kontaktfrei steuerbare Pharmakaträger oder -depots in der Medizinertherapie einsetzbar sind.

Ausgangspunkt unseres Ansatzes sind thermosensitive Polymerträger, in die entsprechende Pharmaka zusammen mit magnetischen Nanopartikeln (Magnetkolloide mit Teilchengrößen von 10-100 Nanometern) eingekapselt sind. „Thermosensitiv“ bedeutet, dass die Polymerpartikel aufgrund ihrer speziellen chemisch-physikalischen Eigenschaften oberhalb einer bestimmten Schwellentemperatur („untere kritische Lösungstemperatur“) einen Großteil ihres gebundenen Wassers abgeben – in der Polymerchemie spricht man von einem Entquellungsprozess. Während dieses Vorganges, der von einer deutlichen Reduktion der Partikelgrößen (bis zu 70 Prozent) begleitet ist, werden gleichzeitig auch die eingekapselten Pharmaka freigesetzt. Anschaulich lässt sich dieser Prozess mit dem Auswringen eines Schwammes vergleichen.

Während die Thermosensibilität in Verbindung mit eingekapselten Pharmaka einen neuen Freisetzungsmechanismus eröffnet, fungieren die miteingekapselten Magnetkolloide als kontaktfrei steuerbare Heizelemente. Dies wird mit Hilfe einer äußeren Magnetspule (Induktionsspule) erreicht, die hochfrequente magnetische Wechselfelder erzeugt – in etwa vergleichbar mit dem Mikrowellenprinzip –, die die Magnetpartikel induktiv aufheizen. Ursache der Erwärmung sind induzierte Ummagnetisierungsprozesse in den Magnetpartikeln. Die erzeugte Wärme in den Magnetkolloiden wird durch Wärmeleitung auf die Polymermatrix übertragen, wodurch innerhalb we-

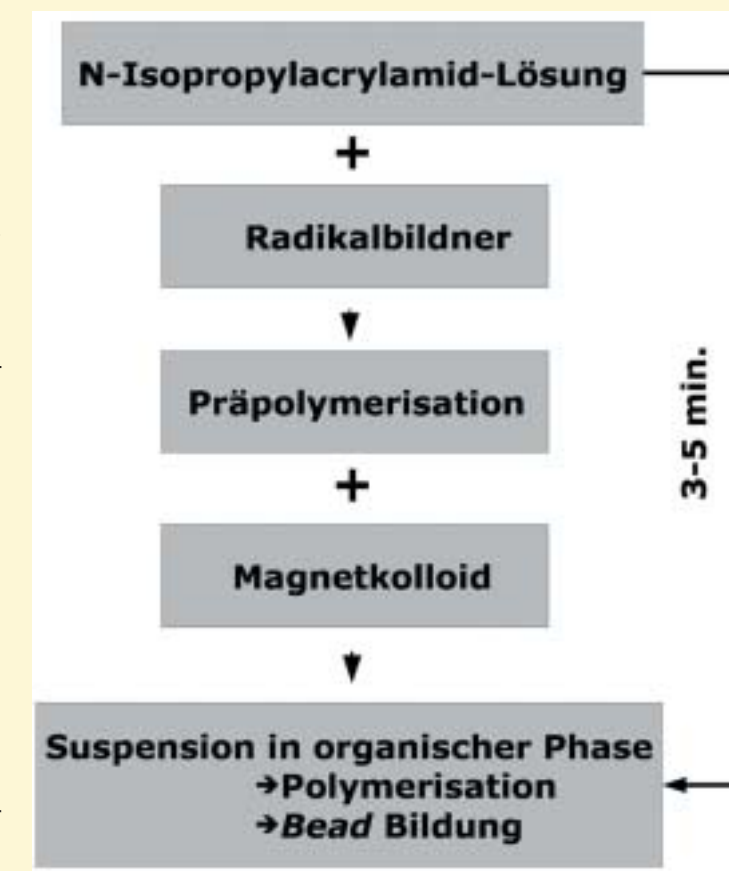


Bild 1: Fließschema der inversen Suspensionspolymerisation zur Herstellung sphärischer Polymerpartikel.

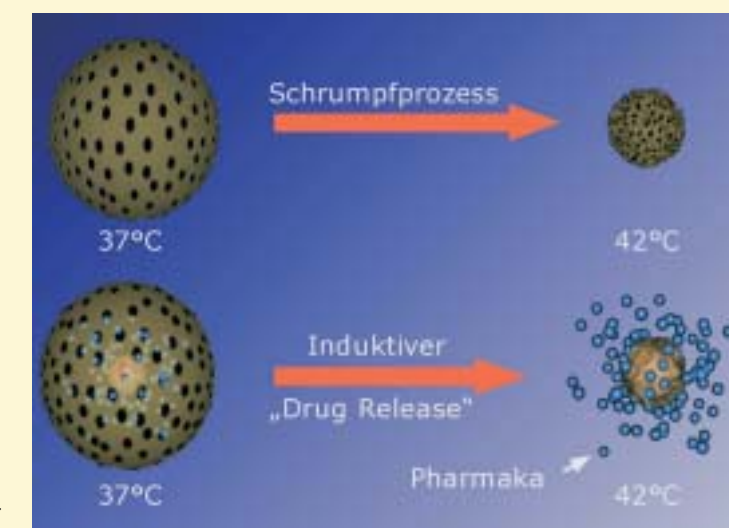


Bild 2: Prinzip der kontaktfrei steuerbaren Pharmakaträger

niger Sekunden die zum Schrumpfen des Polymeren benötigte Schwellentemperatur erreicht wird.

Zur induktiven Erwärmung der Polymerträger werden in der Regel magnetische Wechselfelder mit einer Frequenz von 0,2 bis fünf Megahertz verwendet. Dieses Frequenzfenster ermöglicht die abschließliche Aufheizung der Magnetpartikel. Als magnetisches Material wird bevorzugt Magnetit (Fe_3O_4) oder γ -Eisenoxid (Fe_2O_3) verwendet, das sich mit Hilfe nasschemischer Verfahren in nanopartikulärer Form herstellen lässt. Die Bedingung einer erfolgreichen Einkapselung solcher Magnetkolloide in eine sphärische Polymermatrix konnte mit Hilfe einer neu entwickelten Suspensionspolymerisation, dessen Syntheschema in Bild 1 dargestellt ist, erfüllt werden. Grundprinzip dieses Syntheseverfahrens, das wahlweise die Herstellung von Nano- und Mikropolymerpartikeln ermöglicht, besteht in der Dispersion einer Magnetkolloid-enthaltenden wässrigen N-Isopropylacrylamid-Phase in einer mit dieser nicht mischbaren organischen Phase (zum Beispiel Pflanzenöl). Die dabei entstehenden Monomertropfen werden anschließend zu festen Polymerpartikeln polymerisiert. Wie aus dem Syntheschema ersichtlich (Bild 1), können nach wenigen Minuten sphärische Polymerpartikel hergestellt werden.

Zentrales Anliegen der neuen Technologie in Hinblick auf die therapeutische Applikation ist die Einkapselung von Pharmaka beziehungsweise Wirksubstanzen in die Polymermatrix sowie die anschließende Freigabe dieser Substanzen aufgrund des über die Induktionsspule erzeugten äußeren magnetischen Stimulus. Das Wirkprinzip dieses Ansatzes ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

Die grundsätzliche Machbarkeit des neuen Ansatzes wurde zunächst mit Pharmaka-Modellsubstanzen überprüft. Hierzu wurden Farbstoffe, wie beispielsweise Methylblau und Rhodamin B, herangezogen. Aufgrund ihres Molekulargewichtes und ihrer

Molekülstruktur weisen beide Analogien zu heute gebräuchlichen Antitumormitteln (so zum Beispiel zu Methotrexat und Tamoxifen) auf, so dass in Bezug auf die späteren In-vivo-Applikationen authentische Ergebnisse zu erwarten sind. Wie sich anhand verschiedener Aufheizexperimente mit diesen Modellsystemen zeigen lässt, können die eingekapselten Modellfarbstoffe innerhalb kurzer Zeit in nachweisbarer Konzentration freigesetzt werden. Unterstützt wird dieses Ergebnis durch die kinetischen Daten, die einen direkten Zusammenhang zwischen steigender Temperatur und freigesetzter Farbstoffmenge ausweisen.

Durch Kombination mit einem statischen Magnetfeld eröffnet der neue Therapieansatz eine zusätzliche Perspektive, die Pharmaka-Applikation noch gezielter einzusetzen. Dazu können die applizierten, im Kreislaufsystem zirkulierenden Magnetpartikel durch Anlegen eines statischen Magnetfeldes an einem Ort, zum Beispiel im Tumorgewebe, fokussiert werden. Durch die anschließende Anwendung des hochfrequenten Magnetfeldes kann dann dort die Wirksubstanz in konzentrierter Form freigesetzt werden.

Der vorliegende Ansatz, die Thermosensibilität mit Einkapselung von Therapeutika und der induktiven Aufheizung zu kombinieren, erlaubt erstmals die Realisierung kontaktfrei steuerbarer Nano- und Mikroträger (Stimulus-Response-Prinzip). Andere, heute bekannte Stimulus-Response-Polymerträger basieren unter anderem auf thermischen, elektrischen, enzymatischen, magnetischen oder ionischen Stimuli. Keiner dieser Träger wäre jedoch bei einem therapeutischen Einsatz im menschlichen Körper von außen kontaktfrei steuerbar.



Detlef Müller-Schulte (links) und Thomas Schmitz-Rode halten ein Reagenzglas, in das noch schwach eingestellte Magnetfeld der Stereotaxis-Anlage. Foto: Peter Winandy

Das erste konkrete Ziel des neuen Ansatzes liegt in der Entwicklung eines Therapieverfahrens speziell für Lebertumore. Maligne Lebertumore in einem fortgeschrittenen Stadium sind aufgrund ungünstiger Tumorlokalisationen und -ausdehnungen überwiegend inoperabel und gehen mit einer Überlebenszeit von nur drei bis zwölf Monaten einher. Alternative Verfahren, die zu einem Einschmelzen und zur Verödung des Tumorgewebes in der Leber unter Umgehung operativer Maßnahmen führen könnten, sind daher von größter therapeutischer und gesundheitsökonomischer Bedeutung. Auf der Basis des neuen Therapieansatzes ergeben sich folgende Ansatzpunkte zur Verbesserung:

- Reduktion der Zytostatika-Dosis durch gezielte und konzentrierte lokale Applikation
- Verminderung der Zytostatika-Nebenwirkungen mit entsprechender Kostenreduktion der dafür sonst unumgänglichen Begleitmaßnahmen
- Reduktion bzw. Vermeidung aufwendiger operativer Maßnahmen
- Reduktion der stationären Nachbehandlung mit entsprechender Kostenreduktion

Autoren:

Dr. rer.nat. Detlef Müller-Schulte ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Klinik für Radiologische Diagnostik. Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Experimentelle Diagnostische und Interventionelle Radiologie.

Die hier vorgestellte Technologie wird durch das Aachener Kompetenzzentrum Medizintechnik (AKM) gefördert.

Karl-Heinz Klöss, Tobias Koplin, Daniel Sanders, Maike Siemons, Ulrich Simon

Nanopartikel in der Sensorforschung

Neue Möglichkeiten durch kombinatorische Chemie

Die Sensorik ist einer der wichtigsten Massenkategorien der Zukunft mit einer stetig steigenden Zahl und Vielfalt von Anwendungen sowohl im industriellen als auch im privaten Bereich. Immer mehr Sensoren werden bei der technischen Prozessüberwachung, im Umweltschutz oder in der Medizin eingesetzt. Insbesondere im Kraftfahrzeug sind Gassensoren zur Optimierung von Verbrennungsprozessen in Motoren, wie die Lambda-Sonde, nicht mehr wegzudenken. Dadurch wird eine erhebliche Verbesserung der Sicherheit, der Umweltverträglichkeit und nicht zuletzt des persönlichen Komforts ermöglicht. Die daraus resultierenden Anforderungen an ein Sensorsystem machen die Entwicklung schneller und empfindlicher Gassensoren mit geringer Querempfindlichkeit zum Gegenstand aktueller Forschung.

In vielen Bereichen der Gassensorik werden Metalloxide wie Zinndioxid, Titandioxid oder Zirkondioxid als sensitive Materialien eingesetzt. Durch ihre chemische Stabilität lässt sich eine für den praktischen Einsatz notwendige Langzeitstabilität der Sensorsysteme erreichen. Darüber hinaus eignen sie sich auch für den Einsatz unter harschen Einsatzbedingungen, wie sie zum Beispiel im Abgasstrom eines Verbrennungsmotors herrschen, und unter denen organische Materialien wie etwa Polymere oder Farbstoffe zerstört würden.

Zur Beantwortung der Frage, welche Vorteile Nanopartikel gegenüber mikrokristallinen Materialien haben, soll im Folgenden zunächst das Funktionsprinzip eines solchen Sensors beschrieben werden. Dieses beruht im Idealfall auf einer gasspezifischen Änderung des elektrischen Widerstandes etwa bei einer Konzentrationsänderung eines zu detektierenden Gases (Zielgas) in der umgebenden Atmosphäre. Typischerweise werden dazu polykristalline Metalloxidschichten zur elektrischen Kontaktierung auf entsprechenden Elektrodenstrukturen aufgebracht.

Sind diese Sensorschichten der normalen Raumluft ausge-

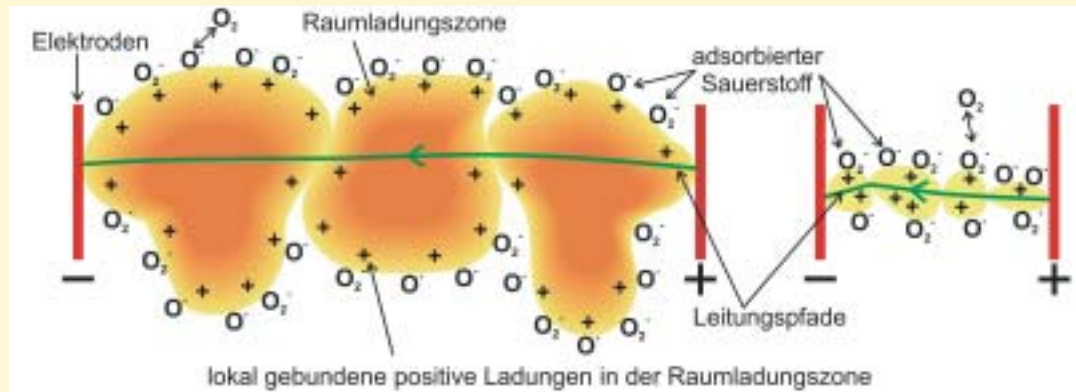


Bild 1: Sensormaterial unter Raumluftbedingungen

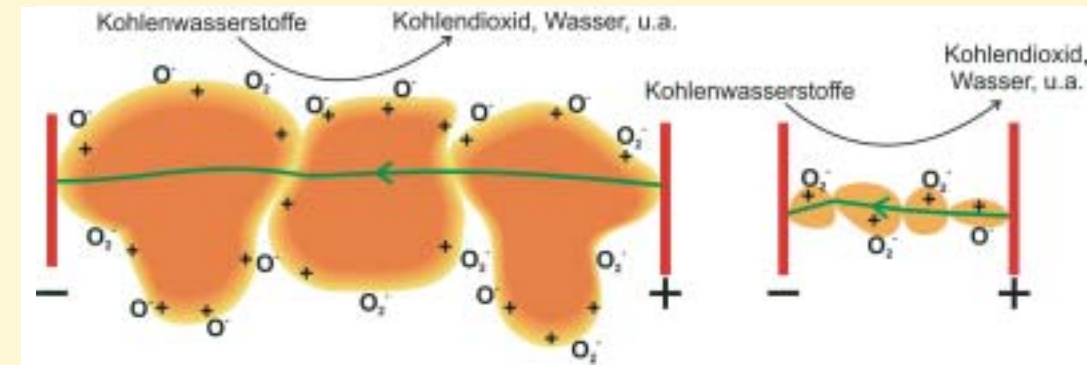
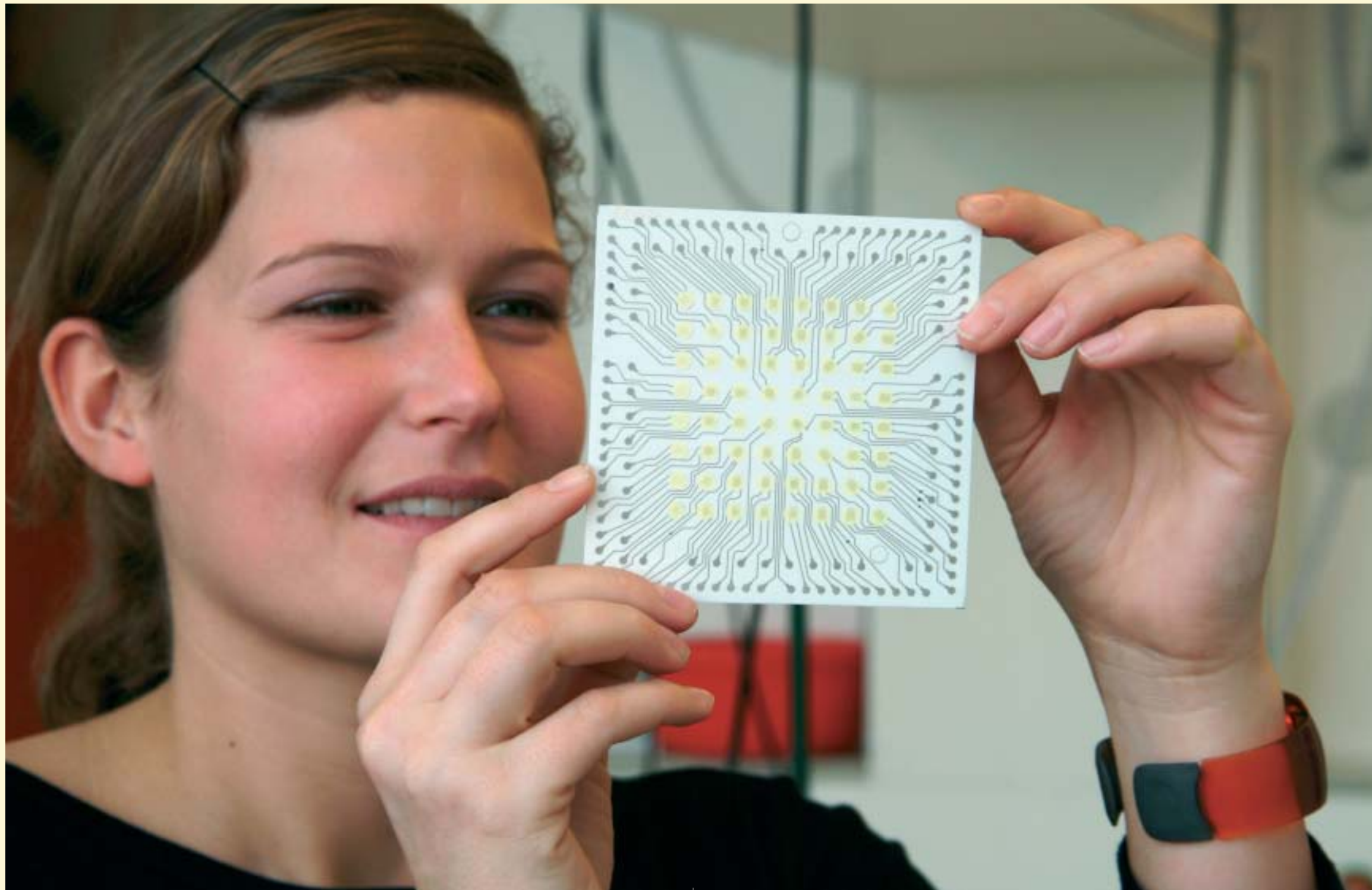


Bild 2: Änderung der Raumladungszone durch die Oberflächenreaktion an einem Sensor-

material durch die Gasbeaufschlagung mit einem reduzierenden Gas



setzt, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem freien und dem auf der Metalloxydoberfläche adsorbierten Sauerstoff ein. Durch die Chemisorption des Sauerstoffs, was formal einer partiellen Oxidation der Materialoberfläche entspricht, werden den Materialien Elektronen entzogen. Dadurch bildet sich eine Raumladungszone mit verminderter elektrischer Leitfähigkeit im Bereich der Kornoberfläche aus. Die Dicke dieser Grenzschicht ist materialspezifisch und temperaturabhängig und liegt für den Fall des Zinndioxids bei etwa 60 Nanometern (bei 300 Grad Celsius). Dies ist für die Funktionsweise eines solchen Sensormaterials entscheidend, da die Leitung des elektrischen Stromes in der polykristallinen Schicht von Korn zu Korn über die jeweiligen Korngrenzen hinweg und damit durch die Raumladungszone erfolgt (auf Bild 1 entlang des schematisch eingezeichneten Leitungsweges).

Gelangen nun typische reduzierende Gase wie Kohlenmonoxid oder Kohlenwasserstoffe an die Sensorschicht, reagieren diese mit dem adsorbierten Sauerstoff auf der Oberfläche des sensitiven Materials. Dadurch verschiebt sich das Adsorptionsgleichgewicht des Sauerstoffs und die dabei frei werdenden Elektronen vermindern die Dicke der Raumladungszone, woraus über alle Korngrenzen hinweg eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit resultiert, die dann als Sensorsignal dient.

Das Sensorprinzip beruht folglich auf einer Änderung der elektronischen Eigenschaften der Kornoberfläche durch chemische Reaktion des adsorbierten Sauerstoffs, wobei das Korninnere davon weitestgehend unberührt bleibt. Verkleinert man die Korngröße in den Nanometerbereich erstreckt sich die Änderung der elektrischen Eigenschaften und damit

Visuelle Kontrolle der Probenplatte.
Foto: Peter Winandy

die Raumladungszone auf das gesamte Volumen des Teilchens. Die bei der Reaktion mit reduzierenden Gasen frei werdenden Elektronen erhöhen nun die Leitfähigkeit des gesamten Materialkorns. Dadurch vergrößert sich die Änderung des elektrischen Widerstandes, wodurch Sensoren aus nanopartikulären Metalloxiden eine verbesserte Sensitivität zeigen (Bilder 1 und 2, links). Zugleich ist aber die Partikelgröße nur ein Parameter, der die Eigenschaften eines Sensors beeinflusst. Während sich die oben ausgeführten Betrachtungen auf ein einziges Material (reines Metalloxid) und einen Anwendungsfall (Detektion reduzierender Gase) beschränken.

Das Verhalten von Sensoren wird aber nicht nur von der Art und Zusammensetzung der sensitiven Materialien und dem mitunter sehr komplexen Zusammenwirken der verschiedenen Gase mit diesem bestimmt, sondern auch – ähnlich wie bei Katalysatoren – maßgeblich durch die Herstellungsbedingungen beeinflusst. In Anbetracht dieser Vielfalt an variablen Parametern ist die konventionelle Suche nach optimalen Sensoren sehr zeitaufwändig oder sogar unmöglich. Hier bietet die kombinatorische Chemie in Verbindung mit Hochdurchsatzmethoden, in denen durch Parallelisierung, Miniaturisierung und einem gleichzeitig hohen Automatisierungsgrad in der Synthese und Analyse ein großer Probendurchsatz erreichbar ist, einen Ausweg.

Die kombinatorische Chemie hat sich bei der Leitstruktursuche für pharmazeutische Anwendungen weltweit etabliert. Allerdings lassen sich die dazu entwickelten automatisierten Verfahren nicht ohne Weiteres auf die Entwicklung neuer Gassensoren auf Metalloxidbasis übertragen, da die bisherige Sensorfertigung auf der Verarbeitung von Feststoffen beruht. Dagegen greift die Pharmaforschung auf Wirkstofflösungen, also ausschließlich auf die Handhabung flüssiger Ausgangsverbindungen und Produkte, zurück.

Aber auch hier bietet die Verwendung von Nanoparti-

keln einen Ausweg. Nanopartikel anorganischer Feststoffe sind unter Zusatz von geeigneten Stabilisatoren in Lösung stabil und können folglich wie Lösungen organischer Wirkstoffe in flüssiger Phase gehandhabt werden. Um diesen Vorteil für die Sensorentwicklung nutzen zu können, wurden am Institut für Anorganische Chemie entsprechende Verfahren zur Synthese und Charakterisierung entwickelt.

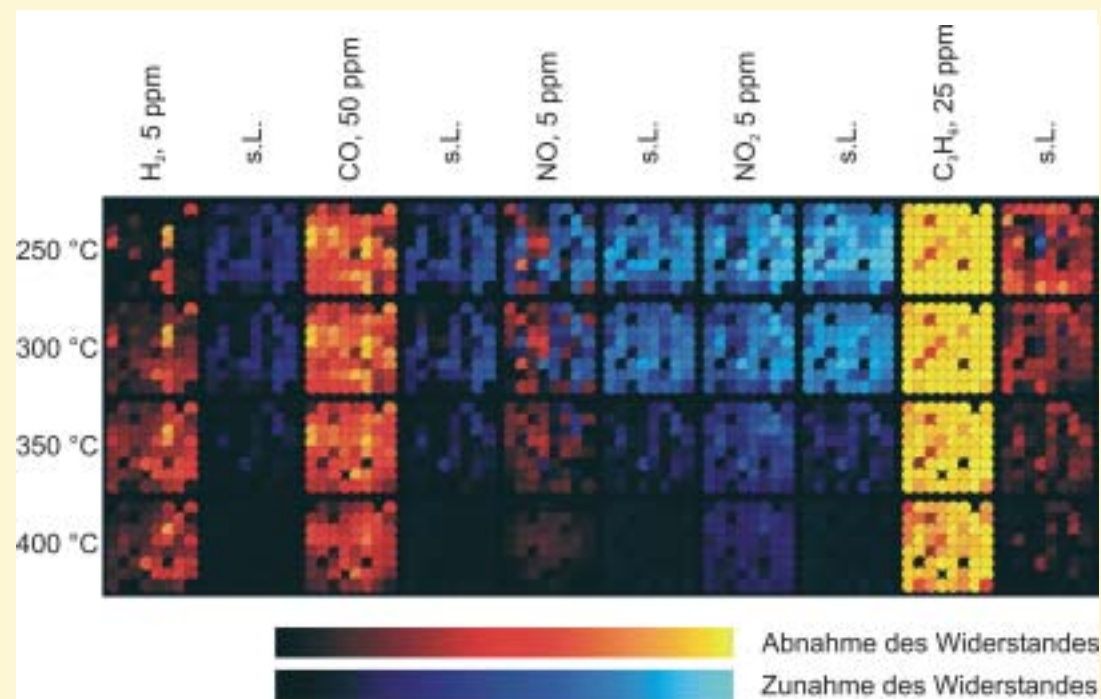
Einen nasschemischen synthetischen Zugang zu auch komplexeren Metalloxidnanopartikeln erlaubt der Einsatz der Polyolmethode. Durch die Hydrolyse von entsprechenden Vorstufen (Metalacetaten, oder -isopropoxiden) in einem besonderen Alkohol (Diethylenglycol) bilden sich durch die Wachstumskontrolle der organischen Moleküle sphärische Partikel mit Radien von 10 bis 150 Nanometern. Bisher wurden neben einfachen binären Oxiden auch ternäre oder dotierte Funktionsmaterialien in nanopartikulärer Form dargestellt und als Sensormaterialien evaluiert.

Die als Reaktionsprodukte erhaltenen Suspensionen können dann direkt oder nach einem intermediären Calcinations- und Resuspendierungsschritt zur Darstellung von Sensorschichten eingesetzt werden. Diese werden zum Erfassen der sensorischen Eigenschaften auf speziell für dieses Verfahren entwickelten Substratplatten mit Mikroelektrodenstrukturen aufgebracht.

Das zunächst häufig unspezifische Sensorverhalten der reinen Materialien lässt sich

Bild 3: Screeningergebnisse von oberflächendotiertem Indiumoxid als Trellisplot

bereits durch in Spuren oberflächlich aufgetragener Metalloxide und Edelmetalle deutlich beeinflussen. Dies als Oberflächendotierung auch aus der heterogenen Katalyse bekannte Verfahren erfolgt in einfacher Weise durch eine Imprägnierung der abgeschiedenen Metalloxidschichten durch Lösungen der entsprechenden Metallsalze. Dazu stehen etwa Lösungen von 50 Elementen zur Verfügung, deren geschickte Kombination die Optimierung des Sensorverhaltens auf die gewünschte Anwendung hin ermöglicht. Eine Substratplatte kann 64 verschiedene Substanzen oder Oberflächendotierungen umfassen. Das Screening erfolgt in einem Ofen bei verschiedenen Temperaturen unter Beaufsichtigung mit den zu prüfenden Gasen. Um auch Einblicke in die Ladungstransportvorgänge in den Materialien erhalten zu können, werden anstelle einfacher Widerstandsmessungen die elektrischen Eigenschaften mittels eines neu entwickelten Multikanalmessplatzes für die komplexe Impedanzspektroskopie erfasst. Die Ergebnisse eines solchen Screenings sind als so genannter Trellisplot darstellbar (Bild 3). Als Grundeinheit ist das 8x8-Raster der Materialproben zu erkennen, wobei jeder Farbpunkt das Ausmaß und die Art der Widerstandsänderung bei verschiedenen Temperaturen und Begasungsbedingungen widerspiegelt. Das unterschiedliche Ansprechen der Materialproben auf ein Prüfgas bei einer Temperatur wird durch verschiedene aufgebrachte Me-



talloxide und Edelmetalle erreicht. Als ein erstes Ergebnis der Untersuchungen konnte ein Sensor entwickelt werden, der Stickstoffmonoxid detektiert aber keine Querempfindlichkeit gegenüber Stickstoffdioxid aufweist.

Der Einsatz von Hochdurchsatzmethoden zur Findung und Optimierung neuer Funktionsmaterialien ist noch ein relativ junges Forschungsgebiet. Der Einsatz von Nanopartikeln erlaubt die Verwendung kombinatorischer Methoden in der Sensorforschung, wodurch mit zahlreichen Verbesserungen bezüglich der Materialeigenschaften zu rechnen ist. Allerdings wird nicht zuletzt wegen der mitunter schwierigen Prozessautomation das Innovationspotenzial dieses Chemiegebietes in der Materialforschung bisher noch nicht vollständig ausgeschöpft.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH durchgeführt.

Autoren:

Dipl.-Chem. Karl-Heinz Klöss ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie.

Dipl.-Chem. Tobias Koplin ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie.

Dipl.-Chem. Daniel Sanders ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie.

Dipl.-Chem. Maik Siemons ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Anorganische Chemie.

Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Ulrich Simon ist Inhaber des Lehrstuhls für Anorganische Chemie und Elektrochemie sowie Leiter des Instituts für Anorganische Chemie.

Sichtkontrolle der mit dem Syntheseroboter "Lissy" auf Substratplatten aufgetragenen Materialproben im Lehrstuhl für Anorganische Chemie und Elektrochemie der RWTH Aachen.

Foto: Peter Winandy



Christoph Steimer, Matthias Wuttig

Wer schreibt, der bleibt – Phasenwechselmedien als universelle Datenspeicher

Entwicklung von Designregeln zur Optimierung
künftiger elektronischer und optischer Speichergenerationen

1/2004 RWTH THEMEN

Mit dem Motto „wer schreibt, der bleibt“ warb vor einigen Jahren ein amerikanischer Großkonzern ganzseitig in deutschen Tageszeitungen für einen bahnbrechenden Forschungserfolg, der zwei seiner Mitarbeiter gelungen war. Die Forscher hatten es erstmalig geschafft, einzelne Atome auf einer Metalloberfläche so anzuordnen, dass sie ein Wort schreiben konnten.

Noch heute ist diese Form der Speicherung in ihrer Speicherdichte in kommerziellen Datenträgern unerreicht. Allerdings benötigten die amerikanischen Kollegen für das Schreiben mit Atomen auch mehrere Stunden, während moderne Datenspeicher in Sekundenbruchteilen Millionen von Bits transferieren. Daher sind die Datentransferrate und die Speicherdichte die beiden entscheidenden Eigenschaften eines Datenspeichers. Bild 1 zeigt, wie sich diese beiden Größen in kommerziellen Speichern in den letzten Jahren entwickelt haben. Man erkennt, dass in naher Zukunft ein Bit einen Radius von etwa 30 Nanometern hat und in weniger als einer Nanosekunde geschrieben wird.

Offensichtlich liegen also hier die relevanten Längen- und Zeitskalen und Analyseverfahren im Nanobereich. Dies stellt hohe Anforderungen an die Entwicklung geeigneter Materialien. Bisher werden sowohl magnetische als auch ferroelektrische und halbleitende Materialien zur Datenspeicherung eingesetzt. Dabei haben die auf den verschiedenen Materialklassen basierenden Datenspeicher unterschiedliche Charakteristika, die sie für verschiedene Anwendungen prädestinieren. Zurzeit wird in industriellen Forschungslabors gezielt nach einem universellen nichtflüchtigen Datenspeicher gesucht, der alle positiven Attribute (hohe Integrationsdichte, geringer Stromverbrauch, niedrige Kosten) vereint. An diesem auch wissenschaftlich sehr interessanten Thema forschen an der RWTH verschiedene Arbeitsgruppen. Ein Teil dieser Aktivitäten wird im Rahmen einer internationalen Tagung

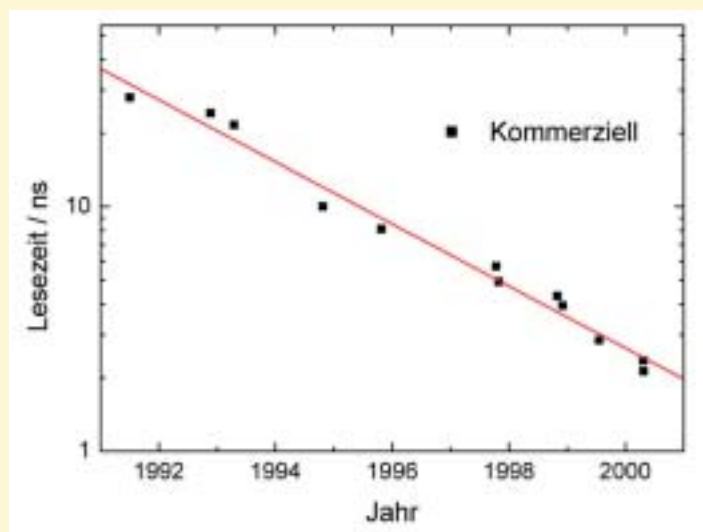
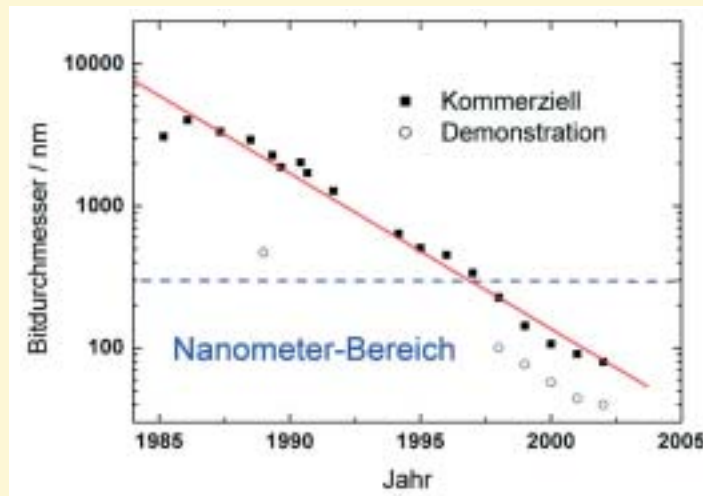
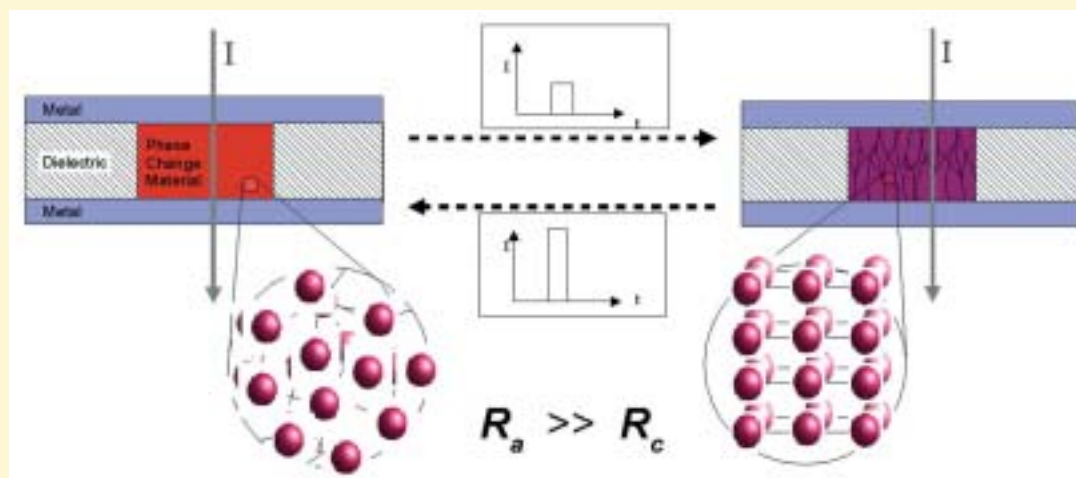


Bild 1: Exponentielle Verkleinerung von Bitdurchmesser und Zeit zum Lesen eines Bits für magnetischen Massenspeicher.

über innovative Massenspeicher, die im Herbst 2004 in Aachen stattfinden wird, vorgestellt. In den Blickpunkt des Interesses sind in den letzten Jahren vor allem auch Phasenwechselmedien gerückt. Das Prinzip dieser besonders universellen Kandidaten beruht auf einer thermisch induzierten, reversiblen Phasenumwandlung von einer geordneten kristallinen in eine ungeordnete amorphe Phase (Bild 2).

Ausgehend vom kristallinen Zustand wird zum Schreiben einer Dateneinheit (Bit) ein winziger Punkt (Durchmesser einige Hundert Nanometer) des Phasenwechselmediums kurzfristig (<1 ns) über den Schmelzpunkt T_m erhitzt und verflüssigt. Beim anschließenden raschen Abkühlen mit Raten von etwa 10^{10} Grad Celsius pro Sekunde bleibt den Atomen nicht genügend Zeit, sich zur energetisch günstigen kristallinen Phase zu ordnen. Die Atome frieren in einer flüssigkeitsähnlichen amorphen Phase ein. Erhitzt man den Bereich dagegen mit geringerer Leistung aber für längere Zeit über die Kristallisationstemperatur T_x , so ordnen sich die Atome zum kristallinen Zustand und der Dateninhalt wird zurückgesetzt. Abhängig vom Einsatz des Speichers als wie-

Bild 2: Funktionsprinzip der Datenspeicherung mit Phasenwechselmedien. T_m : Schmelztemperatur, T_x : Kristallisationstemperatur. Temperaturerhöhung und Auslesen können optisch oder elektrisch erfolgen.



derbeschreibbarer optischer Massenspeicher (zum Beispiel CD-RW, DVD-RW) oder als elektronischer Speicher (zum Beispiel PC-RAM) kann die Erhitzung des Phasenwechselmediums durch Laserpulse oder durch elektrischen Strom erfolgen. Im amorphen Zustand liegen sowohl das optische Reflektionsvermögen als auch die Leitfähigkeit deutlich unter den Werten der kristallinen Phase. Der Auslesevorgang kann deshalb entweder durch eine optische Reflektivitäts- oder durch eine elektrische Leitfähigkeitsmessung mit geringerer Leistung, die den Zustand des Materials nicht verändert, erfolgen. In beiden Fällen wird die Datentransferrate durch die Dauer des Löschvorgangs, der wegen der Rekristallisation am langsamsten abläuft (zurzeit >10 ns), begrenzt.

Geeignete Phasenwechselmaterialien bestehen aus zwei- bis vierelementigen Tellurlegierungen mit Edelmetallen oder Elementen der dritten bis fünften Hauptgruppe. Einerseits müssen diese Legierungen über große Unterschiede zwischen den Reflektivitäten und Leitfähigkeiten der kristallinen und amorphen Phase verfügen, um den Speicherinhalt zuverlässig auszulesen. Andererseits sollten sich die Strukturen – das heißt die Anordnungen der Atome – von kristallinem und amorphem Zustand nicht zu sehr unterscheiden, damit der zeitlimitierende Kristallisationsvorgang durch Umordnungsvorgänge nicht zu stark verlangsamt wird, um hohe Geschwindigkeiten zu erzielen.

Bisher wurden Materialien mit immer kürzeren Umwandlungsgeschwindigkeiten empirisch durch zeitaufwändige Optimierungsversuche ermittelt. Dies überrascht, wenn man die kommerzielle Bedeutung dieser Materialklasse bedenkt. Ziel unserer Forschungsarbeiten ist daher ein systematisches Verständnis der Materialeigenschaften, das wir zur Entwicklung von Designregeln für Phasenwechselmedien nutzen wollen. Daher geht es zunächst um ein atomistisches Verständnis des Einflusses der Stöchiometrie der Legierungen

auf die Strukturen der amorphen und kristallinen Phase, die die optischen und elektronischen Eigenschaften bestimmen. In einem zweiten Schritt soll ein atomistisches Bild der Umwandlungskinetik entwickelt werden.

Einen ersten Erfolg auf diesem Weg stellen unsere Untersuchungen an den Legierungen AgSbTe_2 und AgInTe_2 dar, die belegen, dass ein ausreichender optischer Kontrast zwischen den beiden Phasen mit dem strukturellen Unterschied zwischen amorpher und kristalliner Phase verknüpft ist. Bild 3a zeigt den Kontrast der Reflektivität zwischen kristalliner und amorpher Phase dieser Legierungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes. Während der Kontrast für AgSbTe_2 für große Wellenlängen oberhalb eines ausreichenden Schwellwertes von 5,0 Prozent liegt, werden für AgInTe_2 maximal 2,1 Prozent Kontrast erreicht. Der Zusammenhang mit den strukturellen Unterschieden beider Phasen wird durch Vergleich mit Bild 3b deutlich, in dem die Dichteunterschiede beider Phasen gegen die Temperatur aufgetragen sind. Mit steigender Temperatur setzt Kristallisation ein, bei der sich die Struktur und damit die Dichte ändert. Dabei zeigt das Material mit der größeren Dichteänderung AgSbTe_2 auch eine größere Kontraständerung als AgInTe_2 . Diesen Trend konnten wir auch für andere Te-Legierungen bestätigen. Unsere Untersuchungen zeigen, dass nur Materialien mit ausreichendem Dichtekontrast auch über eine ausreichende Änderung der elektronischen Eigenschaften verfügen.

Um die Frage zu beantworten, welche Materialien über eine genügend große Dichteänderung verfügen, haben wir die Eigenschaften unterschiedlicher Kandidaten detailliert untersucht. Dabei zeigte sich, dass alle bisher identifizierten erfolgreichen Speichermaterialien eine ähnliche Struktur aufweisen, bei der die Atome in erster Näherung sechs nächste Nachbarn und kochsalzartige Strukturen aufweisen. Dies zeigt auch der Vergleich der dem System

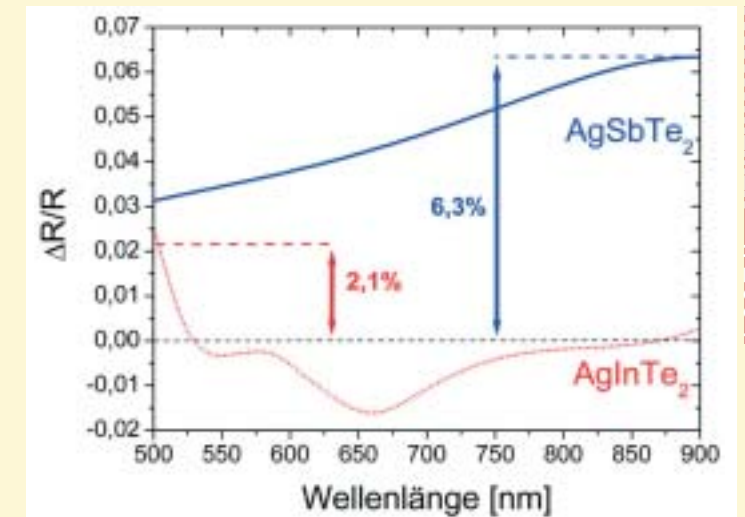


Bild 3: Normierte Reflektivitätsänderung in Abhängigkeit von Wellenlänge und normierte Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur.

AgInTe_2 und AgSbTe_2 , ähnlichen Verbindungen AuInTe_2 und AuSbTe_2 . Die unterschiedlichen Dichteänderungen beim Kristallisieren können durch die unterschiedlichen Strukturen der kristallinen Phasen erklärt werden: AgInTe_2 und AuInTe_2 kristallisieren in einer der Diamantstruktur ähnlichen Chalkopyritstruktur, AgSbTe_2 und AuSbTe_2 dagegen in einer Kochsalz-ähnlichen Struktur, in der die Atome besonders dicht gepackt sind. Das Zustandekommen der unterschiedlichen Strukturen kann mit Hilfe von Dichtefunktionalberechnungen, die die Energiedifferenz der Strukturen ermitteln, verstanden werden.

Während für AuInTe_2 das Energieminimum der Chalkopyritstruktur mit einem Gitterparameter von 6,2 Ångström um 0,1 Elektronenvolt günstiger

ger liegt als das Minimum der Kochsalzstruktur bei 5,7 Ångström, liegt das Energieminimum für AuSbTe_2 bei einer Kochsalzstruktur und einem Gitterparameter von 5,6 Ångström um 0,4 Elektronenvolt niedriger als das Minimum der Chalkopyritstruktur bei 6,2 Ångström. Durch analoge Berechnungen der Energiedifferenz der Minima beider Strukturen für weitere Legierungen konnten wir einen Zusammenhang zwischen Stöchiometrie und Struktur aufklären: Bild 4 zeigt die Energiedifferenz des Minimums der Kochsalz- und der Chalkopyritstruktur als Funktion der mittleren Valenzelektronenzahl der jeweiligen Legierung. Für kleine Valenzelektronenzahlen ist diese Differenz positiv, das heißt die Chalkopyritstruktur ist energetisch günstiger. Zwischen 4 und 4,25 wird die Differenz negativ und ein Übergang zur Kochsalzstruktur findet statt.

Der Einsatz in Bild 4 liefert eine anschauliche Erklärung für das beobachtete Verhalten: Bis zu einer mittleren Valenzelektronenzahl von vier liegen die Elektronen in einer auch für Elemente der vierten Hauptgruppe typischen sp^3 -Hybridisierung vor. Zahl und Ausrichtung der Elektronen führen zur Bevorzugung einer tetraedrischen Anordnung in einer Chalkopyritstruktur, die der Diamantstruktur der vierten Hauptgruppe ähnelt. Oberhalb der Valenzelektronenzahl von vier wird die Anordnung der Elektronen in so genannten p-Orbitalen energetisch günstiger, bei der die Bindungen zu den Mitten der sechs Begrenzungsflächen eines Würfels zeigen und so zur Ausbildung kubischer Strukturen wie der Kochsalzstruktur führen.

Damit ist es uns gelungen, den optischen und elektronischen Kontrast auf die Strukturunterschiede sowie die Struktur der kristallinen Phase auf die chemische Zusammensetzung der Legierung zurückzuführen. Unsere Ergebnisse erlauben es zum ersten Mal eine auf atomistischen Vorstellungen beruhende Bedingung für die Eignung als Phasenwechselmedien aufzustellen.

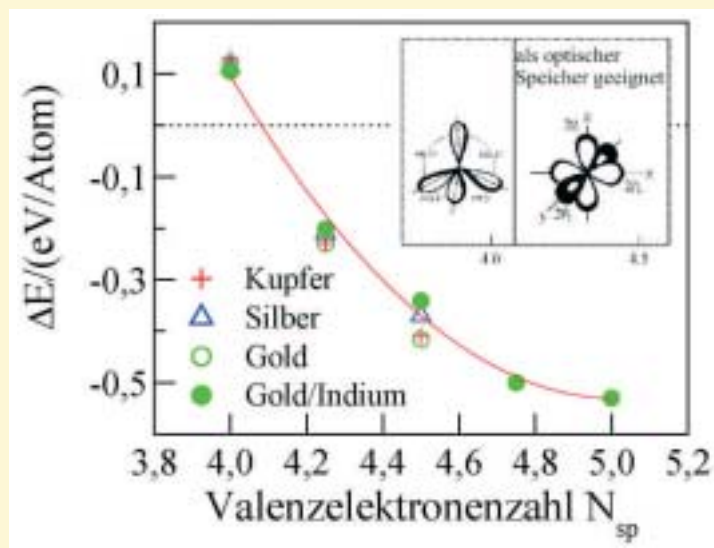


Bild 4: Energiedifferenz zwischen den Energieminima von Kochsalz und Chalkopyritstruktur als Funktion der mittleren Valenzelektronenzahl. Der Einsatz zeigt die Ausrichtung der bindenden Orbitale, die zu den benachbarten Atomen zeigen.



In einem zweiten Schritt soll ein atomistisches Bild der Umwandlungskinetik entwickelt werden. Dazu beschäftigen wir uns mit der Struktur der amorphen und flüssigen Phase. Aus der Kenntnis der Zusammenhänge zwischen den Strukturen dieser drei Phasen und der Stöchiometrie sollten sich mikroskopische Modelle für die Kinetik der Phasenübergänge und damit die Speichergeschwindigkeit gewinnen lassen. Die aus diesen Arbeiten gewonnenen Kenntnisse sollten es ermöglichen, umfassende Designregeln zu entwickeln, die neben dem rein wissenschaftlichen Aspekt auch technologisch und wirtschaftlich von großer Bedeutung sind.

Autoren:

Dr. rer.nat. Christoph Steimer ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des I. Physikalischen Instituts.
Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Matthias Wuttig ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik I A und Leiter des I. Physikalischen Instituts.

Mitarbeiter des I. Physikalischen Instituts zeigen einen Objektträger mit einer Phasenwechselschicht (in der Pinzette) und eine wiederbeschreibbare CD-ROM.

Foto: Peter Winandy



Als Campus Reseller für die Forschung & Lehre-Einrichtungen in Aachen, Düsseldorf, Gummersbach, Köln, Mönchengladbach/Krefeld sind wir in allen Fragen rund um Hard- und Software der Firma Sun Microsystems Ihr Ansprechpartner. Sie setzen auf Unix/Linux basierte Systeme? Dann sind Sie bei uns richtig! Die speziellen Programme für den F&L-Bereich sind Ihnen noch nicht bekannt? Kostenfrei für den F&L-Bereich erhältlich - die alternative Office-Lösung StarOffice 7.0!

Kommen Sie mit uns ins Gespräch: Systemhaus SAR GmbH · Arnold-Sommerfeld-Ring 27 · 52499 Baesweiler
Tel: 02401/91 95-0 · Fax: 02401/91 95-66 · email: sar@sar.de · Internet: www.sar.de

Frank Peter, Bernd Reichenberg, Andreas Roelofs, Theodor Schneller, Kristof Szot, Rainer Waser

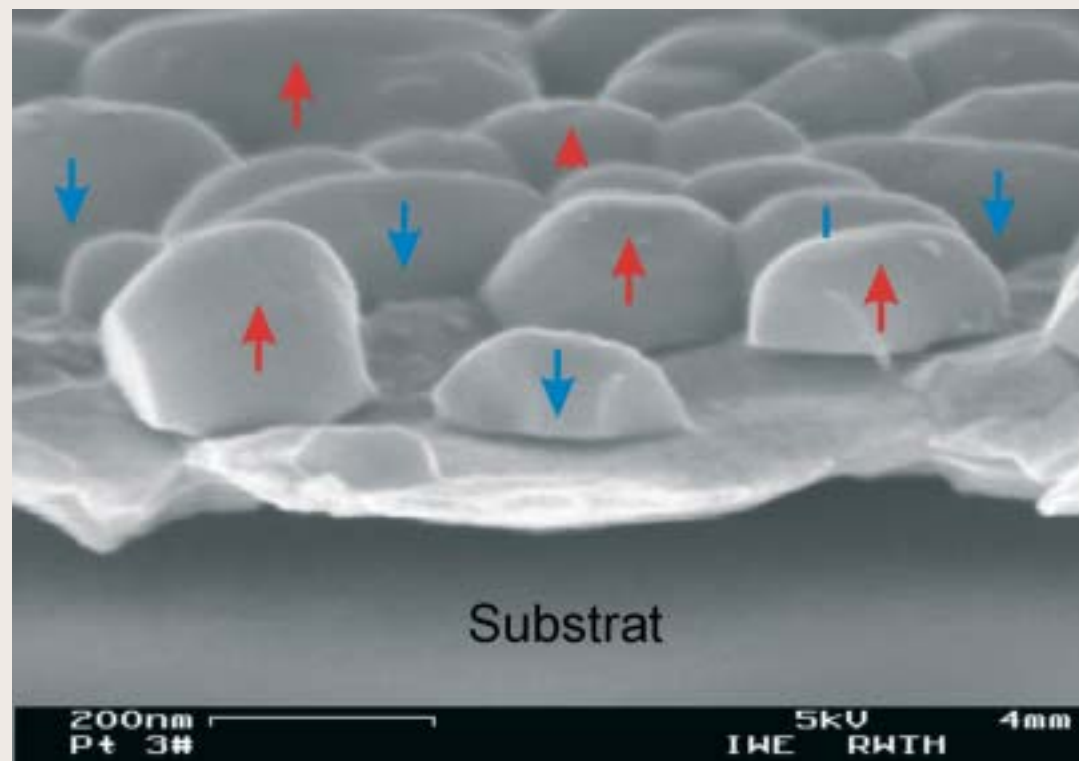
Tief in die Nanowelt der Halbleiterspeicher

Die ultimativ kleinste Speicherzelle mit Langzeit-Gedächtnis

1/2004 RWTH THEMEN

Ein Knopfdruck – und sofort ist der Computer startklar. Kein lästiges Warten mehr, bis der Arbeitsspeicher sich seine Daten mühsam von der Festplatte gezogen hat. Der Traum eines jeden Computerbenutzers könnte schon bald wahr werden: Dank ferroelektrischer Oxide, die Wissenschaftler des IWE II (Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik II) der RWTH in Zusammenarbeit mit dem CNI (Center of Nanoelectronic Systems for Information Technology) des Forschungszentrums Jülich unter die Lupe nehmen.

Der Arbeitsspeicher eines Computers besteht aus winzigen Speicherbausteinen. Jeder Baustein enthält einen Transistor und einen Kondensator. Heutige Kondensatoren aus Siliziumverbindungen speichern Informationen im binären Code als „0“ oder „1“ – aber nur solange sie mit Strom versorgt werden. Anders Kondensatoren aus ferroelektrischen Oxiden: Diese Oxide, beispielsweise Bleititanat (PbTiO_3), besitzen eine spontane elektrische Polarisation, deren Ausrichtungen „auf“ und „ab“ den Zuständen „0“ und „1“ entsprechen. Ursache für die Polarisation sind orientierte Dipole in den Kristallen. Die Ausrichtung bleibt selbst dann erhalten, wenn der Computer ausgeschaltet wird – der Arbeitsspeicher bekommt ein Gedächtnis. Diese elektrische Polarisation kann mit magnetischen Dipolen verglichen werden. Bild 1 zeigt einige Körner auf einem Substrat, in denen die Ausrichtungen der Polarisation eingezeichnet sind.



Wenn Speicher auf der Basis dieser ferroelektrischen Kondensatoren in Zukunft sowohl konventionelle Arbeitsspeicher (DRAMs = Dynamic Random Access Memory) als auch die immer noch recht großen, schweren und vergleichsweise langsamen Festplatten ersetzen sollen, werden unvorstellbar hohe Speicherdichten benötigt. Entsprechend klein müssen die ferroelektrischen Kondensatoren werden.

Doch wie klein können ferroelektrische Kondensatoren werden, damit sie noch ferroelektrisch und damit „speichertauglich“ sind? Wo liegt das – wie die Physiker sagen – superparaelektrische Limit? Um diese Frage zu beantworten, wurden winzige Kondensatoren aus ferroelektrischen Oxiden hergestellt und vermessen. Dabei galt es, zwei Probleme zu lösen: Wie können solch kleine Kondensatoren hergestellt werden und wie kann dann noch festgestellt werden, ob diese auch ferroelektrisch sind?

Um kleine Testkondensatoren herzustellen, wird normalerweise das „Top-Down“-Verfahren gewählt: Aus einer durchgängigen Schicht wird gezielt Material entfernt, um eine kleinere Struktur zu bekommen. Dazu wird auf einem geeigneten Substrat, beispielsweise einem platiniierten Silizium-Wafer, eine dünne dielektrische Oxidschicht aufgebracht. Würde man auf diese Schicht noch eine metallische Schicht aufdampfen, hätte man einen großen Kondensator (ein von zwei Seiten elektrisch kontaktiertes Dielektrikum) hergestellt. Um einen kleinen Kondensator zu bekommen, muss nun ein kleiner Teil des Dielektrikums freigeschnitten werden. Dies kann mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls gemacht werden (Bild 2). Dabei wird leider auch das angrenzende Material beschädigt, so dass unter Umständen auch spezifische Materialeigenschaften verändert werden. Mit dieser Methode ist es allerdings schwierig, einen Durchmesser von unter 30 Nanometern.

Bild 1: Mögliche Ausrichtung der Polarisation.

Kondensatoren mit einer Kantenlänge von weniger als 50 Nanometern herzustellen. Um diese Probleme zu umgehen, wurde am IWE das „Bottom-Up“-Verfahren gewählt: Statt aus einer durchgehenden Schicht etwas auszuschneiden, wurden einzelne Körner auf dem Substrat aufgewachsen. Dazu wurde der Prozess, mit dem normalerweise die durchgehenden Schichten produziert werden, leicht abgeändert. Das für das Schichtwachstum benötigte Material wird in einer Lösung auf das Substrat aufgeschleudert. Anschließend wird das Material bei circa 650 Grad Celsius kristallisiert. Durch starkes Verdünnen der Lösung (also mit weniger Material, woraus die „Schicht“ wachsen kann) ist es gelungen, einzelne voneinander getrennte Körner herzustellen. Einige dieser Körner haben einen Durchmesser von unter 30 Nanometern.

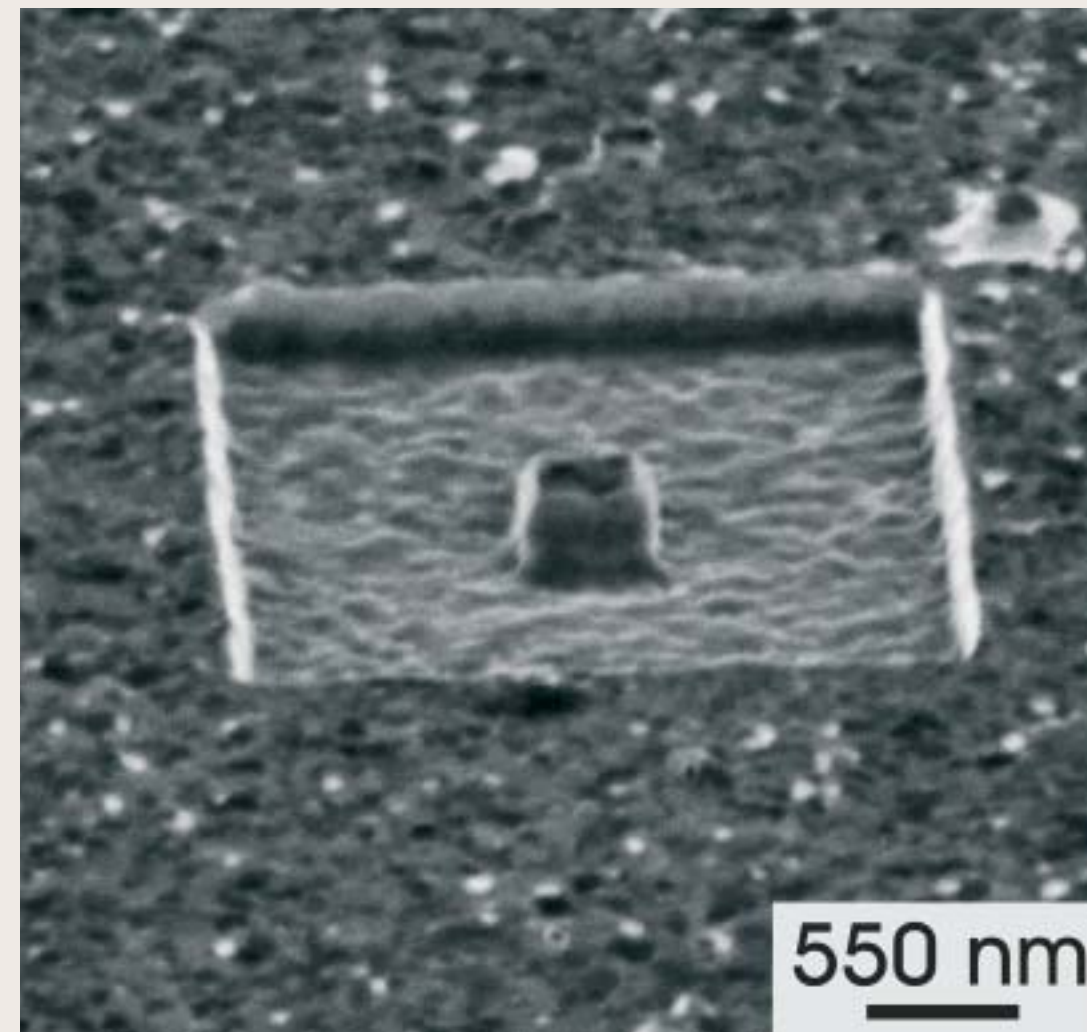


Bild 2: Der Kondensator in der Mitte wurde hergestellt, indem er aus der vollen Schicht mittels eines fokussierten Ionenstrahls „freigeschnitten“ wurde. Diese Struktur entstand in unserer Kooperation mit Prof. Ramesh, University of Maryland, USA.

Weiterhin galt es, die Körner elektrisch zu kontaktieren und zu charakterisieren. Als untere Elektrode des Kondensators wurde das Substrat, auf dem die Körner gewachsen sind, elektrisch kontaktiert. Als obere Elektrode wurde die Sonde eines Rasterkraftmikroskops verwendet, an die eine Spannung angelegt wurde.

Ein Rasterkraftmikroskop funktioniert im Prinzip wie der Tonabnehmer eines Plattenspiels, allerdings mit einer viel höheren Empfindlichkeit. Zum Abtasten der Probenoberfläche wird eine winzige Spitze verwendet (Spitzenradius circa 20 Nanometer), die an einer weichen Biegefeder befestigt ist. Bei der Bewegung über die Oberfläche wird die Feder durch Topographieänderungen leicht durchgebogen. Diese Durchbiegung der Feder wird mit Hilfe eines Lasers detektiert. Sein Lichtstrahl wird an der Spitze der Sonde reflektiert und trifft dann auf eine Photodiode. Für die Kontaktierung der Körner wurden elektrisch leitende Sonden verwendet (Bild 3).

Um festzustellen, ob die Körner ferroelektrisch sind, wurde ausgenutzt, dass alle ferroelektrischen Materialien auch piezoelektrisch sind, das heißt ihre Länge beim Anlegen einer Spannung ändern. Dieser Effekt ist auch umkehrbar und kann mit dem Rasterkraftmikroskop untersucht werden: Wird eine Spannung an einen Kristall angelegt, so verformt sich dieser.

Mit der Sonde des Rasterkraftmikroskops wurde ein kleiner Teil der Probe abgetastet. Bei diesem Verfahren erhält man neben der piezoelek-

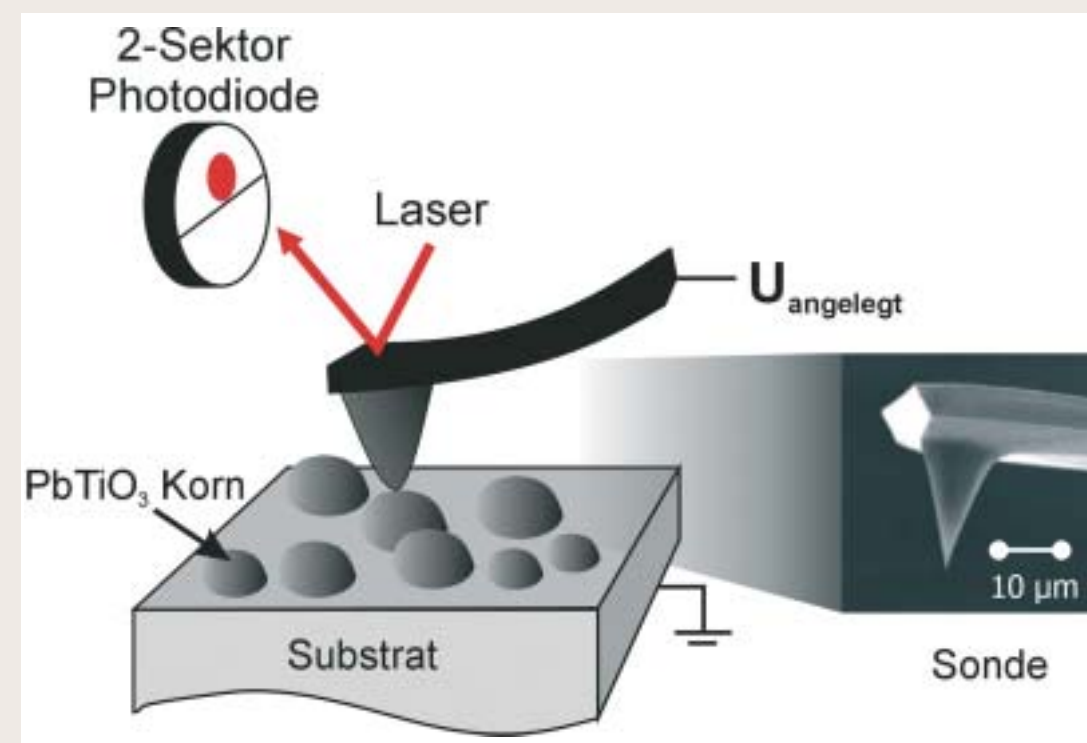


Bild 3: Elektrische Kontaktierung der Bleititanat-Körner mit dem Rasterkraftmikroskop.

Nano magnetismus

Avancierte magnetische Bits und Speicherelemente

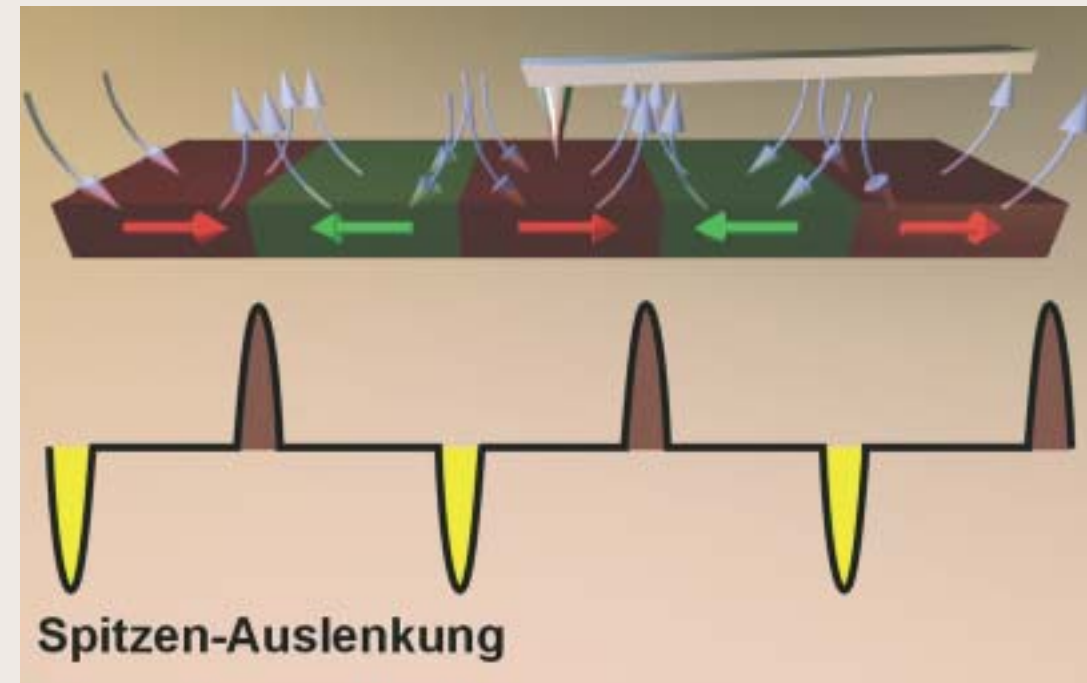


Bild 1: Funktionsweise eines magnetischen Kraftmikroskops (MFM). Ein „Biegebalken“ mit einer magnetischen Spitze wird über die Probenoberfläche gerastert.

Fluss innerhalb des Elements geschlossen werden, so dass die magnetischen Streufelder im Außenraum reduziert werden. Eine derartige Domänenkonfiguration ist schematisch oben rechts in Bild 2 dargestellt. Ein solcher Zustand ist bei der Informationsspeicherung unbedingt zu vermeiden. Die lithographisch mikro-

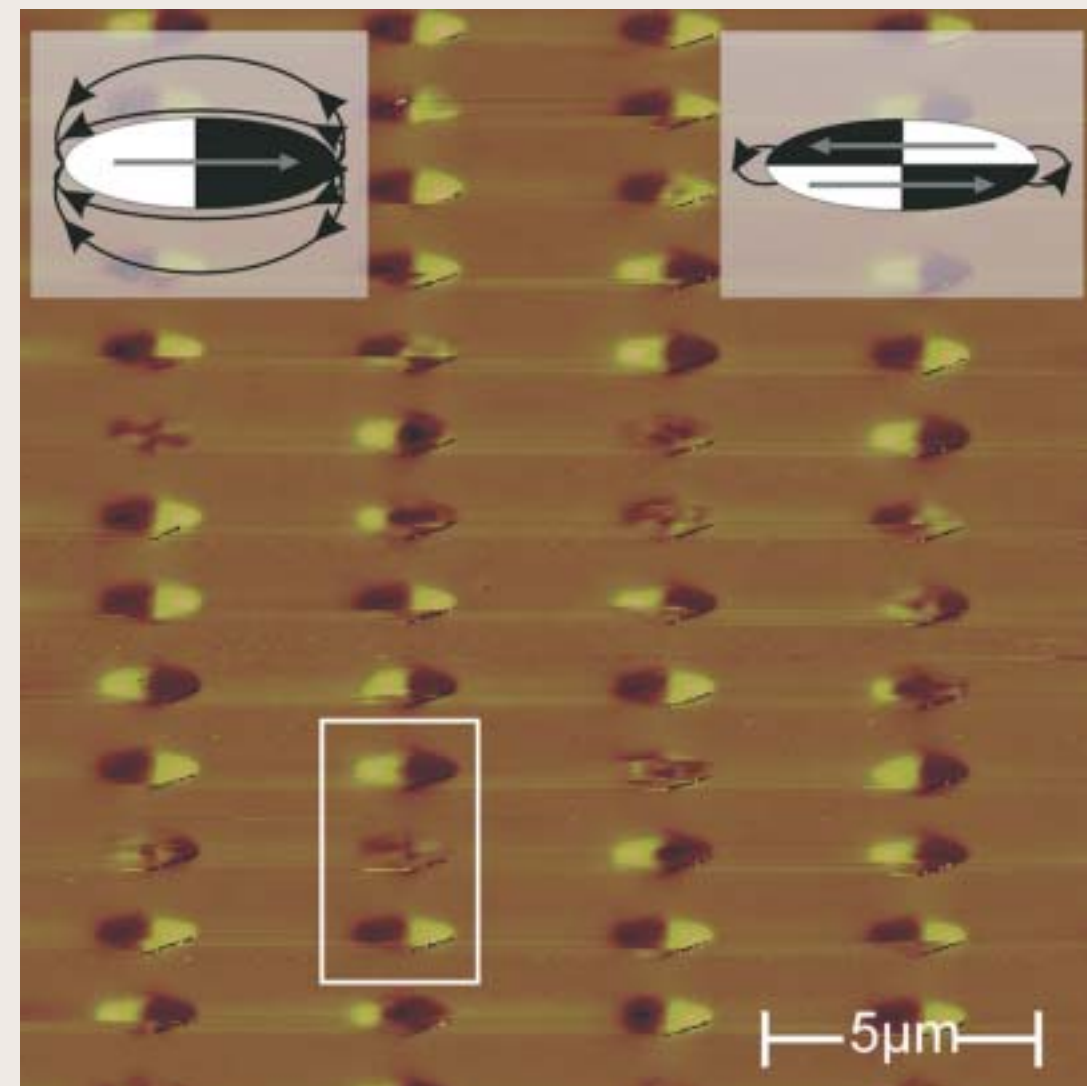


Bild 2: MFM-Aufnahme von mikrostrukturierten ellipsenförmigen Eisen-Elementen mit (110) Orientierung (Mikrometer = µm).

oder nanostrukturierten magnetischen Elemente stellen einen wesentlichen Bestandteil aktueller magnetischer Sensoren und Speicherzellen dar. Um beispielsweise die bisherigen auf Ladungsspeicherung basierten flüchtigen Arbeitsspeicher von Computern durch nichtflüchtige Speicher abzulösen, arbeitet man derzeit auch kommerziell an so genannten Magnetic Random Access Memory (MRAM)-Zellen (Bild 3). Diese bestehen aus zwei durch eine Oxidschicht (ISO) voneinander getrennten magnetischen Schichten (FM). Für parallel zueinander magnetisierte Schichten können die mit ihrem Spin ausgerichteten Elektronen leicht über die Oxidschicht tunneln, was einen kleinen Widerstand (Tunnelmagnetwiderstand) der Zelle und demnach einen hohen Stromfluss zur Folge hat. Das Umgekehrte ist der Fall für antiparallel magnetisierte Schichten. Auf diese Weise kann man die logischen Bits „1“ und „0“ kodieren. Die Magnetisierung der oberen FM-Schicht kann durch die

trischen Antwort auf eine angelegte Spannung zusätzlich noch die Topographie des untersuchten Bereichs der Probe. Ein Messergebnis ist in Bild 4 zu sehen: in der Topographie (a) sind deutlich acht Körner

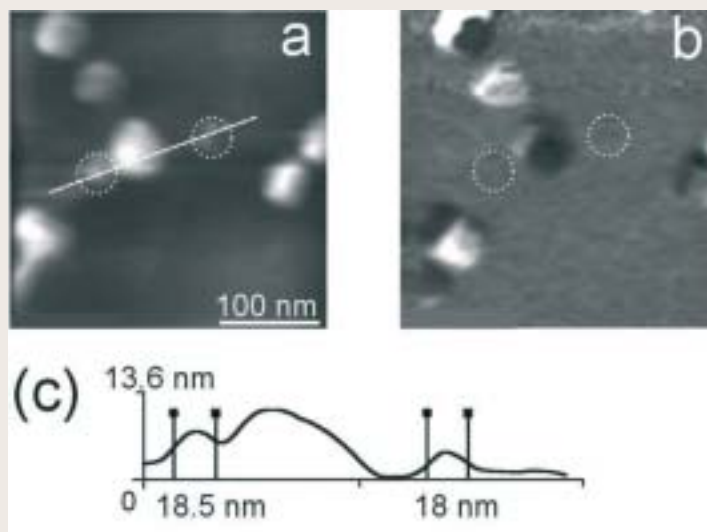


Bild 4: Topographie (a), piezoelektrische Antwort (b) und Querschnitt durch die Topographie (c) von Bleititanat-Körnern.

Zur Informationsspeicherung auf magnetischen Festplatten werden die informationstragenden „Bits“ in Form von eindeutig und homogen magnetisierten Bereichen gespeichert, die sich unabhängig voneinander in die entgegengesetzte Richtung ummagnetisieren lassen. Hierfür werden ferromagnetische Materialien eingesetzt, deren Magnetisierung auch ohne ein äußeres Magnetfeld entweder homogen oder aber in gewissen Bereichen (den so genannten Domänen) in dieselbe Richtung zeigt. Zuverlässige Datenspeicherung erhöhter Dichte ist zukünftig nur möglich, wenn das Verhalten dieser Bereiche auch bei Abmessungen unter 100 Nanometern (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter) noch kontrolliert werden kann. Dies trifft auch auf das Gebiet der Sensorik zu.

Neben den magnetischen Bits auf der Festplatte sind auch lithographisch mikro- und nanostrukturierte dünne magnetische Schichten ein wesentliches Element in neuartigen Computerarbeitspeichern und Sensoren. Um die remanente (also nach Abschalten des äußeren Magnetfelds) Magnetisierungskonfiguration dieser Elemente untersuchen zu können, wurden am II. Physikalischen Institut der RWTH durch Elektronenstrahl-lithographie und Ätzen mit Argon-Ionenstrahlen ferromagnetische Mikrostrukturen verschiedener Formen hergestellt und deren Ummagnetisierungsverhalten untersucht. Dazu wurde auch das magnetische Kraftmikroskop MFM (Magnetic Force Microscope) eingesetzt, mit dem magnetische Streufelder detektiert werden können. Aus der Analyse dieser Streufelder können Rückschlüsse auf die Konfiguration der magnetischen Domänen gezogen werden. Streufelder entstehen entweder an den Rändern magnetischer Elemente oder aber durch Domänenwände, die

Bereiche unterschiedlicher Magnetisierungsrichtungen innerhalb eines Elements abgrenzen.

Die Funktionsweise des MFM beruht auf der Wechselwirkung dieser Streufelder mit einer magnetischen Spitze, die zeilenweise über die zu untersuchende Oberfläche gerastert wird. Wird die MFM-Spitze von magnetischen Streufeldern, die aus der Oberfläche herausragen, zum Beispiel abgestoßen, wird dies in der MFM-Aufnahme als dunkler Bereich dargestellt, im Fall von in die Oberfläche hineinragenden Streufeldern als helle Fläche (Bild 1). Bild 2 zeigt eine MFM-Aufnahme von mikrostrukturierten ellipsenförmigen Elementen aus einer kristallinen (epitaktischen) Eisenschicht. Die seitlichen Abmessungen der Elemente betragen 1.500 mal 500 Nanometer bei einer Höhe von 25 Nanometern. Die Längsachse der Elemente wurde parallel zur „leichten“ Magnetisierungsachse der Eisenschicht ausgerichtet. Nach Vormagnetisierung dieser Elemente entlang ihrer kurzen, magnetisch „harten“ Achse werden im remanenten Zustand drei unterschiedliche Magnetisierungskonfigurationen ausgebildet (weißer Rahmen in Bild 2). Das obere Element im weißen Rahmen weist einen eindomänigen oder auch Dipol-Zustand auf mit einer nach rechts zeigenden Magnetisierung, wie es schematisch oben links in Bild 2 dargestellt ist. Dementsprechend weist die Magnetisierung des unteren Elements nach links. Das Element in der Mitte zeigt einen weitaus geringeren MFM-Kontrast, was auf die Ausbildung eines mehrdomänigen, also nicht eindeutigen Zustands hindeutet, durch den der Grad der Magnetisierung reduziert wurde. Der geringere MFM-Kontrast kann folgendermaßen erklärt werden: Durch das Vorhandensein mehrerer Domänen kann der magnetische

zu erkennen. Die kleinsten Körner haben einen Durchmesser von circa 18 Nanometern (siehe Profil c). Bei diesen Körnern ist – im Gegensatz zu den sechs größeren – keine piezoelektrische Antwort (b) zu erkennen. Dieses Ergebnis legt die Vermutung nahe, dass Bleititanatkörner mit einem Durchmesser von unter 20 Nanometern nicht mehr piezoelektrisch und damit auch nicht mehr ferroelektrisch sind. Hier nach müsste also die kleinste Speicherzelle, die mit diesem Oxid hergestellt werden könnte, eine Kantenlänge von knapp 20 Nanometern besitzen. Aber bei einer Fläche von lediglich $(20\text{ nm})^2 = 400\text{ nm}^2$ wäre das immer noch deutlich kleiner als die heutigen Kondensatoren, die circa 100.000 Quadratnanometer groß sind.

Mit diesen ferroelektrischen Kondensator-Winzlingen werden in Aachen die Grundsteine für die universellen Arbeitsspeicher von übermorgen gelegt.

Autoren:

Dipl.-Ing. Frank Peter ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Center of Nanoelectronic Systems for Information Technology (CNI) des Forschungszentrums Jülich.
Dipl.-Ing. Bernd Reichenberg ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik II der RWTH.
Dipl.-Ing. Andreas Roelofs ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik II.
Dr. rer.nat. Theodor Schneller ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik II.
Dr. rer.nat. Kristof Szot ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am CNI.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Waser ist Inhaber des Lehrstuhls und Leiter des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik II sowie Leiter des Instituts für Elektronische Materialien am CNI.

Magnetfelder, die die beiden stromdurchflossenen Zuleitungen umgeben, eingestellt werden. Die untere FM-Schicht wird als Referenz in ihrer Magnetisierungsrichtung durch eine antiferromagnetische (AFM) Schicht fixiert („Exchange Bias Effekt“).

Im Einschub rechts unten in Bild 3 ist ein derartiges Dreilagenschichtsystem dargestellt, das am II. Physikalischen Institut auf einem Silizium-Wafer (blau) hergestellt wurde. Gezeigt ist eine Transmissionselektronenmikroskop (TEM)-Aufnahme von zwei ferromagnetischen Elektroden aus Kobalt (rot), die durch eine dünne Barriere aus Aluminiumoxid (grün) getrennt sind. Die Aufnahme wurde im Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE) der RWTH gemacht.

Damit die MRAM-Technologie konkurrenzfähig zu den derzeit eingesetzten Ladungsspeicherzellen (DRAM, D=dynamisch) sein kann, müssen seitliche Abmessungen der MRAM-Zellen von unter 100 Nanometern erreicht werden. Daher ist es zur Realisierung magnetischer Speicherbausteine wichtig, Kenntnisse über die magnetischen Eigenschaften dünner Schichten und auch kleiner, lithographisch strukturierter Elemente auf der 100 Nanometer-Skala und darunter zu erlangen.

Neben der oben beschriebenen magnetischen Kraftmikroskopie, bei der eine magnetische Spitze mit magnetischen Streufeldern in Wechselwirkung tritt, bietet sich alternativ die magnetooptische Mikroskopie an. Dabei wird die Magnetisierung der Probe mit linear polarisiertem Laserlicht ausgelesen. Beim Durchgang durch die Probe wird dessen Polarisationsrichtung um wenige Grad (Faraday-Effekt) und bei Reflexion an der Probe um wenige Zehntelgrad (Kerr-Effekt) gedreht. Im Gegensatz zur MFM besteht keine Gefahr, dass die magnetischen

Bild 3: Schematische Darstellung einer MRAM-Zelle. Der Einschub zeigt eine Transmissionselektronenmikroskop-Aufnahme eines Schichtsystems bestehend aus zwei ferromagnetischen

Kobalt-Elektroden (rot) und einer Barriere aus Aluminiumoxid (grün). Als Substrat wurde Silizium (blau) verwendet.

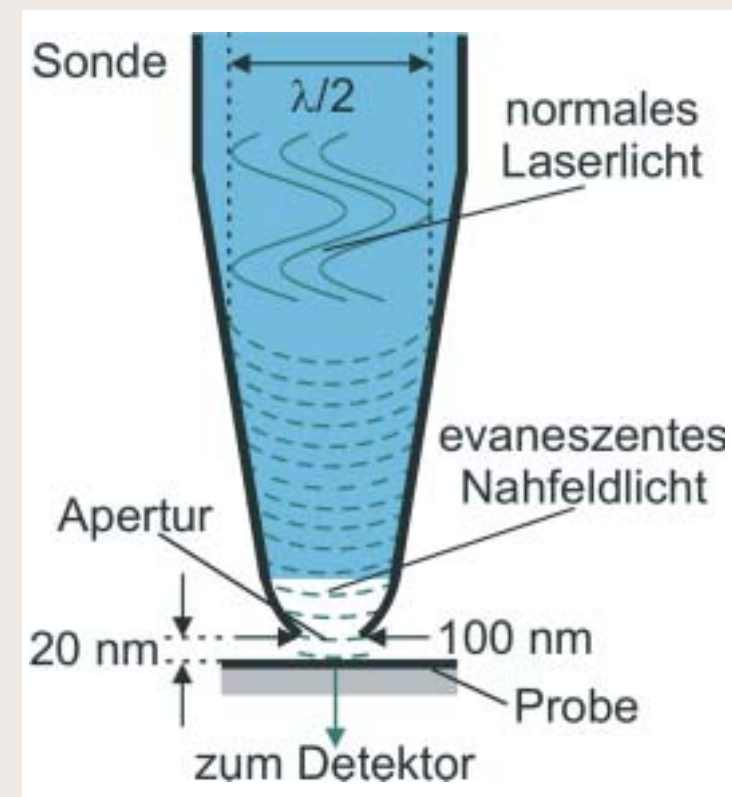
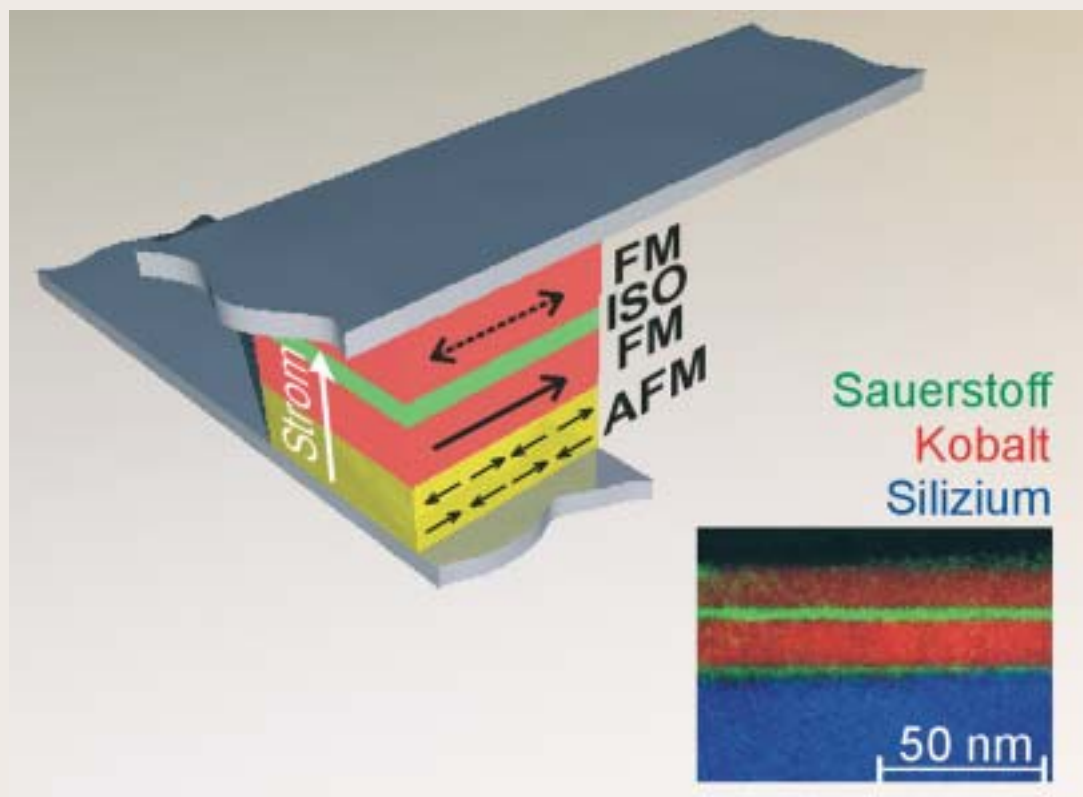
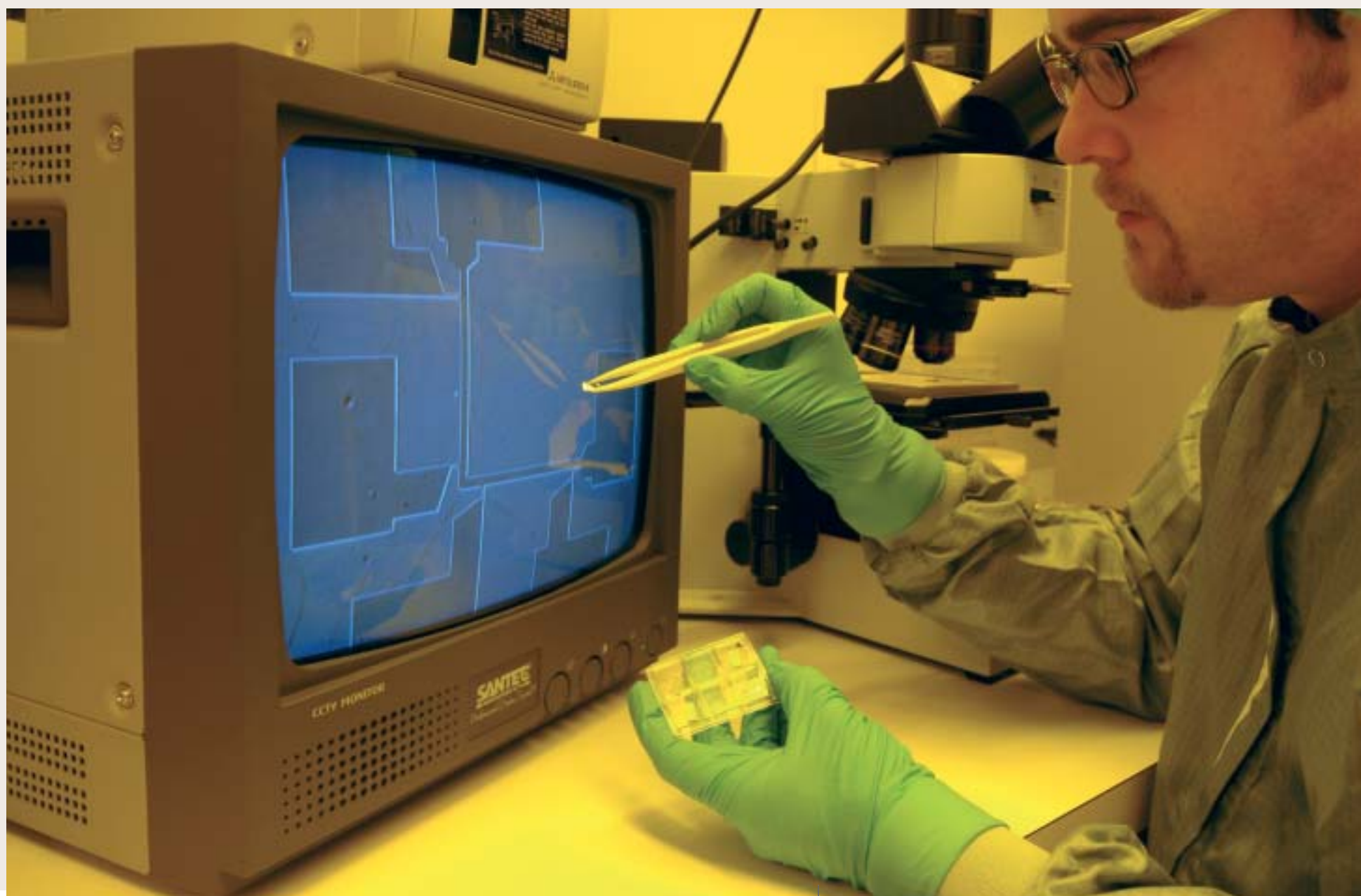


Bild 4: Prinzip der Rasternahfeldmikroskopie (halbe Wellenlänge $\Lambda = \lambda/2$).

Strukturen beim Abbilden beeinflusst und verändert werden. Außerdem ist diese Detektionsmethode unempfindlich gegen äußere Magnetfelder, so dass man damit die magnetische Reaktion der Probe auf ein solches Feld untersuchen kann.

Über lange Zeit schien festzustehen, dass die optische Mikroskopie generell keine Strukturen auflösen kann, die kleiner als die verwendete Lichtwellenlänge von 400 bis 700 Nanometern sind. Durch einen „Trick“ kann man dieses so genannte Beugungslimit jedoch überwinden und so in den „optischen Nanokosmos“ vordringen (Bild 4). Man beleuchtet die durchsichtige Probe durch eine so genannte Nahfeldsonde (beispielsweise eine metallisch beschichtete Glasfaser Spitze) mit Laserlicht. Dieses tritt im vordersten Teil der Sonde aus einer Öffnung (Apertur) aus, die mit etwa 100 Nanometern wesentlich kleiner ist als die Laserwellenlänge Λ (im hier beschriebenen Fall 532 Nanometer). Aus einer derart kleinen Apertur dringt nur Nahfeldlicht, das ausschließlich in Abständen deutlich kleiner als die Wellenlänge Λ des Laserlichts nachweisbar ist und darum auch „evaneszentes“ (verschwindendes) Licht heißt. Wird die Sonde näher als etwa 20 Nanometer an die Probe herangefahren, wird ein Teil des Nahfeldlichts durch Wechselwirkung mit der Probe wieder in „normales“ Licht umgewandelt und kann von einem Detektor hinter der Probe aufgefangen und danach ausgewertet werden. Mit der Nahfeldsonde wird ein Gitternetz von Punkten auf der Probe angefahren. Ein Computer setzt nun die an jedem Punkt gemessenen Intensitäten zu ei-

Im Monitor des optischen Mikroskops sind mikrostrukturierte Leiterbahnen und Kontaktflächen aus ferromagnetischem Material erkennbar. Foto: Peter Winandy



nem optischen Bild beziehungsweise die Polarisationsdrehungen zu einem magnetooptischen Bild zusammen. Man nennt ein derartiges Mikroskop daher Rasternahfeldmikroskop.

Bild 5 wurde mit dem Rasternahfeldmikroskop an einer unmagnetischen Testprobe aufgenommen. Es handelt sich dabei um einen 25 Nanometer dicken Aluminiumfilm mit 90 Nanometer großen Löchern auf einem Glassubstrat. Die Löcher wurden präpariert, indem das Glassubstrat vor dem Aufdampfen des Aluminiums mit einer Verteilung aus einzelnen 90 Nanometer großen Latexkugeln belegt wurde. Nach dem Aufdampfen wurden die Kugeln entfernt. Die Löcher sind klar zu erkennen, obwohl ihr Durchmesser nur etwa ein Sechstel der Laserwellenlänge beträgt.

Im „magnetischen Nanokosmos“ werden magnetooptische Rasternahfeldmikroskope unter anderem für die Qualitätskontrolle magnetooptischer Speichermedien eingesetzt. Die obere und die untere Hälfte von Bild 6 zeigen jeweils eine Aufnahme des regelmäßigen Musters magnetischer Bereiche („Bits“) auf einem kommerziellen magnetooptischen Speichermedium, auf dem die kleinsten Informationseinheiten durch die Magnetisierungsrichtung (in die Schichtebene hinein beziehungsweise aus ihr heraus) kodiert sind.

Zwischen den beiden Aufnahmen wurde der Polarisationsdetektor um seine Achse gedreht. Die Umkehrung des Bildkontrastes beweist, dass es sich um magnetooptischen Kontrast handelt. Die Bits erscheinen riesengroß, was nahelegt, dass die Speicherdichte durch neue Schreib- und Lese-technologien erheblich gesteigert werden könnte. Wie groß das magnetooptische Auflösungsvermögen unseres Mikroskops in etwa ist, zeigt die am rechten Rand von Bild 6

Bild 5: Abbildung eines Aluminiumfilms mit 90 Nanometer großen Löchern mit dem Nahfeldmikroskop in Durchsicht.

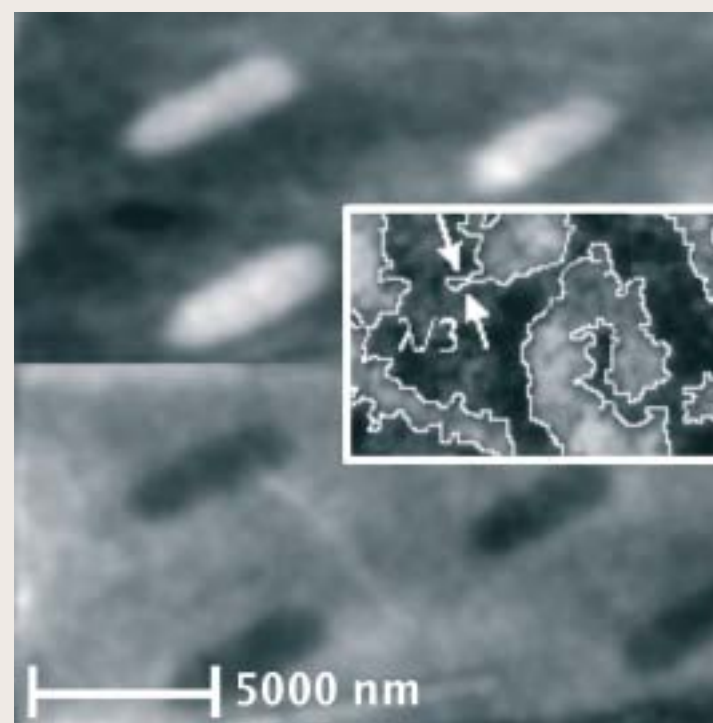
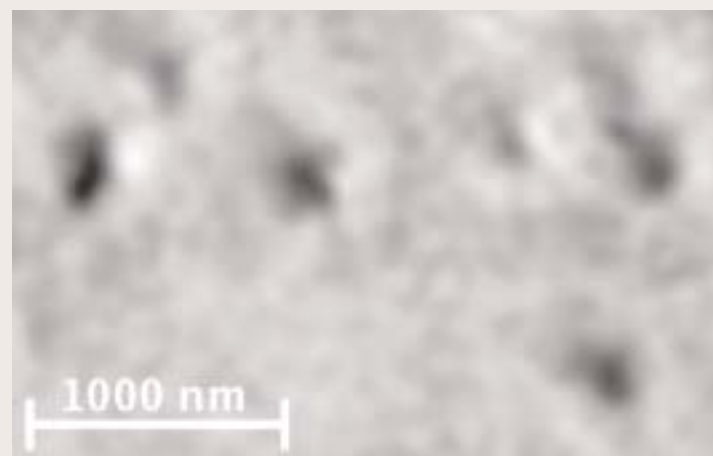


Bild 6: Magnetische Bits eines magnetooptischen Speichermediums, aufgenommen mit dem magnetooptischen Nahfeldmikroskop in Durchsicht. Am rechten Rand: Abbildung (Durchsicht) von magnetischen Domänen einer Kobalt-Platin-Vielfachschicht mit instrumenteller Auflösungsgrenze von einem Drittel der Laserwellenlänge λ .

eingefügte Aufnahme einer Kobalt-Platin-Vielfachschicht. Diese weist ein zufälliges Muster jeweils gleichartig magnetisierter Domänen auf. Die kleinsten auflösbaren Domänenstrukturen sind etwa ein Drittel der Wellenlänge λ des Laserlichts groß.

Autoren:

Dipl.-Phys. Michael Fraune ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im II. Physikalischen Institut. Univ.-Prof. Dr. sc.nat. Gernot Güntherodt ist Inhaber des Lehrstuhls Experimentalphysik II A und Leiter des II. Physikalischen Instituts. Dipl.-Phys. Fabian Kiendl ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im II. Physikalischen Institut. Dipl.-Phys. Christian König ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im II. Physikalischen Institut. Cand. Phys. Frank Lunnebach ist Studentische Hilfskraft im II. Physikalischen Institut.

Matthias Baus, Birgit Hadam, Max Lemme, Thomas Mollenhauer, Bernd Spangenberg, Thorsten Wahlbrink, Olaf Winkler

Schalten und Walten im Nanokosmos

Innovative Logik- und Speicherbauelemente der Nanoelektronik

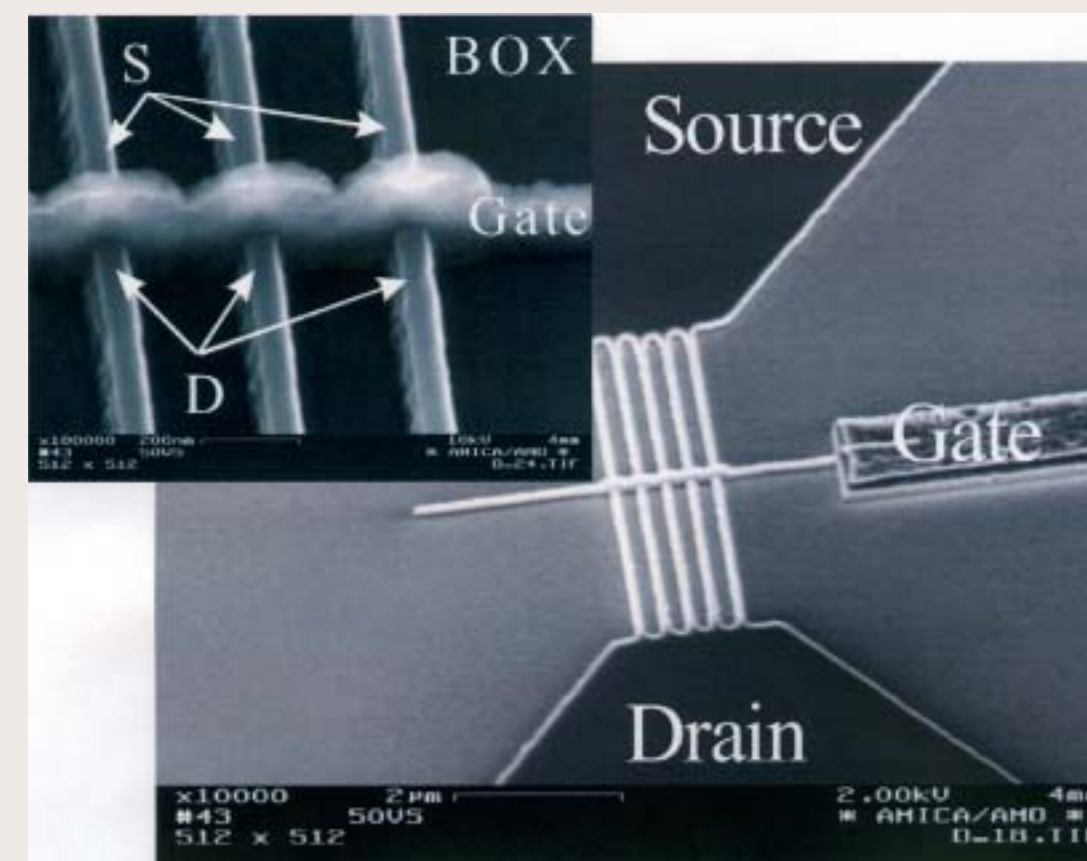


Bild 1: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Triple-Gate-MOSFETs.

(Bild 1) eine dreiseitig kontrollierte Steuerung erreicht, indem dünne Stege in die Siliziumhalbleiterschicht geätzt werden. Aufgrund der dreiseitigen Ansteuerung von oben und den beiden Seiten wird bei dieser Transistorkonfiguration auch von einem „Triple-Gate-MOSFET“ gesprochen. Bei AMICA konnte in Zusammenarbeit mit dem IHT experimentell nachgewiesen werden, dass diese Triple-Gate-Transistoren im Vergleich zu MOSFETs mit einer nur einseitigen planaren Ansteuerung eine deutliche Reduzierung der unerwünschten Kurzkanaleffekte zeigen. Werden solche Triple-Gate-MOSFETs in Schaltungskonzepte integriert, können zukünftig damit Prozessoren mit erheblich reduzierter Verlustleistung (englisch low-power) gefertigt werden. Insbesondere die Wachstumsmärkte Mobile Kommunikation und Mobile Datenverarbeitung benötigen solche verlustarme Schaltungen, um akzeptable Standby-Zeiten zu er-

reichen.

Auch Hochleistungsprozessoren „leiden“ unter Kurzkanaleffekten, denn die verfügbare Stromdichte, die die Schaltgeschwindigkeit bestimmt, nimmt in nanoelektronischen MOSFETs nicht mehr im gewohnten Maße mit der Reduzierung der Strukturgrößen zu. In Experimenten am AMICA konnte nachgewiesen werden, dass Triple-Gate-MOSFETs bei geeigneter Dimensionierung einen gegenüber herkömmlichen SOI-Transistoren deutlich erhöhten Strom pro Chipfläche liefern können. Damit demonstrieren sie ihr enormes Potenzial für zukünftige „High-Performance“ Anwendungen.

Simulationen belegen, dass eine Skalierung der MOSFETs bis in den sub-Deca-Nanometerbereich (kleiner als 10 Nanometer) möglich sein sollte. Experimentell ist dies jedoch aufgrund der erwähnten Kurzkanaleffekte kaum nachweisbar. Ein technisches Problem stellt dabei die unerwünschte Diffusion von Dotieratomen während der Herstellung solcher Nano-MOSFETs dar. Um dieses Problem zu umgehen, wurde am AMICA ein exploratives Bauelement entwickelt.

Dieser EJ-FET Transistor (Electrical Junction-Field Effect Transistor) nutzt eine zweite Steuerelektrode anstelle der lokalen Dotierung für die erforderlichen Zuleitungen. Auf diese Weise ist die Herstellung des bis heute mit acht Nanometern Strukturgröße kleinsten MOSFETs Europas gelungen, der eine Steuerung des Stromes über acht Größenordnungen hinweg ermöglicht. Entsprechend im ausgeschalteten Zustand der Strom des Transistors dem Leuchten einer einzigen Glühbirne, so würden im eingeschalteten Betriebszustand des Transistors jeder Einwohner Deutschlands eine Glühbirne (80 Millionen!) einschalten können. Durch den EJ-FET ist der experimentelle Nachweis gelungen, dass die generelle Funktionalität von MOSFETs auch bei extremer Skalierung bis unter zehn Nanometer erhalten bleibt.

Auf der Basis der vorgestellten Triple-Gate-MOSFETs wurden am IHT Speicherbauelemente hergestellt, die auch ohne Spannungsversorgung die Informationen gespeichert halten und somit als nicht flüchtige Speicher bezeichnet

werden. Eine kleine Modifikation verwandelt den Transistor in ein zukunftsorientiertes Speicherbauelement, das ein Bit an Information speichern kann. Hierzu wird die Gate-Isolationsschicht durch zwei isolierende Siliziumdioxid-Schichten ersetzt, zwischen denen nur wenige Nanometer große Nanodots aus Silizium angeordnet sind. Diese Nanodots werden mittels eines speziellen Niederdruck-Depositionsprozesses (LPCVD – Low Pressure Chemical Vapor Deposition) aus der Silan-Gasphase (SiH_4) abgeschieden. Dieser Depositionsprozess ist selbstorganisierend. Das bedeutet, dass Größe, Anordnung und Form der Silizium-Nanodots sich aufgrund der Material- und Prozessparameter ergeben, ohne dass aufwändige Strukturierungsverfahren für die Definition der einzelnen Nanodots angewendet werden müssen. In Bild 2 sind diese Silizium-Nanodots direkt nach dem Abscheidungsprozess auf eine Siliziumdioxid-Oberfläche dargestellt. Die einzelnen Nanodots haben einen Durchmesser von lediglich fünf bis zehn Nanometern. Auf einer Fläche von einem Quadratmillimeter finden somit circa vier Milliarden Nanodots Platz ($4 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2}$). Nach der Deposition einer zweiten isolierenden Siliziumdioxid-Schicht und der Herstellung der obersten Gate-Elektrode lässt sich so ein Speicherfeldtransistor herstellen, wie er im Querschnitt in Bild 3 gezeigt ist.

Das Funktionsprinzip dieses Speichers beruht darauf, dass durch eine positive Spannung, die an die oben liegende Gate-Elektrode angelegt wird, Elektronen aus dem unten liegenden Halbleitersubstrat durch die erste dünne Tunneloxidschicht in die Silizium-Nanodots blitzartig hineintunneln. Dort können die elektrischen Ladungen auch ohne Spannungsversorgung verweilen, so dass die Information in Form

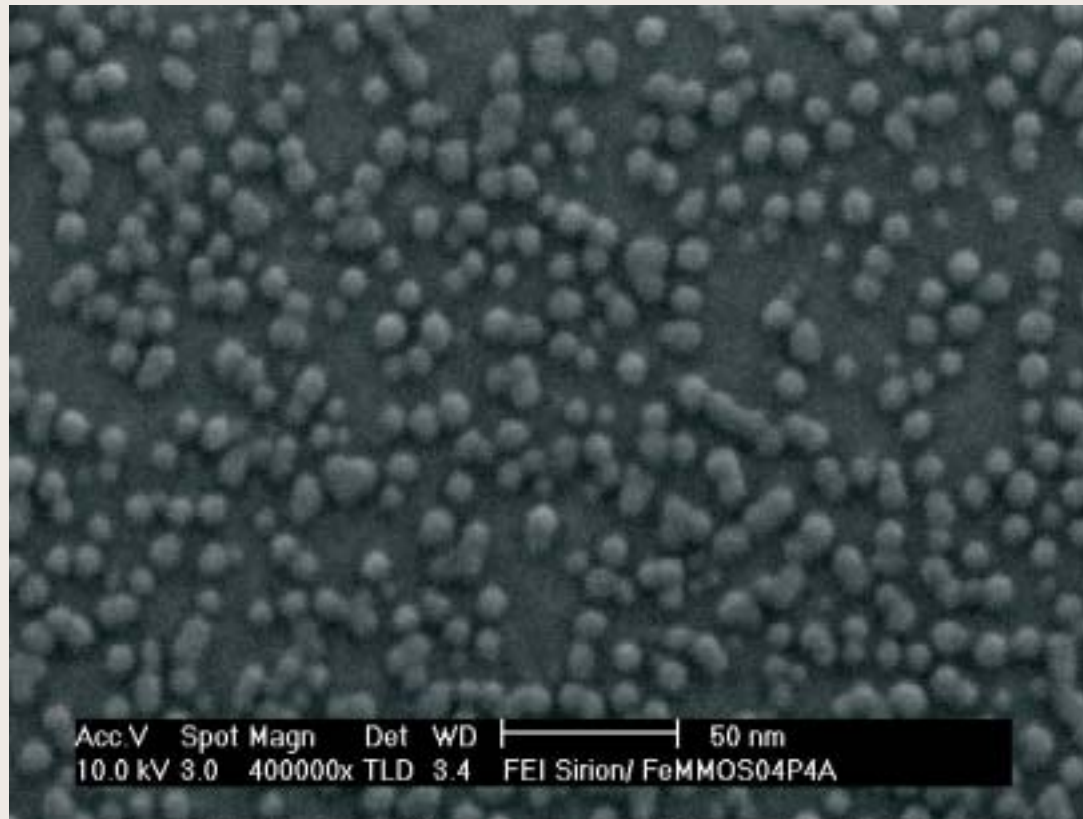


Bild 2: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von mittels LPCVD abgeschiedenen Silizium-Nanodots.

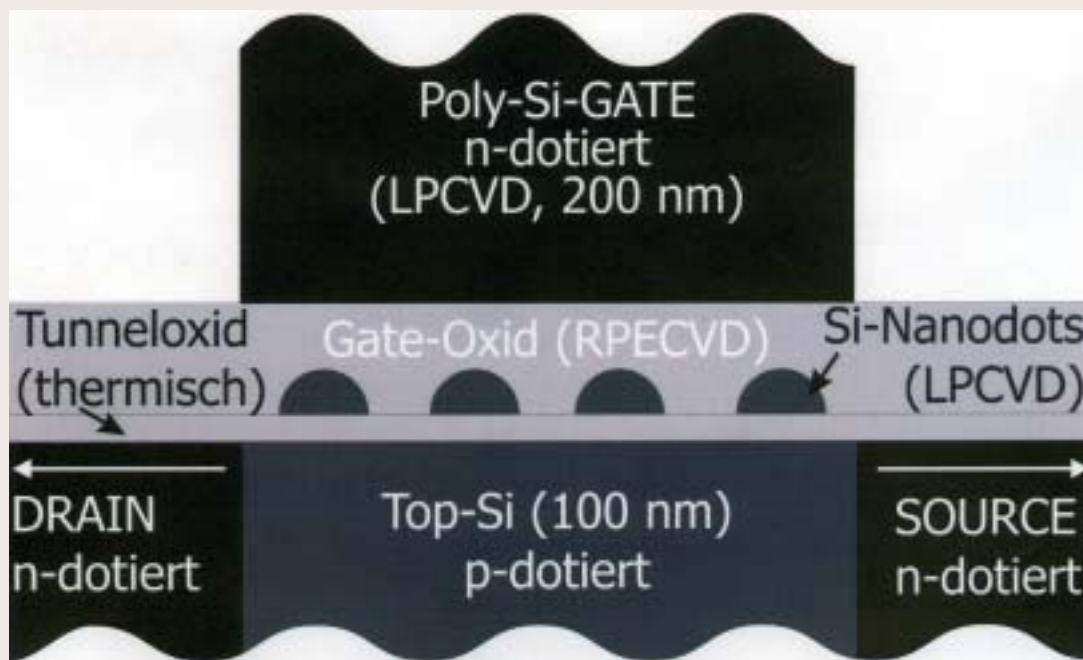


Bild 3: Querschnittszeichnung eines Floating-Dot-Speichertransistors mit Silizium-Nanodots

von An- oder Abwesenheit von Elektronen auf den Nanodots über lange Zeiten erhalten bleibt. Wird danach eine negative Spannung an die Gate-Elektrode angelegt, tunneln die Elektronen aus den Silizium-Nanodots wieder zurück in das Halbleitersubstrat und die Information ist gelöscht. Der Ladungszustand der Nanodots lässt sich sehr einfach feststellen, da die negativ geladenen Elektronen auf den Dots einen hemmenden Einfluss auf den Stromfluss zwischen den Source- und Drain-Gebieten des Speicher-Transistors ausüben. Das heißt, dass die Information – also das Vorhandensein von Elektronen auf den Nanodots – gelesen werden kann, indem das elektrische Schaltverhalten des Transistors geprüft wird. Hoher Stromfluss bedeutet keine Ladungen auf oder in den Nanodots, also Zustand „1“, niedriger Stromfluss bedeutet Elektronen in den Nanodots, also Zustand „0“.

Häufiges Schreiben und Löschen von Informationen führt zu einer Schädigung des extrem dünnen unteren Siliziumdioxids, durch welches die Elektronen hindurch tunneln müssen. Diese Schädigung äußert sich darin, dass die Schicht an einigen Stellen dauerhaft ihre isolierenden Eigenschaften verliert und elektrisch leitend wird, was dazu führt, dass die Ladungen nicht auf den Nanodots bleiben, sondern direkt wieder zurück in das Halbleiter-Substrat fließen. Geschehen also zu viele dieser so genannten Oxiddurchbrüche und verlieren dabei zu viele Nanodots aufgrund dieser Defekte ihre Ladungen, degradiert das Bauelement, es verliert seine Speichereigenschaft. Da die Dots jedoch sehr klein sind, lassen sich sehr viele von ihnen innerhalb eines Speicher-Transistors unterbringen. Selbst wenn mehrere lokal begrenzte Oxiddurchbrüche stattfinden sollten, würden nur einige der Dots ihre Ladung verlieren, die

Funktion des Speichers bliebe jedoch erhalten. Somit besitzt diese neuartige Speichertechnologie eine höhere Lebensdauer im Vergleich zu konventionellen Speichern.

Autoren:

Dipl.-Ing. Matthias Baus ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Halbleitertechnik.
Dipl.-Min. Birgit Hadam ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Halbleitertechnik.
Dr.-Ing. Max Lemme ist Leiter des Forschungsbereichs Nanoelektronik am AMICA der AMO GmbH.
Dipl.-Ing. Thomas Mollenhauer ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des AMICA der AMO GmbH.
Dr. rer.nat. Ing. Bernd Spangenberg ist Leiter des Forschungsbereichs Nanotechnologie am Institut für Halbleitertechnik.
Dr. rer.nat. Thorsten Wahlbrink ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des AMICA der AMO GmbH.
Dipl.-Ing. Olaf Winkler ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Halbleitertechnik.

Nanokosmos

Bernd Beschoten, Gernot Güntherodt, Marcus Heidkamp, Georg Richter, Lars Schreiber

Rechnen mit Spins

Eine moderne Allianz von Magnetismus und Halbleitern

Die moderne Informationstechnologie basiert auf Halbleitern wie Silizium sowie ferromagnetischen Materialien wie Eisen. Die Information wird durch Halbleitertransistoren in integrierten Schaltungen verarbeitet, während die Speicherung der Information auf magnetischen Medien hoher Speicherdichte erfolgt. Die Spintronik ist ein sich innerhalb der letzten Jahre rasant entwickelndes neues Forschungsgebiet, in welchem die Ferromagneten mit den Halbleitern vereint werden sollen, um neue elektronische Bauelemente zu entwickeln, die die systemische Trennung zwischen Speicherung und Verarbeitung von Information aufheben. Solche Bauelemente nutzen sowohl die Ladung des Elektrons als auch seinen quantenmechanischen Spin aus. Das Interesse an der Spintronik ist auch durch die Idee eines Quantencomputers motiviert, dessen Realisierung auf der Kohärenz und Interferenz zwischen Spin-Quantenzuständen beruht.

In den Computermikrochips erfolgt die Informationsverarbeitung bislang ausschließlich durch die Bewegung elektrischer Ladungen. Der mit jedem einzelnen Elektron verbundene Spin wird dabei nicht genutzt. Die Existenz des Spins basiert auf dem Eigendrehimpuls der Elektronen, vergleichbar mit einer sich um sich selbst drehenden Kugel oder mit einem Miniatur-Kinderkreisel. In der Wissenschaft wird diese Rotation durch einen Pfeil dargestellt, der in Richtung der Rotationsachse weist.

In einem gewöhnlichen elektrischen Strom sind die Elektronenspins zufällig orientiert (Bild 1a). Unabhängig davon wie die Spins der Leitungselektronen orientiert sind, hat ein metallischer Kupferdraht denselben elektrischen Widerstand und ein Transistor denselben Verstärkungsfaktor. Spintronik-Bauelemente dagegen behandeln ihre Elektronen unterschiedlich, je nachdem ob ihr Spin nach oben oder nach unten zeigt. Die Erzeugung von spinpolarisierten elektrischen Strömen (die Spinvektoren sämtlicher

Elektronen zeigen in dieselbe Richtung) innerhalb der Halbleiter ist dabei eine wichtige Voraussetzung. Diese können durch den gezielten Einsatz von ferromagnetischen Materialien realisiert werden. In einem ferromagnetischen Festkörper wie Eisen sind die Spins der Elektronen überwiegend in eine Richtung orientiert. Fließt ein Elektronenstrom von einer metallischen Kupferzuleitung durch einen Ferromagneten, so kann nur ein Teil der Elektronen, nämlich der mit einer zum Ferromagneten parallel ausgerichteten Spinkomponente, durch den Ferromagneten fließen (Bild 1b). Der am anderen Ende des Ferromagneten austretende Elektronenstrom ist somit spinpolarisiert.

Wird nun der Ferromagnet in so genannten Ferromagnet-Halbleiter-Hybridstrukturen in direkten Kontakt zu einem Halbleiter gebracht, kann der spinpolarisierte Elektronenstrom vom Ferromagneten in den Halbleiter elektrisch injiziert werden. Diese spinpolarisierten Ströme sind die Grundlage zur Realisierung des bislang hypothetischen Spintronik-Feldeffekt-Transistors (Spin-FET), der von S. Datta und B. Das im Jahre 1990 vorgeschlagen wurde. Beim Spin-FET sind „Quelle“ und „Senke“ des Transistors ferromagnetisch (Bild 1c), so dass der aus der Quelle in den Kanal fließende elektrische Strom spinpolarisiert ist. Dieser Spinstrom fließt ungehindert in die zur Quelle parallel magnetisierte Senke, falls er diese mit unveränderter Spinorientierung erreicht. Beim Transport der Elektronen durch den Halbleiter kann ihr Spin leicht um innere und äußere Magnetfelder präzedieren. Diese Präzession führt zu einer kontinuierlichen Drehung der Spinrichtung des Elektrons innerhalb des Halbleiterkanals. Erstaunlicherweise können innere Magnetfelder auch durch elektrische Felder (Spannung am Gate) erzeugt und gesteuert werden. Der Grund dafür liegt in den nahezu relativistischen Geschwindigkeiten der Elektronen, so dass in ihrem Ruhesystem das elektrische Feld auch eine magnetische Feldkomponente besitzt. Wird die Gate-Span-

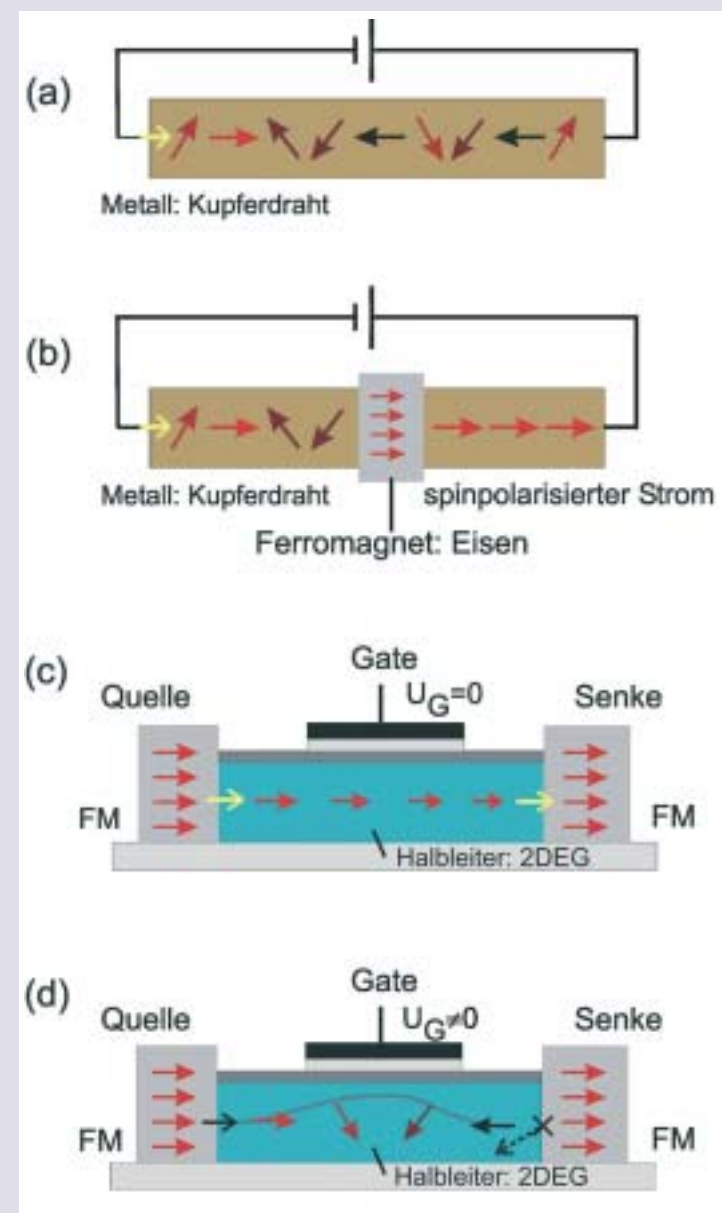


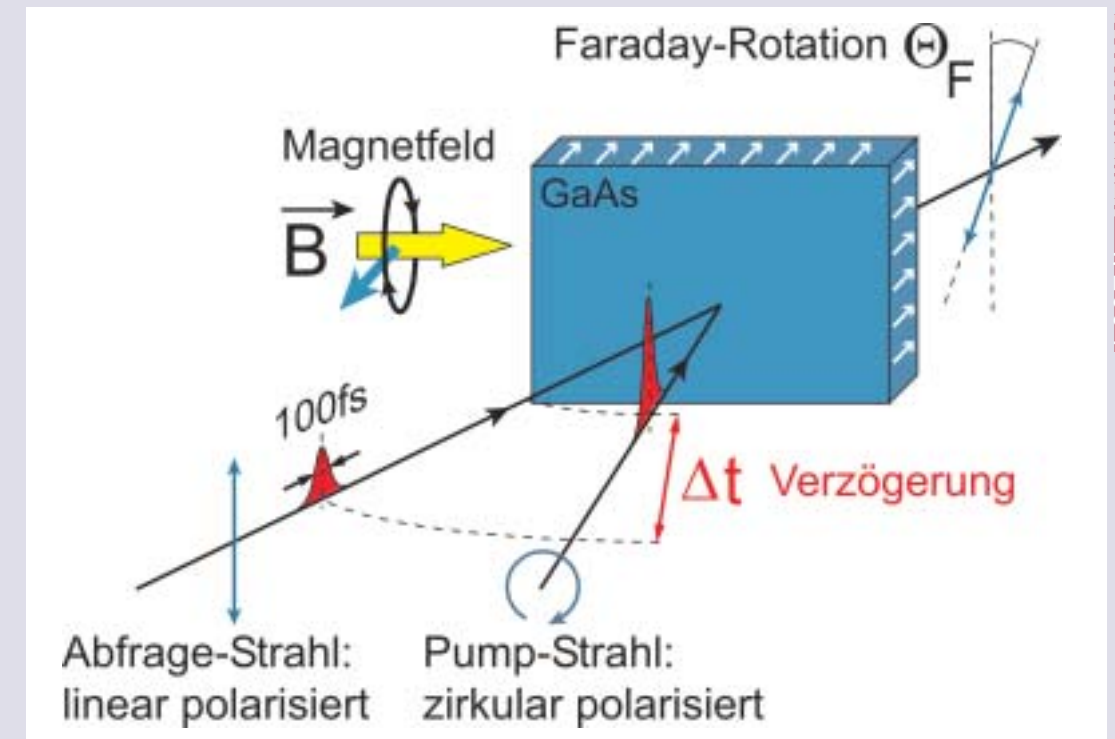
Bild 1: (a) In einem gewöhnlichen Stromkreis (Kupferdraht) sind die Spins der Elektronen zufällig orientiert und beeinflussen den Stromtransport nicht. (b) Spintronik-Bauelemente erzeugen „spinpolarisierte Ströme“ aus Elektronen mit einheitlich ausgerichtem Spin und lassen einen Strom je nach Polarisation durch oder auch nicht. (c) Hypothetischer Spin-

transistor bestehend aus zwei ferromagnetischen Anschlüssen, der „Quelle“ und der „Senke“, die durch einen engen Halbleiterkanal (ein zweidimensionales Elektronengas, 2DEG) getrennt sind. (d) Durch einen dritten Anschluss („Gate“) kann die Spinorientierung beim Transport durch den Halbleiter gesteuert werden.

nung derart eingestellt, dass der Elektronenspin entgegengesetzt zur Spinausrichtung der Senke liegt, wird der Elektronentransport in die Senke blockiert (Bild 1d). Auf diese Weise einen Strom zu sperren, erfordert wesentlich weniger Energie und die Umorientierung der Spins weniger Zeit als in einem konventionellen FET, bei dem die Elektronen durch ein stärkeres elektrisches Feld aus dem Kanal hinausgedrängt werden.

Neben der Spinausrichtung ist auch der Erhalt der Spininformation über praktikable Längen- und Zeitskalen von entscheidender Bedeutung. So kann ein Spin-FET nur dann funktionieren, wenn die Elektronen vom Eintritt in den Kanal bis zum Austritt in dieselbe Richtung zeigen. Die Dauer dieser Ausrichtung (Spinlebensdauer) wird auch zur alles entscheidenden Frage, wenn es um die Realisierung eines Quantencomputers auf der Basis von Elektronenspins geht. Dabei ist die Kontrolle der so genannten Quantenkohärenz (zum Beispiel Präzession aller Spins im Gleichtakt) wichtig: Die Informationseinheiten eines Quantencomputers müssen ihre Quanten-(Gleichtakt-)eigenschaften hinreichend lange behalten. Wird die reine Ladung als eine solche Informationseinheit genutzt, so geht die Kohärenz bereits innerhalb weniger Pikosekunden durch Streuung verloren. Die Quanteneigenschaften von Elektronenspins überleben deutlich länger. So sind Spinkohärenzzeiten von über einer Mikrosekunde (eine Million mal länger als für die Ladungen) im Halbleiter Gallium-Arsenid (GaAs) beobachtet worden ist.

Am II. Physikalischen Institut werden die technologischen und physikalischen Grundlagen zur Realisierung von Spintronik-Bauelementen erarbeitet. Neben der Spininjektion sowie dem Spintransport ist dabei die Untersuchung der Spinkohärenz sowie deren Manipulation und Kontrolle von höchster Bedeutung. Für die Erzeugung kohärenter Spinzustände nutzen wir ultrakurze Laserpulse mit einer zeitlichen Dauer von nur 100



Femtosekunden. Werden die Laserpulse zusätzlich zirkular polarisiert (die elektrischen und magnetischen Feldvektoren drehen sich schraubenförmig im Kreis, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung), so werden die Elektronenspins in Richtung des Laserstrahls innerhalb des Halbleiters kohärent angeregt („gepumpt“). In einem zum Laserstrahl senkrechten äußeren Magnetfeld präzedieren die Elektronenspins, der Spinvektor dreht sich also um die Magnetfeldachse („Leuchtturm-Effekt“) ähnlich wie beim Spin-FET (Bild 2). Die zeitliche Entwicklung dieser Präzession können wir durch einen zweiten, zeitlich verzögerten linear polarisierten Laserpuls („Abfragepuls“) messen. Die Faraday-Rotation, also der Winkel, um den die Polarisation des einfallenden linear polarisierten Laserpulses beim Durchgang durch den Halbleiter gedreht wird, ist ein direktes Maß für die Projektion des präzedierenden Spinvektors in Ausbreitungsrichtung des Lichts. Bei der so genannten zeitaufgelösten Faraday-Rotation erhalten wir damit ein Eins-zu-eins-Abbild der präzedierenden Elektronenspins. Während die Lebensdauer dieser kohärenten Spinzustände aus der zeitlichen

Abnahme der Einhüllenden der Faraday-Rotation bestimmt werden kann, ist die Präzessionsfrequenz unmittelbar mit den inneren Magnetfeldern des Halbleiters verknüpft. Frequenzen von bis zu einem Terahertz (eine Million mal eine Megahertz) konnten bereits nachgewiesen werden. Damit sind die prinzipiell erreichbaren Schaltzeiten einer spin-basierten Elektronik um einen Faktor Tausend schneller als die Taktfrequenzen von etwa einem Gigahertz (ermöglicht eine Milliarde Rechenoperationen pro Sekunde) eines modernen Heimcomputers.

Die Spinlebensdauer hängt sehr stark von der Elektronenkonzentration des Halbleiters ab. Es gibt eine „optimale“ Elektronenkonzentration, bei der die Spinlebensdauer 100 Nanosekunden überschreitet. Diese langlebigen kohärenten Elektronen-Spins sind auch der Ausgangspunkt für das quantenmechanische Rechnen mit Spins. So ist der horizontale Spinzustand eigentlich eine kohärente quantenmechanische Überlagerung der Zustände mit Spinrichtung „nach oben“ und Spinrichtung „nach unten“. Solche Elektronen sind also in beiden Spinzuständen zugleich. Genau diese Art von kohärenter Überlagerung (Ver-

Bild 2: Schematischer Aufbau zur Messung der Spinkohärenz in Halbleitern.

schränkung) von Zuständen wird im Quantencomputer genutzt. Während beim herkömmlichen Computer jedes Bit einen wohldefinierten Wert, entweder 0 oder 1 hat, kann das Quantenbit („Qubit“) in einem Quantencomputer nicht nur die zwei Zustände 0 oder 1 annehmen, sondern auch alle Werte dazwischen, also Kombinationen dieser Zustände. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nimmt das Qubit die beiden Werte 0 und 1 gleichzeitig an. Entsprechend können mit acht Qubits alle Zahlen von 0 bis 255 zugleich dargestellt werden. Ein vielversprechendes Konzept zur Realisierung solcher Qubits sind so genannte Halbleiter-Quantenpunkte. Das sind winzig kleine „Kugeln“ (Punkte) mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern, in denen die kohärenten Elektronenspins „eingesperrt“ werden können. Die Kopplung zwischen benachbarten Quanten-Punkten durch eine angelegte elektrische Spannung kann zur Überlagerung der beiden Spinzustände zu einem Qubit führen. Dabei soll zukünftig für die eigentlichen Qubits der Spin der schweren Atomkerne genutzt werden (Bild 3a). Die Lebensdauern der Kernspins sind etwa tausend- bis millionenfach länger als die der Elektronenspins. Die Verschränkung beziehungsweise das Quantenrechnen erfolgt dann über die Elektronenspins benachbarter Quantenpunkte. Erstaunlicherweise kann durch die zirkuläre Polarisation der optischen Laserpulse, die die Elektronenspins beim „Pumpen“ ausrichten, die Überlagerung der Spins direkt kontrolliert werden (Bild 3b).

Bislang existieren Quantencomputer nur in der Theorie, aber sie berechtigen zu den größten Hoffnungen. Ein Quantencomputer würde zumindest bei bestimmten Aufgaben (Kryptographie) die Leistung herkömmlicher Computer um Größenordnungen übertreffen. ●

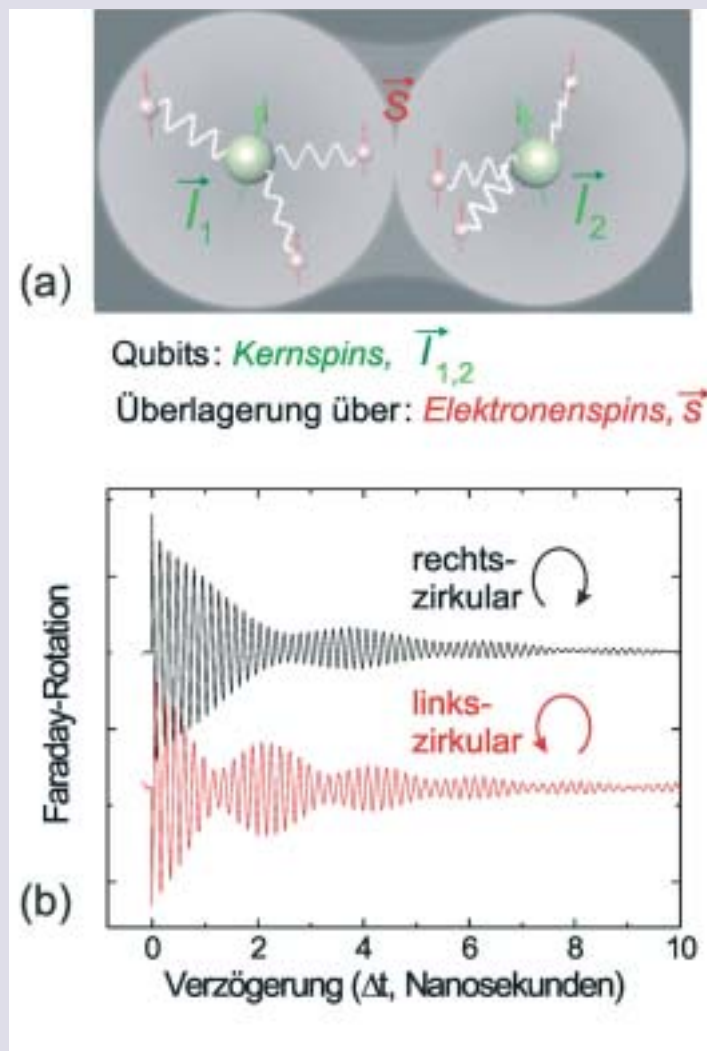
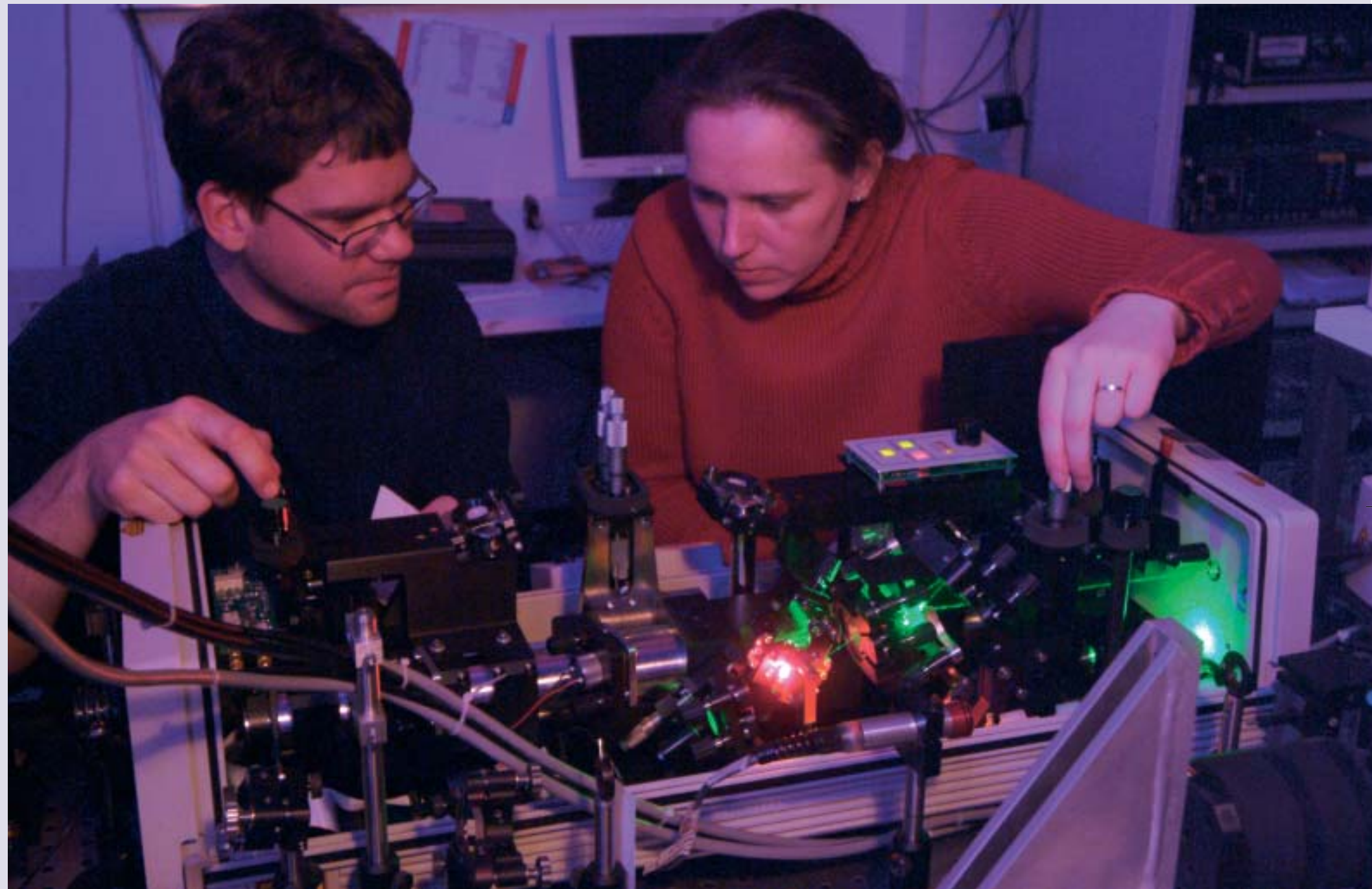


Bild 3: (a) Schematische Darstellung eines Quantenbits (Speichereinheit eines Quantencomputers). Die quantenmechanische Überlagerung (Verschränkung) der Kernspins zweier benachbarter Halbleiter-Quantenpunkte wird über kohärente Elektronenspins vermittelt. (b) Der Stärke der Verschränkung kann durch den Drehsinn (Helizität) der ultrakurzen optischen Laserpulse gesteuert werden.

Autoren:

Dr. rer.nat. Bernd Beschoten ist Akademischer Rat im II.Physikalischen Institut. Univ.-Prof. Dr. sc.nat. Gernot Güntherodt ist Inhaber des Lehrstuhls Experimentalphysik II A und Leiter des II.Physikalischen Instituts. Dipl.-Phys. Marcus Heidkamp ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im II.Physikalischen Institut. Dipl.-Phys. Georg Richter ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im II.Physikalischen Institut. Dipl.-Phys. Lars Schreiber ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im II.Physikalischen Institut.

Einstellarbeiten am Titan-Saphir-Laser mit Frequenzdopplung.
Foto: Peter Winandy



Thomas Kink, Helmut Reul

Nanostrukturen bei Blutpumpen

Verbesserte Blutverträglichkeit durch Nano?

Erkrankungen des Herzkreislaufsystems sind immer noch die Todesursache Nummer Eins in den westlichen Industrienationen. Viele dieser Krankheiten lassen sich medikamentös behandeln, doch oftmals ist ein chirurgischer Eingriff nötig, vor allem, wenn der Herzmuskel direkt betroffen ist. Dabei kommen neben Schrittmachern, Defibrillatoren und Koronar-Stents immer häufiger Herzunterstützungssysteme zum Einsatz, entweder als Überbrückung bis zur Herztransplantation (bridge to transplant), einer eventuellen Herzerholung (bridge to recover) oder aber als endgültige Lösung (destination therapy). In den letzten Jahren hat sich vermehrt gezeigt, dass bei genügend langer Implantationsdauer der Herzmuskel durchaus in der Lage ist, sich zu erholen und komplett zu regenerieren. Aus diesen Gründen konzentriert sich die Forschung heute vor allem auf Herzunterstützungssysteme für den Langzeiteinsatz.

Am Institut für Biomedizinische Technologien der RWTH Aachen (IBMT) werden bereits seit Jahren voll implantierbare Blutpumpen entwickelt. Eine wichtige Anforderung ist, dass solche Systeme bei einer Lebensdauer von einigen Monaten bis hin zu mehreren Jahren absolut wartungsfrei sein müssen. Es hat sich gezeigt, dass die größten Probleme in der Blutverträglichkeit dieser Pumpen liegen. Die Blutschädigung erfolgt sowohl durch unphysiologische Strömungen und Kontakte zu körperfremden Materialien als auch durch lokale Wärmeentwicklung. Sie zeigt sich durch Hämolyse, wobei die roten Blutzellen zerstört werden, oder durch die Entstehung von Blutgerinnseln, einem natürlichen Schutzmechanismus des Körpers. Bis zu einem gewissen Maße kann man dieser Blutschädigung medikamentös entgegenwirken, bei einem Langzeiteinsatz müssen allerdings die Systeme von sich aus blutverträglich sein.

Rotationspumpen haben im Vergleich zu Kolben- oder Membranpumpen einen kleineren Bauraum bei gleicher

Leistung. Sie werden daher bei Langzeiteinsätzen zunehmend favorisiert. Diese Pumpen sind im Vergleich zu den anderen Systemen wesentlich einfacher in ihrer Funktionsweise, sie benötigen keine Ein- und Auslassklappen und besitzen meist nur ein bewegliches Teil, den Rotor. Ein Beispiel für eine derartige Pumpe ist die am IBMT entwickelte Microaxialpumpe „MicroVad“.

Während aufgrund der einfacheren Bauweise der Rotationspumpen Wartungsfreiheit und lange Lebensdauer einfacher zu erreichen sind, stellt die Lagerung des Rotors im Blut eine neue Herausforderung dar. Durch eine geeignete Auslegung des Rotors kann eine strömungsinduzierte Blutschädigung vermieden oder zumindest im akzeptablen Rahmen gehalten werden. Zusätzlich kann man mit einer geeigneten Strömungsführung auch die Wärmeentwicklung des Motors abführen und den Kontakt des Blutes mit körperfremdem Material weitestgehend verhindern. In den Lagerstellen des Rotors ist dies jedoch nicht mehr ausreichend gewährleistet. Hier kommt es häufig zu einer Strömungsverlangsamung bis hin zur Stagnation, was eine Anlagerung von Blutzellen an die Oberfläche in und an den Lagern ermöglicht. Wächst dort ein Blutgerinnsel, kann die Funktion des Lagers nicht mehr gesichert werden und der Rotor kann blockiert oder entkoppelt werden. Wird das Gerinnsel mit einer gewissen Größe abgespült, kann es sich im Gehirn oder in peripheren Organen ablagern und dort zu Embolien oder Infarkten führen.

Wie kann man also die Oberflächen der Pumpen so gestalten, dass zwar das Haupt-Strömungsfeld nicht nachteilig beeinflusst wird, eine Anlagerung von festen Blutbestandteilen aber verhindert wird? Dies betrifft in erster Linie die roten Blutkörperchen, die Erythrozyten, und die Blutplättchen, die Thrombozyten. Der Ausweg könnte sowohl in Mikro- als auch in Nanostrukturen liegen.

Durch Mikrostrukturen könnte die Strömung in Wandnähe so beeinflusst wer-

den, dass eine Stagnation der Blutströmung weitestgehend vermieden wird. Durch geeignete Geometrien könnten solche Strukturen zusätzlich sogar eine tragende Funktion übernehmen – im wörtlichen Sinne. Am IBMT werden beispielsweise Spiralrillenlager als hydrodynamische Lagerungen für den Rotor entwickelt (Bild 1). Dabei sorgen Mikrokanäle mit Abmessungen von etwa 50 mal 15 Mikrometern für einen Druckaufbau im Lagerspalt, der die zwei Lageroberflächen voneinander trennt. Diese Lagerung ist passiv und bedarf keiner weiteren Kontrolle oder zusätzlichen Energie. Zusätzlich sorgen diese Rillen dafür, dass das Lager immer ausreichend geschmiert ist – in diesem Falle mit Blut oder Blutplasma. Aufgrund des kleinen Bauraums des Lagers, der Lagerspalt beträgt nur etwa zehn Mikrometer, wird die Charakteristik der Pumpe als Gesamtsystem nicht beeinflusst.

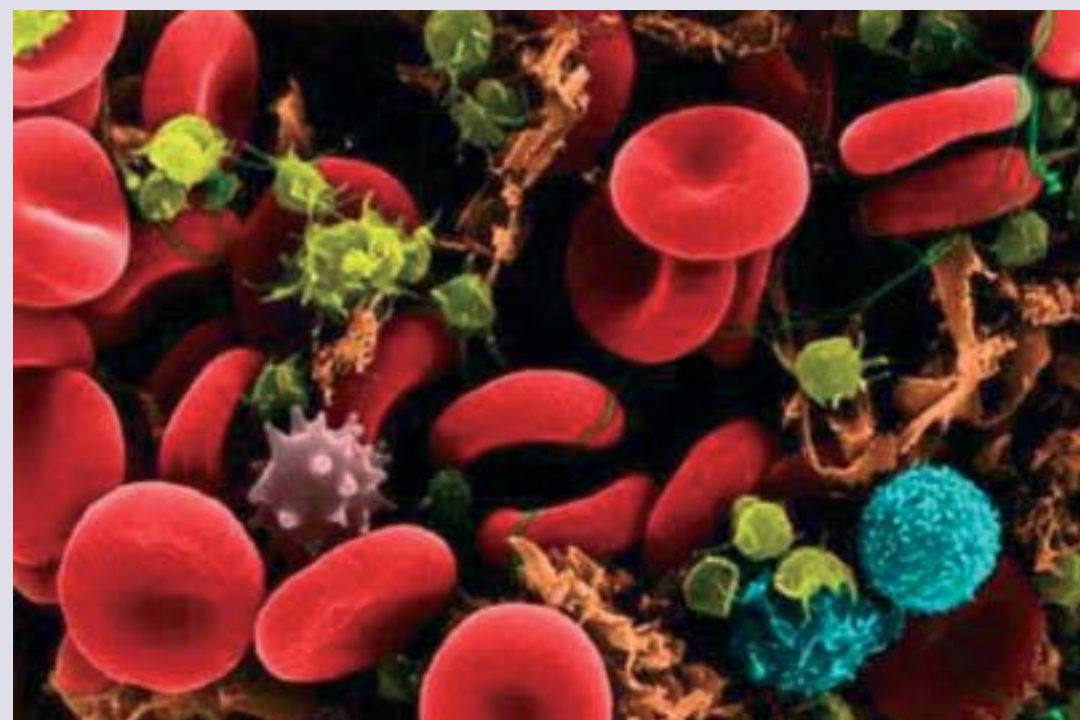
Eine potenzielle Anwendung von Nanostrukturen könnte auf dem Gebiet der Oberflächenmodifikation von blutführenden Bauteilen liegen. In Analogie zum so genannten „Lotuseffekt“ könnten Nanostrukturen das Anlagern von Blutzellen verhindern oder zumindest soweit erschweren, dass schon minimale Strömungsgeschwindigkeiten ausreichen, um Oberflächen wieder frei zu spülen. Erythrozyten haben eine runde bikonkave Form mit einem Durchmesser von etwa acht Mikrometern und einer Höhe von etwa zwei Mikrometern. Thrombozyten sind plättchenförmig und messen etwa 0,5 x 3 Mikrometer, Leukozyten sind kugelförmig mit einem Durchmesser von circa sechs Mikrometern (Bild 2).

Die Haftung eines Partikels auf einer Oberfläche ist unter anderem von der Kontaktfläche dieses Partikels und der Fläche abhängig. Gelingt es nun, diese Kontaktfläche zu minimieren, verringert sich vermutlich auch die Haftung von Zellen darauf. Dies ist auch ein Teilaspekt der Selbstreinigungsfähigkeit von Flächen, wie es im Zusammenhang mit dem „Lotus-Effekt“ hinreichend beschrieben ist.

Bild 1: Spiralrillenlager, Aufsicht



Bild 2: Erythrozyten (rot), Thrombozyten (grün) und Leukozyten (gelb)



Dabei könnte sich durch eine Noppenstruktur um Größenordnungen kleiner als die Blutzellen, also mit einem Spitzendurchmesser von 50 bis 500 Nanometern, die Kontaktflächen und somit die Adhäsionskräfte verringern und deshalb das Anhaftungspotenzial minimieren. Der Abstand zwischen diesen Noppen muss allerdings so gering sein, dass sich vor allem die Thrombozyten nicht dazwischen anlagern können. So hätten diese Strukturen bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Blutschädigung, es würden aber schon niedrige Geschwindigkeiten reichen, um die Anlagerung von Blutzellen zu erschweren. Auf die hydraulische Leistung haben Strukturen in dieser Größenordnung keinen Einfluss. Es ist allerdings dabei wichtig, dass diese Oberflächen keine scharfkantigen Strukturen aufweisen, sondern überall gerundet sind, um eine mechanische Zerstörung der Zellmembranen zu verhindern. Daher ist ein besonderes Augenmerk auf die Fertigung dieser Strukturen zu legen.

In der Literatur sind keine Hinweise darauf zu finden, wie man durch gezielt erzeugte Oberflächenstrukturen die Strömung in Wandnähe so beeinflussen kann, dass die Blutschädigung minimal gehalten wird. So ist vorstellbar, dass man die Mikroströmung in Wandnähe so verändert, dass die Blutkörperchen gehindert werden, mit der Wand in Kontakt zu kommen. Ähnlich dem Fåhræus-Lindquist-Effekt (Magnus-Effekt) könnten hohe Geschwindigkeiten in Wandnähe dazu führen, dass alle Partikel im Blut von den Wänden weg in Richtung Hauptströmungsfeld wandern.

Ein weiterer wichtiger Einfluss auf die Blutschädigung sind hohe Scherspannungen, wie sie vor allem in Wandnähe vorkommen. Aus der Bionik ist bekannt, dass durch eine geeignete Strukturierung, wie sie zum Beispiel bei der Haifischhaut vorkommt, die wandnahe Scherspannung reduziert ist. Mittels solcher Strukturen lassen sich Scherspannungen und damit der Strömungswiderstand reduzieren. Durch parallele Riefen wird verhindert,

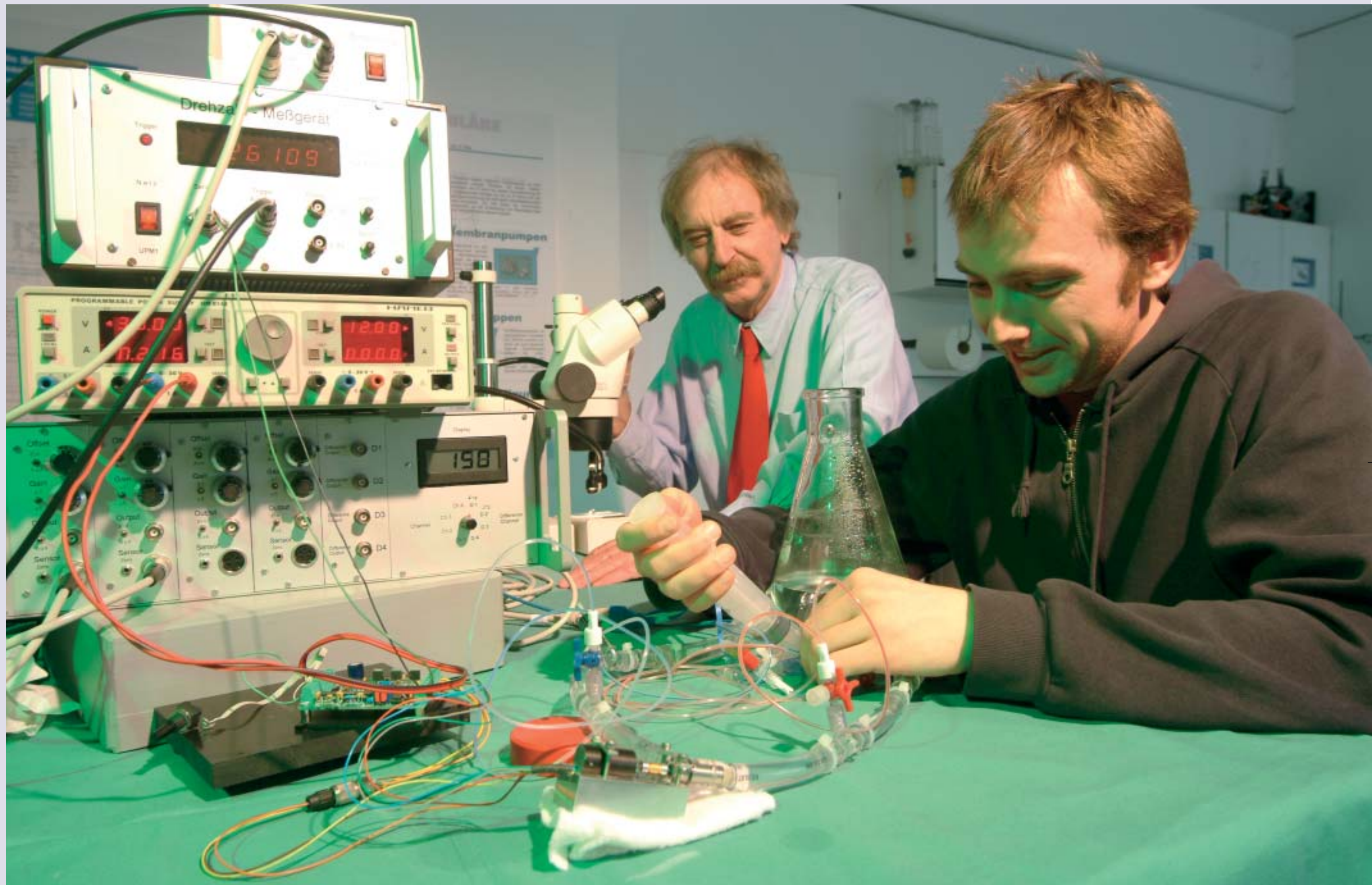
dass sich wandnahe Turbulenzen quer zur Strömungsrichtung ausbreiten. Dadurch sinkt die Gesamtturbulenz und eine laminare Strömung kann länger erhalten bleiben. Zusätzlich entstehen in diesen Rillen Wirbel, die quer zur Hauptströmungsrichtung stehen. Die Vermutung liegt nahe, dass Blutkörperchen in diesen Wirbeln durch Zentrifugalkräfte nach außen geschleudert werden oder gar nicht in diese Rillen eindringen können.

Zurzeit suchen wir nach Möglichkeiten, derartige Strukturen kontrolliert herzustellen und mit geeigneten Untersuchungsmethoden das Verhalten in definierten Blutströmungen zu bestimmen. Dabei müssen auch die elektrochemischen Eigenschaften derartiger Oberflächen berücksichtigt werden, um Anhaftungen zu vermeiden. Bei einer entmischten, zellfreien Wandströmung könnten sowohl die Probleme der Thrombenbildung als auch der schubspannungsbedingten Erythrozytenschädigung gelöst werden.

Autoren:

Dipl.-Ing. Thomas Kink ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Kardiovaskuläre Technik am Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik des IBMT im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen. Prof. Dr.-Ing. Helmut Reul leitet die Arbeitsgruppe Kardiovaskuläre Technik Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik des IBMT im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen.

Thomas Kink (rechts) und Helmut Reul untersuchen an einem Kreislaufsystem die Rotor- und Lagergeometrie sowie die Zuleitung für die Drucksensoren (im Vordergrund).
Foto: Peter Winandy



Nano, Mikro, Makro...

...verschiedene Skalen bei der Herstellung und Anwendung metallischer Bauteile

Georg J. Schmitz

Nanotechnologie – dies ist eine Technologie, die im Allgemeinen mit Chipherstellung, Reinraumtechnologie, Vakuumapparaturen, Dünnschichttechnologie und mikroskopischen Bauteilen einhergeht. Makroskopische Bauteile hingegen werden selten mit nanoskopischen Strukturen in Verbindung gebracht. Ziel dieses Artikels ist eine Darstellung von Phänomenen und Strukturen, die auf unterschiedlichen Längenskalen – von Nanometern bis zu Metern – die Herstellung, die Eigenschaften und die Funktion von Bauteilen bestimmen.

Neben makroskopischer Form, Oberfläche und Werkstoff, aus dem ein Bauteil besteht, bestimmt insbesondere die Mikrostruktur des Werkstoffes – das Gefüge und Defekte in diesem Gefüge – die Bauteileigenschaften. Das Gefüge wird bereits bei der ersten Formgebung – dem Urformen aus gestaltloser Flüssigkeit – weitgehend festgelegt. Urformvorgänge sind beispielsweise die Erstarrung eines Bauteils aus einer Schmelze oder die Kristallisation eines Kristalls aus einer Lösung. Auch das Aushärten eines flüssigen Polymers oder das „Verbacken“ eines Pulvers in einer vorgegebenen Form werden als Urformvorgänge bezeichnet. Neben der endgültigen Formgebung führen weitere Arbeitsschritte wie Umformen oder spanende Bearbeitung zu weiteren Veränderungen des Gefüges. Die Oberfläche fertiger Bauteile wird oftmals mit einer Beschichtung versehen, um sie vor Korrosion zu schützen oder um der Bauteiloberfläche andere Funktionen zu geben.

Während der Erstarrung eines Bauteils aus der Schmelze spielen physikalische Vorgänge auf allen Längenskalen eine wesentliche Rolle. Am Anfang stehen Cluster mit verschiedenen Anzahlen von Atomen, die sich in einer Schmelze immer wieder bilden und zerfallen. Bei Abkühlung der Schmelze nimmt die mittlere Größe dieser Cluster zu. In der Nähe der Schmelztemperatur werden einzelne Cluster dann zu stabilen Keimen, die weiter wachsen. Die Größe der Keime

beträgt nur wenige Nanometer. Ihre Anzahl und Position in der Schmelze bestimmt die Anzahl und Verteilung der Körner – der Kristallite im Gefüge – im festen Bauteil. Eine Vielzahl von Keimen führt zu vielen kleinen Körnern und im Extremfall zu einem nanokristallinen Gefüge. Ein einzelner Keim ermöglicht hingegen das Wachstum eines Einkristalls. Einkristalle aus Silizium mit Durchmessern von einigen Dezimetern und Längen im Bereich von Metern müssen für die Halbleitertechnik möglichst frei von Defekten auf der nanoskopischen Skala sein. Jeder Defekt im Kristall führt zu Ausschuss in der späteren Wafer- und Chipherstellung. In manchen Fällen sind es aber gerade die Defekte, die einen Einkristall erst richtig interessant machen. Während ein technisch perfekter Einkristall aus Aluminiumoxid farblos und transparent ist, lassen Defekte in natürlich gewachsenen Aluminiumoxidkristallen diese transparent und rot erscheinen und geben ihnen als Rubine eine „Anwendung“ in der Schmuckindustrie. Reale Bauteile und Werkstoffe sind oftmals polykristallin. Bekanntes Beispiel hierfür sind Solarzellen aus polykristallinem Silizium, deren Kornstruktur bereits mit bloßem Auge einfach zu erkennen ist. Der Transport der durch das Sonnenlicht erzeugten elektrischen Ladungen zu den Kontakten ist für den Wirkungsgrad solcher Solarzellen wesentlich. Da dieser Ladungstransport über die Grenzen zwischen Körnern hinweg erfolgt, sind die Anzahl der Körner, ihre wechselseitige Ausrichtung und Verunreinigungen auf atomarer Skala an den Korngrenzen entscheidend. Technische Werkstoffe beinhalten eine Vielzahl von Legierungselementen. Diese bilden nicht nur eine Vielzahl von Körnern, sondern darüber hinaus auch unterschiedliche Phasen, die auf unterschiedlichen Längenskalen das Gefüge und die Eigenschaften des Bauteils bestimmen (Bild 1). Fein verteilte Ausscheidungen einer Phase in einer Matrix aus einer anderen Phase verbessern wesentlich die Festigkeit eines Werkstoffes bei hohen Tempe-

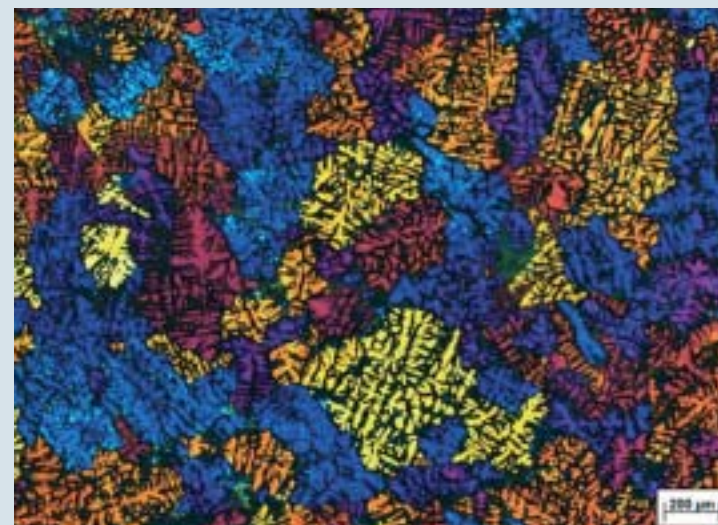
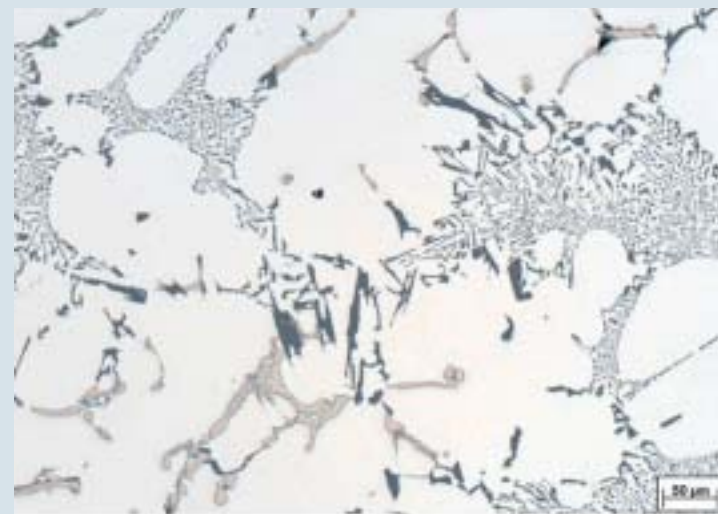
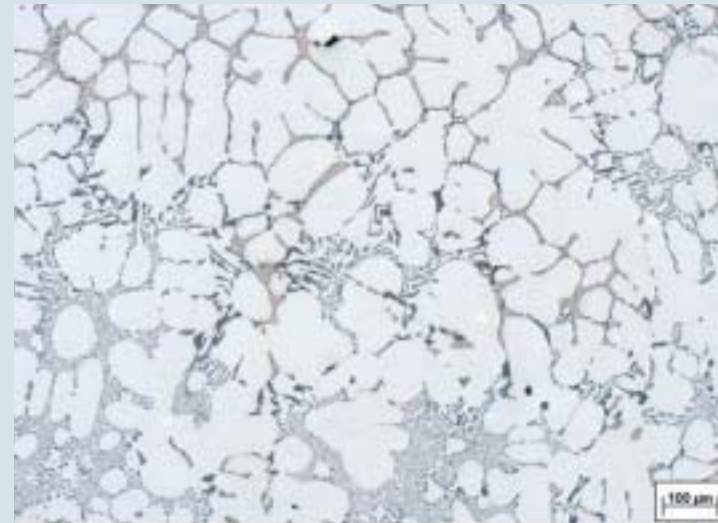
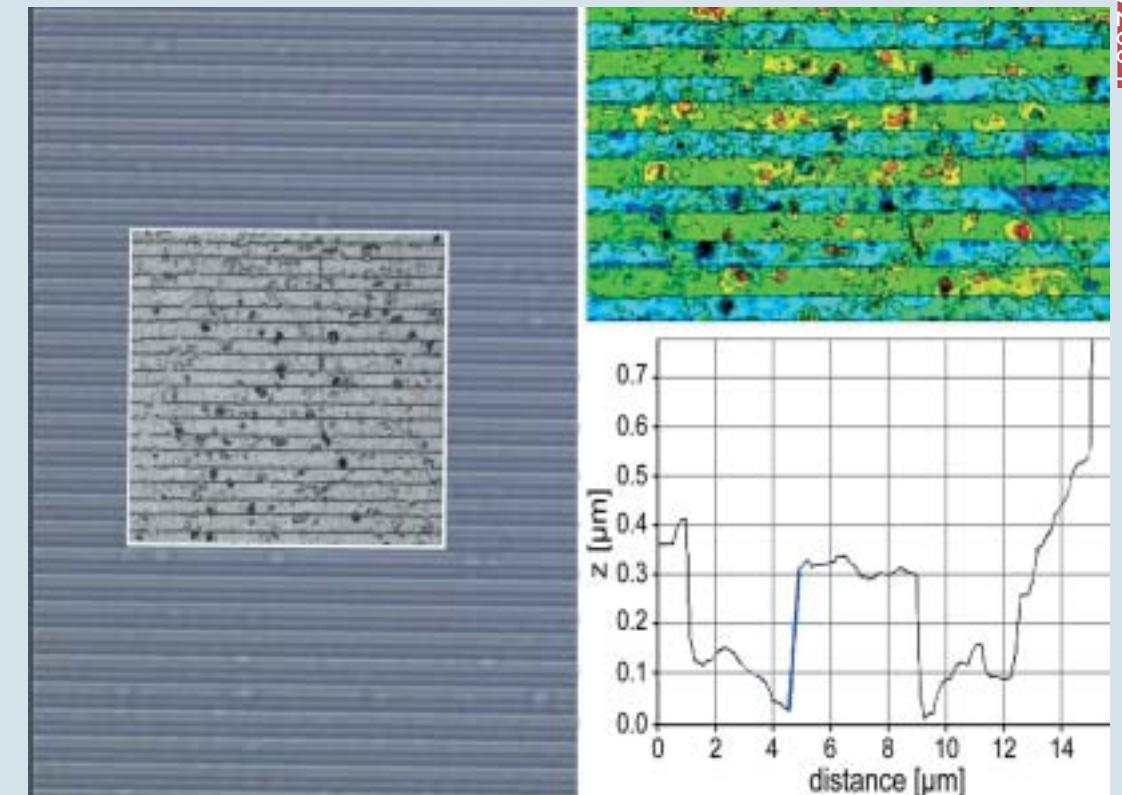


Bild 1: Gefüge einer technischen Aluminiumlegierung in verschiedenen Vergrößerungen. Erkennbar sind die unterschiedlichen Größenskalen der einzelnen Gefügemerkmale, welche hinunter bis zu einigen 100 nm reichen. Die verschiedenen Farbtöne (weiß, grau, braun) entsprechen unterschiedlichen Phasen. Die Orientierung der einzelnen, großen Körner wird im Anschluss an ein spezielles Ätzverfahren bei Beobachtung in polarisiertem Licht farblich sichtbar. Bilder: Tilman Grimmig und Elke Schabberger-Zimmermann.

peraturen, die Reibungs- oder Verschleißseigenschaften des Bauteils, die supraleitenden Eigenschaften von Supraleitern und viele andere für Anwendungen wichtige Werkstoffeigenschaften. Ein genaues Verständnis der Struktur- und Musterbildungsvorgänge auf unterschiedlichen Längenskalen bei der Entstehung von Gefügen in Bauteilen ist für die Verbesserung von Werkstoffen sowie für die Entwicklung neuartiger Materialien von entscheidender Bedeutung.

Verschiedene Längenskalen definieren auch spezielle Anwendungen für entsprechende Bauteilformen. Schiffsschrauben, Laufräder in Wasserpumpen, Blutpumpen und spezielle mikrofluidische Systeme verfolgen alle den Zweck des Transportes von Flüssigkeiten und sind daher in ihrer Form ähnlich. Die Bauteilabmessungen reichen jedoch von einigen Metern hinunter zu wenigen Mikrometern.

Bauteile mit makellos glatten Oberflächen galten noch vor kurzem als Ausdruck technischer Perfektion. Doch hier bahnt sich ein tiefgreifender Wandel an. Prominentes Beispiel ist der Lotus-Effekt: Winzige Strukturen machen die Oberflächen schmutz- und wasserabweisend. Aber auch Lichtreflexion, Strömungswiderstand, Wärmeübergang und Reibung lassen sich durch Oberflächenstrukturen gezielt beeinflussen. Oftmals werden die gewünschten Oberflächeneigenschaften, wie zum Beispiel die Entspiegelung von



Brillengläsern, durch eine zusätzlich auf das Bauteil aufgetragene Beschichtung erzielt. Derartige Beschichtungen werden in der Regel aufgedampft und weisen Rauigkeiten im Nanometerbereich auf. Sie haben jedoch keine geometrisch definierten Strukturen. Geometrisch definierte Strukturen können im mikroskopischen Maßstab auf metallischen Bauteilen durch chemisches Ätzen, durch mechanische Bearbeitung oder mit einem Laser erzeugt werden. Diese zusätzlichen Verfahrensschritte sind jedoch kostspielig und zeitaufwändig. Die Erzeugung geometrisch definierter Strukturen im noch kleineren Nanometerbereich ist mit komplizierten Verfahren aber möglich und Stand der Technik. Beispielhaft sei hier die Elektronenstrahlolithographie genannt. Jedoch werden

nur sehr kleine Flächen auf diese Weise kontrolliert mit Strukturen versehen. Gummartige Elastomere zur Abformung mikro- und nanoskopischer Strukturen ermöglichen deren Vervielfältigung in einfachen Prozessen unter normaler Atmosphäre. Diese Elastomere, welche Strukturen kleiner als zehn Nanometer exakt abbilden können, ermöglichen als Form die Herstellung fast beliebig vieler Wachsmodele. Ein Urmodell, welches in mehreren Stunden oder Tagen hergestellt werden muss, kann so im Minutentakt in Wachs vervielfältigt werden. Bereits heute wird hierbei eine beeindruckende Abbildungsgenauigkeit erzielt (Bild 2). Durch geeignete Techniken lässt sich eine Vielzahl solcher mikro- und nanostrukturierter Wachsmodele zukünftig zu einem größeren Wachsmodell mit definiert

Bild 2: Wachsmodell mit vier Mikrometer breiten Streifen, getrennt durch 200 Nanometer tiefe und vier Mikrometer breite Gräben (Inset, links). Von einem elektronenstrahlolithographisch hergestelltem Urmodell (Hintergrund, links) kann innerhalb weniger Minuten ein solches Wachsmodell angefertigt werden. Die Vermessung der Oberflächenstruktur des Modells mittels konfokaler Laser-Scanning-Mikroskopie (rechts) zeigt neben der bisherigen Präzision der Abbildung noch weitere Optimierungsmöglichkeiten.

strukturierte Oberfläche verbinden. Dieses Wachsmo-
dell kann anschließend im Fein-
gussverfahren in ein makro-
skopisches, metallisches Bauteil
abgebildet werden.

Mikrostrukturierte Oberflä-
chen optimieren die Funktion
vieler metallischer Bauteile und
erschließen neue Anwen-
dungsfelder. Metallische Bau-
teile mit definiert strukturierter
Oberfläche weisen hierbei im
Vergleich zu Kunststoffbautei-
len etliche Vorteile auf. Bei-
spiele sind geringer Verschleiß,
lange Lebensdauer, hohe Här-
te, hohe mechanische Belast-
barkeit, hohe Einsatztempera-
turen, hohe elektrische und
Wärmeleitfähigkeit. Die Bau-
teiloberflächen können hierbei
strömungsoptimiert (Haifisch-
hauteffekt), reaktionsoptimiert
(„Lotuseffekt“), tribologisch
oder optisch optimiert, oder
mit einer gezielt an andere An-
wendungsfälle angepassten
Struktur versehen sein. Bei-
spiele möglicher Anwendungen
metallischer Bauteile mit
strukturierter Oberfläche sind
Implantate, Düsen, Turbinen,
Turbolader, Katalysatoren und
Wärmetauscher, spezielle Spie-
gel, Präge- und Umformwerk-
zeuge oder Schmuck. Entspre-
chende gegossene Bauteile er-
öffnen darüber hinaus als Um-
formwerkzeuge eine Vielzahl
weiterer Möglichkeiten zur
Übertragung feinsten Oberflä-
chenstrukturen auf andere
Materialien. Neue, interessante
Möglichkeiten ergeben sich
letztlich aus der Verwendung
strukturierter Oberflächen für
Selbstorganisationsvorgänge
(Bild 3).

Die softlithographischen
Verfahren zur Übertragung
von Strukturen im Nanometer-
bereich beruhen auf einem Ur-
formverfahren – der Aushär-
tung eines Polymers in einer
nanostrukturierten Form. Der-
artige Polymere dienen als
Ausgangsform für eine Kette
weiterer Urformverfahren beim
Feinguss, welche mit einem
strukturierten, metallischen
Bauteil endet. Alle hierbei zum
Einsatz gelangenden Werkstof-
fe – Polymere, Wachse, Kera-
miken und Metalle – können
bereits heute Strukturen von
wenigen Mikrometern abbil-
den. Die Verwendung nano-
technologisch hergestellter Ur-

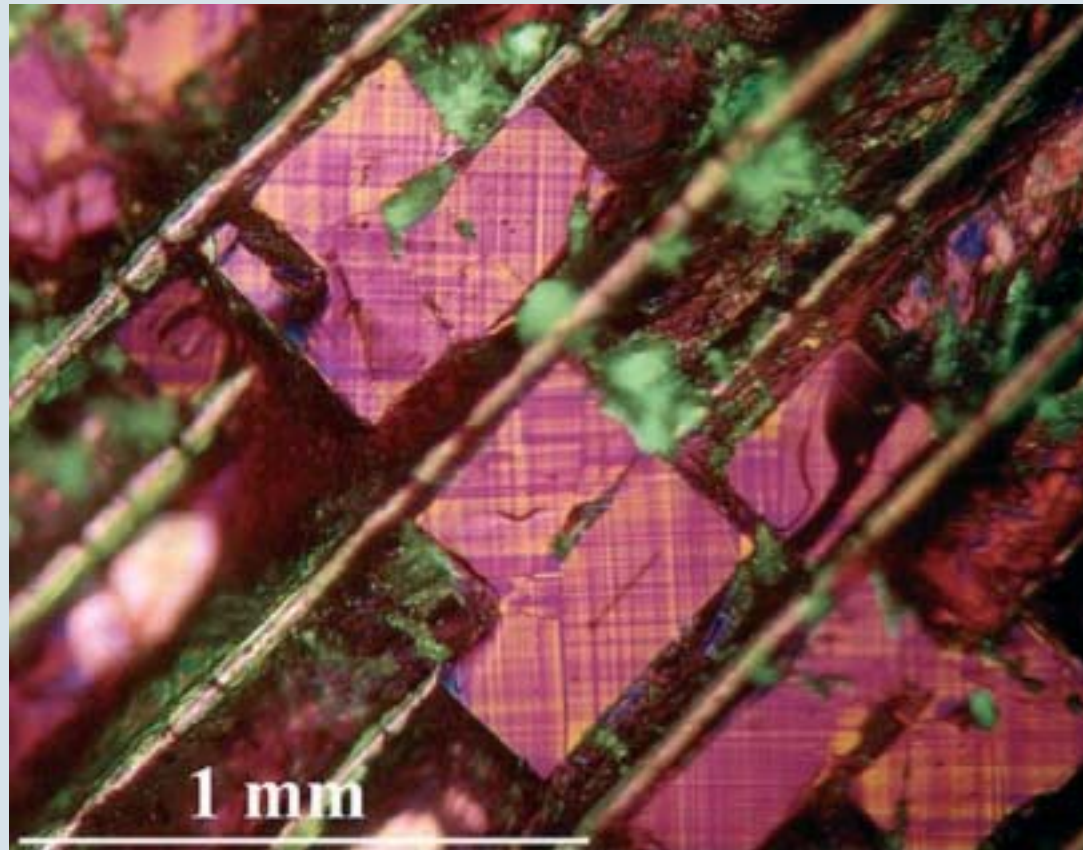


**Bild 3: Kontrollierte Keimbil-
dung und orientiertes Wachs-
tum von Supraleiterkristallen
auf einer mikroskopisch struktu-
rierten Oberfläche. Die gekeim-
ten und gewachsenen Körner
sind parallel zu den Wänden di-
agonal durch das Bild verlaufen-
der Gräben ausgerichtet. Dieser
Selbstorganisationsvorgang be-
ruht im wesentlichen auf Ober-
flächenspannungseffekten zwi-
schen Schmelze, strukturiertem
Substrat und dem wachsendem
Kristall.**

modelle und die weitere Ent-
wicklung des Feingussverfah-
rens – insbesondere der Kera-
miken – erlauben zukünftig
vermutlich Strukturen im Na-
nometerbereich großflächig
auf metallische Bauteile zu
übertragen, um so deren
Funktionalität zu verbessern. ●

Autor:

Dr. rer.nat. Georg J. Schmitz ist
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
bei ACCESS Materials & Pro-
cesses, einem gemeinnützigen,
privatrechtlichen An-Institut
der RWTH Aachen.

● **AFM (Atomic Force Micro-
scope); Rasterkraftmikroskop**
Mikroskop zur mechanischen
Abtastung von Oberflächen
auf der Nanometerskala. Dabei
wird eine an einer Blattfeder
befestigte Nadel – dem so ge-
nannten Cantilever – zeilen-
weise über die Oberfläche ge-
führt. Durch die Struktur der
Oberfläche wird dabei die
Blattfeder verbogen. Die Aus-
lenkung kann mit kapazitiven
oder typischerweise optischen
Sensoren gemessen werden.
Der Krümmungsradius der
Spitzen beträgt dabei typi-
scherweise 5 - 20 nm, was je
nach Rauigkeit der Proben-
oberfläche laterale Auflösun-
gen von 0,1 - 10 nm erlaubt.

● **Antiferromagnetismus**
Es existieren Teilgitter mit ent-
gegengesetzter Magnetisie-
rung. Die Magnetisierung der
Teilgitter kompensiert sich,
weil die antiparallel orientier-
ten magnetischen Momente
der Strukturbausteine gleich
groß sind. Die resultierende
Magnetisierung ist Null, es tre-
ten keine Domänen auf. Die
Substanz verhält sich diamag-
netisch.

● **Apertur**
In der Optik ist eine Apertur
die Öffnung eines technischen
Gerätes für Lichtstrahlen, die
entweder durch Linsen oder
Spiegel weitergeleitet werden.
Diese Öffnung ist meist kreis-
förmig. Man spricht auch von
einer Aperturblende. Wegen
der Beugung des Lichtes,
hängt die Auflösung eines
optischen Gerätes von der
Apertur ab. Zum Beispiel kann
man beim Mikroskop mit einer
Aperturblende das Auflösungs-
vermögen beeinflussen.

● **Bottom-Up**
Beim „Bottom-Up“ Ansatz
werden aus atomaren oder
molekularen Bausteinen kom-
plexe Strukturen gebaut. Die-
ses Konstruktionsprinzip wird
häufig in der Biologie und
Chemie genutzt

● **Cluster**
in der Chemie nach der klassi-
schen Definition eine Verbin-
dung mit mindestens drei Me-
tallatomen, die durch Metall-
Metall-Bindung miteinander
verknüpft sind (Metall-Cluster)

● **CMOS (Complementary
Metal Oxide Semiconductor)**
CMOS-Bausteine sind *inte-
grierte Schaltkreise*, bei denen
gleichzeitig p-Kanal als auch
n-Kanal *MOSFETs* verwendet
werden. Mit dieser Schaltungs-
technik lassen sich zur Zeit die
verlustärmsten Bausteine her-
stellen da durch das Basisele-
ment Inverter zu keinem Zeit-
punkt des Umschaltvorganges
ein Querstrom fließt. Aus die-
sem Grund werden die mei-
sten ICs (Prozessoren, Spei-
cher) zur Zeit in dieser Technik
hergestellt.

● **Dielektrika (Isolatoren,
Nichtleiter)**
Sammelbezeichnung für feste,
flüssige oder gasförmige Stof-
fe, die den elektrischen Strom
nicht oder kaum leiten – also
einen hohen spezifischen Wi-
derstand besitzen – und als
Elektroisolierstoffe in Transfor-
matoren, Kondensatoren etc.
Verwendung finden.

● **DRAM (Dynamic Random
Access Memory), Dynami-
sches RAM**
Speicherbaustein für Compu-
ter, dessen Inhalt flüchtig ist.
Eine DRAM-Speicherzelle be-
steht aus einem Kondensator
und einem Transistor. Dieser
Aufbau hat den Vorteil, dass
die Speicherzellen nur sehr
wenig Chip-Fläche benötigen
und so höhere Packungsdich-
ten als bei statischen Speichern
möglich sind. Der Inhalt eines
DRAMs muss regelmäßig auf-
gefrischt werden, damit die
Speicherzelle die gespeicherten
Daten nicht verliert.

● **Elektronenstrahlithografie**
In der Elektronenstrahltechnik
werden schnelle energiereiche
Elektronen zur Strukturzer-
zeugung benutzt. Der geringe
Durchsatz dieses Verfahrens
verbietet allerdings die direkte
Verwendung bei der Herstel-
lung von Halbleiterbauelemen-
ten.

● **Epitaxie**
Bezeichnung für orientierte,
gesetzmäßige Aufwachsungen
einer kristallinen Substanz auf
einer anderen. Die Epitaxie be-
ruht auf einer weitgehenden
Übereinstimmung der Gitter-
parameter in einer oder besser
in zwei Richtungen entlang
den verwachsenden Netzebe-
nen.

● **Ferromagnetismus**
Die elementaren magnetischen
Momente eines Festkörpers
weisen eine parallele Ordnung
auf. Beim Ferromagnetismus
handelt es sich um ein koope-
ratives Phänomen. Einen ferro-
magnetischen Festkörper be-
zeichnet man als Ferromagnet.
Ferromagnetische Ordnung bei
Raumtemperatur zeigen die
Metalle Eisen, Nickel und Ko-
balt, sowie diverse Legierun-
gen.

● **FET (Feldeffekttransistor)**
Der FET ist ein unipolarer
Transistor. Der FET hat drei
Anschlüsse: Source, Gate und
Drain. Durch ein elektrisches
Feld wird der Stromfluss durch
den leitenden Kanal (Source →
Drain) des Feldeffekt-Transis-
tors geschickt. Durch eine
angelegte Spannung an der
Steuerelektrode (Gatespan-
nung) wird das elektrische Feld
beeinflusst.

● **FIB (Focused Ion Beam),
Rasterionenstrahlmikroskopie**
Materialbearbeitung und Bil-
derzeugung durch Rastern ei-
nes hochenergetischen fokus-
sierten Ionenstrahls aus einer
Flüssig-Gallium-Ionenquelle

● **Hybridisierung**
Vorgang, bei dem sich ein
DNA-Einzelstrang an einen
komplementären DNA- Ein-
zelstrang unter Ausbildung ei-
nes stabilen Doppelstrangs an-
lagert, indem Wasserstoff-
brückenbindungen zwischen
den jeweils komplementären
Nucleinsäurebasen ausgebildet
werden.

● **Kohärenz**
Fähigkeit eines Systems, bei
Überlagerung seiner Wellen
Interferenzstrukturen zu erge-
ben. Damit sich diese Struktu-
ren nicht (wie in den meisten
Fällen) verwischen, ist es not-
wendig, dass eine zeitlich kon-
stante Phasenbeziehung in den
Wellen existiert. Kohärenz tritt
sowohl bei elektromagneti-
schen Wellen (kohärente
Strahlung), als auch bei Ener-
giezuständen zum Beispiel von
Atomen und Molekülen auf.

● Kolloide

Stoffe, die feinverteilt mit Teilchengrößen zwischen 100 und 1 Nanometer vorliegen, was Atomansammlungen mit etwa 10^3 - 10^9 Atomen entspricht. Bei Lacken und Druckfarben trifft man Kolloide speziell in Form wässriger oder nicht-wässriger Dispersionen an, wie sie in Dispersionsfarben, wasserverdünnbaren Lacken und wässrigen Druckfarben eingesetzt werden. Sind die Kolloid-Teilchen von einheitlicher Größe, so spricht man von *monodispersen*, andernfalls von *polydispersen* Dispersionen.

● Liganden

Meist kleine bis mittelgroße, organische Moleküle, die hochreaktive Nanopartikel davor schützen, direkt nach ihrer Bildung zu größeren Aggregaten und schließlich zum makroskopischen Metall zusammenzuwachsen. Die Liganden erlauben es, die Partikel über längere Zeit in Lösung stabil zu halten.

● Magnetit

magnetische Eisen-Sauerstoff Verbindung der Formel Fe_3O_4

● MRAM (Magnetic Random Access Memory)

Nichtflüchtige Speicherchip-Technologie, bei der im Gegensatz zu herkömmlichen Chiptechnologien (DRAM) die Informationen nicht mit elektrischen, sondern mit magnetischen Ladungselementen gespeichert werden. Der Vorteil dieser Technologie liegt darin, dass die Chips ihre gespeicherten Daten auch nach dem Abschalten des jeweiligen Systems behalten.

● Mooresches Gesetz

Gordon Moore bemerkte 1965, dass die Dichte der Transistoren auf einer integrierten Schaltung mit der Zeit exponentiell ansteigt. Als Folge daraus wächst auch die Rechenleistung der Computer exponentiell. Trotz steigender technischer Herausforderungen ist das Mooresche Gesetz seitdem gültig geblieben.

● MOS-FET (Metal-Oxide-Semiconductor-FET)

Eine Art des Feldeffekttransistors, bei dem die Steuerelektrode (Gate) durch eine isolierende Oxidschicht (im allgemeinen SiO_2) von dem leitfähigen Kanal getrennt wird. Er ist wegen seines einfachen Herstellungsprozesses besonders für integrierte Schaltungen geeignet.

● Nano (griech.; nanos = Zwerg)

Ein Milliardstel einer Einheit, z.B. 1 Nanometer (nm) = 10^{-9} m.

● Photolithographie

Lithografisches Reproduktionsverfahren bei dem mittels Belichtung Muster auf Materialien aufgebracht werden. In der Halbleitertechnik werden mittels der Fotolithografie Strukturinformationen in einen Fotoresist übertragen, der wiederum zuvor auf ein Substrat (meistens einen Wafer) aufgebracht wurde. Nach Entwicklung des latenten Bildes kann die Strukturinformation z.B. mittels Ätzen in eine darunterliegende Schicht übertragen werden. Der Photoresist wird danach wieder entfernt. Das Wiederholen dieser Prozessabfolge mit verschiedenen aufeinanderfolgenden Schichten und einer genauen Justierung der einzelnen Muster zu einander ist die Schlüsseltechnik bei der Herstellung von integrierten Schaltkreisen, den so genannten Mikrochips.

● Plasmon

Begriff aus der Festkörperphysik. Plasmen sind Energiequanten der kollektiven Schwingung eines Elektronengases (Plasmaschwingung) gegen den positiven Ionenhintergrund in Metallen oder in stark dotierten Halbleitern.

● Präzession

Lageveränderung der Achse eines rotierenden Kreisels, wenn äußere Kräfte (Drehmomente) auf ihn einwirken. Die Präzession lässt sich bei jedem Spielzeugkreisel beobachten. Steht er genau senkrecht, wirkt kein Drehmoment auf ihn ein, da die Schwerkraft parallel zur Achse ist. Deshalb bleibt die Achse senkrecht, es findet keine Präzession statt. Setzt man ihn dagegen schräg auf, würde er normalerweise durch die Schwerkraft umkippen. Dieses Drehmoment bewirkt bei einem schnell rotierenden Kreisel, dass seine Achse eine Taumelbewegung ausführt, die Präzession.

● Quantencomputer

Computer, der die Gesetze der Quantenmechanik ausnutzt, um gewisse Rechnungen effektiver (schneller) durchzuführen. Statt Bits benutzt ein Quantencomputer so genannte Qubits als Grundlage. Hauptproblem beim Bau von Quantencomputern ist die Dekohärenz, die den Quantenzustand durch Kopplung an die Umgebung zerstört. Quantencomputer mit einer sehr geringen Anzahl Qubits sind bereits gebaut worden und haben z.B. Shors Algorithmus erfolgreich ausgeführt (hierbei wurde die Zahl 15 in ihre Primfaktoren 3 und 5 zerlegt).

● Quantisierung/Quantelung

Unter Quantelung versteht man zum einen das Vorliegen diskreter, durch Quantenzahlen beschreibbarer Energieniveaus zum anderen die Quantisierung als Übergang von der klassischen zur quantentheoretischen Beschreibung physikalischer Vorgänge.

● QuBits (Quanten-Bits)

Qubits werden bei Quantencomputern verwendet. Qubits können nicht nur die Werte (Zustände) 0 und 1 annehmen, sondern auch beliebige Superpositionen dieser Zustände. Außerdem sind verschränkte Zustände mehrerer Qubits möglich.

● REM (Rasterelektronenmikroskop)

Der Elektronenstrahl wird auf die Probe zu einem möglichst kleinen Fleck fokussiert und zeilenweise über den zu untersuchenden Probenbereich geführt. Dabei können verschiedene Signale detektiert und anhand des Detektionszeitpunktes einem Punkt auf der Probenoberfläche zugeordnet werden. Zu diesen Signalen zählen insbesondere die transmittierten Elektronen sowie Sekundärelektronen, die die Probe auf der selben Seite verlassen, von der der primäre Elektronenstrahl eingetreten ist.

● Spin (engl.: spin = (sich) drehen)

Bezeichnung für eine innere Eigenschaft der Elementarteilchen, die kein Analogon in der klassischen Physik besitzt und die man sich am ehesten als Drehimpuls einer Eigenrotation veranschaulichen kann.

● Sputtern

Als Sputtern bezeichnet man Materialabtrag an einem Target durch Ionenbeschuss. Das Target besteht bei Beschichtungsprozessen aus dem Material, das auf einem Substrat abgeschieden werden soll.

● STM (Scanning Tunneling Microscope); Rastertunnelmikroskop

Das erste aller mechanisch arbeitenden Rastermikroskope. Es nutzt den Umstand, dass im Vakuum bei der Annäherung zweier Materiestücke auf wenige Atomdurchmesser ein stark distanzabhängiger Tunnelstrom fließt. Nach dem Abrastern einer Fläche mit einer elektrisch leitenden Spitze unter der Registrierung des Tunnelstroms oder eines daraus abgeleiteten Signals kann ein Computer ein Bild der Fläche in atomarer Auflösung rekonstruieren. Der Abstand zwischen Spitze und Oberfläche beträgt dabei typischerweise weniger als ein Nanometer, die Tunnelströme liegen zwischen einigen Pico- und einigen Nanoampere. 1986 erhielten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer den Nobelpreis für Physik für die Entwicklung des ersten Rastertunnelmikroskops.

● TEM (Transmissionselektronenmikroskop)

Eine Mikroskopieart, die eine direkte Abbildung der Probe ermöglicht. Die Elektronen durchstrahlen das Probenmaterial, das zu diesem Zweck entsprechend dünn sein muss. Je nach Ordnungszahl der Atome, aus denen die Probe besteht, der Höhe der Beschleunigungsspannung und der gewünschten Auflösung kann die sinnvolle Probendicke von wenigen Nanometern bis zu einigen Mikrometern reichen.

● Top-Down

Der klassische Weg in den Nanokosmos, bei dem üblicherweise mit Lithographietechniken nanoskalige Strukturen erzeugt werden.

● Tunnelstrom

Elektrischer Strom, der durch den quantenmechanischen Tunneleffekt zu Stande kommt. Ein Strom kann bei einer anliegenden äußeren elektrischen Spannung durch einen elektrischen Leiter oder Halbleiter fließen. Durch einen Nichtleiter findet ein solcher Stromfluss normalerweise nicht statt. Ist der betreffende Nichtleiter, der die Barriere darstellt, jedoch sehr schmal, so kommt es doch zu einem Stromfluss, dem Tunnelstrom. Dieser wird mittels der quantenmechanischen Wellenfunktion beschrieben, deren Wahrscheinlichkeitsamplitude bei Auftreten auf den Nichtleiter nicht augenblicklich Null wird, sondern exponentiell abnimmt.

● Wafer (dtsch.: Oblate, Scheibchen).

Bezeichnung für dünne Scheiben, die aus Einkristallen von dotiertem Silizium und anderen Halbleiter-Materialien geschnitten werden. Die < 0,5 mm dicken Wafer mit Durchmessern bis ca. 12 cm werden für integrierte Schaltkreise und andere elektronische Bauelemente benötigt.

● Wellenfunktion

Mathematische Beschreibung des quantenmechanischen Zustands eines physikalischen Systems. Die Wellenfunktion gibt für jeden Ort im Raum die so genannte Wahrscheinlichkeitsamplitude (eine komplexe Zahl) an. Die Wellenfunktion eines Systems ergibt sich als Lösung der Schrödingergleichung, und enthält alle Informationen des quantenmechanischen Systems.

Quellen

– „Römpf Chemielexikon Online“, Georg Thieme Verlag KG
– „Wikipedia, freie Enzyklopädie“ (<http://de.wikipedia.org>)
– Stöcker, „Taschenbuch der Physik“, Verlag Harri Deutsch AG
– Köhler, „Nanotechnologie“, Wiley-VCH Verlag Weinheim

Die Mitglieder

NANOCLUB RWTHAACHEN

86

Nano

Prof. Dr. Markus Albrecht	Institut für Organische Chemie	markus.albrecht@oc.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Jürgen Bernhagen	Institut für Biochemie	jbernhagen@ukaachen.de
Prof. Dr. Georg Conrads	Institut für Medizinische Mikrobiologie	gconrads@ukaachen.de
Prof. Dr. Richard Dronskowski	Institut für Anorganische Chemie	drons@hal9000.ac.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Christoph Fahlke	Institut für Physiologie	chfahlke@physiology.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Jürgen Floege	Medizinische Klinik II	juergen.floege@post.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Günter Gottstein	Institut für Metallkunde und Metallphysik	gottstein@imm.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Gernot Güntherodt	Institut für Physik	gernot.guentherodt@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Gernot Heger	Institut für Kristallographie	heger@xtal.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Peter C. Heinrich	Institut für Biochemie	heinrich@rwth-aachen.de
PD Dr. Afroditi Kapurniotu	Institut für Biochemie	akapurniotu@ukaachen.de
Prof. Dr. Uwe Klemradt	II.Physikalisches Institut B	klemradt@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Fritz Klocke	Werkzeugmaschinenlabor (WZL)	F.Klocke@wzl.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Uwe Kreibitz	I.Physikalisches Institut A	kreibitz@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Heinrich Kurz	Institut für Halbleitertechnik/AMICA	kurz@amo.de
Prof. Dr. Bruno Lengeler	II.Physikalisches Institut B	lengeler@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Johann Lorenzen	Institut für Pathologie	lorenzen@pat.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Heiko Lueken	Institut für Anorganische Chemie	heiko.lueken@ac.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Bernhard Lüscher	Institut für Biochemie	luescher@rwth-aachen.de
Prof. Dr. Rudolf Lütticken	Institut für Medizinische Mikrobiologie	rluetticken@ukaachen.de
Prof. Dr. Manfred Martin	Institut für Physikalische Chemie	martin@rwth-aachen.de
Prof. Dr. Joachim Mayer	Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE)	mayer@gfe.rwth-aachen.de
PD Dr. Thomas Michely	I.Physikalisches Institut A	michely@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Martin Möller	Institut für Makromolekulare Chemie/DWI	moeller@dwirwth-aachen.de
Dr. Detlef Müller-Schulte	Institut für Radiologische Diagnostik	detlef.mueller2@post.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Rainhard Osieka	Medizinische Klinik IV	ROsieka@ukaachen.de
Prof. Dr. Andreas Pfennig	Lehrstuhl fuer Thermische Verfahrenstechnik	andreas.pfennig@vt.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Gero von Plessen	I.Physikalisches Institut A	gero.vonplessen@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Helmut Reul	Helmholtz Institut für Biomedizinische Technologien	reul@hia.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Georg Roth	Institut für Kristallographie	roth@xtal.rwth-aachen.de
Dr. Georg J.Schmitz	ACCESS e.V. Materials&Processes	G.J.Schmitz@access.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Thomas Schmitz-Rode	Klinik für Radiologische Diagnostik	smiro@rad.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Jochen Schneider	Lehrstuhl für Werkstoffchemie	schneider@mch.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Herbert Schoeller	Institut für Theoretische Physik A	schoelle@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Ulrich Simon	Institut für Anorganische Chemie	ulrich.simon@ac.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Rainer Waser	Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik	waser@iwe.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Elmar Weinhold	Institut für Organische Chemie	elmar.weinhold@oc.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Matthias Wuttig	I.Physikalisches Institut A	wuttig@physik.rwth-aachen.de
Prof. Dr. Klaus Zerres	Institut für Humangenetik	kzerres@ukaachen.de

Weitere Informationen finden Sie unter www.nanoclub.rwth-aachen.de.

87

Seit dem Januar gibt es einen neuen Lehrstuhl an der RWTH mit der Bezeichnung „*Deutsche Post – Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken*“. Der Lehrstuhl wird von der Deutschen Post finanziell unterstützt. Die Stiftungsprofessur ist zunächst für sechs Jahre vereinbart und vertieft die langjährige und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der Deutschen Post und der Aachener Hochschule. Lehrstuhlinhaber ist der Leiter des Lehr- und Forschungsgebiets Operations Research und Logistic Management, Univ.-Prof. Dr. Hans-Jürgen Sebastian.

Im Rahmen einer Pressekonferenz in der Vertretung des Landes Nordrhein-Westfalen in Berlin präsentierte Rektor Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut die Technische Hochschule Aachen als innovative Ausbildungs- und Forschungsstätte, die sich gut gerüstet dem internationalen Wettbewerb stellt. Unterstützung erhielt er dabei von Staatssekretär Hartmut Krebs vom NRW-Wissenschaftsministerium, der der RWTH Aachen exzellente Qualität in Lehre und Forschung bescheinigte. Als Beispiel für den intensiven Kontakt zur Wirtschaft unterzeichneten der Rektor und der Präsident der Industrie- und Handelskammer Aachen, Michael Wirtz, im Vorfeld der Veranstaltung ein Memorandum über die Gründung einer 250.000 Euro umfassenden Stiftung zur Unterstützung von Existenzgründungen. Damit erfährt die erste bundesdeutsche Kooperation einer Universität und einer IHK aus dem Jahre 1981 eine weitere Intensivierung.

Für seine Dissertation „Politique de la grande versus Made in Germany“ ist Dr. phil. Andreas Fickers mit zwei renommierten Förderpreisen bedacht worden. Sowohl die „*Deutsche Gesellschaft für Geschichte der Medizin, Naturwissenschaft und Technik e.V.*“, kurz DGMNT, als auch die „*Georg-Agricola-Gesellschaft*“ ehrten die von Fickers am Historischen Institut der RWTH Aachen vorgelegte Doktorarbeit. In dieser beschäftigt sich der Preisträger aus historischer Sicht mit der Kontroverse um einen einheitlichen Standard des Farbfernsehens in Europa, der so genannten PAL-SECAM-Kontroverse, zwischen 1963 und 1966. Fickers zeigt, dass die Geschichtswissenschaft einen wichtigen Beitrag zum Verständnis technologischer Entscheidungsprozesse leisten kann, waren es doch industriepolitische, außenpolitische und kulturell-symbolische Faktoren, die einen technologischen Entscheidungsfindungsprozess von europäischer Dimension maßgeblich beeinflusst haben. Der DGMNT-Preis ist mit 1.250 Euro dotiert, der der Georg-Agricola-Gesellschaft mit 1.500 Euro.

Im Dezember 2003 wurde das neue Europagästehaus der RWTH Aachen an der Melatener Straße durch Oberbürgermeister Dr. Jürgen Linden, Rektor Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut und den Aachener Niederlassungsleiter des Bau- und Liegenschaftsbetriebs (BLB) des Landes Nordrhein-Westfalen, Harald K. Lange feierlich eröffnet. Das Europagästehaus ergänzt mit seinen 18 Einzelappartements, sechs Doppelappartements, einem behindertengerechten Appartement sowie seinen sechs Hotelzimmern das Wohnangebot für Gäste der Hochschule. Es fügt sich harmonisch ein in das bisherige Ensemble aus Villa „*Haus Königshügel*“, Terrassenhaus und Kindertagesstätte. Die Räumlichkeiten der Gästehäuser der RWTH stehen neuberufenen Wissenschaftlern, Gastdozenten und ihren Familien zur Verfügung. Die Projektleitung und die Durchführung des Neubaus lag beim BLB. Bei der Planung ging es besonders um die Integration in die Landschaft und die bestehende Bebauung. So ist es zu einem niedrigen Bauwerk gekommen, das seine Hanglage optimal nutzt. Jede der Wohneinheiten verfügt über einen Balkon oder eine Terrasse. Einzelappartements können ohne großen Aufwand zu größeren Wohneinheiten werden.

Die Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) hat Univ.-Prof. Dr. Matthias Jarke, Inhaber des Lehrstuhls für Informatik V (Praktische Informatik) der RWTH Aachen, für zwei Jahre zu ihrem neuen Präsidenten gewählt. Damit steht er ab dem 1. Januar 2004 an der Spitze der mit 25.000 Mitglieder größten Informatikvertretung im deutschsprachigen Raum. Jarke nannte in einer ersten Stellungnahme die Intensivierung der Kontakte zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sowie die Qualitätssicherung bei den anstehenden Veränderungen des deutschen Hochschulsystems als seine vorrangigen Ziele.

Neben seiner Professur an der RWTH Aachen leitet Jarke das Fraunhofer-Institut für angewandte Informatik (FIT) in St. Augustin und ist im 2003 neu gegründeten Bonn-Aachen International Center for Information Technology (B-IT) aktiv.

Einer der zwei diesjährigen Preisträger des mit insgesamt 10.000 Euro dotierten renommierten Johann-Philipp-Reis-Preises 2003 ist Dr.-Ing. Peter Jax vom Institut für Nachrichtengeräte und Datenverarbeitung (IND) der RWTH. Die Auszeichnung soll an Johann Philipp Reis (1834-1874) erinnern und wird alle zwei Jahre an Nachwuchswissenschaftler verliehen, die sich um die Forschung im Bereich der Kommunikation verdient gemacht haben. 1860 gelang Reis die Umwandlung von Membranschwingungen in leitbare Sprechströme, so dass Klang und Sprache übermittelt werden konnten – zunächst über die Distanz von 100 Metern. Dieses von ihm „*Telephon*“ genannte Gerät erregte aber in Deutschland keine Aufmerksamkeit, trotz Vorführung im Frankfurter Physikalischen Verein. In seiner Arbeit befasste sich Jax, der an der RWTH Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Allgemeine Elektrotechnik studierte und Oberingenieur am IND ist, mit der „*Verbesserung bandbegrenzter Sprachsignale*“.

Mit einem großen Festkolloquium feierte das heutige Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling den 70. Geburtstag von Univ.-Prof. em. Dr. Joachim Krüger. Mehr als 180 Freunde, Kollegen und ehemalige Studierende kamen zum Gratulieren. Seit über 45 Jahren gestaltet Prof. Krüger in unterschiedlichen Funktionen die Geschichte des Instituts mit.

Geboren 1933 in Eberswalde bei Berlin, kam er als Student an die RWTH nach Aachen. Nach dem erfolgreichen Abschluss als Diplom-Ingenieur der Metallhüttenkunde (heute: Metallurgie und Werkstofftechnik) blieb er am Institut und forschte im Bereich Vakuummetallurgie und habilitierte zum Thema Vakuumtechniken zur Gewinnung von Nichteisenmetallen. Nach seiner umfangreichen wissenschaftlichen Tätigkeit arbeitete er in der Industrie, bevor er 1977 als Professor an die RWTH berufen wurde. Ende des Sommersemesters 1998 wurde Krüger nach 21 Dienstjahren emeritiert, er leitete das Institut aber kommissarisch, bis sein Nachfolger Univ.-Prof. Dr. Karl Bernhard Friedrich 1999 dem Ruf an das Institut folgte.

Neben seiner wissenschaftlichen Arbeit engagierte sich Krüger sehr für seine Studenten und für die akademische Hochschulselbstverwaltung. Er war von 1978 bis 1981 Fachabteilungsleiter, von 1984 bis 1986 Dekan, als Wahlsenator von 1982 bis 1984 Mitglied des Senats und von 1979 bis zu seiner Emeritierung Mitglied im Satzungsausschuss, der für den Entwurf und die Änderung der Hochschulverfassung verantwortlich war. Darüber hinaus engagierte er sich ehrenamtlich für den internationalen Austausch und für den Dialog von jungen Wissenschaftlern.

Ende der neunziger Jahre arbeitete er an der Restrukturierung des Studiums der Hüttenkunde mit. In Absprache mit seinem Nachfolger initiierte er die Umbenennung des über 100 Jahre alten Aachener Metallhütteninstituts in das heutige Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling.

Das Kuratorium der RWTH tagte im vergangenen Jahr erstmals in neuer Besetzung. Es ist der Aachener Hochschule gelungen, namhafte Persönlichkeiten aus dem öffentlichen Leben und der Wirtschaft für die Mitgliedschaft in diesem Gremium zu gewinnen. Sie werden die RWTH künftig bei ihrer Weiterentwicklung im nationalen und internationalen Raum beratend unterstützen.

Die gewählten Kuratoriumsmitglieder repräsentieren ein entsprechend breites Spektrum: Zu ihnen gehören Dr. Young-Sup Huh, koreanischer Unternehmer und RWTH-Ehrenszenar, Prof. Dr. Olaf Kübler, Präsident der ETH Zürich, Professor Dr. Detlef Müller-Böling, Leiter des Centrums für Hochschulentwicklung, Dr. Alfred Oberholz, Vorstandsmitglied der Degussa AG, Lars Schewe als Vertreter des freien Zusammenschlusses von Studentenschaften, Prof. Dr.-Ing. Klaus Wucherer, Mitglied des Zentralvorstandes der Siemens AG, sowie der Journalist und Fernsehmoderator Ranga Yogeshwar. So genannte geborene Mitglieder des Kuratoriums sind der Aachener Oberbürgermeister Dr. Jürgen Linden und Univ.-Prof. em. Dr. Roland Walter als Vorsitzender von proRWTH, die Freunde und Förderer der Aachener Hochschule.

Das Rektorat der RWTH ist im Kuratorium mit beratender Stimme vertreten. Wie Rektor Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut betonte, begreift die Hochschulleitung ihre wesentliche Verpflichtung darin, die Kuratoriumsmitglieder beständig über die internen Vorgänge der RWTH zu informieren. Somit werde gewährleistet, dass dieses Gremium seine Beratungsfunktion umfassend wahrnehmen und die RWTH beim Ausbau ihrer Souveränität konstruktiv fördern könne.

Um die Arbeitsfähigkeit des Kuratoriums zu stärken, will die RWTH in Zukunft die Zahl der bislang sieben vom Senat der Hochschule gewählten Mitglieder noch erhöhen. In seiner konstituierenden Sitzung legte das Kuratorium seine primären Arbeitsfelder fest, es will sich zunächst vor allem mit der weiteren internationalen Ausrichtung der Hochschule befassen. Im Einzelnen sollen dabei die Ausbildung und Betreuung ausländischer Studierender, die Ausbildung von Studierenden gemeinsam mit Institutionen des Auslands sowie der Austausch von Gastwissenschaftlern im Vordergrund stehen. Weitere wesentliche Themen werden die Struktur- und Entwicklungspläne der Hochschule, die Qualitätssicherung und die Akkreditierung von Studiengängen sein.

Ein vierköpfiges Team der RWTH Aachen gewann den 1. Preis im Hochschulwettbewerb „*Patente Erfinder*“ des Landes Nordrhein-Westfalen. Wissenschaftsministerin Hannelore Kraft überreichte im Industrieclub Düsseldorf die Siegerurkunden. Ganz oben auf dem Siegereppchen standen Florian Merget, Dae Hwang Kim, Dr. Peter Haring Bolivar und Univ.-Prof. Dr. Heinrich Kurz, die sich über 10.000 Euro Fördermittel freuen durften. Die Forschergruppe vom RWTH-Institut für Halbleitertechnik wurde ausgezeichnet für eine Erfindung, mit der die Digitalkameras und Mobiltelefone der Zukunft ausgerüstet werden könnten. Es handelt sich um ein nicht-flüchtiges Speichermedium, das extrem stromsparend ist und mit dem sich besonders kleine Speicherchips bauen lassen. Nach Einschätzung des RWTH-Teams ist die Erfindung ein aussichtsreicher Kandidat für die Nachfolge der Flash-Memory-Speicherbausteine, die gegenwärtig in mobiler Hochleistungselektronik vorherrschen.

Namen



Nachrichten

Die neue Speichertechnologie beruht auf dem Wechsel zwischen zwei Zuständen mit verschiedenem elektrischen Widerstand. Das Beschreiben und Lesen der Speicherzellen geschieht mit Hilfe ultrakurzer Stromstöße, die das Material von dem einen in den anderen Zustand „umschalten“. Führende Speicherhersteller erfordern diese Phasenwechselmedien bereits seit einigen Jahren. Dabei favorisieren sie bislang ein Konzept, bei dem die Schaltströme die Halbleiterschichten senkrecht durchqueren. Allerdings sind der Miniaturisierung dann enge Grenzen gesetzt: Die Leitungsquerschnitte für die Schaltströme können nicht kleiner werden als die kleinsten herstellbaren Schaltelemente. Dies erfordert wiederum recht große Ströme, was zu einem hohen Energieverbrauch führt.

Das Aachener Erfinderteam hat sich nun eine clevere Lösung einfallen lassen. Es lässt die Schaltströme nicht mehr senkrecht, sondern seitlich durch die Halbleiterschichten fließen. Da man diese sehr dünn herstellen kann – im Extremfall nur eine Atomlage – verringern sich auch die Leitungsquerschnitte, und der Strombedarf sinkt auf ein Zehntel. Wie die Erfinder außerdem zeigten, lassen sich derart konstruierte Speicherzellen vorzüglich stapeln. So mit könnten daraus hoch integrierte Chips mit großer Speicherkapazität hergestellt werden.

Im Rahmen der „Akademischen Feier 2004“ der Fakultät für Bauingenieurwesen wurden Maike Zell, Karin Reißer und Thomas Lechner mit dem Josef-Pirlet-Preis für ihre hervorragenden Studienleistungen im Vordiplom ausgezeichnet. Den Eugen-Pirlet-Preis erhielt Dipl.-Ing. Isabel Beckmann für ihre hervorragende Diplomarbeit ebenso wie Dr.-Ing. Jens U. Neuser für seine herausragende Dissertation.

Gleich drei Preise wurden im Januar im Rahmen der Veranstaltung „RWTH transparent“ verliehen: Der DAAD-Preis, der Lehrpreis der RWTH und der Frauenförderpreis der RWTH.

Für den DAAD-Preis 2003 wurde eine Ingenieurin aus Mexiko ausgewählt. Filiberta del Angel Vicente war in Mexiko die beste Studentin ihres Jahrgangs. Anschließend arbeitete sie vier Jahre in Mexiko als Wissenschaftlerin und Dozentin. Zur wissenschaftlichen Weiterbildung kam sie nach Deutschland. 1998 begann sie an der RWTH Aachen am Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen ihre Promotion. Neben ihren beachtlichen akademischen Leistungen zeichnet sich del Angel Vicente durch großes gesellschaftliches und interkulturelles Engagement aus. Bei der Katholischen Hochschulgemeinde gehört sie zu den aktivsten ausländischen Studierenden. Sie gestaltet federführend den Interreligiösen Gesprächskreis mit, in dem sich regelmäßig Angehörige des Christentums, des Islam, des Buddhismus und des Hinduismus treffen und über ihren Glauben austauschen.

Der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD), die gemeinsame Einrichtung der deutschen Hochschulen zur Förderung der internationalen akademischen Zusammenarbeit, insbesondere des Austausches von Studierenden und jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, gibt den Hochschulen die Möglichkeit, alljährlich den DAAD-Preis für hervorragende Leistungen ausländischer Studierender zu verleihen. Mit diesem Preis soll eine Person gewürdigt werden, die gleichermaßen besondere akademische Leistungen wie ein bemerkenswertes gesellschaftliches – insbesondere interkulturelles – Engagement gezeigt hat.

Mit dem Lehrpreis der Aachener Hochschule wird in diesem Jahr ein Team aus den Fachgruppen für Rohstoffe und Entsorgungstechnik sowie für Metallurgie und Werkstofftechnik ausgezeichnet, das seit 1996 mit viel Engagement ein internationales Studienprogramm aufgebaut hat. Der „European Mining Course – EMC“ und der „European Mineral Engineering Course – EMEC“ sind mittlerweile zwei etablierte Kooperationen im Bereich der Lehre zwischen den Universitäten in Delft, Helsinki, London und Aachen. Für die jeweils 20 Studierenden aus Europa, Australien, Nord- und Südamerika bedeutet dies acht Monate intensive Ausbildung an den vier Universitäten in Europa. Weitere Kennzeichen des EMC/EMEC sind die Unterrichtssprache Englisch, Industriebeteiligung in Form von Projekten, Exkursionen und Studierenden-Sponsoring. Arbeiten im Team, Evaluierung durch die Studierenden und die Industrie sowie volle Anerkennung der Prüfungsleistungen. Zum Service für die Studierenden gehört darüber hinaus Hilfestellung bei Einschreibeformalitäten, der Beantragung von Fördergeldern oder das Bereitstellen von Unterkünften.

Die Lehre an der RWTH Aachen wird in den letzten Jahren immer wichtiger, denn nur wenn der studentische Nachwuchs die entsprechende Ausbildung erhält, ist auch ein hohes Niveau in Forschung und Industrie gewährleistet. Diesen Zusammenhang verdeutlichen auch die zahlreichen Aktivitäten und Initiativen im Bereich der Lehre. Um herausragende und beispielhafte Leistungen zu würdigen, lobt die RWTH seit 2001 den Lehrpreis aus.

Gleich zwei Initiativen an der Aachener Hochschule wurden für ihr Engagement mit dem Frauenförderpreis belohnt: „do-Ing“ und „Gender & Science“. do-Ing ist praktische Frauenförderung, umgesetzt vom Zentrum für Lern- und Wissensmanagement und dem Lehrstuhl für Informatik im Maschinenbau (ZLW/IMA) der RWTH Aachen. Projektziel ist die Erhöhung des Frauenanteils in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen der RWTH, speziell an den Fakultäten Maschinenbau und Elektro- und Informationstechnik. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von do-Ing klären mit ihrem praxisnahen Informationsprogramm für Schülerinnen und Abiturientinnen sowie Eltern und Lehrer über das Studium und Berufsbild der Ingenieurin auf. Zu den Aktivitäten gehören beispielsweise Schnupperpraktika, der „Campustag“ für Schülerinnen, Informationsvorträge von Ingenieurinnen und Studentinnen sowie vieles mehr.

Der Arbeitskreis Gender & Science an der RWTH trifft sich seit dem Sommer 2002 auf Initiative der Gleichstellungsbeauftragten in regelmäßigen Abständen zu folgenden Themen: Aufbau eines Netzwerkes von Angehörigen der Aachener Hochschulen, Vertreterinnen und Vertretern der Kirchen und der Wirtschaft, Austausch von Informationen über den aktuellen Stand der europaweiten Gendermainstreaming-Prozesse an Hochschulen, Entwicklung von Chancengleichheit durch geschlechtergerechte Veränderungen von gesellschaftlichen Strukturen sowie Sensibilisierung für die Fragen der Geschlechterforschung.

Der Frauenförderpreis wurde auf Initiative der Gleichstellungsbeauftragten der RWTH Aachen ausgelobt und wird jährlich vergeben. Mit dem Preis soll „ein herausragendes Projekt zur Förderung von Frauen an der RWTH Aachen“ gewürdigt werden. Preisträger können sowohl Einzelpersonen, Personengruppen, Fachgruppen und andere Einrichtungen der Hochschule und aus ihrem Umfeld sein. Über die Vergabe des Preises entscheidet eine Jury, der Preis ist mit 1.500 Euro dotiert.

Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Günter Rau hat seine Amtszeit als Vorsitzender der International Academy for Medical and Biological Engineering angetreten. Rau ist Inhaber des Lehrstuhls für Biomedizinische Technik der RWTH Aachen und Direktor des Helmholtz-Instituts für Biomedizinische Technik. Der internationalen Akademie gehören weltweit 20 berufene Wissenschaftler an. Sie wurde von der International Federation for Medical and Biological Engineering ins Leben gerufen, dem Dachverband aller nationalen Gesellschaften für Biomedizinische Technik, der weltweit etwa 20.000 in der Medizintechnik Beschäftigte repräsentiert. Die Akademie hat zum Ziel, zukünftige Entwicklungen für das Gebiet der biomedizinischen Technik im Bereich der Forschung und Anwendung sowie in Ausbildungsfragen zu analysieren und durch richtungsweisende Empfehlungen zu bewerten und zu fördern.

Dagmar Röhrlich erhielt den RWTH-Preis Wissenschaftsjournalismus. „Ihr Beitrag eignet sich durch neue Forschungsergebnisse der Fachbereiche Physik, Chemie und Geowissenschaften zur Entwicklung des Sonnensystems und des Erdkörpers exemplarisch für eine integrative Darstellung dieser Naturwissenschaften gegenüber der Öffentlichkeit.“ Damit entsprach der Jury zufolge die Hörfunksendung „Die Suche nach anderen Erden – Vom Ursprung des Lebens“ ideal den Anforderungen für die Verleihung des RWTH-Preises Wissenschaftsjournalismus. Die Technische Hochschule Aachen vergibt diese Auszeichnung seit 1993 alle zwei Jahre für herausragende Wissenschaftsvermittlung in den Medien. Die prominent besetzte Jury entschied sich unter über 70 Einsendungen für den einstündigen Beitrag von Dagmar Röhrlich zur Entstehung und Entwicklung von Lebensformen im All, der auf WDR 3 gesendet wurde. Die Auszeichnung ist mit 2.500 Euro dotiert.

„Die komplexen Sachverhalte werden durch die Autorin hervorragend für das breite Publikum aufbereitet und dargestellt“, heißt es weiter in der Bewertung der Jury. Der Aufbau der Argumentation sei logisch und zeige eine gute Einbeziehung meteorologischer, geochemischer sowie geologischer Befunde. Die wissenschaftlichen Fakten sind dabei exzellent wiedergegeben. Darüber hinaus wird in der Begründung für die Preisvergabe an Dagmar Röhrlich betont, dass die mediengerechte Aufbereitung im Rahmen der umfassenden Hörfunksendung durch die geschickte Ausnutzung unterschiedlicher Stilelemente überaus gelungen Forschung lebendig vermittelt.

Der RWTH-Preis Wissenschaftsjournalismus ist die einzige Auszeichnung dieser Art, die von einer deutschen Universität vergeben wird. Er würdigt herausragende Beispiele der medialen Darstellung von wissenschaftlichen Themen. Die eingereichten Beiträge

müssen Themen behandeln, die in den über 260 Hochschul-Instituten abgedeckt werden. Vor allem aber die Beschreibung fachübergreifender Forschung ist ein wichtiges Kriterium für die Preisverleihung.

Die Preisträgerin 2003 arbeitet seit Jahren erfolgreich für Sender wie den Deutschlandfunk, die Deutsche Welle oder den Südwestdeutschen Rundfunk. Beim WDR sind immer wieder Beiträge von ihr im WDR 3 oder in der Wissenschaftssendung „Leonardo“ zu hören. Für ihre Arbeiten erhielt Dagmar Röhrlich bereits mehrere Auszeichnungen, so 1997 den Medienpreis der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, 1999 den Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus und 2002 den Karl-Winnacker-Preis des Deutschen Atomforums.

Der RWTH-Preis Wissenschaftsjournalismus wurde während einer Feierstunde vom Rektor der RWTH, Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut, an Dagmar Röhrlich übergeben. In ihrer Dankesrede betonte Röhrlich die Bedeutung des Wissenschaftsjournalismus als gesellschaftliche Brücke zwischen Forschung und breiter, die Forschungsprojekte letztlich finanzierende Öffentlichkeit. Sie bedauerte, dass ihr Metier in letzter Zeit immer mehr als Teil des Ressorts Boulevard verstanden werde, dass zwar immer mehr über wissenschaftliche Themen berichtet wird, aber leider immer ungenauer und reißerischer. Dagmar Röhrlich drückte ihre große Hoffnung aus, dass die Öffentlichkeit in Zukunft die Bedeutung eines unabhängigen, vermittelnden Journalismus wieder mehr schätzen werde. Denn nur eine gut informierte Öffentlichkeit kann komplexe Themen selbstbewusst mittragen.

Für ihre Wissenschaftsseite „Wachsen auf dem Acker bald Antikörper gegen Krebs?“ in der Aachener Zeitung sind der RWTH-Forscher Markus Sack und die Journalistin Ute Steinbusch ausgezeichnet worden. Beim Journalistenpreis „Hauptsache Biologie“, den die Promega GmbH in diesem Jahr erstmalig für Veröffentlichungen in regionalen deutschsprachigen Tageszeitungen ausgeschrieben hatte, gewann das Team den zweiten Platz. Markus Sack ist Doktorand am Institut für Molekulare Biotechnologie bei Univ.-Prof. Dr. Rainer Fischer. Dort optimiert er die Produktion von diagnostisch und therapeutisch wichtigen Antikörpern in Pflanzen. Sack und Steinbusch freuten sich über einen Geldpreis in Höhe von 5.000 Euro.

Eine Minisonde, die Blutwerte aus dem Körper funkt, ein winziger Augendrucksensor, der in den Augapfel implantiert wird – diese medizinischen Messfühler haben in jüngster Zeit internationales Aufsehen erregt. An den Entwicklungen maßgeblich beteiligt ist **Uwe Schnakenberg** vom Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I. Neben Messfühlern zur medizinischen Diagnose hat Schnakenberg auch Beschleunigungssensoren für Automobile sowie Mikroelektroden zum Nachweis kleinster Schadstoffmengen entwickelt. Der Physiker wurde für seine bahnbrechenden Beiträge zur Sensortechnologie mit einem Europäischen Wissenschaftspreis, dem mit 5.000 Euro dotierten „*Euroensors Fellow Award*“, ausgezeichnet. Der Preis wird einmal im Jahr auf der Konferenz „*Euroensors*“ vergeben. Sie gilt als europaweit bedeutendste Tagung auf dem Gebiet der Sensortechnik und Mikrosysteme.

Für acht Wissenschaftler verschiedener deutscher Hochschulen hat sich ihre Forschungsarbeit im doppelten Sinne gelohnt: Sie wurden von der „*Stiftung der deutschen Städte, Gemeinden und Kreise zur Förderung der Kommunalwissenschaften*“ mit einer Prämie dafür belohnt, dass ihre Arbeiten besonders wertvolle wissenschaftliche Erkenntnisse für die Praxis der kommunalen Selbstverwaltung vermitteln. Die eingereichten Arbeiten wurden durch Expertinnen und Experten des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu), Berlin, begutachtet. Eine Prämie in Höhe von 1.000 Euro erhielt **Heidi Sinning** für ihre Dissertation „*Leistungsfähigkeit und Grenzen kommunikativer Planungsinstrumente am Beispiel nachhaltiger Freiraumpolitik in Stadtregionen*“. Die Doktorarbeit wurde von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Selle, Inhaber des Lehrstuhls für Planungstheorie und Stadtplanung, betreut.

Dr. Karl-Ulrich Köhler, Vorsitzender des Vorstandes der ThyssenKrupp Stahl AG, verlieh erstmalig den ThyssenKrupp Award in Anwesenheit von Rektor Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut an zwei Studierende mit herausragenden Leistungen im Grundstudium. Die Preise erhielten **Thomas Gebhardt** aus dem Studiengang Metallurgie und Werkstofftechnik sowie **Matthias Thewes** aus dem Studiengang Maschinenbau. Der ThyssenKrupp Award ist mit einer finanziellen Unterstützung des Hauptstudiums und einer Patenschaft durch ein Vorstandsmitglied aus dem ThyssenKrupp Konzern verbunden. Durch diesen Preis möchte ThyssenKrupp die Förderung besonders qualifizierter Studierender der Ingenieurwissenschaften unterstützen. Er ist Teil einer umfangreichen, partnerschaftlichen Kooperation zwischen der ThyssenKrupp AG und der RWTH Aachen. Die Partnerschaft umfasst unter anderem auch die Vergabe von Stipendien sowie Möglichkeiten, Praktika und Studienarbeiten oder Diplom- und Doktorarbeiten in Unternehmen des ThyssenKrupp Konzerns zu absolvieren.

Myrjam Winning erhält den Hertha-Sponer-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Der Preis wird alljährlich an eine Nachwuchswissenschaftlerin verliehen. Die Leiterin einer Forschergruppe am Institut für Metallkunde und Metallphysik der RWTH Aachen wird für ihre bahnbrechenden Arbeiten zur Bewegung der so genannten Korngrenzen ausgezeichnet. So heißen die Nahtstellen zwischen den zahllosen winzigen Kristallen, aus denen Metalle bestehen. Wie sich diese Nahtstellen räumlich verteilen, bestimmt wesentlich die Eigenschaften eines Metalls, so etwa dessen Härte und Verformbarkeit. Zudem können sich die Korngrenzen bewegen, auflösen oder neu bilden. Winning hat nun erstmals per Röntgenbeugung untersucht, welchen Einfluss mechanische Kräfte auf die Anordnung und Bewegung metallischer Korngrenzen haben. Ihre Resultate haben gleich doppelten Nutzen: Zum einen eröffnen sie neue Möglichkeiten für das Materialdesign. Zum anderen helfen sie zu verstehen, unter welchen Bedingungen Metalle ermüden.

Der Preis ist mit 3000 Euro dotiert und wird auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in München verliehen. Benannt ist er nach einer der ersten drei Frauen in Deutschland, die im Fach Physik die Lehrerausbildung erwarben. Hertha Sponer habilitierte sich 1925 an der Universität Göttingen. Nach der Machtergreifung der Nationalsozialisten emigrierte sie zunächst nach Norwegen, dann in die USA, wo sie drei Jahrzehnte eine Professur innehatte. Im Dezember 2003 eröffnete

die Ministerin für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, **Hannelore Kraft**, in Aachen den Workshop „Nanotechnologie für Informationstechnik in NRW“. Die Ministerin misst diesem Forschungszweig größte Bedeutung bei: „Die Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts.“ Wirtschaftliche Analysen gehen von einem erheblichen Weltmarktvolumen für „Nanoprodukte“ aus. Der internationale Wettlauf um Anteile auf diesem Markt hat längst begonnen. Nordrhein-Westfalen hat sich auf diesem Gebiet schon seit Mitte der neunziger Jahre zielstrebig und erfolgreich positioniert: So wurde auf Initiative des Wissenschaftsministeriums der bundesweit erste Forschungsverbund zur Nanotechnologie in Deutschland gegründet. Mit dem Workshop „Nanotechnologie/Informationstechnologie“ wurde jetzt der erste Schritt zur Gründung eines neuen Clusters „Nanotechnologie NRW“ unternommen. Ziel der Landesregierung ist es, den Forschungs- und Innovationsstandort NRW weiter auszubauen und voranzubringen.

Bereits vor mehr als zehn Jahren haben sich die ersten Lehrstühle an Universitäten in NRW mit der Thematik Nanotechnologie befasst. Aus diesen Aktivitäten entstanden im Dezember 1998 die beiden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kompetenzzentren Aachen und Münster. Während sich die Arbeiten in Aachen mit dem Thema der funktionalen lateralen Nanostrukturen beschäftigten, konzentrierte sich Münster auf das Gebiet der analytischen Methodik. Um leistungsstarke Werkstoffe

zu entwickeln, müssen Materialien in einem unvorstellbar kleinen Bereich – nämlich Millionstel Millimetern – maßgeschneidert werden. Dies geht nur mit höchstauflösenden Untersuchungsmethoden. Das Forschungszentrum Jülich und die RWTH Aachen gründeten daher das „*Ernst Ruska-Centrum für höchstauflösende Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen*“, das auf dem Campus des Forschungszentrums angesiedelt ist. Der Name geht auf den Nobelpreisträger **Ernst Ruska**, dem Erfinder des Elektronenmikroskops, zurück. Das neue Zentrum wird mit Elektronen-Mikroskopen ausgestattet, die mit ihrer Leistungsfähigkeit weltweit an der Spitze liegen werden. Diese Mikroskope ermöglichen es, Materialien zum Beispiel für die Nanoelektronik zu entwickeln – Entwicklungen, die auch für die deutsche Wirtschaft von hohem Nutzen sein werden.

Der Vertrag wurde von Prof. Dr. **Joachim Treusch** und **Dorothee Dzwonnek** vom Vorstand des Forschungszentrums Jülich sowie von Univ.-Prof. Dr. **Burkhard Rauhut**, Rektor der RWTH Aachen, unterzeichnet. Die beiden Leiter des Ernst-Ruska-Centrums, Prof. Dr. **Knut Urban** vom Forschungszentrum und Univ.-Prof. Dr. **Joachim Mayer** von der RWTH stellten die geplanten Aktivitäten vor.

Eine Gruppe Studierender der omanischen Sultan Qaboos Universität in Muscat war in Begleitung ihres Dekans für studentische Angelegenheiten, Dr. **Mohammad al-Muqadam**, zu Gast in Aachen. Die Studierenden aus allen Disziplinen wurden wegen ihrer hervorragenden Studienleistungen vom Sultan zu dieser Deutschlandreise eingeladen. Das Fernsehen des Sultanats berichtete ausführlich über den Besuch.

Nach der Begrüßung durch den Rektor der RWTH, Univ.-Prof. Dr. **Burkhard Rauhut**, wurden die omanischen Gäste über die Struktur und die Studienangebote der RWTH informiert. Die Partnerschaft der Aachener Hochschule mit der Sultan Qaboos Universität geht auf die archäologische Tätigkeit von Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Michael Jansen** vom Lehr- und Forschungsgebiet Stadtbaugeschichte im Oman zurück. Erstmals arbeitete Jansen 1996 im Sultanat. Seitdem ist er auch Beauftragter der Hochschule für den Austausch mit dem Oman und betreut die Aachener Kulturhilfe für das Sultanat.

Seit drei Jahren wird die Kooperation, die den Austausch und die Unterstützung der omanischen Hochschule in den Bereichen Lehre, Forschung und wirtschaftlicher Entwicklung beinhaltet, vom Deutschen Akademischen Austauschdienst gefördert. Es reisten bereits mehrere Aachener Professoren und Wissenschaftler in den Oman. Wissenschaftler aus dem arabischen Land waren mehrmals in verschiedenen RWTH-Instituten zu Gast.

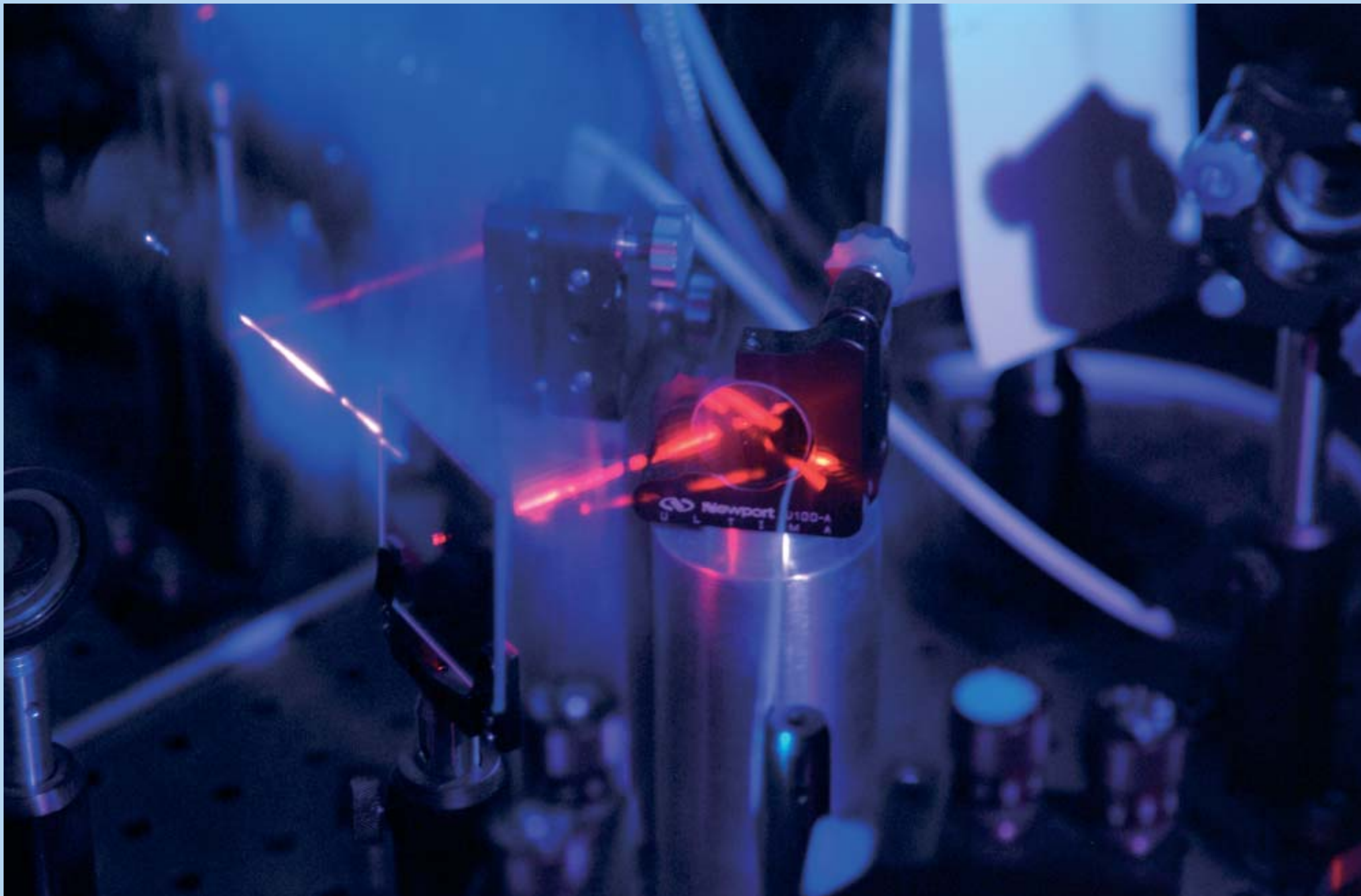
Zwischen Ulaan Bataar, der Hauptstadt der Mongolei, und Aachen liegen mehr als 10.000 Kilometer. Diese Distanz wird nun durch eine Kooperationsvereinbarung der RWTH Aachen mit der Mongolischen Universität für Wissenschaft und Technologie überwunden. Kernpunkt der Vereinbarung ist der Aufbau einer Zusammenarbeit zwischen den metallurgischen Fachbereichen der beiden Hochschulen. Es wurde vereinbart, gemeinsame Forschungsprojekte zu realisieren. So soll beispielsweise untersucht werden, wie sich die weitere Industrialisierung und der stark expandierende Bereich der Metallgewinnung auf die Umwelt in der Monolei auswirkt. Auf den Gebieten Goldgewinnung und Umweltschutz konnte Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Hermann Wotrub**a vom Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe der RWTH mit seinen mongolischen Kollegen eine Zusammenarbeit vereinbaren.

Die Mongolei befindet sich auf dem Weg von einem Agrarland zu einer Industrialisierung. Treibstoff für diese Entwicklung sind die Bodenschätze des Landes, in der Hauptsache sind dies Erze. Damit das Land zukünftig nicht nur Erze abbauen, sondern sie auch zu hochwertigen Metallen weiterverarbeiten kann, haben die Aachener Wissenschaftler den ansässigen Unternehmen Technologieunterstützung angeboten. Hoch zufrieden mit der Kooperation ist Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Karl Bernhard Friedrich**, Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie. Mit der „*Erdenet Mining Corporation*“, einem für die ganze Mongolei bedeutenden Industrieunternehmen, wurde unter anderem vereinbart, gemeinsam auf dem Gebiet der Hydrometallurgie zu forschen.

Im nächsten Heft

Computational Chemistry

Mit Rechnern den Atomen und Molekülen auf der Spur



96

97

Nano

Optischer Strahlengang in der
zeitaufgelösten Pump-Probe-
Spektroskopie-Anlage des II.
Physikalischen Instituts der
RWTH Aachen.
Foto: Peter Winandy

Thomas Früh

Wie Hellhörigkeit vor Delfinen schützt

Heringsfische verarbeiten womöglich Schall auf eine Millionstel Sekunde genau

Manche Fische hören offenbar weit besser als bislang angenommen. Lange Zeit glaubte man, Fische könnten allenfalls Töne bis zu einer Höhe von 3.000 Hertz wahrnehmen. Entsprechend groß war vor einigen Jahren die Überraschung, als man bei bestimmten Heringsfischarten ein Ultraschallgehör entdeckte. Die Tiere vernehmen sogar Schallschwingungen bis zu 180.000 Hertz und können so den Ortschaftslauten der Delfine entgegen. Zum Vergleich: Junge Menschen nehmen „nur“ Töne bis zu einer Höhe von 20.000 Hertz wahr.

Jetzt gesellt sich zu dieser Überraschung eine weitere Sensation. In dem bei Mensch und Delphin gleichermaßen beliebten Amerikanischen Maifisch (*Alosa sapidissima*) fanden sich akustische Neurone, die Zeitabstände von weniger als vier Hunderttausendstel Sekunden genau messen. Eine so hohe Präzision der akustischen Signalverarbeitung war bislang nur von Fledermäusen bekannt, die ebenfalls Ultraschall hören. Zudem ergaben sich Hinweise, dass die ultrahohen Töne von einer besonderen Haarzellenpopulation im Innenohr aufgefangen und über eigene Nervenbahnen ans Kleinhirn weitergeleitet werden. Dies berichten Forscher der RWTH Aachen und der University of Maryland, USA, jetzt in den internationalen Fachblättern „Journal of Neurophysiology“ und „Journal of Experimental Biology“. Die Forscher um Dennis Plachta vom RWTH-Lehrstuhl für Biologie II haben den Fischen unter Wasser Ultraschalltöne vorgespielt und mit Elektroden gemessen, wie Kleinhirn und Hörnerv antworten.

Wie sich dabei herausstellte, können die mit Hering und Sardine verwandten Tiere Ultraschallsignale äußerst genau analysieren. So feuerten einige Nervenzellen nur dann, wenn ein Ton einsetzte oder aber verklang. Andere reagierten nur auf den Wechsel der Tonhöhe. Besonders frappierend waren indes Kleinhirnzellen, die nach Erklängen eines Tones stets im gleichen Zeitabstand zu feuern begannen. Dabei waren sie offensichtlich präziser als die Messinstrumente. Obgleich diese in Zeitintervallen von vier Hunderttausendstel Sekunden getaktet waren, zeigte sich nicht die leiseste Schwankung im zeitlichen Verhalten der Zellen.

Die Forscher um Plachta vermuten sogar, dass die Neuronen Zeitabstände messen, die nur eine Millionstel Sekunde dauern. Eine solche Rechenleistung wird vom Gehirn der Fische wohl auch verlangt. Denn, wie die Forscher ebenfalls beobachteten, schwimmen bereits kleine Jungtiere von einer Ultraschallquelle weg. Um diese aber orten zu können, müssen die Zeitunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr ausgewertet werden. Und die sind denkbar gering. Bei einem Innenohrabstand von nur fünf Millimetern und einer fünfmal höheren Schallgeschwindigkeit als in Luft ergeben sich Zeitspannen von etwa einer Millionstel Sekunde.

Wo hat der ultragenaue Sinn für ultrahohe Töne seinen Sitz? Offenbar ist für Ultraschall ein exklusiver Informationskanal reserviert. So hörten die Fische diese Schallsorte auch dann heraus, wenn sie durch weißes Rauschen in tieferen Tonlagen „maskiert“ wurde. Weitere Indizien lieferte der Blick ins Innenohr. Dort wandeln die so genannten Haarzellen akustische Schwingungen in elektrische Signale um. Diese Sinneszellen, die stets wie Grashalme im englischen Rasen nebeneinander liegen, bilden bei den meisten Fischen eine einheitliche Schicht. Eine Ausnahme bilden die Heringsfische: Ihr Haarzellenrasen ist in drei Parzellen unterteilt – ganz gleich ob die Spezies für Ultraschall taub oder empfindlich ist. Die „hellhörigen Heringe“ indes zeichnen sich durch eine zusätzliche Besonderheit aus: Bei ihnen verbindet ein elastisches Band das mittlere „Rasenstück“ mit einem kugelförmigen Kämmerchen im Schädel.

Nach Ansicht von Plachta und Kollegen könnte diesen Strukturen eine Schlüsselrolle bei der Ultraschallwahrnehmung zukommen. Dafür spricht auch eine weitere Beobachtung des deutsch-amerikanischen Teams: Ultraschall lässt frisch geschlüpfte Fischlarven völlig kalt. Erst später, wenn sich in ihrem Innenohr der ursprünglich einheitliche Haarzellenrasen unterteilt hat, reagieren sie mit Flucht.

Autor:

Dr. rer.nat. Thomas Früh ist Mitarbeiter des Dezernats Presse- und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Verstrickung der Natur- und Ingenieurwissenschaften mit dem Naziregime lag bisher im Dämmerlicht einer lückenhaften Geschichtsschreibung. Dies gilt besonders für die national-sozialistische Vergangenheit der damals zwölf Technischen Hochschulen in Deutschland. Eine Neuerscheinung auf dem Buchmarkt bringt jetzt Licht in das Dunkel: Unter dem Titel „Die Technische Hochschule Aachen im Dritten Reich“ zeichnet der Historiker Ulrich Kalkmann ein facettenreiches Bild vom Verhalten der Aachener Hochschullehrer und Studierenden in der Zeit zwischen 1933 und 1945. Anhand zeitgenössischer Quellen, wie Telegrammen und Briefen, enthüllt er hautnah das zwiespältige Handeln der Hochschulleitung und die unrühmliche Rolle der Studentenschaft, als nach der so genannten „Machtergreifung“ zwölf der insgesamt 123 Professoren aus rassistischen und politischen Gründen von der Hochschule vertrieben wurden.

Kalkmann untersucht die verschiedenen Interessengruppen innerhalb der TH Aachen und bringt das Kräftespiel zwischen der Hochschule und mehreren, teils miteinander konkurrierenden Reichsministerien ans Tageslicht. Außerdem erkundet er den Einfluss der „braunen“ Hochschulpolitik auf die Aachener Forschung- und Lehrinhalte. Dabei widmet er sich auch der Rüstungsforschung, die im 2. Weltkrieg stark ausgeweitet wurde. Kalkmann hat umfangreiches Quellenmaterial ausgewertet. Er nahm Einblick in das RWTH-Hochschularchiv und

das Hauptstaatsarchiv Düsseldorf, wo Aktenbestände des damaligen Erziehungsministeriums, der Regierung Aachen, der Polizei und Gestapo sowie der Entnazifizierungsstellen lagern. Akten der zuständigen Reichsministerien lieferten ebenfalls wertvolle Hinweise. Diese fanden sich im Bundesarchiv Koblenz, dem Geheimen Staatsarchiv in Berlin-Dahlem sowie in Staatsarchiven der früheren DDR in Potsdam und Merseburg. Die Forschungsarbeiten wurden vom Rektorat sowie den Freunden und Förderern der RWTH Aachen e.V. finanziert.

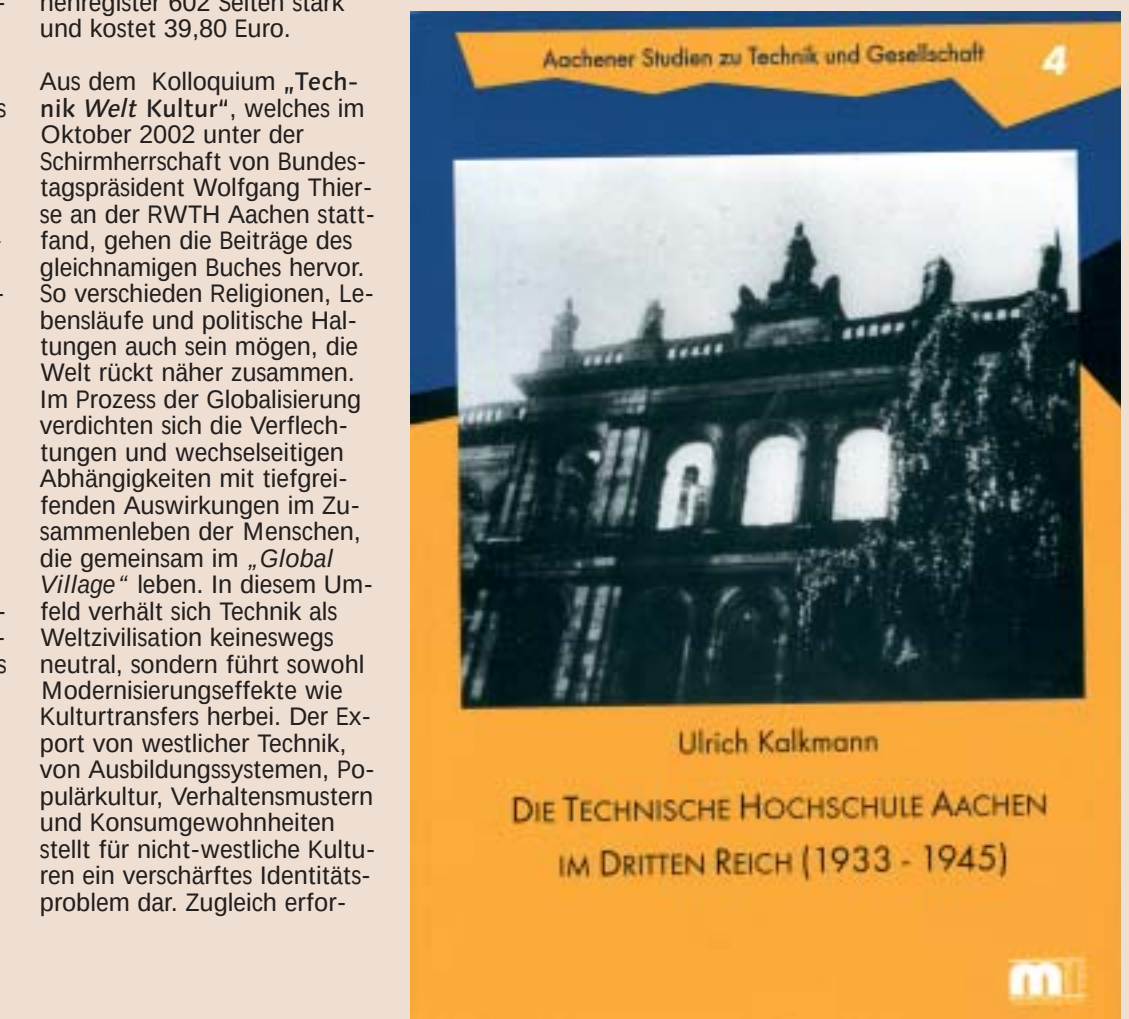
„Die Technische Hochschule Aachen im Dritten Reich“ ist im Verlag Mainz, Aachen, erschienen. Das Buch ist mit Quellenangaben und Personenregister 602 Seiten stark und kostet 39,80 Euro.

Aus dem Kolloquium „Technik Welt Kultur“, welches im Oktober 2002 unter der Schirmherrschaft von Bundestagspräsident Wolfgang Thierse an der RWTH Aachen stattfand, gehen die Beiträge des gleichnamigen Buches hervor. So verschieden Religionen, Lebensläufe und politische Haltungen auch sein mögen, die Welt rückt näher zusammen. Im Prozess der Globalisierung verdichten sich die Verflechtungen und wechselseitigen Abhängigkeiten mit tiefgreifenden Auswirkungen im Zusammenleben der Menschen, die gemeinsam im „Global Village“ leben. In diesem Umfeld verhält sich Technik als Weltzivilisation keineswegs neutral, sondern führt sowohl Kulturtransfers herbei. Der Export von westlicher Technik, von Ausbildungssystemen, Populärkultur, Verhaltensmustern und Konsumgewohnheiten stellt für nicht-westliche Kulturen ein verschärftes Identitätsproblem dar. Zugleich erfor-

dert die kulturelle Vielheit der Welt einen kontinuierlichen und selbstkritischen Dialog der Kulturen untereinander. Durch die Reichweite des internationalen Wissens- und Güterausbaus hat diese Aufgabe einen globalen Stellenwert gewonnen.

Die tatsächliche Aktualität und Brisanz dieses Themas, die furchtbaren Attentate des „Elften September“ und die darauf folgenden militärischen Konflikte in Afghanistan und im Irak bis hin zum mancherorts proklamierten „Krieg der Kulturen“ war den Organisatoren der Tagung als Mitte 2001 die Planung begann, noch nicht bewusst, das grundlegende Konfliktpotenzial der „Globalisierung“ jedoch schon.

Unter den Gesichtspunkten unterschiedlicher nationaler Technik- und Lebenskulturen sowie von Produktions- und Wissenskulturen widmen sich die Autoren aus Wissenschaft und Wirtschaft den Kontexten, dem internationalen Einsatz und dem Transfer von Technik. Das von Karl R. Kegl und Max Kerner herausgegebene Buch „Technik Welt Kultur. Technische Zivilisation und kulturelle Identitäten im Zeitalter der Globalisierung“ ist im Böhlau Verlag erschienen.



Martin Frenz, Markus Soeding

Eins plus Eins ist Eins

Gemeinsamer Diplom- und Lehramtsstudiengang
Maschinenwesen an der RWTH Aachen

1/2004 **RWTH THEMEN**

Seit dem Wintersemester 2000/01 hat die Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen einen Gemeinsamen Diplom- und Lehramtsstudiengang Maschinenbau eingeführt. Dieser Studiengang schließt mit der Diplomprüfung und der Ersten Staatsprüfung ab. Neben dem Ersten Staatsexamen für das Lehramt an Berufskollegs in den Fächern Maschinenbautechnik und – je nach Wahl der Vertiefungsrichtung im Hauptstudium – Fertigungstechnik, Fahrzeugtechnik oder Versorgungstechnik wird der akademische Grad Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.) vergeben. Studienbeginn ist im Wintersemester. Die Regelstudienzeit beträgt zehn Semester.

Voraussetzungen für das Studium sind die Allgemeine oder eine einschlägige fachgebundene Hochschulreife und ein sechswöchiges betriebliches Praktikum. Insgesamt werden betriebliche Praktika von insgesamt zwölf Monaten gefordert, die aber auch während des Studiums (insgesamt 26 Wochen) und vor der Referendarzeit nach dem Studium (weitere 26 Wochen) absolviert werden können. Ziel des Studiums ist es, sowohl Handlungskompetenz für eine berufliche Tätigkeit als Ingenieurin beziehungsweise Ingenieur als auch als Lehrerin beziehungsweise Lehrer an einem Berufskolleg zu entwickeln. Dies wird durch ein paralleles Angebot von fachwissenschaftlichen, erziehungswissenschaftlichen – insbesondere berufs- und betriebspädagogischen – und fachdidaktischen Veranstaltungen erfolgen. In diesen sollen den Studierenden unter Berücksichtigung der Anforderungen und Veränderungen in der Berufswelt die erforderlichen fachlichen Kenntnisse, Fähigkeiten und Methoden so vermittelt werden, dass sie zu wissenschaftlicher Arbeit, zur kritischen Einordnung der wissenschaftlichen Erkenntnisse und zu verantwortlichem Handeln sowohl als Ingenieur als auch als Lehrer an einem Berufskolleg befähigt werden.

Das Studium umfasst neben den Fächern des Maschinenbaus auch Studienanteile der Erziehungswissenschaft und der Fachdidaktik Maschinentechnik. Der Aufbau des Studiums gliedert sich in ein Grundstudium mit einem Studienumfang von vier Semestern mit 103 Semesterwochenstunden (kurz: SWS) und einem sechssemestrigen Hauptstudium von 72 SWS.

Das Grundstudium vermittelt zunächst die naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen sowie eine Einführung in erziehungswissenschaftliche und fachdidaktische Aspekte. Diese Grundlagen werden in elf Prüfungen in der vorlesungsfreien Zeit geprüft. In einigen Fächern sind als Zulassungsvoraussetzung Prüfungsvorleistungen, Leistungsnachweise oder Teilnahmenachweise erforderlich. Diese sind zum Beispiel Zeichnungs-, Konstruktions- und Rechenübungen.

Im Hauptstudium erfolgt dann eine Spezialisierung der ingenieurwissenschaftlichen Kenntnisse in den Studienrichtungen Fertigungstechnik sowie eine Vertiefung der Studien der Erziehungswissenschaften und der Fachdidaktik. Zusätzlich schließt das Hauptstudium ein integriertes Praxissemester, zwei Studienarbeiten mit einer Bearbeitungszeit von jeweils circa 200 Stunden und die Abschlussarbeit mit einer Bearbeitungsdauer von vier Monaten ein.

Im Rahmen eines Auslandsstudienaufenthaltes besteht die Möglichkeit, zwischen drei und zwölf Monaten an einer Hochschule im Ausland zu studieren. Auslandsstudienaufenthalte können selbständig organisiert oder in speziellen Austauschprogrammen durchgeführt werden. Es existieren zahlreiche Programme, in denen die Austauschbeziehungen zwischen der Fakultät für Maschinenwesen beziehungsweise der RWTH Aachen und Hochschulen im Ausland geregelt sind.

Mit dem Diplom- und Lehramtsstudiengang können klassische Aufgabenfelder eines Maschinenbauingenieurs zum Beispiel in der Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Produktion oder auch dem Vertrieb wahrgenommen werden. Zusatzkenntnisse der Erziehungswissenschaften und der Fachdidaktik stellen wichtige Qualifikationen etwa für die Wahrnehmung von Aufgaben in der beruflichen Aus- und Weiterbildung, in der Personalentwicklung und Personalführung und in der Dokumentation und Präsentation von Projekt- und Entwicklungsergebnissen dar. Zusätzlich werden die Studierenden für den Beruf eines Lehrers an einem Berufskolleg oder einer privaten Bildungseinrichtung qualifiziert.

Weitere Informationen zur Lehramtsausbildung nach Abschluss des Studiums erhalten Sie unter www.studienseminare-berufskolleg.nrw.de sowie unter <http://www.bildungsportal.nrw.de/BP/index.html>.

Autoren:

Dr. phil. Martin Frenz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft. Markus Soeding ist Fakultätsassistent an der Fakultät für Maschinenwesen.

Thomas Früh

Mit Großrechnern ins Zeitalter der globalisierten Produktentwicklung

Neue Kommunikationsplattform hilft bei der Produktentwicklung

Im Oktober 2003 wurden sechs neue Großcomputer in den Rechnerverbund Nordrhein-Westfalen eingeklinkt. Für die Hochschulen in Nordrhein-Westfalen öffnete sich eine neue Welt: Produktentwicklung im Zeitalter der Globalisierung. Erstmals erhalten jetzt deutsche Universitäten Zugang zu einer elektronischen Plattform, die räumliche Entfernungen bei der arbeitsteiligen Entwicklung neuer Waren schwinden lässt. Mit Hilfe des Systems können Projektpartner, die sich an verschiedenen Orten befinden, gemeinsam Produkte entwickeln und dabei die einzelnen Schritte präzise aufeinander abstimmen. Bereits im kommenden Wintersemester wollen acht Hochschulen des Landes die Plattform in Lehrveranstaltungen und Forschungsprojekten einsetzen.

Die in der deutschen Hochschullandschaft einmalige Initiative „Produktentwicklung über verteilte Standorte“ (ProVerStand) wird vom Land Nordrhein-Westfalen mit 3,8 Millionen Euro gefördert. Koordiniert wird sie von der RWTH Aachen aus: Von einem Team um Professor Jörg Feldhusen, Leiter des Instituts für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus. Feldhusen und seine Mitarbeiter bieten zudem landesweit Schulungen für Administratoren, Entwickler und intensive Nutzer des Systems an.

Installation, Betrieb und Wartung der Hardware hat das RWTH-Rechenzentrum übernommen. Die Software-Ausstattung stammt von dem Unternehmen PTC, einem weltweit führenden Anbieter von Software zur Produktentwicklung. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme werden bis zu 45.000 Personen die elektronische Plattform nutzen können. Sie soll rund um die Uhr verfügbar sein und in jeder Sekunde bis zu 2.000 Nutzerzugriffe gleichzeitig verarbeiten können.

Studierende finden somit ideale Bedingungen vor, um die globalisierte Produktentwicklung trainieren zu können. So sollen an der RWTH Aachen zwei Gruppen von je einem Dutzend Studierenden – obgleich räumlich getrennt – ein Entwicklungsprojekt gemeinsam bearbeiten. Die Universitäten Bochum, Duisburg und Düsseldorf sowie die Fachhochschulen Düsseldorf, Gelsenkirchen, Niederrhein und Siegen wollen ähnliche Veranstaltungen anbieten. Ist die Pilotphase erfolgreich, dann werden in den folgenden Semestern jeweils bis zu 1.500 Studierende die ProVerStand-Plattform nutzen. Feldhusen hofft, dass es bald auch hochschulübergreifende Kurse geben wird. Studierendengruppen, die etwa in Düsseldorf, Köln und Aachen sitzen, könnten dann Teilaufgaben übernehmen und diese Bausteine mit Hilfe der elektronischen Plattform zusammenfügen.

Die ProVerStand-Initiative kommt überdies der industriellen Forschung zugute. So können auch die An-Institute der Hochschulen, wie etwa die Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft, daran teilnehmen. Probleme, die in gemeinsamen Forschungsprojekten zwischen Hochschulinstituten und Industrieunternehmen zu klären sind, gibt es genug. Etwa die Frage, wie sich Informationsflüsse sicher abgrenzen lassen, wenn Projektpartner ihre jeweiligen Kernkompetenzen nicht preisgeben wollen. Zudem können die Firmen Software-Systeme zur räumlich verteilten Produktentwicklung erst dann sinnvoll nutzen, wenn die Abläufe zuvor genau definiert und standardisiert wurden. „Das ist für viele Unternehmen immer noch eine große Herausforderung“, kommentiert Feldhusen.

Autor:

Dr. rer.nat. Thomas Früh ist Mitarbeiter des Dezernats für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit.



RWTH-Shop

Ab sofort bietet die RWTH ein umfangreiches und hochwertiges Sortiment an ausgesuchten Merchandising-Produkten an. Im "Runner Shop", Neupforte 15 in Aachen, sind modische Sportbekleidung und nützliche Utensilien für den Büroalltag erhältlich. Alle Artikel sind mit dem RWTH-Logo versehen. So wird die Aachener Hochschule noch stärker im Bewusstsein der Besucher und Bürger der Region Aachen verankert werden. Die gesamte Produktpalette kann in Kürze im Internet-Shop angeschaut und bestellt werden:

www.rwth-aachen-shop.de.



*Justage der Laserstrahlen an der zeitaufgelösten Pump-Probe-Spektroskopie-Anlage des II. Physikalischen Instituts der RWTH Aachen.
Foto: Peter Winandy*

Nano

„Wo findet man reale Energie mit virtueller Realität?“

Die Zukunft ist schon lange unter uns:
www.deutsche-steinkohle.de

Tunnelbaumaschinen, die am Bildschirm in Echtzeit gesteuert werden können. Gläserne Bergwerke unter der Erde, die sich über Hunderte von Kilometern erstrecken und per Mausclick sichtbar werden, mit jedem einzelnen von Zehntausenden von Messpunkten. Was wie Science Fiction klingt, ist bei uns Alltag. Mit modernster Computertechnologie, der virtuellen Realität, machen wir unsere Abbaubetriebe sicherer und wirtschaftlicher. Gleichzeitig sorgen wir für einen neuen Exportschlager der weltweit führenden deutschen Bergbautechnologie. Wir fördern eben nicht nur die Energiesicherheit unseres Landes. Sondern auch den Technologiestandort Deutschland. Heute und in Zukunft.

 **Deutsche Steinkohle.**
400 Jahre ab heute.