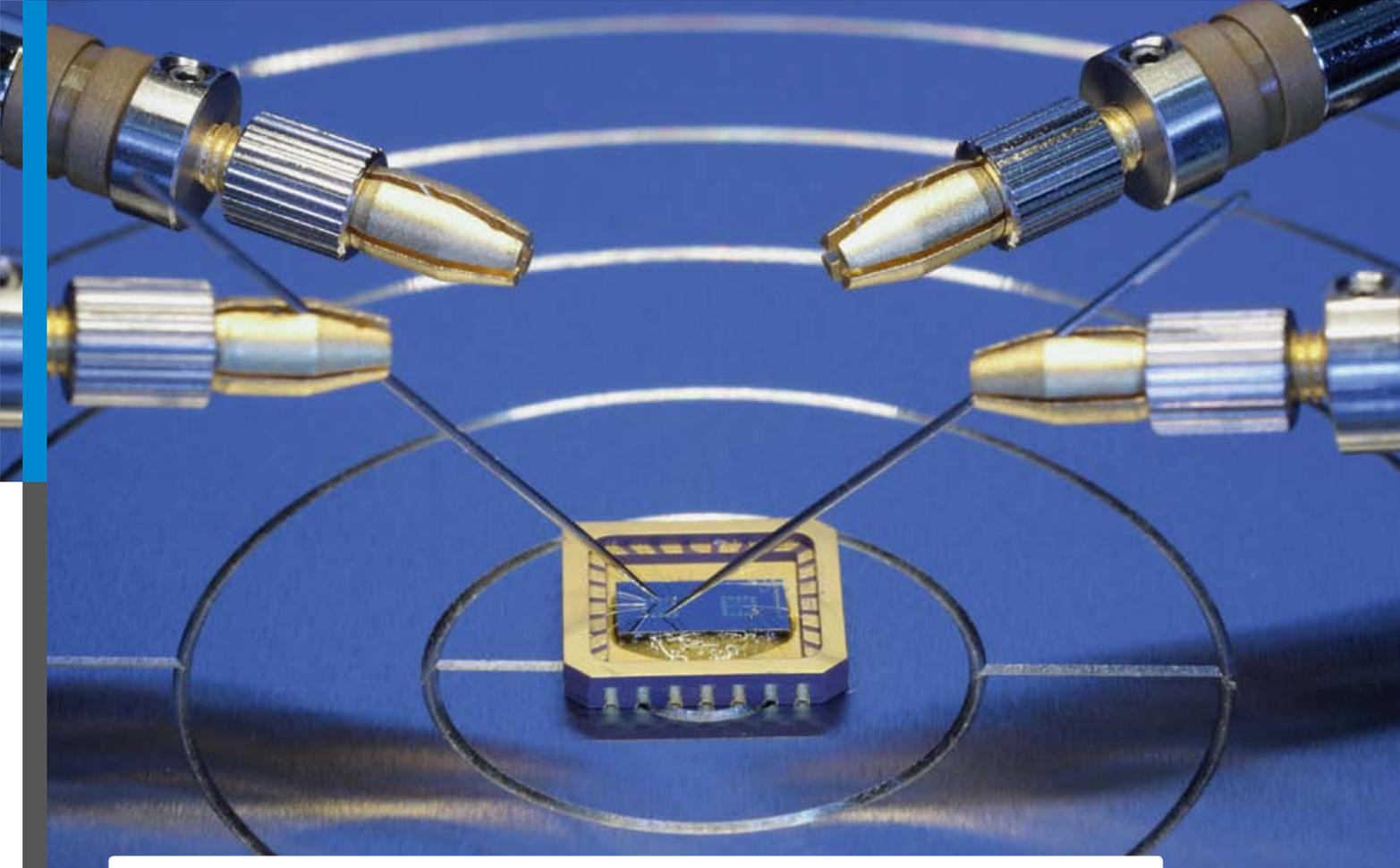


FORSCHEN in Jülich



NANOELEKTRONIK

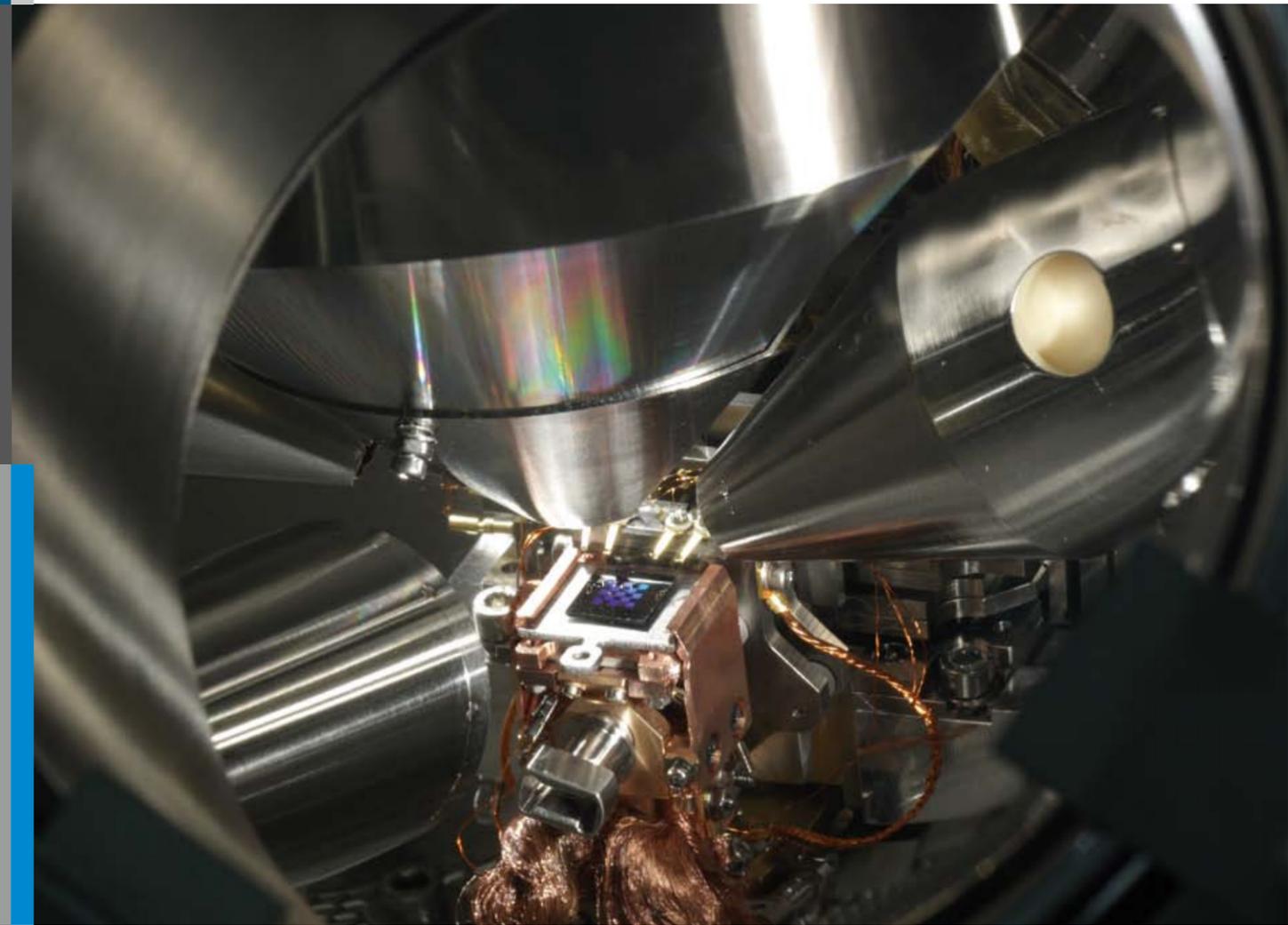
:: TURBOSPEICHER FÜR DIE COMPUTER VON MORGEN

:: DURCHSTARTEN MIT SPINTRONIK

:: VON DER BIOLOGIE INSPIRIERT

FORSCHEN in Jülich

Das Magazin aus dem Forschungszentrum



In diesem Teil des „Nano-Spintronic-Cluster-Tools“ (siehe auch „Das Universalwerkzeug“, S. 26) können Nanobauteile im Ultrahochvakuum erzeugt, abgebildet und untersucht werden. Das Schachbrettmuster in der Mitte ist weit größer als die Strukturen auf den üblichen Proben und dient zu Eichzwecken.

Titelbild: Mit dieser Messeinrichtung charakterisieren Jülicher Wissenschaftler die elektronischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhrchen und anderen empfindlichen Bauelementen einer künftigen Informationstechnologie.



Innovationsmotor Nanoelektronik

Informations- und Kommunikationstechnologien sind Treiber für Wachstum und Innovation“, lauten die ersten Worte der „Stuttgarter Erklärung“ des nationalen IT-Gipfels Ende 2009. Hochrangige Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft unterstreichen darin die besondere Bedeutung dieser Technologien für den Standort Deutschland. Und die Bundesregierung betont in ihrer Hightech-Strategie: „Informations- und Kommunikationstechnologien leisten einen wesentlichen Beitrag zur Lösung gesellschaftlicher Probleme.“

Uns im Forschungszentrum Jülich ist dies sehr bewusst. Informationstechnologie ist einer der Schwerpunkte unserer Forschung, und wir wollen die moderne Informationsgesellschaft aktiv mitgestalten. Vor mehr als 20 Jahren hat Physik-Nobelpreisträger Prof. Peter Grünberg hier in Jülich die Grundlagen der Spintronik gelegt und den Riesemagnetowiderstand entdeckt. Dieser Effekt ermöglichte die Technologie, auf der mittlerweile nahezu jeder Lesekopf in einer Festplatte beruht. Und auch heute stellen sich Jülicher Forscher der gesellschaftlichen Herausforderung und schaffen die Grundlagen für die Informationsgesellschaft von morgen. Dabei arbeiten sie nicht nur mit der Industrie zusammen, sondern kooperieren auch innerhalb der Sektion FIT (Fundamentals of Future Information Technology) der Jülich Aachen Research Alliance JARA eng mit Kollegen der RWTH Aachen. In vielen Artikeln dieser Ausgabe von „Forschen in Jülich“ wird deutlich, wie diese Allianz das Nebeneinander von universitärer und außeruniversitärer Forschung und Lehre überwindet, um die Stärken beider Systeme zu vereinen.

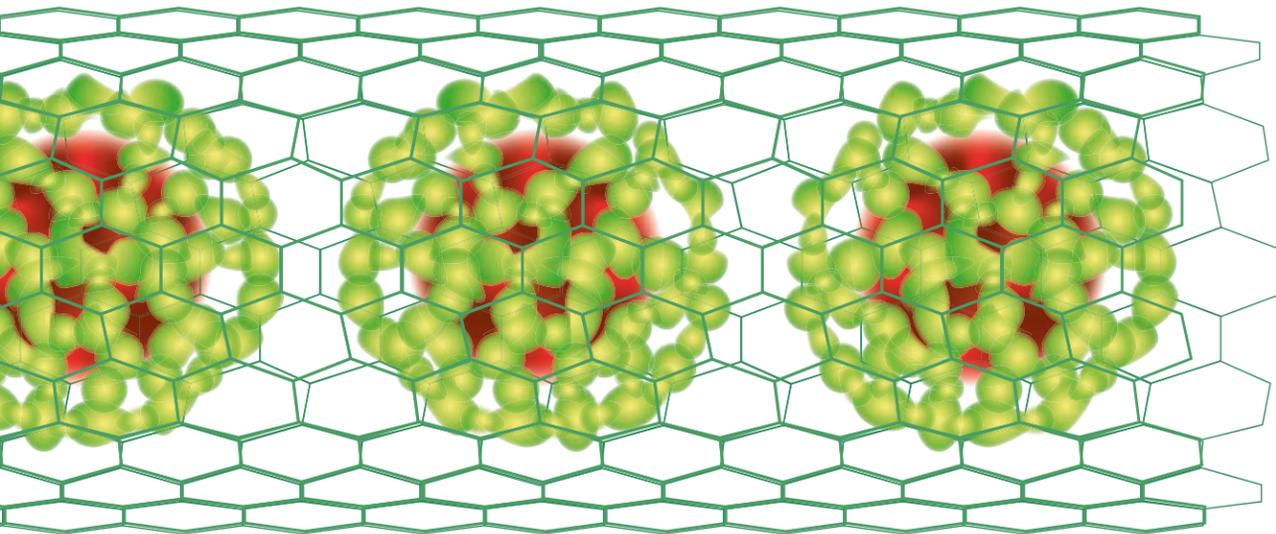
Was erwartet Sie in diesem Heft? Häufig wird der Begriff „Informationstechnologie“ in einem Atemzug mit dem Begriff „Mikroelektronik“ verwendet, ist der

„Computerchip“ zugleich ein „Mikrochip“. Doch inzwischen haben die elektronischen Bauteile, die ganz überwiegend auf dem Material Silizium basieren, Nanometerdimensionen erreicht: Nanoelektronik ist zum Schlüsselbegriff geworden und wird uns helfen, den kommenden Herausforderungen der Informationstechnologie zu begegnen. Lesen Sie, wie Jülicher Forscher die Grenzen der etablierten Technologie erweitern, um auch künftig wachsende Rechenleistung zu ermöglichen. Erfahren Sie, wie die Wissenschaftler alternative Konzepte für eine Hardware von übermorgen vorantreiben, wie sie dafür neue Materialien und Baupläne für nicht flüchtige Speicher entwickeln und die sogenannte Spintronik ausbauen, die helfen kann, Computer schneller und energieeffizienter zu machen. Lernen Sie, wie sich Biomoleküle für die Informationsverarbeitung nutzen oder aus welchen Bausteinen sich Quantencomputer bauen lassen.

Wer im globalen Wettbewerb die Nase vorn haben will, muss die richtigen Forschungsstrategien verfolgen, in die richtigen Geräte und Kooperationspartner investieren und die richtigen Köpfe an sich binden. Ohne engagierte, kenntnisreiche und kreative Menschen funktioniert Forschung nicht. Einige der jungen Köpfe aus dem Forschungszentrum Jülich und ihre Ideen für das 21. Jahrhundert können Sie im Schwerpunktthema dieses Heftes kennenlernen. Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre.

Prof. Dr. Achim Bachem
Vorstandsvorsitzender des
Forschungszentrums Jülich

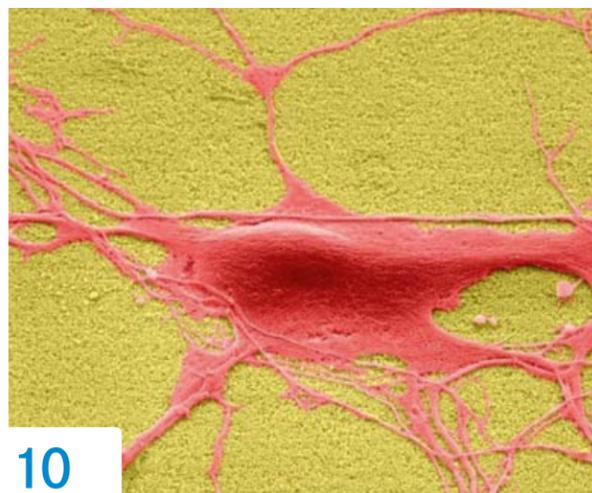
Prof. Dr. Sebastian M. Schmidt
Mitglied des Vorstands



12

:: DURCHSTARTEN MIT SPINTRONIK

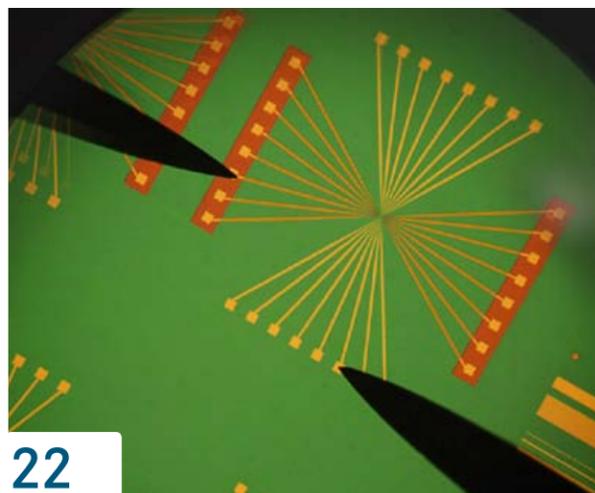
„Erbsenschoten“ aus Kohlenstoffatomen sind ideal geeignet, um Spineffekte zu untersuchen. Künftig könnten sie zu Bausteinen für eine energiesparende und schnelle Informationstechnik werden.



10

VON DER BIOLOGIE INSPIRIERT

Jülicher Wissenschaftler wollen die Kommunikation zwischen lebenden Zellen und elektronischen Bauteilen verbessern. Sie entwickeln dazu Chips mit nanostrukturierten Oberflächen und Methoden, um die Signale der Zellen zu verstärken.



22

TURBOSPEICHER FÜR DIE COMPUTER VON MORGEN

Bei heutigen Computerspeichern werden die Daten nur langsam ein- und ausgelesen oder die Information geht nach dem Ausschalten des Rechners verloren. Jülicher Forscher entwickeln Speicherelemente, die einen Ausweg aus dem Dilemma zeigen.

3 Editorial

:: SCHNAPPSCHÜSSE AUS JÜLICH

6 Forschung im Überblick

Ein Kaleidoskop von Bildern zeigt Höhepunkte aus der Jülicher Forschung – von der Analyse gefährlicher Proteine über einen Brennstoffzellen-Rekord bis hin zu Erkenntnissen über die Klimawirkung von Wäldern.

:: SCHWERPUNKT

9 Frische Ideen

10 Von der Biologie inspiriert

Bernhard Wolfrums Grundlagenforschung könnte den Weg zu Prothesen weisen, die sich direkt ans Nervensystem anschließen lassen.

12 Durchstarten mit Spintronik

Carola Meyer entwickelt Bauelemente, die auf der Umschaltung des Elektronenspins beruhen.

14 Ordnung schaffen in Oxiden

Manuel Angst sucht nach Materialien, die zugleich magnetisch und ferroelektrisch sind.

16 Dynamisch unterwegs in der Nanowelt

Janine Splettstößer berechnet, was passiert, wenn Quantenpunkte aus dem Gleichgewicht geraten.

18 Beste Aussichten

:: HIGHLIGHTS

20 Fit für die Zukunft

Interview mit den Professoren Markus Morgenstern und Detlev Grützmacher über die Jülich Aachen Research Alliance JARA.

22 Turbospeicher für die Computer von morgen

Jülicher Forscher arbeiten daran, dass künftig das Hochfahren eines Computers nicht mehr eine gefühlte Ewigkeit dauert.

26 Das Universalwerkzeug

Das Jülicher „Nano-Spintronic-Cluster-Tool“ ist das „Schweizer Taschenmesser“ unter den Forschungswerkzeugen.

28 Das Nanoecholot

Der Elektronenstrom von Rastertunnelmikroskopen lässt sich nutzen, um tief verborgene Eigenschaften von Metallen zu untersuchen.

30 Trickreich zum schnelleren Transistor

Jülicher Wissenschaftler weiten das Kristallgitter von Silizium, damit die Ladungsträger schneller hindurchfließen können.

32 Einzigartige Einsicht in die Welt der Atome

Das neue Supermikroskop PICO kann Atomverschiebungen mit einer Genauigkeit von einem milliardstel Millimeter messen.

34 Nachrichten aus der Informationstechnologie

Vom Bau eines hochmodernen Reinraumzentrums, einem Modellsystem aus ultrakalten Atomen und dem entschlüsselten Aufbau eines Materials, das in DVDs eingesetzt wird.

FLUCHTWEGE

Auch eine kleine Verbreiterung von Ausgängen hilft, dass im Notfall mehr Menschen aus Stadien flüchten können. Das haben Jülicher und Wuppertaler Forscher durch Tests mit Probanden herausgefunden. Bislang nahm man an, dass der Passantenfluss erst dann steigt, wenn die Engstelle um die vollständige Breite einer Person vergrößert wird. Ergebnisse wie diese helfen, bessere Computermodelle der Fluchtbewegung zu erstellen. Das Jülich Supercomputing Centre koordiniert das vom Bundesforschungsministerium geförderte Projekt „Hermes“, bei dem ein rechnergestütztes Evakuierungssystem entwickelt werden soll.

**WÄLDER UND KLIMAERWÄRMUNG**

Bäume geben eine Mischung flüchtiger organischer Verbindungen in die Atmosphäre ab. Wie Jülicher Forscher in der Fachzeitschrift „Nature“ berichteten, verändert sich diese Mischung bei steigender Temperatur so, dass sich weniger Schwebeteilchen in der Atmosphäre bilden. Daraus folgt: Die globale Klimaerwärmung wird den Kühleffekt der Wälder verringern. Denn die Schwebeteilchen dienen als Kondensationskeime für Wolkentröpfchen. Weniger Schwebeteilchen würden daher zu geringerer Bewölkung und vermehrter Sonneneinstrahlung auf den Erdboden führen.

**ATMOSPHERISCHER TURBOWASCHGANG**

Ein internationales Team, dem Jülicher Forscher angehörten, fand bei Luftmessungen über Südchina einen beschleunigten Abbau von Schadstoffen. Ein bislang unbekannter Verstärkungsmechanismus vergrößert die Selbstreinigungskräfte der Atmosphäre um das Drei- bis Fünffache. Wie die Wissenschaftler in der Fachzeitschrift „Science“ schilderten, erzeugt er – anders als die bisher bekannten Mechanismen – wenig gesundheitsschädliches Ozon. Daher müssen nun die Computermodelle auf den Prüfstand, mit denen bodennahe Ozonkonzentrationen vorhergesagt werden.

**BESSERE ANALYSE GEFÄHRLICHER PROTEINE**

Wissenschaftler der Universität Düsseldorf und des Forschungszentrums Jülich erforschen gemeinsam auf dem Jülicher Campus Struktur und Wirkung von Proteinen. Manche Proteine spielen bei der Vermehrung von Viren eine Rolle oder stehen im Verdacht, direkt schädlich zu wirken, wie etwa das Alzheimer-Amyloid. Dank eines neuen 900-MHz-NMR-Spektrometers können die Forscher nun das Aussehen der gefährlichen Proteine Atom für Atom analysieren und ihre Wirkweisen im Körper genauestens studieren. Das Messgerät gehört zu den weltweit empfindlichsten seiner Art.



Forschung im Überblick

Die Jülicher Nanoelektronik-Forschung steht im Mittelpunkt dieses Magazins. Jülicher Wissenschaftler sind aber auch auf anderen Forschungsgebieten aktiv und erfolgreich.

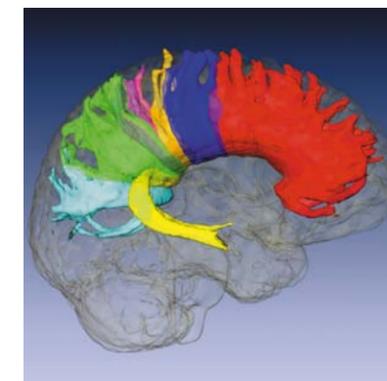
LINKTIPP
www.fz-juelich.de/portal/kurznachrichten

SPARSAMER SUPERCOMPUTER

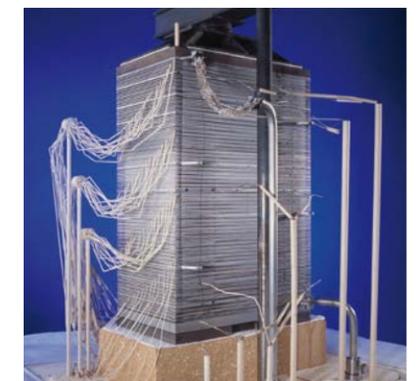
Mehr als leistungsstark ist der deutsche Forschungsrechner QPACE, der von einem akademischen Konsortium unter wesentlicher Beteiligung der Universität Regensburg, des Forschungszentrums Jülich sowie des IBM Forschungslabors in Böblingen entwickelt wurde. Denn er führt die Weltrangliste der energieeffizientesten Supercomputer, die Green500-Liste, vom November 2009 an. Er dient der Simulation fundamentaler Naturkräfte in der Elementarteilchenphysik.

**SIGNALE IM GEHIRN**

Forscher aus Jülich und Freiburg haben herausgefunden, dass der Botenstoff Acetylcholin im Gehirn nicht immer – wie bisher gedacht – die Signalübertragung zwischen Nervenzellen verstärkt. Im Gegenteil: In der vierten Schicht der Großhirnrinde übernimmt er ausschließlich die Funktion, die Signalübertragung der Nervenzellen zu hemmen. Da Gehirnerkrankungen wie Schizophrenie mit einer Fehlfunktion in der Acetylcholin-Ausschüttung einhergehen, ist es wichtig, genau zu verstehen, wie die Substanz wirkt.

**BESTMARKE MIT BRENNSTOFFZELLE**

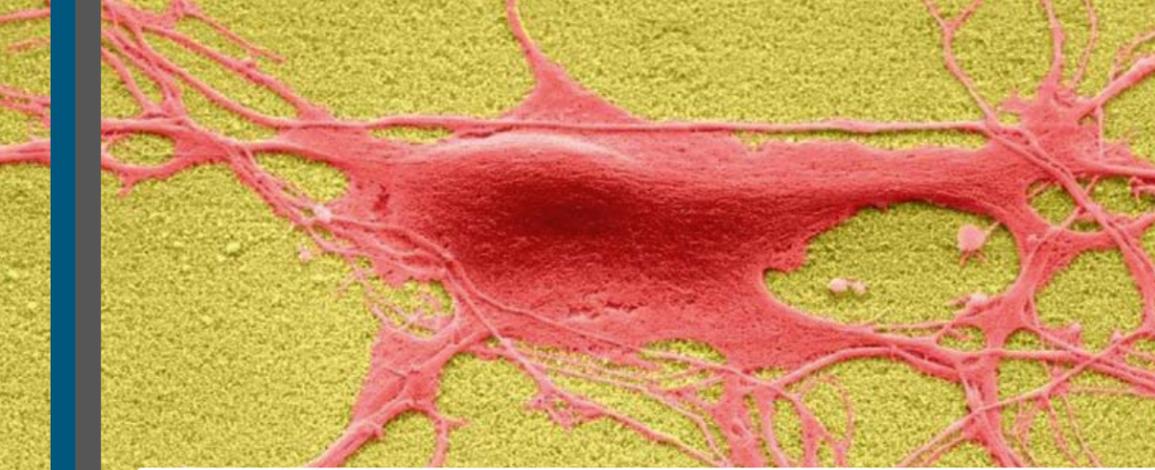
Jülicher Wissenschaftler haben zwei Stapel von Hochtemperatur-Brennstoffzellen über jeweils 15 000 Stunden betrieben. Diese lieferten mit 0,4 Watt pro Quadratmeter rund das Doppelte der Leistung, die kommerzielle Systeme heute erreichen sollen. Damit sind die Forscher dem Ziel ein gutes Stück näher gekommen, SOFCs (Solid Oxide Fuel Cells) reif für den Einsatz in Gebäuden und Kraftwerken zu machen. Brennstoffzellen wandeln chemische Energie direkt, effizient und umweltfreundlich in Strom um.





:: FRISCHE IDEEN

Viele junge, exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler forschen an der Informationstechnologie der Zukunft. Vier von ihnen werden im Schwerpunkt dieses Magazins vorgestellt – mitsamt den frischen Ideen, die sie kenntnisreich und engagiert verfolgen. Die Nachwuchsforscher profitieren dabei von finanzieller Förderung, die ihnen eine frühe wissenschaftliche Selbstständigkeit ermöglicht, und von der Zusammenarbeit mit etablierten Spitzenforschern des Forschungszentrums Jülich und der Jülich Aachen Research Alliance JARA.



Von der Biologie inspiriert

Bernhard Wolfrum entwickelt Werkzeuge, mit denen sich die Kommunikation zwischen lebenden Zellen und elektronischen Bauteilen verbessern lässt. Seine Grundlagenforschung könnte den Weg zu Sensoren für Umweltchemikalien weisen – oder zu Prothesen, die sich direkt ans Nervensystem anschließen lassen.

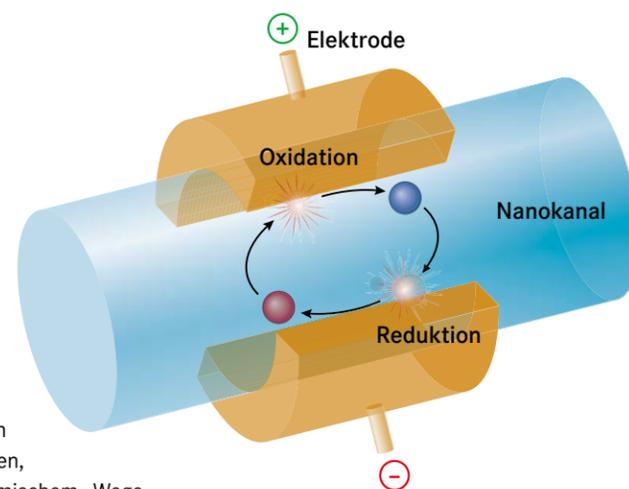
Sie bevölkern Zukunftsromane, Comics und Science-Fiction-Filme: Mischwesen aus Mensch und Maschine, Cyborgs genannt. In Dr. Bernhard Wolfrums Labor am Institut für Bio- und Nanosysteme sucht man sie vergebens. Zwar arbeitet sein Team an der Verknüpfung von Elektronik und Biologie. „Aber von irgendwelchen Bio-Techno-Monstern sind wir weit entfernt“, versichert der junge Physiker lachend.

„Zelle an Chip“

Wolfrum und sein Team interessieren sich insbesondere für die Kommunikation zwischen Nervenzellen. Diese sind gewis-

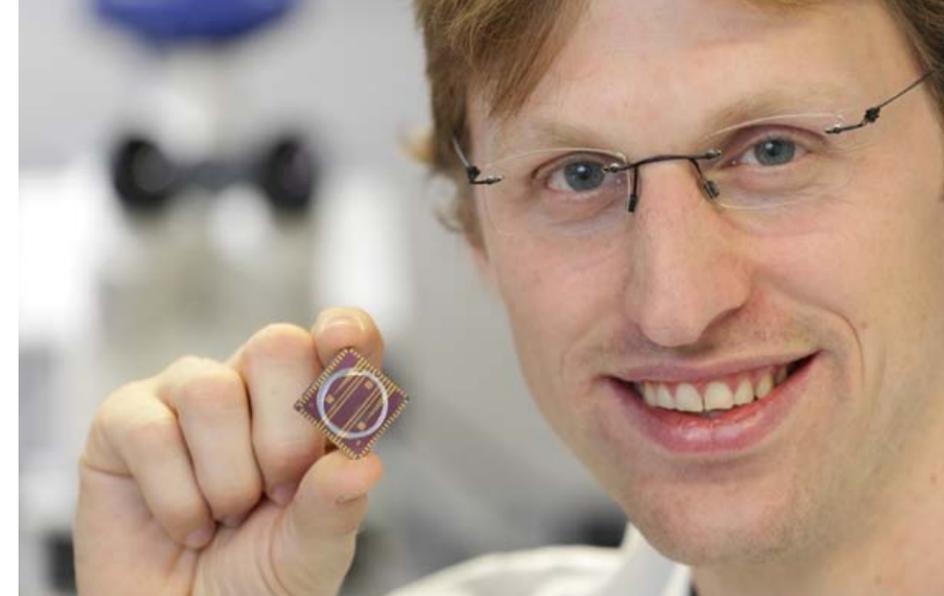
sermaßen zweisprachig: Sie können Informationen einerseits elektrisch weiterleiten; ihre Fortsätze fungieren dabei als winzige „Kabel“. Andererseits sprechen sie an den Schaltstellen von einer Zelle zur anderen, den Synapsen, auf chemischem Wege miteinander. Sie schütten dort bestimmte Botenstoffe – Neurotransmitter – aus, die eine Nachricht von Zelle zu Zelle weitergeben. Diesen chemischen Dialog möchte Wolfrum belauschen und für den Informationsaustausch zwischen Neuronen und Elektronik nutzbar machen.

Dafür lassen die Wissenschaftler Netzwerke von Zellen auf elektronischen Chips mit speziellen Kontaktstellen wachsen. Sie entwickeln nanostrukturierte Oberflächen, beispielsweise mit winzigen Goldstäbchen besetzt, an die sich die Zellen fest anheften können. Außerdem konstruieren die Wissenschaftler Chips mit Nanokanälen, in denen elektrochemische Prozesse ablaufen.



Zwei Elektroden an einem Nanokanal verstärken durch mehrfache Oxidation und Reduktion das Signal eines Botenstoffmoleküls.

„Es kommt vor allem darauf an, das Signal der Zellen so zu verstärken, dass es überhaupt registriert werden kann“, erläutert Wolfrum. Für den „Lauschangriff“ auf die Zelle wird gemeinhin eine einzelne Elektrode genutzt. Wenn auf sie ein Molekül des ausgeschütteten Dopamins oder eines anderen Botenstoffs trifft, wird dieses Molekül oxidiert. Das



Ganz links: Eine Herzmuskelzelle wächst auf einem „Rasen“ aus winzigen Goldstäbchen. Die Stäbchen vergrößern die Oberfläche einer Elektrode.

Links: Dr. Bernhard Wolfrum arbeitet an der Verknüpfung von Elektronik und Biologie.

dabei entstehende Stromsignal wird weitergeleitet. „Doch für die wenigen Neurotransmittermoleküle an einer einzelnen Synapse ist so ein System nicht empfindlich genug“, sagt Wolfrum. Sein Trick: Er bringt eine zweite Elektrode ins Spiel, die das Dopamin wieder reduziert. Liegen beide Elektroden in einem Nanokanal, durch den sich die Botenmoleküle bewegen, dicht genug beieinander, kann ein und dasselbe Dopaminmolekül mehrfach oxidiert und wieder reduziert werden. „Das Signal wird in diesen Zyklen ganz erheblich verstärkt. Damit haben wir einen sehr sensiblen Sensor für Neurotransmitter“, erläutert Wolfrum. „Selbst ein einzelnes Molekül kann damit schon einen messbaren Strom erzeugen.“ Auf diese Weise möchte er das „Gespräch“ der Neuronen besser verstehen und die Kopplung mit elektronischen Bauteilen verbessern.

Horrorszenarien und Realität

Ob am Ende solcher Forschungsarbeiten nicht doch ein Chip stehen könnte, den man Menschen ins Hirn pflanzt, um ihr Gedächtnis und ihre Intelligenz zu verbessern oder um sie gar fernzusteuern? Selbstverständlich sollte man sich über ethisch umstrittene Entwicklungen Gedanken machen, meint Wolfrum. „Aber solche Horrorszzenarien sind doch sehr weit von der Realität entfernt.“ Er ist überzeugt, dass sich in der Zukunft viele

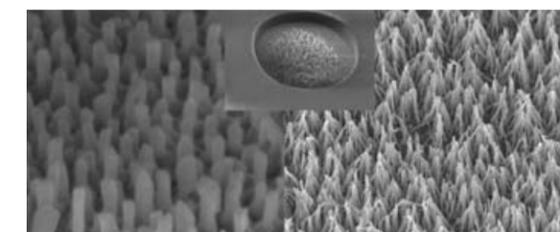
nützliche Anwendungen der bioelektronischen Chips ergeben werden: in einer künstlichen Netzhaut etwa, die Blinden das Sehvermögen wiedergeben soll, oder in Prothesen, die wie natürliche Gliedmaßen vom Nervensystem gesteuert werden. Zeitlich näher liegende Einsatzbereiche sind Sensoren für Umweltchemikalien oder Testsysteme für die Arzneimittelentwicklung. So kann man bereits mit einem bioelektronischen Chip messen, wie ein Netzwerk von Nervenzellen auf ein Umweltgift oder einen pharmazeutischen Wirkstoff reagiert. Auch wenn Wolfrum seine Arbeit eher als Teil der Grundlagenforschung begreift, interessiert sich die Industrie bereits für die Ergebnisse, berichtet er.

Vielfältig vernetzt sind nicht nur Zellen und Elektronik auf Wolfrums Chips, sondern auch die Jülicher Arbeitsgruppen in der Bio- und Nanoelektronik. Die Zusammenarbeit innerhalb des Forschungszentrums und mit der RWTH Aachen in der Jülich Aachen Research Alliance JARA sei ganz hervorragend, betont Wolfrum. Nach dem Physikstudium in Göttingen und in Santa Barbara, Kalifornien, arbeitete er unter anderem am renommierten Kavli Institute of Nanoscience der TU Delft

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Goldstäbchen auf verschiedenen Oberflächen.

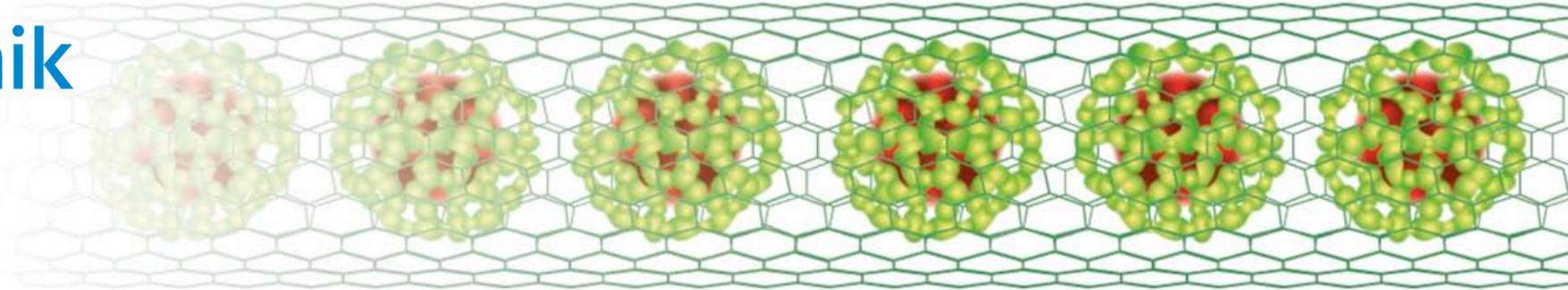
in den Niederlanden, ehe er im Sommer 2008 nach Jülich kam. Er schätzt seine aktuelle Stellung als Leiter einer Helmholtz-Nachwuchsgruppe sehr: „Für eine akademische Laufbahn ist das eine optimale Startposition“, sagt Wolfrum. „Man kann sich zum einen ganz selbstständig Ziele in seiner Arbeit setzen, zum anderen schafft die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der JARA-Sektion FIT beste Voraussetzungen, diese auch zu erreichen.“ Natürlich bedeute das viel Arbeit, räumt der junge Familienvater ein. „Doch bin ich dabei sehr flexibel in meiner Zeiteinteilung – das kommt auch meiner Familie zugute.“ Denn so kann er sich bei der Betreuung seiner beiden Kinder im Kindergarten- und Grundschulalter gut mit seiner Frau abstimmen, die als Ärztin in einer Klinik feste Dienstpläne hat. „Ich verbringe sicher mehr Zeit mit meinem Sohn und meiner Tochter als viele andere Väter“, sagt Wolfrum.

Wiebke Rögner



Durchstarten mit Spintronik

Carola Meyer sperrt Spins in Käfige aus Kohlenstoff-Molekülen, ist von der männlichen Übermacht in der Quantenphysik nicht zu beeindrucken und setzt bei ihren Forschungsvorhaben stärker auf Kooperationen als auf Wettbewerb.



„Erbsenschote“ als Vorläufer künftiger Nanoelektronik-Bauteile: Ein Kohlenstoffnanoröhrchen, das mit Fullerenen – Kugeln aus Kohlenstoffatomen – gefüllt ist. Jede Kugel (grün) umschließt dabei ein Atom (rot). So kann die Forscherin mit einer abzählbaren Reihe von Spins experimentieren.

Computern nötig macht. „Solche Verluste könnte eine Technik vermeiden, die sich eine andere Eigenschaft der Elektronen zunutze macht und statt ihrer Ladung den Spin verwendet“, erklärt Carola Meyer. Annähernd vorstellbar ist diese quantenmechanische Eigenschaft als eine Art Drehimpuls des Elektrons. Der Spin kann dabei zwei Zustände, „Spin-Up“ oder „Spin-Down“, annehmen. Gemessen wird er über seine Wechselwirkung mit magnetischen Feldern.

Mit Spineffekten arbeiten heute schon Leseköpfe für Computerfestplatten. Bei ihnen wird der Riesenmagnetowiderstand genutzt, der auf der quantenmechanischen Kopplung von Elektronenspins in dünnen magnetischen Schichten beruht. Entdeckt wurde dieser Effekt 1988 vom Jülicher Forscher Prof. Peter Grünberg und vom Franzosen Albert Fert, die hierfür 2007 den Nobelpreis für Physik erhielten. Noch in den Kinderschuhen steckt dagegen der Versuch, einzelne spinpolarisierte Elektronen für die Quanteninformationsverarbeitung zu manipulieren. „Wenn es gelänge, Bauelemente zu entwickeln, die auf der Umschaltung des Spins beruhen, ließen sich Informationen nicht nur mit geringem Energieaufwand, sondern auch sehr schnell verarbeiten“, so Meyer.

Um den Spin in den Griff zu bekommen, sperrt die Forscherin ihn ein. Dafür eignen sich Käfige aus Kohlenstoff besonders gut, erläutert sie: „Wenn der Elektronenspin mit dem Spin von

Atomkernen in Wechselwirkung tritt, geht die Information verloren. Das Gute an Kohlenstoffatomen ist: Sie haben keinen Kernspin.“ Carola Meyer und ihr Team füllen Kohlenstoffröhrchen, die einen Durchmesser von wenigen Nanometern, also millionstel Millimeter, haben, mit kugelförmigen Molekülen aus 60 Kohlenstoffatomen. Bei manchen Experimenten ist in diesen Kugeln, den Fullerenen, auch noch jeweils ein Metallatom eingeschlossen, da dann stärkere Spineffekte erzielt werden können. Die Fullerene liegen

hintereinander in der Röhre wie Erbsen in der Schote, weshalb diese Anordnung auch als „peapod“ (engl. Erbsenschote) bezeichnet wird. „Wir haben damit eine eindimensionale Spinkette, ein Modellsystem mit einer abzählbaren Zahl an Spins“, sagt Meyer. Mit spektroskopischen Methoden und unter dem Elektronenmikroskop untersucht ihr Team Struktur und Eigenschaften dieser Gebilde. Aus den „Erbsenschoten“ könnten beispielsweise Transistoren und andere Bauteile im Nanomaßstab entwickelt werden. Deren Spineigenschaften können dann in Strommessungen bei sehr kleinen Temperaturen genau untersucht werden.

Dass sie ihren Laptop in absehbarer Zeit durch einen praxistauglichen Rechner auf Basis von Quanteneffekten ersetzen kann, erwartet Carola Meyer indes nicht. „Da gab es manche voreiligen Ankündigungen“, sagt sie. Noch sei man dabei, grundlegende Eigenschaften der Quantenobjekte zu untersuchen.

Hoch qualifiziert und engagiert

Meyer kam 2005 mit Hilfe des Tenure-Track-Programms an das Jülicher Institut für Festkörperforschung. Dieses Programm ermöglicht es hoch qualifizierten jungen Wissenschaftlerinnen, frühzeitig eine eigene Arbeitsgruppe aufzubauen und nach einer Evaluation eine feste Stelle zu erhalten. Inzwischen wurde das Programm auch für männliche Nachwuchswissenschaftler geöffnet. „Als ich von der TU Delft in den Niederlanden

nach Jülich wechselte, fand ich hier überall offene Türen und viele Möglichkeiten der Zusammenarbeit“, berichtet Meyer. Beispielhaft nennt sie das Ernst Ruska-Centrum für Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen. Sie ist überzeugt: „Wenn sich solche Kooperationen nun aufgrund der Jülich Aachen Research Alliance JARA noch ausweiten, ist das sehr positiv.“ Überhaupt findet sie, dass die Rolle des Wettbewerbs in der Wissenschaft oft überbetont wird: „Wissenschaft lebt viel mehr von Austausch und Zusammenarbeit als von Konkurrenz.“

Ob es für sie auch Schwierigkeiten in der Zusammenarbeit gibt, in einem so stark von Männern dominierten Forschungsfeld? „Es stimmt zwar, dass gerade im Quantencomputing noch weniger Frauen arbeiten als sonst in der Physik“, sagt Meyer, „aber hier im Institut ist das kein Thema, das Klima ist äußerst angenehm.“ In der von ihr geleiteten Arbeitsgruppe sind Frauen sogar in der Überzahl. „Die Mitarbeiter habe ich mir selbst ausgesucht. Bewerbungen, die mit ‚Dear Sir‘ anfangen, landeten gleich im Papierkorb“, schmunzelt sie. Einen Teil ihrer knappen Freizeit widmet sie dem Arbeitskreis Chancengleichheit in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, dessen stellvertretende Sprecherin sie ist. „Für mich ist es wichtig, mich so auch gesellschaftlich zu engagieren – Fortschritte sind ja nicht nur in der Technik nötig.“

Wiebke Rögener



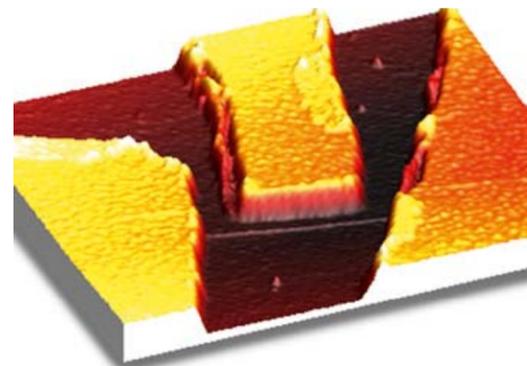
Dr. Carola Meyer führt ihre Quantentransportmessungen in einem Kryostaten durch, in dem es kälter als im Weltraum ist.

Wenn im Labor von Dr. Carola Meyer eine gute Fee vorbei käme und ihr die Antwort auf eine ungelöste Forschungsfrage anbieten würde, müsste die Fee unverrichteter Dinge wieder davonfliegen. „Ich möchte gar keine fertigen Lösungen präsentiert bekommen“, sagt die Physikerin, „mein Antrieb ist die ‚Was-passiert-dann-Maschine‘ – es ist gerade der Prozess des Nachdenkens und Experimentierens, den ich an meiner Arbeit so spannend finde.“ Ihr Forschungsgebiet, die Spintronik, bietet dazu Möglichkeiten genug.

Spin statt Ladung

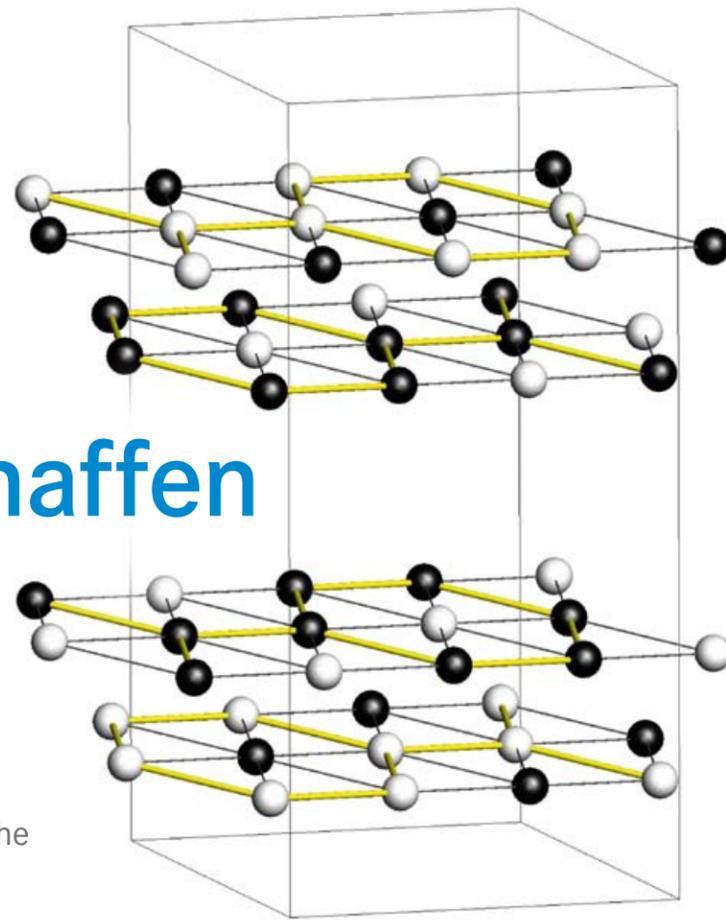
Bisher basiert Informationsverarbeitung mit Computern darauf, dass elektrische Ladungen transportiert werden. Bei dieser Bewegung entsteht unweigerlich auch Wärme, also unnötiger Energieverbrauch, der zudem lärmende Lüfter in

In der dreidimensionalen Darstellung einer Rasterkraftelektronenmikroskop-Aufnahme erscheint ein Nanoröhrchen wie ein Faden (die horizontale helle Linie) zwischen zwei Goldkontakten. Nach hinten erstreckt sich die Gatter-Elektrode, mit der die Anzahl der Elektronen gesteuert wird, die durch die Röhre fließen. Eine solche Struktur bezeichnet man als Feldeffekttransistor.



Ordnung schaffen in Oxiden

Der Schweizer Manuel Angst erforscht in Jülich ungewöhnliche Materialien, die zugleich ausgezeichnete magnetische und elektrische Eigenschaften haben. Seine Motivation dafür lässt sich auf eine knappe Formel bringen: verstehen und verändern.



Kristallstruktur von Lutetium-Eisenoxid – ein Material, in dem interessante Ordnungsphänomene auftreten.

Eisenoxid scheint indes die „Quadratur des Kreises“ möglich. Angsts Experimente deuten darauf hin, dass Lutetium-Eisenoxid neben der magnetischen eine antiferroelektrische Ordnung besitzt. „Um mit externen Spannungen die Magnetisierung zu ändern, reicht Antiferroelektrizität nicht aus“, bedauert der junge Physiker. Er wünscht sich ein Material, das Magnetismus und Ferroelektrizität kombiniert. Hier kommt sein zweites Motiv ins Spiel – der Drang zur Veränderung. „Man kann da sozusagen an verschiedenen Knöpfen drehen“, erläutert er. So möchte er das Lutetium durch ein anderes Element aus der Gruppe der sogenannten seltenen Erden ersetzen. Da im Lutetium-Eisenoxid eine antiferroelektrische Ordnung nur geringfügig stabiler ist als die ferroelektrische, könnte damit ein Material entstehen, bei dem eine ferroelektrische Ordnung und der Magnetismus zugleich stabil sind. Angst



Ein Gerät für den Durchblick – Dr. Manuel Angst am Einkristall-Röntgendiffraktometer.

trischen Kristallgitter sind verschieden geladene Ionen so arrangiert, dass der Schwerpunkt der Ladungen nicht zusammenfällt und stattdessen elektrische Dipole auftreten. Es ist ähnlich wie bei einem Magneten, den man sich aus vielen winzigen Stabmagneten zusammengesetzt vorstellen kann. Wie diese magnetischen Dipole sind auch die elektrischen Dipole geordnet: Haben sie alle die gleiche Orientierung, ist das Material ferroelektrisch. Liegen dagegen jeweils Dipole mit entgegengesetzter elektrischer Polarisation nebeneinander, ist die Gesamtpolarisation Null und Physiker sprechen von einer antiferroelektrischen Ordnung.

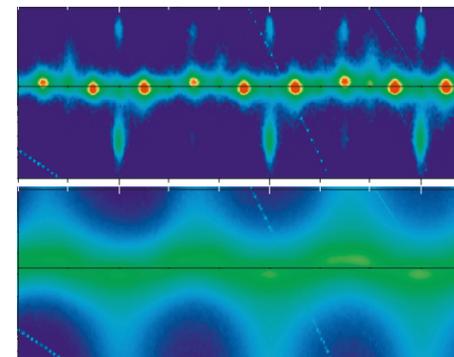
Großes Potenzial

Besonders interessant sind Materialien, in denen sowohl Magnetismus als auch Ferroelektrizität – oder Antiferroelektrizität – auftreten und beide Phänomene die Ordnung im Kristallgitter beeinflussen. Zu diesen sogenannten multiferroischen Materialien zählt beispielsweise Lutetium-

Eisenoxid. „Spannend wird es, wenn zwischen verschiedenen Ordnungen eine Kopplung existiert, wenn man also mit einem Magnetfeld die Ferroelektrizität beeinflussen kann oder mit einem elektrischen Feld die Magnetisierung ändert“, beschreibt Angst sichtlich begeistert sein Forschungsfeld. Er will wissen, wie die Ordnungen zustande kommen und wie sie zu verändern sind. „Das ist einerseits ein heißes Thema für die Grundlagenforschung“, führt er aus. „Andererseits gibt es ein großes Potenzial für Anwendungen in der Informationstechnologie.“ Hoch empfindliche Sensoren aus multiferroischen Materialien könnten schon in ein paar Jahren marktreif sein. Auf längere Sicht seien nichtflüchtige Computerspeicher denkbar, die sich allein durch das Anlegen einer Spannung beschreiben lassen, ohne dass Strom fließt. Deren Energiebedarf wäre viel geringer als bei heutigen Speichern.

Nach herkömmlichen Theorien allerdings schließen Magnetismus und Ferroelektrizität einander aus. Beim Lutetium-

Streubilder von Lutetium-Eisenoxid, gemessen mit Synchrotron-Röntgenstrahlung. Bei ca. minus 70 Grad Celsius (oben) lassen sich scharfe Überstrukturreflexe erkennen. Sie weisen auf eine spezifische Ladungsordnung mit polaren Struktureinheiten hin, die antiferroelektrisch angeordnet sind. Bei ca. plus 80 Grad Celsius (unten) sind dagegen scharfe Überstrukturreflexe nicht mehr vorhanden.



will die Kandidaten, deren Struktur interessant erscheint, im Labor herstellen und dann mit Hilfe von Synchrotron- und Neutronenstrahlung analysieren. Er betont: „In Jülich gibt es dafür alle experimentellen Möglichkeiten, die ich mir nur wünschen kann.“

Über die USA nach Jülich

Nach Jülich kam der Wissenschaftler 2008. Zuvor hatte er an der ETH Zürich seine Doktorarbeit zu supraleitenden Materialien geschrieben und dann am renommierten Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, USA, geforscht. „Von damaligen Kooperationen her wusste ich, dass ich hier im Institut ein hervorragendes Forschungsklima vorfinden würde“, sagt Angst. Als wichtigen Vorteil sieht er die Einbindung in die Jülich Aachen Research Alliance JARA: „Hier werden viele unterschiedliche Forschungsansätze zusammengeführt und auf die Informationstechnik fokussiert – das schafft enorme Möglichkeiten.“

Im Rahmen des Nachwuchsprogramms der Helmholtz-Gemeinschaft baut Angst eine eigene Arbeitsgruppe auf. Für diese Position musste der Materialforscher in einem mehrstufigen Wettbewerb die externen Gutachter überzeugen. Nun kann er fünf Jahre lang neben seiner eigenen Stelle bis zu drei Mitarbeiter sowie die Laborausstattung finanzieren. 250 000 Euro jährlich stammen je zur Hälfte aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft und aus dem Etat des Forschungszentrums Jülich. Außerdem bewirbt sich Angst um eine Juniorprofessur an der RWTH Aachen. Bereits jetzt übernimmt er dort Lehraufgaben. „Besonders die Vorlesungen für Fortgeschrittene machen richtig Spaß“, berichtet der Physiker mit charmantem schweizerischem Zungenschlag. „Durch die Fragen der Studierenden ergeben sich nicht selten sogar Impulse für meine Forschung.“

Wiebke Rögener

Dynamisch unterwegs in der Nanowelt

Ob bei ausgedehnten Wanderungen in der Natur oder bei gedanklichen Höhenflügen – Janine Splettstößer ist gerne in Bewegung. Auch beruflich interessiert sich die junge Professorin für theoretische Physik besonders für dynamische Prozesse: Ihr Metier sind Schaltvorgänge in Nanometer-Dimensionen oder Elektronen, die durch Quantenpunkte gepumpt werden.



Arbeitet gerne mit Kreide oder Bleistift: Prof. Janine Splettstößer

Reisen sei ihre liebste Freizeitbeschäftigung, sagt Prof. Janine Splettstößer. Während ihres letzten Urlaubs etwa erkundete sie gemeinsam mit einer Freundin Nigeria. Auch die Stationen ihrer wissenschaftlichen Karriere spiegeln das Interesse für fremde Länder wider: Ein Jahr studierte sie in Frankreich, die Doktorarbeit schrieb sie quasi im Schatten des schiefen Turms in Pisa, und eine Postdoc-Stelle führte sie nach Genf. Vier Sprachen spricht die Physikerin fließend, ihr Lebenspartner ist Italiener.

Um solch eine Weltenbummlerin zurück nach Deutschland zu locken, muss man ihr schon etwas bieten. Das Rückkehrerprogramm des Landes Nordrhein-Westfalen war offenbar attraktiv genug: Im Mai 2009, noch nicht ganz 32 Jahre alt, kam Janine Splettstößer wieder nach Deutschland und forscht nun am Institut für Physik der RWTH Aachen. Hier hat sie eine vorerst auf fünf Jahre befristete Professur inne. „Für mich ist das eine Superchance“, freut sie sich. Auch von der Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich innerhalb der Sektion „Fundamentals of Future Information Technology FIT“ der Jülich Aachen Research Alliance JARA verspricht sie sich viel. Sicher nicht zufällig wollten alle vier Nachwuchsforscher aus dem NRW-Rückkehrerprogramm 2008 an JARA-FIT Institute gehen. Das „Programm zur Förderung der Rückkehr des wissenschaftlichen Spitzennachwuchses aus dem Ausland“ wendet sich an Wissenschaftler, die mindestens zwei Jahre erfolgreich außerhalb Deutschlands gearbeitet haben. Es ermöglicht ihnen, an einer nordrhein-westfälischen Universität eine selbstständige Arbeitsgruppe aufzubauen. Dafür stellt das Land jedem Rückkehrer über einen Zeitraum von fünf Jahren bis zu 1,25 Millionen Euro zur Verfügung.

Im Jahr 2008 richtete sich das Programm gezielt an junge Spitzenforscher im Bereich Nanotechnologie. „Ich hatte die Ausschreibung eher zufällig in einer Fachzeitschrift entdeckt und dachte: Versuch' es mal!“, erinnert sich Splettstößer. Der Erfolg gab ihr Recht: Sie war eine von vier Bewerbern, die in einem harten Wettbewerb von internationalen Gutachtern ausgewählt wurden: als einzige Frau. „Und vor allem als einzige theoretische Physikerin“, betont sie.

Forschen mit Papier und Bleistift

Ihre Reisen in die Quantenwelt unternimmt Janine Splettstößer rein theoretisch: Um die elektronischen Eigenschaften von Nanosystemen zu erkunden, benötigt sie lediglich einen Laptop. „Oft arbeite ich auch einfach mit Papier und Bleistift“, sagt sie. Vor allem möchte sie wissen, was geschieht, wenn sich Elemente der Nanowelt – Elektronen beispielsweise – bewegen, mit anderen Objekten in Wechselwirkung treten oder unter verschiedenen Bedingungen aufeinander treffen. „Ich befasse mich hier vorwiegend mit relativ großen Gegenständen, die gerade noch Quanteneigenschaften zeigen“, erläutert Splettstößer. Bei den „Gegenständen“ handelt es sich um räumlich abgeschlossene Ansamm-

lungen einer begrenzten Anzahl von Atomen, üblicherweise Halbleiterstrukturen, in denen sich die Elektronen nicht frei in alle Raumrichtungen bewegen können. Im Vergleich zu einzelnen Elementarteilchen sind diese Objekte tatsächlich „relativ groß“. Fachleute bezeichnen diese als Quantenpunkte, weil ihre Energie nicht beliebige, sondern nur ganz bestimmte, diskrete Werte einnehmen kann, also gequantelt ist. „Wir bewegen uns hier an der Grenze von Quantenwelt und makroskopischen Objekten“, sagt die Physikerin, die offenkundig nicht nur in ihrer Freizeit gerne Grenzen überschreitet. Vor allem geht es ihr um die Dynamik in diesem Nanokosmos. So hat sie in ihrer Doktorarbeit untersucht, was geschieht, wenn einzelne Elektronen durch solche Quantenpunkte hindurchgepumpt werden.

„Über stationäre Quantenpunkte weiß man schon manches“, sagt Splettstößer. „Ich will wissen, was passiert, wenn sie etwas aus dem Gleichgewicht kommen.“ Dazu stellt sie mathematische Gleichungen auf, die solche Zustände der Quantenpunkte beschreiben. Derzeit interessiert sie sich für Elektronenemitter – Bauteile, die Elektronen mit bestimmter Energie in ein System einspeisen. Besonders spannend wird es dann, wenn sich zwei solcher Elektronen, von Magnet-

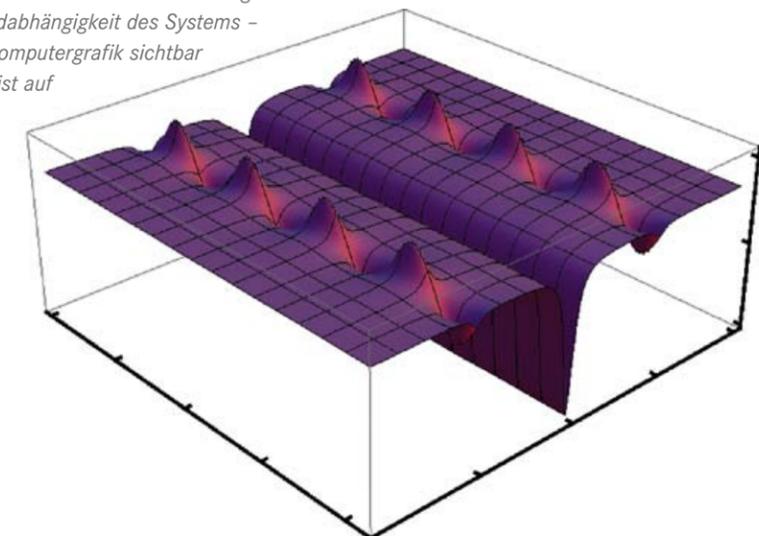
feldern beeinflusst, an einem Quantenpunktkontakt begegnen und – wie Fachleute es ausdrücken – verschränken. „Dann kann man die beiden Elektronen prinzipiell nicht mehr unterscheiden und nicht mehr sagen, welches Elektron woher gekommen ist“, erläutert die Physikerin.

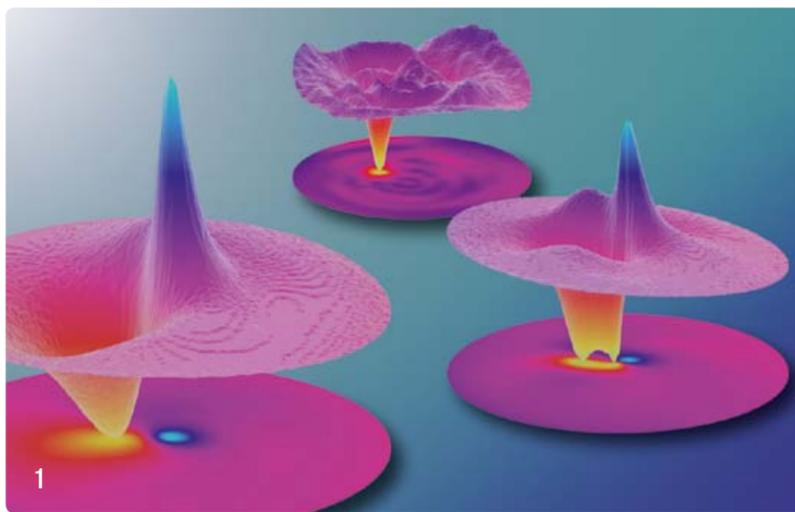
Intuitiv vorstellbar sind solche Phänomene nicht. Ob es manchmal schwierig sei, Freunden und Bekannten zu erklären, woran sie arbeitet? „Eigentlich nicht“, sagt Splettstößer. „Es gibt ja Analogien in der Alltagswelt: Pumpen, Schalter – darunter kann sich jeder etwas vorstellen. Ich erforsche eben derartige Vorgänge in viel kleineren Dimensionen, auch wenn sich Materie da natürlich etwas anders verhält.“

Tatsächlich wird das exzentrische Verhalten von quantenmechanischen Systemen durchaus schon genutzt – beispielsweise in der Verschlüsselung von Informationen durch Quantenkryptografie. „Es ist ein faszinierendes Arbeitsfeld“, sagt Splettstößer. „Ich kann mir in der Theorie etwas ausdenken, und hinterher lässt sich das von experimentell arbeitenden Kollegen wirklich umsetzen.“ Auch für diese Reise von der Theorie in die Praxis bietet JARA-FIT beste Voraussetzungen.

Wiebke Rögener

Janine Splettstößer berechnet, was geschieht, wenn Elektronen miteinander in Wechselwirkung treten. Die Magnetfeldabhängigkeit des Systems – hier in einer Computergrafik sichtbar gemacht – weist auf interessante quantenmechanische Effekte hin.

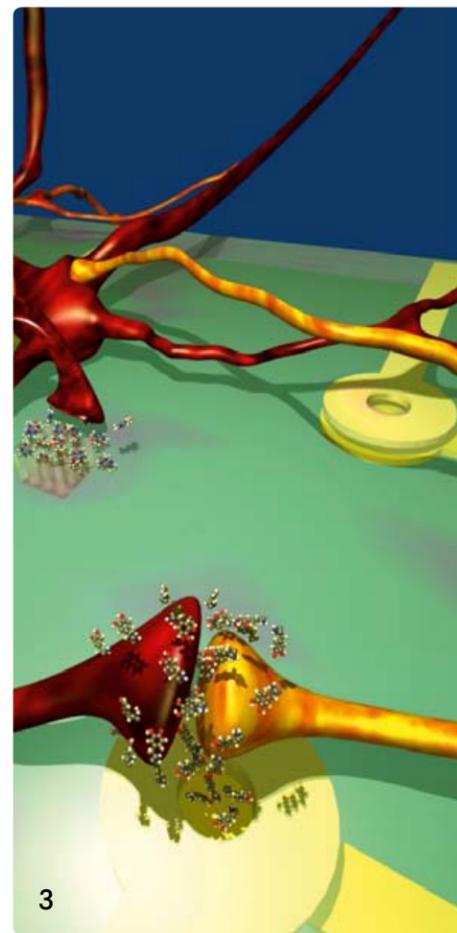




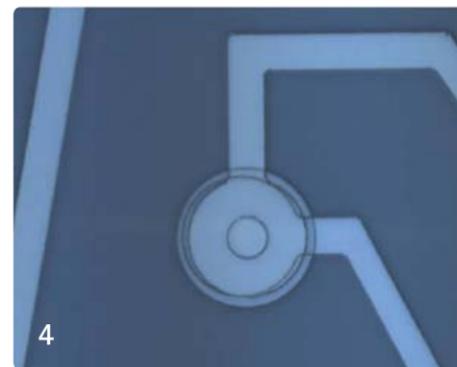
1



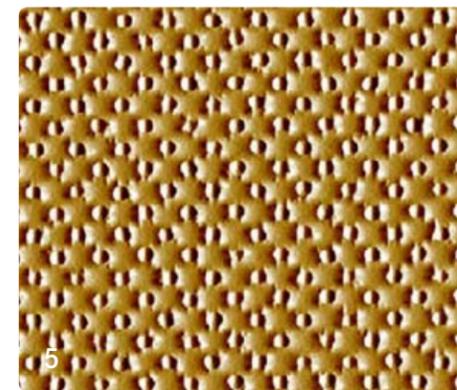
2



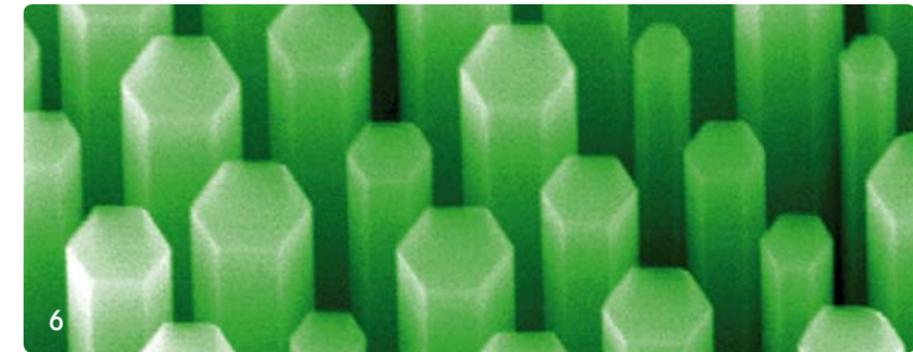
3



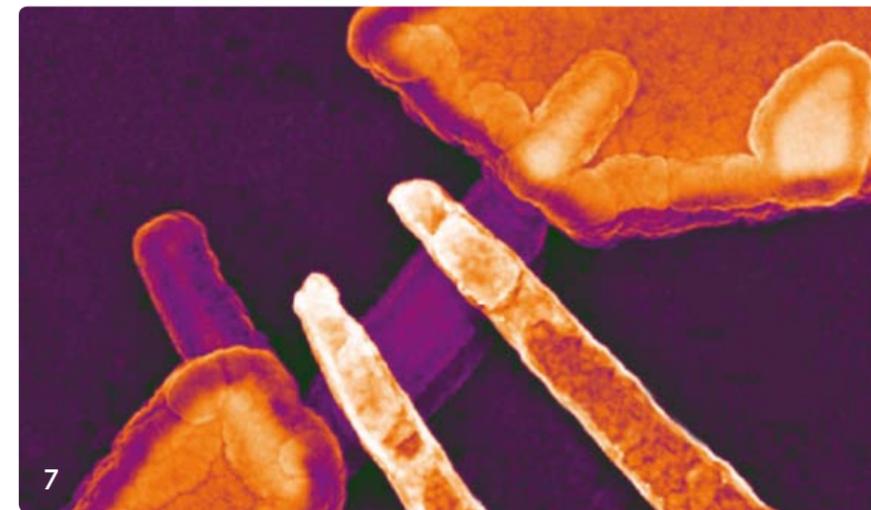
4



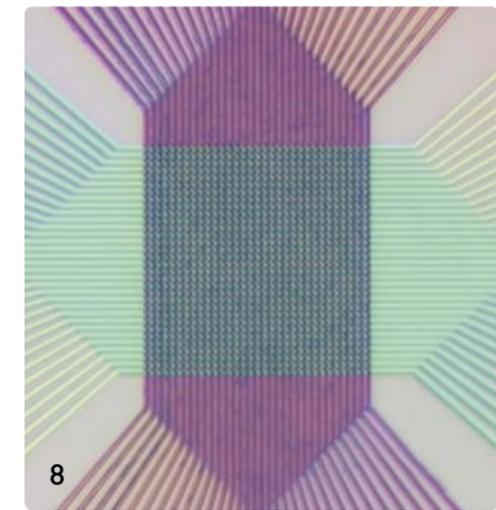
5



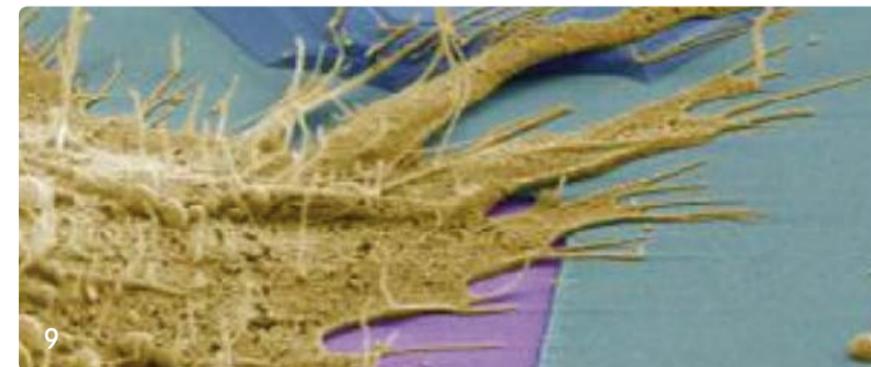
6



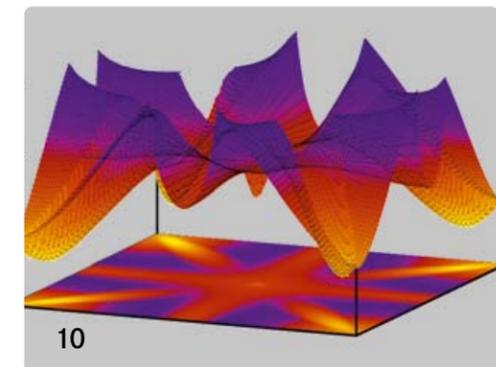
7



8



9



10

Beste Aussichten

Die Nanoelektronik ist eine Schlüsseltechnologie von heute, morgen und übermorgen. Entsprechend ist industriennahe Forschung ebenso gefragt wie völlig neue Konzepte abseits der etablierten Technologie – eine aussichtsreiche Vielfalt, die sich in diesen Bildern widerspiegelt.

- 1** In Nanometer-dünnen magnetischen Scheibchen treten magnetische Wirbel auf. Ein kurzer elektrischer Strompuls kann die Magnetisierung im Kern dieses Wirbels schnell umschalten – ein Vorgang, den diese Computersimulation zeigt.
- 2** Die atomare Struktur des Hochtemperatursupraleiters YBaCuO als elektronenmikroskopische Aufnahme. Hier tritt ein elektronischer Effekt auf, der sich bei der sogenannten

Hilbert-Spektroskopie verwenden lässt. Mit dieser in Jülich entwickelten Methode kann man mittels Mikrowellen schnell und zuverlässig verschiedene Flüssigkeiten etwa bei Sicherheitskontrollen unterscheiden.

- 3** Grafische Darstellung eines elektrochemischen Sensors (grün, mit gelben Leiterbahnen), der Botenstoff-Moleküle detektiert. Diese wurden von Nervenzellen (dunkelrot) ausgeschüttet.

- 4** Mikroskopische Teilansicht eines Sensors für die Kommunikation zwischen Zellen und Elektronik. Die hellblauen Strukturen entsprechen den gelben Strukturen in Bild 3.
- 5** Inselchen aus dem Halbleitermaterial Germanium haben sich in den regelmäßig angeordneten, vier bis acht Nanometer tiefen Mulden einer Siliziumscheibe gesammelt.
- 6** Nanosäulen aus Galliumnitrid als Grundelemente für zukünftige Schaltungen.
- 7** Vier Elektroden (orange) und ein Nanodraht aus Indiumnitrid (lila) bilden eine Struktur, die Jülicher Wissenschaftler als möglichen Baustein eines künftigen Quantencomputers untersucht haben. Quantencomputer erreichen eine enorme

Geschwindigkeit dank der quantenmechanischen Überlagerung und Verarbeitung der Zustände, in denen Informationen gespeichert werden.

- 8** Lichtmikroskopische Aufnahme einer Crossbar-Struktur. Inzwischen haben die Jülicher Wissenschaftler diesen Baustein für künftige Computerspeicher um das Zehnfache verkleinert (siehe Artikel auf Seite 23), sodass ein Lichtmikroskop nicht mehr ausreicht, um die feine Struktur sichtbar zu machen.
- 9** Nervenzelle (hellbraun) auf einem Feldeffekttransistor.
- 10** Computersimulation der elektronischen Struktur eines Halbleiters, wenn Ladungsträger mit voreingestelltem Spin in ihn injiziert werden.

Prof. Markus Morgenstern und Prof. Detlev Grützmacher im Gespräch

FIT für die Zukunft



In der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) begegnen RWTH Aachen und Forschungszentrum Jülich komplexen wissenschaftlichen Fragen mit vereinter Kompetenz und Kapazität. Sie entscheiden in den vier Sektionen JARA-BRAIN, JARA-ENERGY, JARA-SIM und JARA-FIT gemeinsam, welche Forschungsziele verfolgt, welche wissenschaftlichen Geräte angeschafft und welche Wissenschaftler berufen werden. Die Sektion FIT – für „Fundamentals of Future Information Technology“ – hat sich dabei der Aufgabe verschrieben, die Grundlagen für die Informationstechnologie der Zukunft zu schaffen. Die Direktoren von JARA-FIT sind Prof. Markus Morgenstern, Leiter des II. Physikalischen Instituts B der RWTH Aachen, und Prof. Detlev Grützmacher, Direktor des Instituts für Bio- und Nanosysteme des Forschungszentrums Jülich. Gemeinsam ziehen sie eine erste Bilanz der strategischen Partnerschaft.

Frage: Herr Prof. Morgenstern, als JARA-FIT vor etwas mehr als zwei Jahren an den Start ging: Was haben Sie und Ihre Aachener Kollegen sich von der Allianz mit dem Forschungszentrum Jülich versprochen?

Morgenstern: Um bestimmte Forschungsprojekte überhaupt angehen zu können und Fördermittel dafür einzuwerben, benötigt man eine gewisse Anzahl qualifizierter Wissenschaftler, die auf dem gleichen Gebiet arbeiten. Diese kritische Masse, um einen Begriff aus der Physik zu verwenden, wollten wir durch die Allianz mit Jülich erzeugen. Zum anderen verfügt das Forschungszentrum Jülich über besonders leistungsfähige wissenschaftliche Geräte und über das notwendige Know-how, sie einzusetzen und weiterzuentwickeln. Wir haben daher erwartet, von dieser besonderen Jülicher Stärke zu profitieren. Schließlich wollten wir neue Möglichkeiten für unsere Aachener Studierenden erschließen, etwa indem wir ihnen Praktika in Jülich anbieten.

Frage: Und was waren die Jülicher Motive, eine Allianz mit der RWTH Aachen einzugehen?

Grützmacher: In der Informationstechnologie hat man als einzelne Institution schlechte Chancen auf dem weltweiten Wissenschaftsmarkt. Denn die Fragen sind sehr komplex und interdisziplinär. Man benötigt enorme Ressourcen, um international eine Spitzenstellung einnehmen zu können. Gerade auch was das wissenschaftliche Umfeld und den wissenschaftlichen Nachwuchs betrifft, bringt uns in Jülich die Allianz mit Aachen Vorteile.

Frage: Mit JARA gehen RWTH und Forschungszentrum einen ganz eigenen Weg, um das Nebeneinander von universitärer und außeruniversitärer Forschung zu überwinden. Worin liegt dessen Besonderheit?

Grützmacher: JARA lässt sich mit einer Ehe vergleichen, bei der man sich versprochen hat, sich gegenseitig zu helfen, und mit der gewisse Verpflichtungen verbunden sind. Demgegenüber stehen Partnerschaften ohne Trauschein – Kooperationen zwischen Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, die nicht unbedingt auf Dauer angelegt sind. Andererseits gibt es auch die

JARA | FIT

Fundamentals of Future Information Technology

Zwangsehe: Hier wird von außen Druck auf Forschungsinstitutionen ausgeübt, zu verschmelzen. Ich halte da das Modell Ehe für das beste.

Frage: Wurden Ihre Erwartungen bislang erfüllt?

Morgenstern: Ja. Wir haben innerhalb von JARA-FIT bereits eine neue Forschergruppe etabliert. Außerdem hat es uns JARA-FIT ermöglicht, gemeinsam bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) einen Antrag für einen Sonderforschungsbereich einzureichen. Zwei Jahre seit dem JARA-Start sind eine kurze Zeit – doch lässt sich jetzt schon erkennen, dass wir gemeinsam die kritische Masse erreichen und uns strategisch besser als vorher positionieren können.

Grützmacher: Das lässt sich auch an aktuellen Berufungsverhandlungen belegen, bei denen wir prominenten Wissenschaftlern aufgrund unserer Allianz Angebote unterbreiten können, die weder Aachen noch Jülich für sich allein hätten stemmen können. Es hat sich außerdem gezeigt, dass JARA-FIT für Nachwuchsforscher attraktiv ist. So wollten bei uns alle vier Nanowissenschaftler arbeiten, die 2008 innerhalb des nordrhein-westfälischen Programms zur Förderung der Rückkehr des wissenschaftlichen Spitzennachwuchses aus dem Ausland ausgewählt wurden.

Frage: Warum muss man überhaupt Steuergelder in die Informationstechnologie stecken? Kann man die Forschung nicht Industrieunternehmen überlassen?

Morgenstern: Nein. Die Industrie geht langfristig angelegten Alternativen zur etablierten Siliziumtechnologie für die Hardware der Zukunft nicht nach. Optionen wie Quantencomputer oder das Nutzen einzelner Moleküle für die Informations-

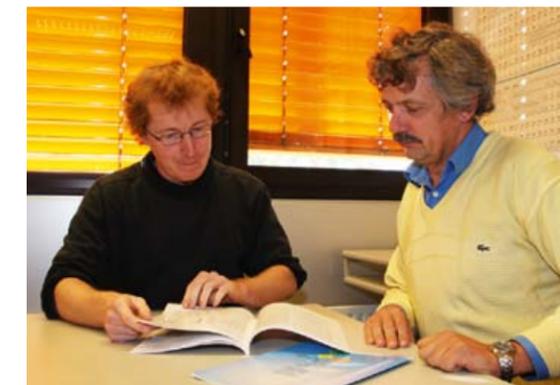
übertragung sind für Unternehmen noch zu weit weg von den tatsächlichen technischen Anforderungen an ein Produkt. Uns bei JARA-FIT zeichnet aus, dass wir diese Vorfeldforschung betreiben, aber andererseits auch sehr industrienahe Projekte verfolgen.

Frage: Was wünschen Sie sich für JARA-FIT im Jahr 2015?

Morgenstern: Es gibt dann den gemeinsamen Sonderforschungsbereich, einen gemeinsamen Master-Studiengang, eine gemeinsame Graduiertenschule ...

Grützmacher: ... und eine gemeinsame Infrastruktur, mit der man wissenschaftliche Höchstleistung erreichen kann. Ein wichtiger Schritt dahin ist das im Frühjahr 2009 gegründete Peter Grünberg Centrum als zentrale Plattform für Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Nanoelektronik in der Region. JARA-FIT wird zu den weltweit führenden Forschungsinstitutionen auf dem Gebiet der Informationstechnologie gehören.

Interview Frank Frick



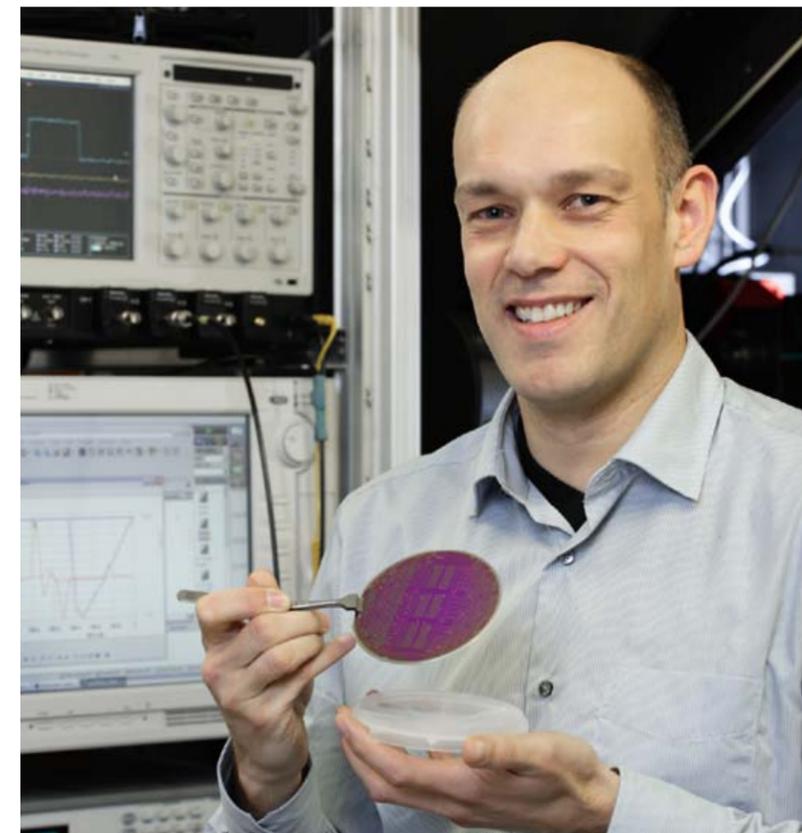
Prof. Markus Morgenstern (links) und Prof. Detlev Grützmacher, die Direktoren der Sektion „FIT“ der Jülich Aachen Research Alliance (JARA).

Turbospeicher für die Computer von morgen

Bei Computerspeichern hat man bislang die Wahl zwischen zwei Übeln: Entweder werden die Daten nur langsam ein- und ausgelesen oder die Information geht nach Abschalten des Gerätes verloren. Jülicher Forscher wollen das ändern.

Blick durch das Mikroskop auf eine Scheibe, auf der zwei ausgewählte Leiterbahnen (gelb) mit zwei Messnadeln (schwarz) kontaktiert wurden. Auf dem winzigen Bereich inmitten der strahlenförmig zusammenlaufenden Leiterbahnen befindet sich ein neuartiges Speicher-element mit 256 Widerstandskanälen.

Das reißt selbst ruhigen Gemütern schon einmal der Geduldsfaden: Man will gerade mal schnell am heimischen Computer seine Mails abrufen oder via Internet eine Kinokarte bestellen, und dann dauert das „Hochfahren“ wieder eine gefühlte Ewigkeit. Schuld ist der DRAM (Dynamic Random Access Memory), ein Modul des Arbeitsspeichers. Da sich die dort als elektrische Ladung gespeicherte Information beim letzten Ausschalten des PCs verflüchtigt hat, müssen nun das Betriebssystem und



Dr. Carsten Kügeler präsentiert eine Scheibe, auf der sich die Turbospeicher befinden.

alle anderen permanent benutzten Programme erneut geladen werden, bevor man den Computer nutzen kann. Auch während des Betriebs muss der DRAM etwa alle 60 Millisekunden nachgeladen werden. Dauerhaft vorrätig sind dagegen die Daten auf der PC-Festplatte, die dort in Form winziger, ausgerichteter magnetischer Bezirke hinterlegt sind. Doch auch Festplatten haben einen Nachteil: Sie sind vergleichsweise langsam. Ihre Schreib- und Lesezeiten betragen tausendstel Sekunden, während DRAMs innerhalb von milliardstel Sekunden verfügbar sind.

Widerstand erwünscht

„Mein Notebook braucht derzeit zum Hochfahren mehrere Minuten“, sagt Dr. Carsten Kügeler. Was andere verzweifeln lässt, ist für ihn zusätzliche Motivation. Denn er ist einer der Jülicher Wissenschaftler vom Institut für Festkörperforschung, die unter der Leitung von Prof. Rainer Waser an einem vollkommen neuen Speicherverfahren arbeiten. „Das Grundprinzip unserer sogenannten resistiven Speicher ist es, den elektrischen

Widerstand eines Materials zwischen einem niedrigen und einem hohen Wert hin und her zu schalten“, erläutert er. Diesen beiden Widerstandswerten werden dann die beiden Grundelemente aller Computersprachen zugeordnet, nämlich die Null und die Eins.

Die resistiven Speicher sollen die Vorteile von Festplatte und DRAM in sich vereinen. Bei ihnen, so sind die Wissenschaftler überzeugt, werden Informationen wie bei den Festplatten ohne angeschlossene Netzspannung erhalten bleiben und sich genauso schnell ein- und auslesen lassen wie bei den DRAMs. Doch damit nicht genug: Die neuen Speicherelemente beanspruchen auch besonders wenig Fläche auf dem Computerchip. „Dieser Flächenbedarf ist das, was zählt. Dadurch werden die Kosten in die Höhe getrieben – oder aber reduziert“, sagt Kügeler.

Mehrere Wissenschaftlergruppen des Instituts für Festkörperforschung arbeiten Hand in Hand, um die ehrgeizigen Ziele zu erreichen. Die Teams um Prof. Kristof Szot und Dr. Regina Dittmann erforschen die grundlegenden physikalisch-

chemischen Prinzipien der resistiven Speicherung. Kügeler's Gruppe arbeitet daran, die Speicher für die Integration in die bestehende Computertechnik anzupassen. Und Chemiker Dr. Rainer Bruchhaus hat unter anderem die Aufgabe, die Bedürfnisse der Industrie im Auge zu behalten. Erst vor kurzem ist er von dort ins Forschungszentrum Jülich gewechselt.

Die ersten Ergebnisse dieser geballten Kompetenz können sich sehen lassen. So wiesen die Forscher beispielsweise nach, dass sich in Strontiumtitanat und Titandioxid – Materialien, die für die Nutzung als resistive Speicherelemente intensiv untersucht werden – leitfähige Kanäle bilden, die bei Anlegen einer bestimmten Schwellenspannung ihren elektrischen Widerstand sprunghaft erhöhen. Der neue, höhere Widerstandswert bleibt auch nach Abschalten der Spannung erhalten. Erst mit dem Anlegen einer geeigneten hohen Gegenspannung nimmt der Kanal wieder den ursprünglichen niedrigen Widerstandswert an. Aufgrund dieses Verhaltens sind die Kanäle wie geschaffen dazu, als kleinste Grundelemente für Speicher zu dienen.



Dr. Regina Dittmann erforscht die grundlegenden physikalisch-chemischen Prinzipien von Widerstandskanälen, die als kleinste Grundelemente für Speicher dienen können.

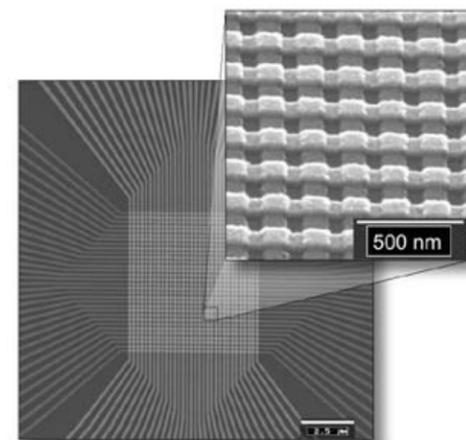
Keine grundsätzlichen Hindernisse

„Die Kanäle haben einen Durchmesser von wenigen Nanometern, also wenigen millionstel Millimetern. Wir können also bei der Realisierung einer kleinsten Speichergrundeinheit bis auf diese Größenordnung hinuntergehen“, sagt Regina Dittmann. Allerdings liegt die Größe von Kügelers Grundeinheiten, mit denen die Widerstandskanäle in die Computerperipherie eingebunden werden, derzeit noch deutlich darüber, nämlich zwischen 50 und 100 Nanometern. Doch die Forscher sind optimistisch, dass es keine prinzipiellen Hindernisse für eine weitere Miniarisierung gibt. Bei einer Größe von zehn Nanometern hätten sie ihr selbst gestecktes Ziel erreicht, den Flächenbedarf der resistiven Speicherelemente gegenüber den heute üblichen Speichern um den Faktor 1000 zu verringern.

Während eine Basiseinheit bei den DRAMs aus einem Kondensator, dem eigentlichen Speicherelement, und einem

Transistor besteht, benötigen Kügelers Grundeinheiten außer einem Widerstandskanal eigentlich nichts, außer natürlich Elektroden, um die Verbindung zur „Außenwelt“ herzustellen. Und auch bei den raumeinnehmenden Elektroden haben die Wissenschaftler kräftig eingespart. Ihr Prototyp im Labor besteht aus 4096 Widerstandskanälen, die zu einem Quadrat mit der Kantenlänge 64 angeordnet sind. Statt jeden der Widerstandskanäle einzeln mit einer eingehenden und einer ausgehenden Elektrode zu verbinden, haben die Wissenschaftler je eine Reihe mit 64 Kanälen an ihren oberen Ausgängen mit einer balkenartigen Längselektrode überzogen. Ähnlich verfahren sie mit den unteren Enden der Widerstandskanäle – mit einem Unterschied: Die unteren Balkenelektroden verlaufen senkrecht zu den oberen. Auf diese Weise entsteht eine sogenannte Crossbar-Struktur (siehe Abbildung), bei der man nur 128 Elektroden (64 plus 64)

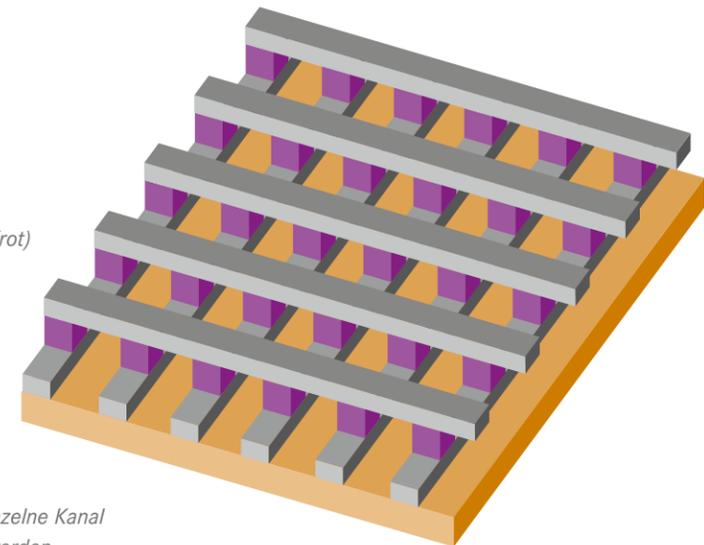
4096 Speicherkanäle umfasst diese Crossbar-Struktur (großes Bild), die nur rund ein hundertstel Millimeter groß ist. Jeder Kanal ist oben mit einer Querelektrode (im Ausschnittbild weiß) und unten mit einer Längselektrode (grau) verbunden (siehe auch Schema auf der nächsten Seite).



benötigt. Dagegen würde man 8192 Elektroden (2 mal 64 mal 64) brauchen, wenn man jeden Widerstandskanal einzeln mit einer eingehenden und einer ausgehenden Elektrode koppeln würde. Trotzdem lässt sich auch mit der Crossbar-Struktur ein bestimmter Widerstandskanal gezielt ansteuern, indem man eine Spannung an jeweils eine bestimmte Kombination von Längs- und Querelektrode legt, ähnlich dem System, mit dem man auf einem Schachbrett ein bestimmtes Feld durch seine Zeilen- und Spaltennummer identifiziert.

Nun weiß aber jeder Elektronikbastler, dass es dann doch so einfach nicht ist. Denn an den jeweiligen Elektroden liegen noch andere Widerstandskanäle, die somit auch unter Spannung stehen. Dadurch entstehen ungewollte – parasitäre – Ströme. „Deren Stärke und Auftreten hängen wiederum davon ab, welcher der einzelnen Widerstandskanäle gerade auf Null beziehungsweise Eins geschaltet ist“, erläutert Kügeler. Dieses Problem versuchen die Wissenschaftler durch eine ausgeklügelte Wahl der Spannungsniveaus zu umgehen und so die parasitären Ströme zu minimieren. Doch das ist nicht die einzige Baustelle, an der Kügelers Team noch arbeitet. Bisher bleibt die Information, die in den Widerstandskanälen gespeichert ist, etwa einen Tag erhalten. Das ist zwar immerhin schon 20 000-mal so lang wie die Speicherdauer der DRAMs. „Aber ein paar Größenordnungen müssen wir noch besser werden“, räumt Kügeler ein. Gleichzeitig versuchen die Forscher, die Differenz zwischen den beiden Widerstandswerten, die der Null beziehungsweise der Eins

Jeder Speicherkanal (rot) ist auf den Crossbars oben und unten jeweils mit einem Elektrodenbalken verbunden. Durch Anlegen von Spannung an einen oberen und einen unteren Balken kann jeder einzelne Kanal gezielt angesteuert werden.



entsprechen, zu vergrößern, um dadurch die Zuverlässigkeit des resistiven Speicherfahrens zu verbessern.

Verstehen, was passiert

Parallel zu Kügelers Forschungen arbeitet Regina Dittmanns Team daran zu verstehen, was denn in den Widerstandskanälen geschieht, wenn diese ihren Widerstandswert sprunghaft ändern. „Wir vermuten, dass beim Anlegen der Schwellspannungen Sauerstoffionen hin- und hergeschoben werden“, sagt Dittmann. „Dadurch kann das Material zwischen einem leitenden und einem isolierenden Zustand hin und her geschaltet werden.“ Neueste Ergebnisse der Forscher deuten darauf hin, dass diese Hypothese richtig ist. Während bei früheren Versuchen die Schaltfähigkeit der Widerstandskanäle nach einer gewissen Anzahl von Speicherzyklen verloren ging, blieb sie erhalten, wenn die Wissenschaftler an der Oberfläche des Materials eine oxidierbare Elektrode anbrachten. Dittmann: „Das spricht dafür, dass die Sauerstoffionen dem Material ohne diese Elektrode verloren gingen. Die Oxid-

schicht an der Elektroden-Grenzfläche nimmt nun den Sauerstoff vorübergehend auf und gibt ihn beim nächsten Schaltvorgang wieder in das Material hinein.“ Auf diese Weise, so die Physikerin, bliebe die Speicherfähigkeit der Kanäle erhalten.

Die Jülicher Forscher, die als Mitglieder der Jülich Aachen Research Alliance JARA eng mit mehreren Gruppen der RWTH Aachen zusammenarbeiten, sind sich darin einig, dass es bis zur Marktreife der resistiven Speicher noch einige Jahre dauern wird. „Wenn wir die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Crossbars demonstrieren haben, haben wir in Jülich unsere Arbeit getan“, sagt Rainer Bruchhaus. Der Kollege von Dittmann und Kügeler weiter: „Die Realisierung verkaufsfähiger Speicher ist keine Grundlagenforschung mehr; sie gehört dann in die Hände der Industrie.“ Bereits jetzt kooperieren Unternehmen wie Intel mit den Jülicher Forschern. Ein gutes Zeichen dafür, dass sie den neuartigen Speichern gute Zukunftschancen einräumen.

Axel Tillemans

Das Universalwerkzeug

Auf der Suche nach der energiesparenden Informationstechnologie der Zukunft erzeugen und erforschen Jülicher Wissenschaftler nanometerkleine Bauteile für die Spintronik. Dabei hilft ihnen das „Schweizer Taschenmesser“ unter den Forschungswerkzeugen: das weltweit einzigartige „Nano-Spintronics-Cluster-Tool“.

Auf Informations- und Kommunikationstechnologien entfielen 2007 in Deutschland rund zehn Prozent des gesamten Stromverbrauchs. Die globale Dimension des Themas macht Dr. Daniel Bürgler vom Jülicher Institut für Festkörperforschung deutlich: „Mit dem Wirtschaftswachstum der Schwellenländer steigt auch der weltweite Energiebedarf für Computer rapide an, falls diese nicht viel energiesparender werden.“ Doch nicht nur aus Gründen der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes werden genügsamere Prozessoren benötigt: Der hohe Stromverbrauch produziert so viel Wärme, dass es für die empfindliche Elektronik im Computergehäuse bei noch mehr Rechenleistung einfach zu heiß wird.

Ein Ausweg könnte die Spintronik sein, also elektronische Bauteile, bei denen die Eigenrotation – der „Spin“ – von Elektronen zur Informationsverarbeitung verwendet werden soll. Doch zentrale Fragen

sind derzeit noch offen: Wie produziert man einen Strom an Elektronen mit nur einer Art von Spin? Wie manipuliert man die Ausrichtung der Spins, und wie liest man die Ausrichtung der Spins wieder aus? Um die Suche nach Antworten wirklich effektiv betreiben zu können, haben sich die Jülicher Wissenschaftler ein Instrument ausgedacht, das mehrere Funktionen in einer Maschine vereint: das „Nano-Spintronics-Cluster-Tool“.

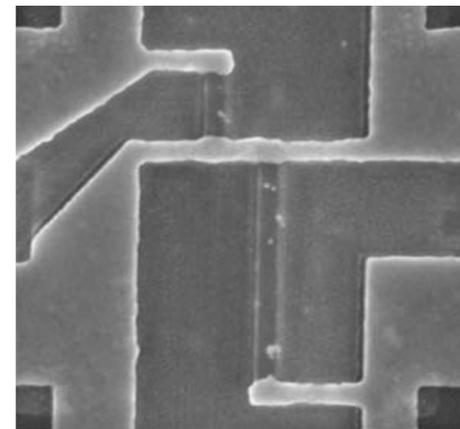
Zweckmäßig von Station zu Station

In einem Ultrahochvakuum, das Staub und den reaktionsfreudigen Sauerstoff aus der Luft von den Proben fernhält, können die Wissenschaftler zunächst durch sogenannte Molekularstrahlepitanie dünnste Schichten herstellen. Dabei verdampft ein Elektronenstrahl das jeweilige Ausgangsmaterial. Damit lässt sich dann eine Probe Atomlage für Atomlage aufbauen. In diesem Teil des Nano-„Spintronics-Cluster-Tools“ beginnt auch der Weg eines Bauteils, das der Jülicher Physiker Julius Mennig „Spinventil“ nennt, weil es Elektronen mit unterschiedlichem Spin räumlich trennen soll.

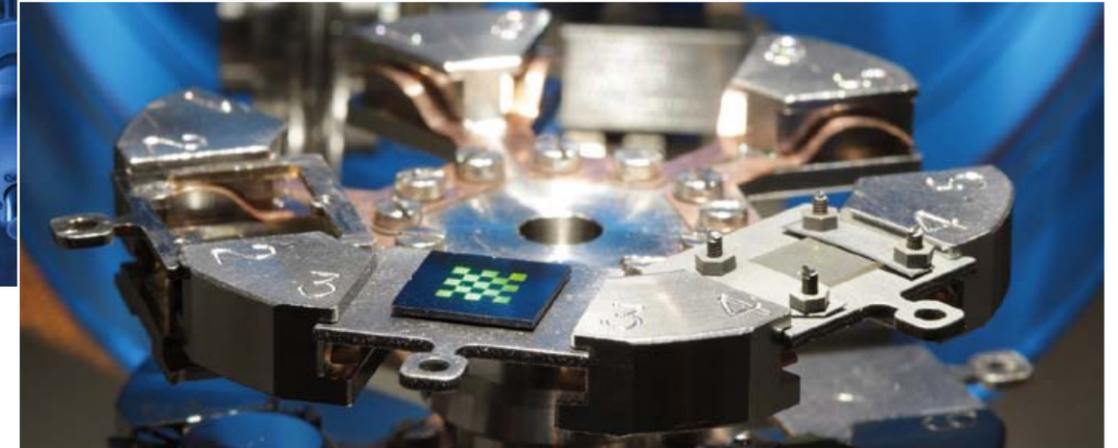
Der Jülicher Doktorand produziert zunächst aus unmagnetischem, leitendem Kupfer eine Grundstruktur. Später kommen an einigen strategischen Stellen noch Schichten von magnetischem

Kobalt hinzu. Ohne die Probe aus dem schützenden Vakuum zu nehmen, kann Mennig sie zur nächsten Station des Universalwerkzeugs schieben. Dort prüft er mit einem Photoemissionsspektrometer und Elektronenbeugung, ob die Schichten fehlerfrei sind. Jedes Staubkorn, jeder Kontakt mit Sauerstoff oder anderen oxidierenden Substanzen würde schon bei diesem Schritt das Aus für den weiteren Prozess bedeuten.

Nur unter dem Elektronenmikroskop zu erkennen: das „Spinventil“. Hell schimmern die unmagnetischen, leitenden Kupferstrukturen. Die beiden senkrechten magnetischen Kobaltstreben erscheinen etwas dunkler.



Sichtfenster erlauben den Blick ins Innere des „Nano-Spintronics-Cluster-Tools“ (links) – zum Beispiel auch auf das silberne Probenkarussell, auf dem bis zu sechs Versuchsstücke Platz finden (unten).



Wiederum ohne die Probe aus der Maschine herausholen zu müssen – somit zeitsparend und abgeschirmt – geht es weiter zu einem äußerst präzisen Schneidewerkzeug: Hier nimmt Mennigs Ventil konkrete Form an. Mit Hilfe eines Ionenstrahls, dessen Schnittbreite nur acht Nanometer misst, verpasst der Physiker seinem winzigen Bauteil zwei Streben aus magnetischem Kobalt. Das Ergebnis prüft der Physiker visuell unter dem Rasterelektronenmikroskop, ebenfalls Teil des Universalwerkzeugs. „Außerdem besitzt das Tool als weitere Station noch ein Rastertunnelmikroskop, das ebenfalls häufig für Analysen benötigt wird“, erläutert Daniel Bürgler.

Im abschließenden Test zeigt sich, ob das Spinventil wie gewünscht arbeitet. Dabei schickt Mennig im Universalgerät mithilfe von winzigen Federkontakten einen elektrischen Strom durch eine der Kobaltstreben. In den magnetisierten Streben sollten linksdrehende Elektronen, deren Spin parallel zur Magnetisierung der Strebe orientiert ist, schneller vorankommen als Elektronen mit entgegengesetztem Spin. Ausgangspunkt dieser Annahme: In den Kobaltatomen sitzt bereits die maximale Zahl linksdrehender

Tradition und Zukunft: Spintronik in Jülich

Die Wissenschaftler Daniel Bürgler und Julius Mennig arbeiten im selben Institut, in dem Nobelpreisträger Prof. Peter Grünberg mit der Entdeckung des Riesenmagnetowiderstands vor rund 20 Jahren die Datenspeicherung mittels Festplatten revolutionierte und die Grundlagen für die Zukunftstechnologie Spintronik legte. Heutzutage forschen die Wissenschaftler um den Leiter des Bereichs „Elektronische Eigenschaften“, Prof. Claus Michael Schneider, daran, Spinströme besser zu kontrollieren und für die Datenverarbeitung in energiesparenden Computerbauteilen einsetzbar zu machen.

Elektronen. Für weitere ist kein Platz in den Atomen. Ein linksdrehendes Elektron sollte daher nahezu ungestört durch die Kobaltstrebe laufen. Dagegen bieten die Kobaltatome den rechtsdrehenden Elektronen, deren Spin entgegen der Magnetisierung ausgerichtet ist, zahlreiche freie Energiezustände, die mutmaßlich wie kleine Fallgruben wirken. Wie viel Prozent gleich rotierender Elektronen sich am Ende der Strebe im Kupfer tatsächlich anreichern, detektiert Mennig mit der zweiten magnetischen Strebe. Dort fließt zwar kein elektrischer Strom, dennoch lässt sich die elektrische Spannung messen, die vom elektrochemischen Potenzial der nach Drehsinn getrennten Elektronen verursacht wird.

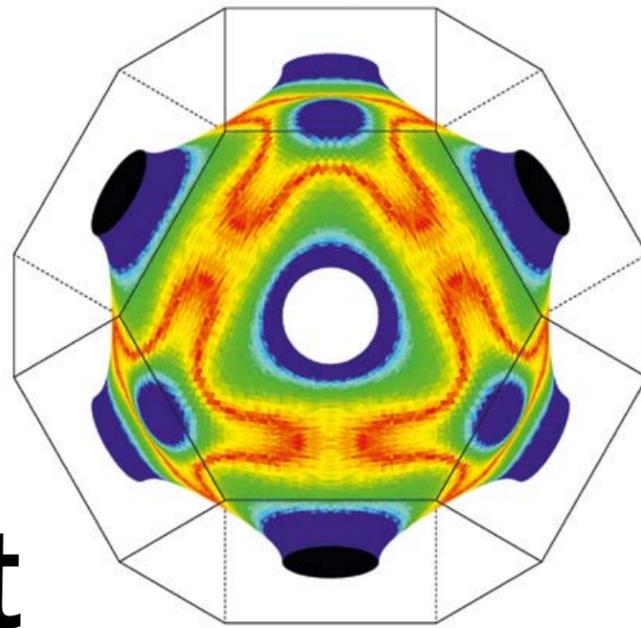
Spinventil funktioniert

„Wir konnten eindeutig zeigen, dass das Ventil funktioniert“, freut sich Mennig. Allerdings möchte er noch keine Prozentzahlen nennen. „Das Ganze ist komplexer, als es sich anhört“, räumt er ein. „Denn die nur 200 Nanometer auseinanderliegenden Streben beeinflussen sich manchmal gegenseitig in ihrer magnetischen Ausrichtung – das erschwert die Kontrolle der Spinrichtung.“ Doch die Spintronik-Forscher sind zuversichtlich, Schwierigkeiten wie diese mithilfe ihres Universalwerkzeugs schneller überwinden und Impulse für die Informationstechnologie der Zukunft geben zu können.

Brigitte Stahl-Busse

Das Nanoechohot

Ein Echohot sendet Schallwellen aus, mit denen sich die Tiefen der Ozeane erkunden lassen. Wie Jülicher Forscher herausgefunden haben, lässt sich auf ähnliche Weise der Elektronenstrom von Rastertunnelmikroskopen nutzen, um tief verborgene Eigenschaften des Atomgitters von Metallen zu untersuchen.



Die Fermi-Fläche von Kupfer, wobei die Farben die Krümmung verdeutlichen. Entlang der Richtung, in der die Fermi-Fläche besonders flach ist (rot), kommen die Elektronen im Festkörper besonders schnell voran. Die Fermi-Flächen liefern sozusagen den „Steckbrief“ eines Metalls oder Halbleiters.

Festkörpers – so ähnlich, wie die reflektierten Schallwellen eines Echohots Informationen über die Beschaffenheit des Meeresgrunds liefern.

Wie aber sehen die Muster aus, die beispielsweise ein Kobaltatom, das in Kupfer eingebettet ist, auf der Kupferoberfläche erzeugt? Wo sie den Schlüssel zur Antwort suchen mussten, war den Jülicher Forschern schnell klar: in den sogenannten Fermi-Flächen. „Diese Konstruktionen, die sich nicht im normalen Raum, sondern in einem davon mathematisch abgeleiteten Raum befinden, legen die elektronischen, magnetischen, optischen und thermischen Eigenschaften eines Metalls oder Halbleiters fest. Somit liefern sie eine Art Steckbrief eines Materials“, sagt Stefan Blügel. Die Fermi-Flächen der Kupferatome bestimmen auch, wie sich die Elektronen – genauer die Elektronenwellen – in Kupfer ausbreiten. „Die Elektronen folgen bestimmten Straßen, deren Richtung und Größe von den Fermi-Flächen festgelegt wird“, erläutert Lounis. „Auf manchen dieser Straßen rasen die Elektronen wie auf einer Autobahn, auf anderen kommen sie nur schleppend vorwärts wie auf einem Feldweg.“

Die Forscher standen somit vor der Aufgabe, mit Hilfe der – für Kupfer bekannten – Fermi-Flächen die „Straßenkarte“ des mit einem Kobaltatom verunreinigten Kupferinneren zu berechnen. Obwohl die Physiker sich dabei auf ein Kupferstück mit Ausmaßen von wenigen millionstel Millimetern beschränkten, benötigten sie für die aufwändigen quantenphysikalischen Rechnungen die geballte Leistung des Jülicher Supercomputers JUMP.

Das Ergebnis: Zumeist sind es „Feldwege“, die vom Fremdatom ausgehen. Doch in manche Richtungen rasen die Elektronen wie auf Autobahnen. Dort, wo die „Autobahnen“ die Kupferoberfläche durchstoßen, werden Muster sichtbar. Allerdings lieferten die Rechnungen der Jülicher Physiker keine Ringe, sondern abgerundete Dreiecke, die aber Ringen sehr ähnlich sahen. Genau diese Dreiecke hatten auch die Göttinger Kollegen gefunden, die mit Kobaltatomen dotierte Kupferproben mit hoher Genauigkeit untersucht hatten.

Wegweisende Erkenntnis

Für reine Materialien wie Kupfer sind die Fermi-Flächen sehr gut bekannt. Anders ist das bei Legierungen, die aus vielen möglichen Kombinationen von einzelnen chemischen Elementen bestehen können. „Unsere Ergebnisse weisen somit den Weg zu einem Verfahren, mit dem man zumindest Teile dieser bisher unbekannt Fermi-Flächen bestimmen kann“, freut sich Lounis. Auch lässt sich nun durch die rastertunnelmikroskopische Untersuchung einer Oberfläche die genaue Lage eines Fremdatoms in der Tiefe eines Metalls ermitteln.

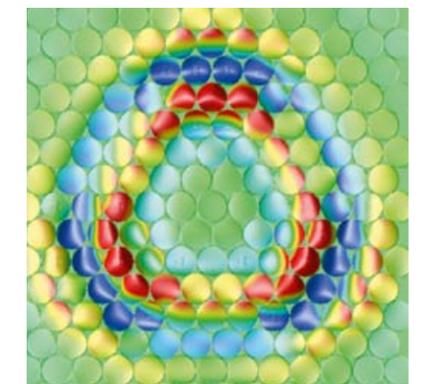
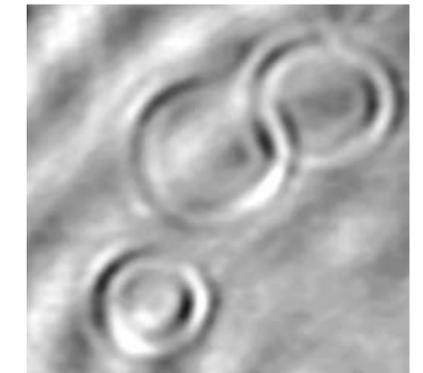
An Ideen für weitere Anwendungsmöglichkeiten der neuen theoretischen Erkenntnisse mangelt es Lounis nicht: „In Zukunft werden wir vielleicht Informationen in Atomen speichern können, die weit unter der Oberfläche stecken.“ Dazu könnte man entlang der „Autobahnen“ mit einem Rastertunnelmikroskop gezielt Ströme in Richtung des jeweiligen Atoms leiten, um damit den Spin, also den Eigendrehimpuls, eines seiner Elektronen umzudrehen. Da der Spin die zwei

Zustände „up“ und „down“ annehmen kann, eignet er sich zur Speicherung von Information. „Das würde alle bisherigen Speicherverfahren alt aussehen lassen“, ist Lounis überzeugt.

Axel Tillemans

Oben: Mit dem Rastertunnelmikroskop aufgenommene „Ringe“, die von Fremdatomen unter der Oberfläche stammen. Nur bei sehr genauer Bildauswertung erkennt man, dass es sich in Wirklichkeit um abgerundete Dreiecksstrukturen handelt.

Unten: Computersimulation der Strukturen.



Große Erkenntnisse haben wir oft Forschern zu verdanken, die sich eingehender mit Phänomenen beschäftigten, die andere links liegen ließen. „Bei der Untersuchung von Festkörperoberflächen mit dem Rastertunnelmikroskop sind schon einer ganzen Reihe von Wissenschaftlern ringförmige Strukturen aufgefallen“, sagt Dr. Samir Lounis. Der theoretische Physiker vom Jülicher

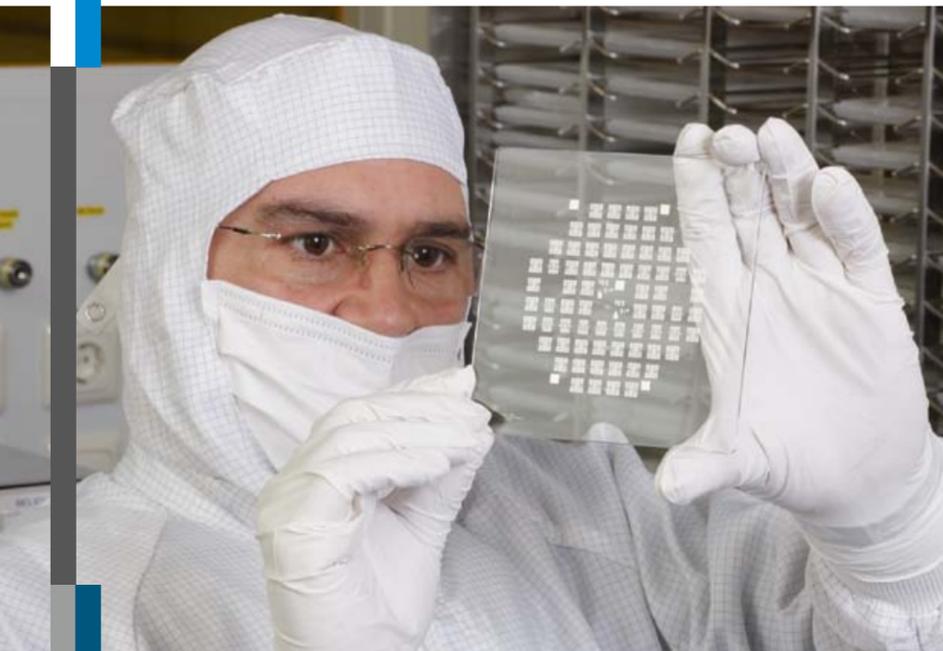
Institut für Festkörperforschung weiter: „Durchaus bekannt war auch, dass Fremdatome im Innern des untersuchten Materials diese Ringe hervorrufen.“ Doch anders als andere Wissenschaftler sahen Lounis und seine Kollegen Prof. Stefan Blügel und Prof. Peter Dederichs in den Strukturen nicht nur eine ärgerliche, auf Verunreinigungen zurückzuführende Störung, sondern eine Informationsquelle über das Innere von Kristallen. Einen entscheidenden Hinweis lieferten ihnen Göttinger Wissenschaftler, die neue experimentelle Untersuchungen durchgeführt hatten.

Informative Wellen

Um die Überlegungen der Jülicher Forscher zu verstehen, muss man wissen: Ein Rastertunnelmikroskop erstellt ein Bild von einer Oberfläche, indem es diese mit einer Spitze abtastet. Dabei fließen Elektronen von der Spitze auf die Oberfläche. Im Festkörper breiten sich diese Elektronen gemäß der Quantenmechanik wie Wellen aus. Daher werden sie wie Wasserwellen an Hindernissen gestreut oder reflektiert und somit teilweise zur Oberfläche zurückgeworfen. Die reflektierten Elektronenwellen enthalten also Informationen über das Innere des

Trickreich zum schnelleren Transistor

Jülicher Forscher haben Methoden entwickelt, mit denen man das Kristallgitter von Silizium weiten kann. Aus dem solchermaßen verspannten Material lassen sich Transistoren für Computerchips herstellen, die deutlich schneller arbeiten als herkömmliche.



Auf einem Quadratzentimeter eines heutigen Computerprozessors drängeln sich bis zu zwei Milliarden winzige Ein- und Ausschalter, die Transistoren. Ihre weitere Miniaturisierung ist eine Möglichkeit, Computer künftig noch schneller zu machen. Doch es gibt auch noch eine andere: In dem Silizium-Grundgerüst eines Transistors

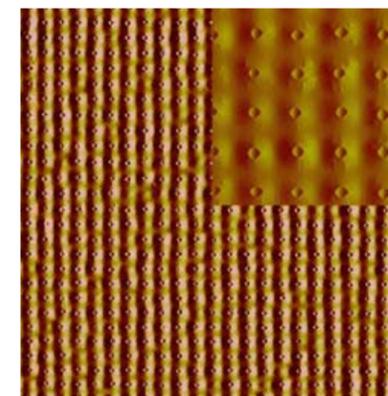
fließen Ladungsträger von A nach B. Ein kleiner Kunstgriff kann den Ladungsfluss beschleunigen. Verzerrt man das Kristallgitter des Siliziums, so bewegen sich die Ladungsträger schneller.

Germanium als Streckgehilfe

Das Team um Prof. Siegfried Mantl vom Jülicher Institut für Bio- und Nanosysteme verspannt das Kristallgitter mit einem Trick. Die Wissenschaftler nutzen den natürlichen Unterschied im Kristallaufbau von Silizium und Germanium. Die Atome sind in beiden Materialien auf die gleiche Weise angeordnet, doch ihr Abstand ist im Germanium 4,2 Prozent größer als im Silizium. Lässt man nun auf einer reinen Germaniumschicht – mehrere hundert Nanometer dick – eine rund zehn Nanometer dünne Siliziumschicht aufwachsen, so passt sich das Kristallgitter der dünneren Schicht an die dickere Schicht an. Die Folge: Das Kristallgitter des Siliziums wird in den Ebenen parallel zur Oberfläche um einige Prozent gedehnt. Indem die Forscher in der dicken Schicht statt reinen Germaniums unterschiedliche Germanium-Silizium-Legierungen einsetzen, gelingt es ihnen sogar, in der dünnen Schicht gezielt verschieden starke Verspannungen einzustellen.

„Das Ziel ist es, eine möglichst gleichmäßige und fehlerfreie verspannte Siliziumschicht über eine sehr große Fläche zu erreichen“, sagt Dr. Bernhard Holländer, Mitarbeiter von Mantl. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert das Projekt mit 8,1 Millionen Euro. Weitere 6,4 Millionen Euro steuern die Verbundpartner Globalfoundries Dresden, Siltronic AG, Aixtron AG, Forschungszentrum Jülich und das Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik bei.

Typischerweise haben die Siliziumscheiben, die in der Industrie als Trägermaterial für die Schaltkreise und Transistoren dienen, einen Durchmesser von 300 Millimetern. Die Jülicher Forscher haben festgestellt, dass bei dieser Größe eine Aufweitung der Kristallstruktur von rund einem Prozent optimal ist. Die Scheiben, die von Fachleuten „Wafer“ genannt werden, biegen sich dann nicht durch, und die Transistoren sind durchschnittlich 20 bis 30 Prozent schneller als herkömmliche Bauelemente.



Auf den Punkt gebracht

Einen etwas anderen Weg beschreitet das Team von Prof. Detlev Grützmacher, Direktor des Jülicher Instituts für Bio- und Nanosysteme. Es arbeitet eng mit Europas größtem Halbleiterhersteller STMicroelectronics zusammen und setzt auf Wafer, auf denen sich verspannte Siliziuminseln wie eine Heerschar winziger Pünktchen verteilen. Bei der Herstellung ätzen die Wissenschaftler zunächst in regelmäßigen Abständen viele Millionen Löcher in den Wafer, jedes davon vier bis acht Nanometer tief. Auf den Wafer scheiden sie anschließend reines Germanium ab, das sich durch Kapillarkräfte genau in den Vertiefungen sammelt und kleine gewölbte Inselchen bildet. Wie ein dünnes Tuch breiten die Forscher nun eine Siliziumschicht über die Waferfläche aus. Überall da, wo eine Germaniuminsel unter dem „Tuch“ steckt, ist eine lokale Wölbung in der Siliziumschicht vorhanden. Entfernen die Jülicher Wissenschaftler in einem weiteren Schritt das Germanium wieder, so erhalten sie sehr gut leitende und zudem gut isolierte Siliziumbrücken. „Mit diesen haben wir erste Transistoren gefertigt, die 15 bis 30 Prozent schneller laufen als Bauteile ohne Verspannung“, freut sich Grützmacher.

Kapillarkräfte sorgen dafür, dass sich die Germanium-Inselchen gleichmäßig und wohl geordnet präsentieren. Auf der stärkeren Vergrößerung oben rechts lässt sich besonders gut erkennen, wie gleichförmig die Inseln sind.



Ganz rechts ein heutiger 300-Millimeter-Wafer. Links ein Silizium-Wafer mit einem Durchmesser von 100 Millimetern, wie er vor rund 30 Jahren in der Industrie Standard war.

Ob letztlich flächig oder punktuell verspanntes Silizium das Rennen macht, ist heute nicht vorherzusagen. „Wir haben jedenfalls bei beiden Methoden darauf geachtet, dass man einen Transistor schafft, der mit heutigen Produktionstechniken kompatibel ist“, betont Grützmacher. Tatsächlich sind die Produktionsbedingungen in der Halbleiterindustrie sehr anspruchsvoll. Höchster Wert wird auf perfekte Strukturen und Schichten, Staubfreiheit und Automatisierbarkeit gelegt. Letztendlich muss garantiert sein, dass alle zwei Milliarden Transistoren eines Prozessors störungsfrei laufen.

Um auf Industrieniveau arbeiten zu können, stehen in Jülich ein Reinraum, vier Beschichtungsanlagen und eine neue Wafer-Reinigungsanlage für 300-mm-Wafer bereit. Die Ausstattung und das Know-how industrieerfahrener Wissenschaftler gewährleisten, dass Strukturen und Grenzflächen mit extrem hoher Reinheit und Perfektion hergestellt werden. Detlev Grützmacher und Siegfried Mantl sind überzeugt, dass die Siliziumära in der Informationstechnologie noch lange nicht zu Ende ist: „Bevor neue Technologien verwirklicht werden, gehört die Zukunft erst einmal neuen Materialkombinationen, die aber alle im Zusammenhang mit Silizium stehen“, sagt Mantl.

Brigitte Stahl-Busse

Einzigartige Einsicht in die Welt der Atome

Mit den Elektronenmikroskopen im Ernst Ruska-Centrum (ER-C) lassen sich unter anderem Nanoelektronik-Materialien untersuchen – Atomposition für Atomposition. Das Supermikroskop PICO, das 2010 ins ER-C einzieht, misst dabei Atomverschiebungen mit einer Genauigkeit von einem Pikometer oder einem milliardstel Millimeter: Das ist Weltrekord!

Ruska-Centrus für Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen (siehe Kasten S. 33) geschieht dies auf eine Weise, die die Veränderungen im Atomgitter des Speichermaterials auf einem Bild erkennbar und damit für jedermann einsichtig werden lassen.

20 Pikometer machen den Unterschied

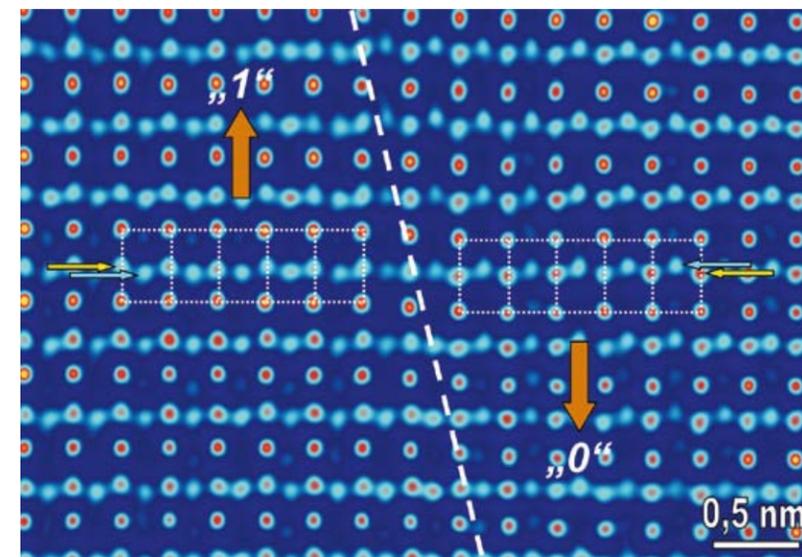
Ferroelektrische Materialien sind permanent elektrisch polarisiert: Anders als üblicherweise bei chemischen Verbindungen fällt bei ihnen auf atomarer Ebene der Schwerpunkt der negativen und der positiven Ladung nicht zusammen – und zwar auch ohne äußeres elektrisches Feld. Ursache dieser Polarisation bei oxidischen Ferroelektrika ist, dass sich die negativ geladenen Sauerstoffionen im Kristallgitter nicht genau in der Mitte zwischen den positiv geladenen Metallionen befinden. Als Speicher eignen sich solche Materialien, weil sich bei ihnen die Polarisation durch ein externes elektrisches Feld in eine andere Richtung umschalten lässt. Dieses Umschalten geschieht dabei immer nur in sehr kleinen Zonen, die in der Fachsprache „Domänen“ heißen. Domänen mit Polarisation in die eine Richtung entsprechen dann dem Zustand „Null“, Domänen mit Polarisation in die entgegengesetzte Richtung dem Zustand „Eins“.



„Auf unseren elektronenmikroskopischen Bildern kann man erstmals sehen, wie die Sauerstoffionen ihre Position im Kristallgitter verändern, wenn die Information mit Hilfe eines äußeren elektrischen Feldes in das Material eingeschrieben wird“, sagt Prof. Knut Urban, einer

Das Ernst Ruska-Centrum (ER-C)

Mit dem ER-C gründeten das Forschungszentrum Jülich und die RWTH Aachen 2004 eine gemeinsame Kompetenzplattform und ein nationales Nutzerzentrum für atomar auflösende Elektronenmikroskopie und -spektroskopie. Das ER-C ist die heute international führende Einrichtung auf diesem Gebiet. Sie wird unter dem Dach der Jülich Aachen Research Alliance JARA betrieben und befindet sich auf dem Jülicher Campus. Die Hälfte der Messzeit der Einrichtung, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie von Bund und Land speziell gefördert wird, geht an Forscher aus Universitäten und Industrie im In- und Ausland.



Jede Information lässt sich als Folge der Zustände „Null“ und „Eins“ ausdrücken. Diese elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt, wie sich die Position von Sauerstoffionen in einem Material verändert, wenn Information eingeschrieben wird.

der beiden Direktoren des ER-C. Die Sauerstoffionen verschieben sich dabei um eine Winzigkeit von rund 20 Pikometern (1 Pikometer ist ein milliardstel Millimeter; das entspricht weniger als einem Hundertstel eines Atomdurchmessers). „Noch vor wenigen Jahren hätte niemand geglaubt, dass man solche Verschiebungen mit einer Genauigkeit von wenigen Pikometern messen kann“, so Urban. Gemeinsam mit Forschern aus Darmstadt und Heidelberg war es dem Jülicher Physiker in den 1990er-Jahren gelungen, ein elektromagnetisches Korrektorelement

zu entwickeln, das ähnlich einer Brille die starken Abbildungsfehler der Objektivlinsen von Elektronenmikroskopen berichtigen kann. Diese Abbildungsfehler hatten bis dahin die erreichbare Schärfe und Auflösung von Elektronenmikroskopen stark eingeschränkt.

Der nächste Schritt

Mit einem solchen Korrektur ausgestattet, können inzwischen auch kommerzielle Elektronenmikroskope atomare Strukturen auflösen. Bei der komplexen Aufgabe, die Korrektoren zu justieren,

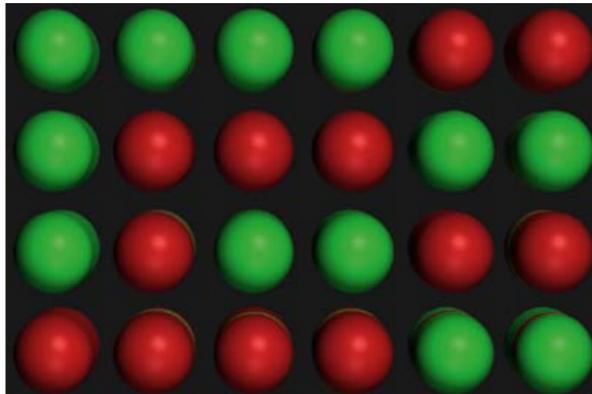
helfen Messverfahren und Computerprogramme aus Jülich, die von der elektronenoptischen Industrie in Lizenz genutzt werden. „Trotzdem sind der technische Aufwand und das Können, um entsprechende Aufnahmen zu erhalten, und die Anforderungen an die Herstellung der nur wenige Atomlagen dicken Präparate gewaltig“, sagt Prof. Joachim Mayer, der zweite Direktor des ER-C. Der Physiker von der RWTH Aachen weiter: „Die erforderliche Leistungsfähigkeit von Gerät und Personal lässt sich nur erreichen, indem Hochschule und außeruniversitäre Forschung ihre Anstrengungen in gemeinsamen Einrichtungen wie dem ER-C bündeln.“ Der nächste Schritt, um an der Weltspitze der Elektronenmikroskopie zu bleiben, ist bereits getan: Ende 2009 erfolgte der erste Spatenstich für einen Erweiterungsbau des ER-C. In ihm wird das neue Supermikroskop PICO unterbracht, das eine rund doppelt so hohe Auflösung ermöglicht wie die bis dahin verfügbaren Geräte. Zugleich steigert sich mit ihm die Genauigkeit, mit der Wissenschaftler Atomabstände und Atomverschiebungen messen können, von fünf Pikometern auf lediglich einen Pikometer. „Damit stoßen wir an die physikalische Grenze der Optik“, erläutert Urban. Allerdings nicht zum Selbstzweck, wie er betont: „Um Bauteile der Nanoelektronik und Nanotechnologie zu kontrollieren und zu optimieren, muss man sie im Pikometer-Bereich analysieren können.“

Frank Frick

Nachrichten

aus der Informationstechnologie

Ultrakaltes Modell



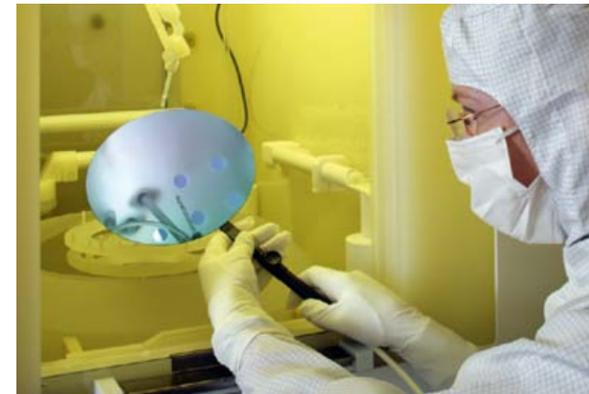
Wissenschaftler aus Mainz, Köln und Jülich haben in der Zeitschrift „Science“ über ein neues Modellsystem aus ultrakalten Atomen berichtet, mit dem sich das Verhalten der Elektronen in einem Festkörper studieren lässt. Die Atome sind dabei in einem optischen Gitter gefangen, das durch Überlagerung mehrerer Laserstrahlen entsteht. Untermauert von Simulationen am Jülicher Supercomputing Centre, konnten die Forscher mit dieser Versuchsanordnung ein spektakuläres Phänomen nachvollziehen, bei dem ein Metall schlagartig seine Leitfähigkeit verliert, wenn die Wechselwirkung zwischen den Elektronen zu stark wird.

Neue Plattform



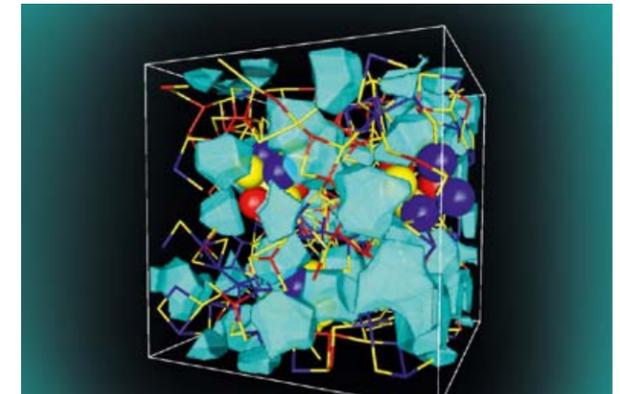
Anfang 2009 ging die zentrale Plattform für Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Nanoelektronik in der Region Jülich/Aachen an den Start, das Peter Grünberg Centrum. Mit der Namensgebung ehrt das Forschungszentrum Jülich seinen Nobelpreisträger, den Physiker Prof. Peter Grünberg. Die Forschungseinrichtung ist eingebunden in die Kooperation mit der RWTH Aachen in der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) und im Bereich Nanoelektronik deutschlandweit die erste, die speziell auch für externe Nutzer zugänglich ist.

Hochmodernes Reinraumzentrum



2010 beginnen in Jülich die Bauarbeiten für die Helmholtz Nanoelectronic Facility (HNF), eine hochmoderne Forschungs- und Entwicklungseinrichtung auf dem Gebiet der Nanoelektronik. Zu ihr gehören Reinräume, die bis zu 10 000-mal reiner sind als Operationssäle in Krankenhäusern. Ausgestattet werden sie mit Geräten, die das HNF zu einer europaweit einzigartigen Einrichtung machen, darunter ein Epitaxie- und Nanofabrikationscluster. Bei dem Cluster handelt es sich um eine zusammenhängende Anlage auf einer Fläche von sechs mal fünfzehn Metern, mit der zunächst künstliche Kristallstrukturen erzeugt und anschließend Schaltkreise im Nanometermaßstab erstellt werden können.

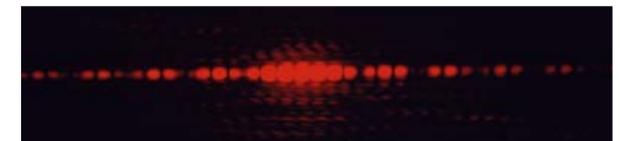
Entschlüsselte Struktur



Ein deutsch-japanisches Forscherteam unter maßgeblicher Jülicher Beteiligung konnte die lange umstrittene Struktur eines Materials überzeugend klären, das in DVDs und anderen optischen Datenspeichern verwendet wird. Dieses Material lässt sich zwischen zwei verschiedenen Zuständen umschalten, einem regelmäßigen „kristallinen“ und einem eher ungeordneten „amorphen“. Nun weiß man, wie dieses Schalten auf atomarer Ebene abläuft, und kann gezielt nach besseren Speichermaterialien suchen. Möglich wurde die Entschlüsselung der Struktur unter anderem durch Simulationen auf dem Jülicher Supercomputer JUGENE.

Ultraschnell messen

Forscher aus Jülich, Kaiserslautern und Boulder, USA, haben eine neue Methode entwickelt, um ultraschnelle magnetische Vorgänge zu verfolgen, die entscheidend sind für die Schreibgeschwindigkeit künftiger magnetischer Datenspeicher. Ausgangspunkt des Verfahrens ist ein Femtosekundenlaser, dessen Lichtblitze in das Edelgas Neon geleitet werden. Dabei entstehen Pulse aus weicher Röntgenstrahlung, die nur rund zehn Femtosekunden (billiardstel Sekunden) lang sind. Treffen sie auf eine Probe, erlaubt das resultierende Beugungsmuster Rückschlüsse



auf deren Eigenschaften. Zu den Vorteilen des Verfahrens, das ohne Großgeräte auskommt, gehört neben der extrem feinen zeitlichen Auflösung auch eine räumliche Auflösung im Nanometer-Bereich.

Cooler Speicher

Wissenschaftler aus Jülich und Slowenien haben gezeigt, dass sich digitale Daten auch ohne elektrische oder magnetische Felder aufzeichnen lassen. Sie speicherten Informationen von einem Byte Länge in strukturell komplexen Festkörpern, in denen die atomaren magnetischen Momente keinen Grundzustand annehmen können. Dazu kühlten Sie die Proben kontinuierlich bis zu sehr tiefen Temperaturen ab, legten zwischendurch aber definierte Pausen ein, in denen sie die Temperatur konstant hielten. Dadurch entsteht im Festkörper eine charakteristische auslesbare Anordnung von magnetischen Momenten. Das zum Patent angemeldete neue Speicherprinzip könnte sich künftig noch auf sehr unterschiedlichen Gebieten als nützlich erweisen: etwa bei der sicheren Datenübertragung oder bei der Analyse von Staub aus dem Weltall.

IMPRESSUM

Forschen in Jülich Magazin des Forschungszentrums Jülich, ISSN 1433-7371 **Herausgeber:** Forschungszentrum Jülich GmbH | 52425 Jülich **Konzeption und Redaktion:** Dr. Frank Frick, Dr. Anne Rother (v.i.S.d.P.), Kosta Schinarakis **Autoren:** Dr. Wiebke Rögener, Dr. Frank Frick, Dr. Axel Tillemans, Brigitte Stahl-Busse **Design und Layout:** Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich **Bildnachweis:** Forschungszentrum Jülich (Titelbild, S. 2 - 4, S. 7 - 15, S. 16 li. u., S. 18/19, S. 22 - 27, S. 28 o., S. 29, S. 30 u., S. 31 u., S. 33, S. 34 o. re., S. 35 o. li.), Hermes Verbund (S. 6 o. li.), Fotolia (S. 6 o. re., S. 16 o., S. 28 M., S. 34 u.), Mauritius (S. 20, S. 35 u.), AMD (S. 30 o.), Siltronic (S. 31 o.), FEI Company (S. 32), RWTH Aachen (S. 17 u.), Martin Lux (S. 21), Max-Planck Institut für Quantenoptik (S. 34 o. li.) **Kontakt:** Stabsstelle Unternehmenskommunikation | Telefon 02461 61-4661 | Telefax 02461 61-4666 | info@fz-juelich.de **Druck:** Schloemer und Partner GmbH **Auflage:** 8 000



Mitglied der:

