

# bild der wissenschaft plus



## DER GROSSE WURF

WIE NANOTECHNOLOGIE EIN LAND ZUKUNFTSFÄHIG MACHT



# miniabo

## bild der wissenschaft jetzt testen!

Holen Sie sich jetzt die nächsten 3 Ausgaben von bild der wissenschaft frei Haus.  
35% Preisvorteil und die Wetterstation sind Ihnen sicher!



**gratis**

### Digitale Wetterstation

Ein Blick genügt:  
Die digitale Wetterstation bietet neben einem attraktiven Äußeren viele nützliche Funktionen wie Wettertrend, Luftdruck, Temperatur und Alarm mit Nachweckautomatik. Inklusive Batterien.  
Maße: 8,1 x 15,1 x 4,5cm.

**Kennen lernen  
lohnt sich!**

- 3 Ausgaben mit 35% Preisvorteil
- Lieferung pünktlich und portofrei
- GRATIS für Sie: digitale Wetterstation
- keine weitere Verpflichtung

Coupon ausfüllen und einsenden an:  
**bild der wissenschaft Leserservice**  
Heuriedweg 19 · 88131 Lindau  
Oder noch schneller bestellen per  
**Telefon 0 18 05/26 01 55**  
**Telefax 0 18 05/26 01 56**

14ct/min aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreise können abweichen  
**leserservice@wissenschaft.de**

Weitere Angebote finden Sie auch im Internet: [direktabo.de](http://direktabo.de)  
Abo-Vertrieb: Güll GmbH, Heuriedweg 19, 88131 Lindau.  
Geschäftsführer: Ernst G. Wallaschek, Dr. Gerhard Wölfe

**Ja**, bitte schicken Sie mir 3 Ausgaben von **bild der wissenschaft** mit über **35% Preisvorteil** für nur € 13,50 (A: € 15,60; CH: sfr 25,20;\*). Als Dankeschön erhalte ich die **digitale Wetterstation GRATIS** dazu. Wenn ich danach nicht ständiger Bezieher werden möchte, teile ich Ihnen dies nach Erhalt der 3. Ausgabe mit. Andernfalls erhalte ich bild der wissenschaft weiterhin monatlich mit über 8% Preisvorteil zum Jahrespreis von zzt. € 75,60 (A: € 86,40; CH: sfr 143,40; \*weitere Auslandspreise auf Anfrage) und dem Recht, jederzeit zu kündigen. **[ABMS0608]**

**Widerrufsrecht:** Mir ist bekannt, dass ich die Bestellung innerhalb von 14 Tagen bei bild der wissenschaft, Leserservice, Heuriedweg 19, 88131 Lindau, widerrufen kann. Die Frist beginnt mit der Absendung der Bestellung (Poststempel).  
Konradin Medien GmbH, Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen,  
Geschäftsführer: Katja Kohlhammer, Peter Dilger, Amtsgericht Stuttgart,  
HRB 222257, www.konradin.de

Name, Vorname
Straße, Nr.
PLZ Ort
Mein Zahlungswunsch: <input type="checkbox"/> per Bankeinzug <input type="checkbox"/> gegen Rechnung
BLZ Konto-Nr.
Bank
Datum, Unterschrift



## Die Neuentdeckung der Welt

**HELLE KLEIDUNG IST TRENDY.** Aber man sieht dort jeden Fleck. Lacke schillern prächtig. Doch wehe, sie bekommen Kratzer. Arzneimittel lindern Krankheiten – leider oft mit unliebsamen Nebenwirkungen. Solarzellen erzeugen umweltfreundlichen Strom. Doch noch ist die Photovoltaik für einen breiten Einsatz viel zu teuer. Was wäre, wenn Schmutz- und Kratzempfindlichkeit, Nebenwirkungen oder Kosten deutlich verringert werden könnten? Klare Antwort: Solche Produkte würden sich von der Konkurrenz ab- und somit am Markt durchsetzen. Möglich machen könnte all dies eine einzige Technologie – die Nanotechnologie. Ihre Funktionsstrukturen messen weniger als 100 Nanometer – sie liegen also unter einem zehntausendstel Millimeter. In der Nanowelt bekommen atomare Kräfte und molekulare Reaktionen einen völlig neuen Stellenwert – mitunter einen so starken, dass die neuen Materialeigenschaften qualitativ deutlich über den bisherigen liegen. Die Umsätze, die sich mit nanostrukturierten Materialien machen lassen, gehen in die Hunderte von Milliarden Euro.

Bei der Erforschung der Nanowelt sind die USA, Japan, Europa – und da vor allem Deutschland – führend. Doch in der Vergangenheit hat von den hierzulande erforschten Grundlagen oft die Industrie anderer Länder profitiert. Computer, Raketen, Fax, MP3-Player und bald vielleicht auch der Transrapid sind unerfreuliche Beispiele.

In Baden-Württemberg hat man aus diesen Umsetzungsschwächen gelernt. So unterstützt die Landesstiftung Baden-Württemberg das Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“, in dem Wissenschaftler verschiedener Disziplinen mit Partnern aus Wirtschaft und Politik kooperieren. Ziel ist, Grundlagenforschung auf Weltspitzenniveau zu fördern. Gleichzeitig haben die Wissenschaftler von Anfang an die wirtschaftliche Anwendung im Auge. Erkenntnisse werden rasch zu Patenten.

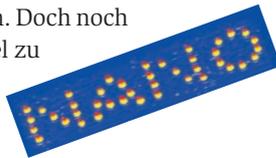
Im Jahr 2000 ins Leben gerufen und mit dem Erlös aus dem Verkauf des Landesanteils der zur EnBW fusionierten Energieversorger Badenwerk und EVS gut abgepolstert, ist die Landesstiftung Baden-Württemberg die zweitgrößte deutsche Stiftung nach privatem Recht (Stiftungsvermögen 2007: 2,8 Milliarden Euro). Neben Bildung, sozialer Verantwortung und Kultur fördert sie in erster Linie Forschung und Wissenschaft. Über 10 Millionen Euro hat die Stiftung bisher allein in die Nanoforschung gesteckt. Was dadurch bewegt wird, zeigt diese Sonderausgabe von bild der wissenschaft – mit vielen Bildern, die der Augsburger Fotograf Bernd Müller produzierte. Wenn Sie noch mehr erfahren wollen oder direkten Kontakt zu den Forschern suchen, hilft Ihnen [nano.bdwd.de](http://nano.bdwd.de) weiter. Dort treffen Sie dieses Supplement internetgerecht aufbereitet an.

- 4 UNSICHTBARE NEUE WELT**  
Die Nanotechnologie ist der Schlüssel zu vielen neuen Produkten und technischen Anwendungen.
- 9 IMPRESSUM**
- 10 ATOME STREICHELN**  
Rastermikroskopie: Fenster ins Reich der Atome
- 12 „WELTSPITZE ZUSAMMEN MIT USA UND JAPAN“**  
Wissenschaftsminister Frankenberg und Wirtschaftsminister Pfister über die Chancen durch „Nano“
- 16 ARCHITEKTEN DES ALLERKLEINSTEN**  
Wie Forscher filigrane Nanolandschaften erschaffen
- 20 KREATIVES GEFLECHT**  
Das Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“
- 22 BLAULICHT AUS DEM SÄULENWALD**  
Winzige Zäpfchen für bessere und billigere Laser
- 24 MUSKELN AUS GOLD**  
Poröse Edelmetalle wirken wie künstliche Muskeln.
- 26 LEGO FÜR ERWACHSENE**  
Molekulare Bausteine, die sich selbst arrangieren
- 28 WIE GUT IST DER STANDORT SÜDWEST?**  
Analyse der Nanoforschung in Baden-Württemberg
- 30 MIT TARNKAPPEN GEGEN KREBS**  
Verpackte Wirkstoffe: anschleichen und attackieren
- 34 RECHNEN MIT RÖHRCHEN**  
Makkaroni-Moleküle statt Silizium in Transistoren
- 36 VÖLLIG NEUE DIMENSIONEN**  
Bosch-Manager Siegfried Dais im Interview
- 38 PANIK BEI 73 NANOMETERN**  
Was man von Zellen für neue Implantate lernen kann
- 40 MIT VIREN STRIPPEN ZIEHEN**  
Tabakschädlinge als Gussform für Nanodrähte
- 42 GEFANGEN IM QUANTENPUNKT**  
Trickreiche Technik für superschnelle Computer

K. Mellenthin für bdw



Wolfgang Hess, Chefredakteur



A. Rief/Inauritus Images; Montage: K. Marx



Der große Wurf: Die Erkenntnisse der Nanoforscher könnten viele Bereiche von Wirtschaft und Alltag revolutionieren. Für die kommenden Generationen wird das Leben ohne „Nano“ kaum noch vorstellbar sein.

# UNSICHTBARE NEUE WELT



Die Technik des 21. Jahrhunderts trägt die Vorsilbe „Nano“. Davon sind neben Trendforschern und Börsianern auch viele Wissenschaftler überzeugt – aus guten Gründen.

Text: Frank Frick

**523-MAL SCHAFFTEN** die Begriffe „Nanotechnologie“ oder „Nanotechnik“ zwischen 2000 und Anfang 2008 den Sprung in die Frankfurter Allgemeine Zeitung – deutlich häufiger als die „Pharmaforschung“ (83-mal) und selbst als „Dieter Bohlen“ (230-mal). Das verdankt die Technologie, deren Vorsilbe sich vom griechischen Wort „nano“ für Zwerg ableitet, riesigen Erwartungen: Sie soll den Alltag einmal ähnlich revolutionieren wie Dampfmaschine oder Computer. Dabei, so hoffen Unternehmen, gibt es viel Geld zu verdienen – ein heißes Thema also auch für Wirtschaftsmedien. Doch selbst in Feuilletons und Kulturmagazinen findet die Nanotechnologie dank der Visionen einiger Science-Fiction-Autoren Widerhall.

„Viele Menschen verknüpfen daher mit der Nanotechnologie ausschließlich Zukunftsaussichten. Kaum jemandem ist bewusst, dass jeder von uns ihr heute schon täglich begegnet“, sagt Prof. Thomas Schimmel, Sprecher des Kompetenznetzes „Funktionelle Nanostrukturen“ in Baden-Württemberg. So enthalten Leuchtdioden (LED) raffinierte, nanotechnologisch erzeugte Schichtsysteme, die Strom sehr effizient in Licht umwandeln. Doch LEDs sind nicht nur energiesparend, sondern leuchten bei einem Stromstoß auch schneller auf als herkömmliche Lampen. Daher kommen sie in hochwertigen Autobremsslichtern zum Einsatz. Der nachfolgende Fahrer hat aufgrund der gewonnenen Zeit eine größere Chance, sein Fahrzeug noch rechtzeitig zum Halten zu bringen.

Sollte es trotzdem zu einem Auffahrunfall bei geringer Geschwindigkeit kommen, so schützen Stoßstangen aus Kunststoff vor größeren Blebschäden. „Geschick verteilte, gummiartige Bereiche auf der Nanometerskala sind dafür verantwortlich, dass der eigentlich harte und spröde Kunststoff der Stoßstange auch bei niedrigen Temperaturen ausreichend elastisch ist und den Aufprall auffangen kann“, sagt Schimmel, der an der Universität Karlsruhe und dem Forschungszentrum Karlsruhe lehrt und forscht.

Manche abrupten Bremsmanöver würden sich durch vorausschauendes Fahren vermeiden lassen. Das fällt leichter, wenn Brillengläser und Windschutzscheiben sauber sind. Auch dazu kann Nanotechnologie etwas beitragen: Einige teure Brillengläser sind mit einer Schicht ausgerüstet, die den Schmutz dank eingebauter Nanoteilchen abweisen. An selbstreinigenden Windschutzscheiben wird noch intensiv geforscht. Rund um das Automobil gibt es viele weitere nanotechnologisch optimierte Produkte, darunter kratzfeste Lacke, abriebbeständige Reifen und effiziente Abgaskatalysatoren.

Nach Angaben des Düsseldorfer VDI Technologiezentrums hat der weltweite Umsatz mit Nanotechnologie die 100-Milliarden-Euro-Marke längst passiert. Und allein in Deutschland hängen direkt von ihr bereits über 50 000 Arbeitsplätze ab. Trotz Medienbegleitung zieht die Nanotechnologie dabei eher still in unseren Alltag ein. Schimmel

Thermochromes Glas reguliert den Lichteinfall.

Spezielle Fassadenfarbe schützt vor Korrosion.

Füllstoffe im Gummi machen Reifen robust.



Fahrradrahmen sind federleicht und stabil.

Technik für heute und morgen: Die Nanotechnologie ist nicht nur eine Vision für die Zukunft. Auch schon jetzt steckt „Nano“ in vielen Dingen des Alltags.

Schnelle Chips verleihen Handys enorme Power.

Transparente Solarzellen liefern elektrischen Strom.

Leuchtdioden erzeugen das Licht der Ampel.

Eine Imprägnierung schützt vor Flecken.

Sonnenschutzcremes blockieren das UV-Licht.

Intelligente Kleidung überwacht den Puls.



**Der Karlsruher Physiker Thomas Schimmel ist ein international renommierter Experte für Nanotechnik.**

B. Müller

**Magnetische Kräfte zwischen Atomen sollen sich künftig zum Rechnen nutzen lassen.**

nennt dafür ein weiteres Beispiel: „Nahezu unbemerkt verwandelt sich gerade die Mikroelektronik zur Nanoelektronik.“ Denn die Strukturen auf den massengefertigten Chips in Computern, Handys & Co sind inzwischen meist kleiner als ein Mikrometer (tausendstel Millimeter) und oft sogar als 100 Nanometer (100 millionstel Millimeter).

Ein Bündel aus mehreren 100 Millionen Nanodrähten hat eine kleinere Querschnittsfläche als ein menschliches Haar. Oder anders betrachtet: Ein Nanometer entspricht dem Durchmesser von drei bis vier Atomen. In dieser Dimension gelten andere Regeln als in der sichtbaren Welt. Es greifen die Gesetze der Quantenmechanik, die den gesunden Menschenverstand strapazieren. Danach sind Teilchen gleichzeitig Wellen. Sie befinden sich zu einer bestimmten Zeit nicht an einem bestimmten Ort. Außerdem haben viele Materialien in Nanogröße völlig andere Eigenschaften als sonst, verändern etwa Farbe, Härte oder elektrische Leitfähigkeit.

Daher ist „nano“ nicht bloß kleiner als „mikro“, sondern anders klein. Und Nanotechnologie ist mehr als das weitere Schrumpfen von elektronischen Bauteilen, das man seit Jahrzehnten gewöhnt ist. Ein Bonmot des Schweizer Physikers und Nobelpreisträgers Heinrich Rohrer verdeutlicht das: „Nanotechnologie bedeutet nicht kleiner, schneller, billiger. Nanotechnologie heißt: intelligenter, intelligenter, intelligenter.“

Ein Schild mit der Aufschrift „Hier betreten Sie Nano-Neuland“ hat die Natur nicht aufgestellt. Das lässt Forschern und Unternehmen mit ihren Marketingexperten Platz für Etikettenschwindel. „Klar: Jeder kann ent-

decken, dass Moleküle Abmessungen im Nanometerbereich besitzen“, schmunzelt Physiker Schimmel. „Doch darum geht es in der Nanotechnologie eben nicht.“ Noch in anderer Hinsicht ist der Begriff Nanotechnologie etwas unscharf: Unter seinem Dach versammeln sich unterschiedlichste Forschungsprogramme. Sie zielen etwa darauf, Krebs erfolgreicher zu bekämpfen, neue Materialien, Datenspeicher und optische Bauteile zu entwickeln oder eine umweltschonendere, effizientere Energiegewinnung zu ermöglichen. Daher hat der Darmstädter Wissenschaftsphilosoph Alfred Nordmann vorgeschlagen, stets von Nanotechnologien im Plural zu sprechen. Tatsächlich kann

man Chancen und Risiken konkreter diskutieren, wenn man nicht „die Nanotechnologie“ betrachtet, sondern getrennt voneinander Nanoelektronik, Nanobiologie und Nanomaterialwissenschaft.

#### **VIEL GELD FÜR DIE RISIKOFORSCHUNG**

„Von der Nanoelektronik beispielsweise geht wohl kaum eine Gesundheitsgefahr aus“, ist Schimmel überzeugt. Und weiter: „Dagegen sind die Bedenken, Nanopartikel könnten etwa beim Einatmen auch unerwünschte Wirkungen auf Menschen und Umwelt haben, durchaus begründet.“ Nanoteilchen in der Atemluft sind aufgrund ihrer Kleinheit in der Lage, tief in die Lunge vorzustoßen und von da über das Blut fast ungefiltert in Körperzellen einzudringen. Der Körper wehrt sich gegen die Invasion, Entzündungen oder Allergien können die Folgen sein. Wie groß die Gefahren tatsächlich sind, wird intensiv untersucht: Das Bundesforschungsministerium fördert die Forschung, an der auch die Industrie beteiligt ist, bis 2009 mit acht Millionen Euro. Bisher steht für die meisten Experten fest: Sicherheitsvorkehrungen, wie sie in der chemischen Industrie üblich sind, machen die Risiken bei der Nanoteilchen-Produktion beherrschbar. In Materialien finden sich Nanopartikel meist in gebundener Form, sodass Verbraucher mit einzelnen Teilchen gar nicht in Berührung kommen.

Laut den Schreckensvisionen einiger Autoren und Vordenker gehen von Nanopartikeln in Form künstlicher Nanowesen noch ganz andere Bedrohungen aus. In Michael Crichtons Bestseller „Beute“ schließen sich Nanomaschinenorganismen zu Schwärmen zusammen, die Menschen jagen. In einer Vision des Ingenieurs Eric Drexler bedroht „Graue

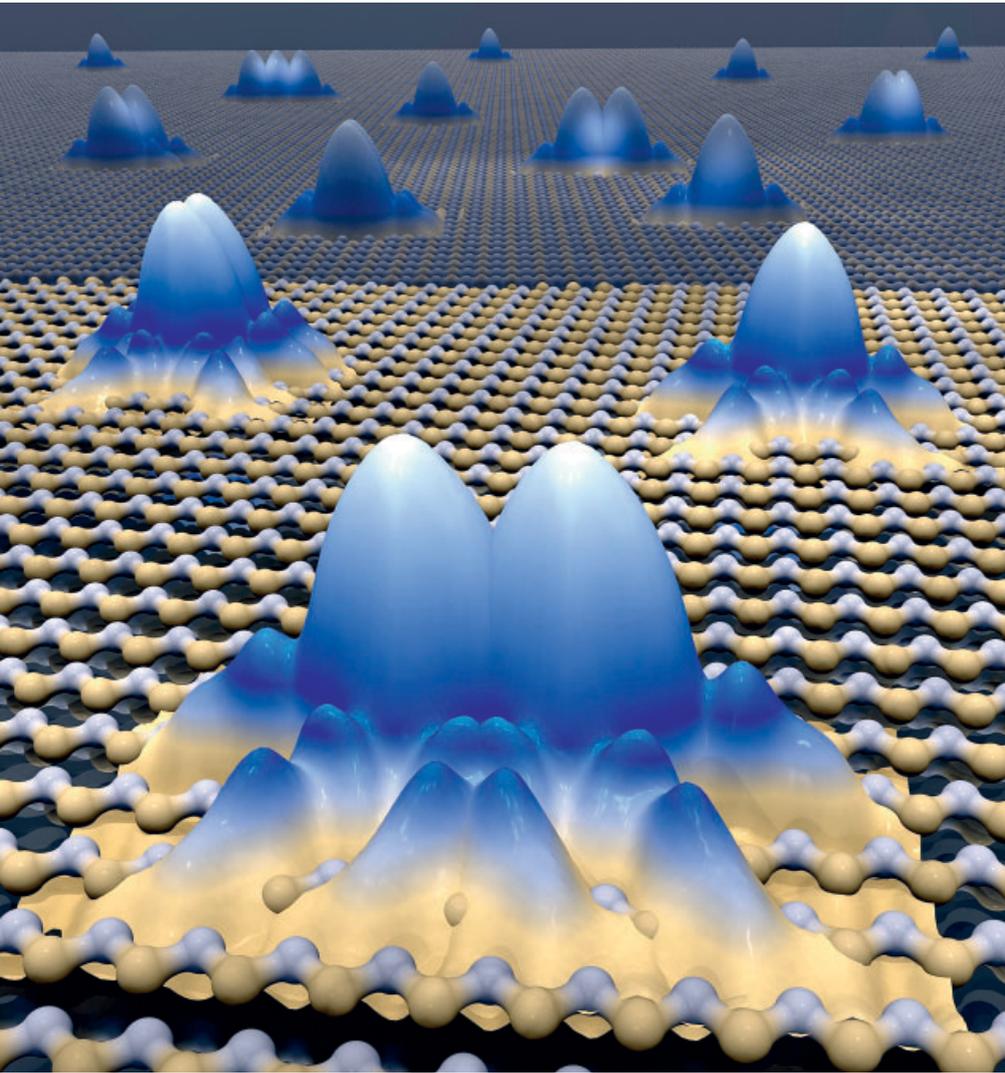
#### **LIZENZ ZUM GELDDRUCKEN**

Weltweite Umsätze mit Nano-Produkten in Billionen US-Dollar



Die Umsätze mit Nanotechnologie steigen rasch – bis 2014 laut einer Prognose von Lux Research auf 2,9 Billionen Dollar.

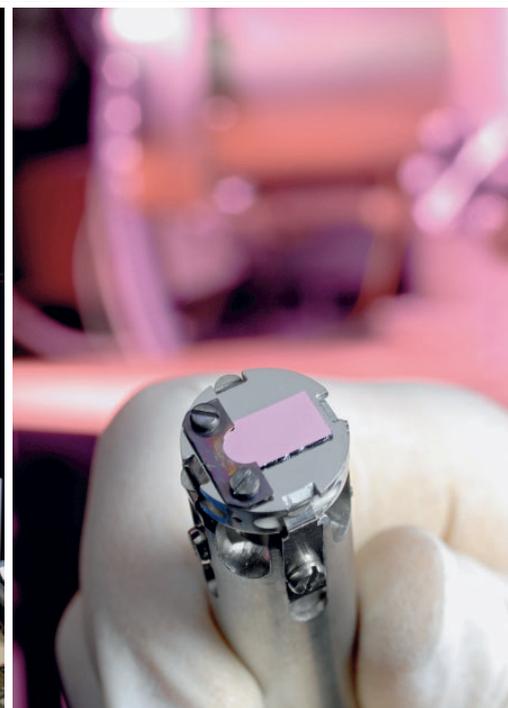
Grafik: K. Marx; Quelle: Lux Research



## SCHWAMMIGER BEGRIFF

- Das Wort „Nanotechnologie“ ist ein dehnbare Begriff. Eine eindeutige Übereinkunft, was damit gemeint ist, gibt es nicht. Eingebürgert hat sich jedoch, das Wort Nanotechnologie auf eine ähnliche Weise festzulegen, wie es die Wissenschaftler des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag tun. Demnach
- befasst sich Nanotechnologie mit Strukturen, die in wenigstens einer Dimension kleiner als 100 Nanometer sind.
- macht sich Nanotechnologie charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Grenzbereich zwischen der atomaren Ebene und mindestens mikrometergroßen Gebilden auftreten.
- bezeichnet Nanotechnologie die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Strukturen im Nanomaßstab.

Eine Besonderheit der winzigen Nanopartikel und -strukturen sind sehr starke Oberflächeneffekte. Hat ein Teilchen eine Größe von 30 Nanometern, befinden sich rund fünf Prozent seiner Atome an der Oberfläche – bei einem Durchmesser von 10 Nanometern sind das bereits 20 Prozent, bei 1 Nanometer sogar 50 Prozent aller Atome. Dieser enorme Einfluss der Oberfläche lässt Nanopartikel im Vergleich zu makroskopischen Objekten aus demselben Material chemisch wesentlich stärker reagieren und verleiht ihnen zudem ganz neue Eigenschaften – beispielsweise eine größere Härte oder eine höhere Leitfähigkeit. Ein weiteres Merkmal von Nanoteilchen ist der Einfluss von quantenphysikalischen Phänomenen, die bei einer Größe von weniger als etwa 50 Nanometern gegenüber den Effekten der klassischen Physik dominieren.



B. Müller (2); Yazdani & Hombaker/SPL/Agentur Focus (oben)

Einblicke in die Nanowelt der atomaren Dimension bietet ein Elektronenmikroskop (links). Rechts: Siliziumdioxid-Probe zur Herstellung von Nanostrukturen.

Schmiere“ die Welt, eine Wolke aus missratenen Nanorobotern. Doch solche Szenarien nimmt kaum ein Wissenschaftler ernst.

Realen Risiken der Nanotechnologie und Schreckensfantasien stehen zahlreiche Verheißungen gegenüber. Auch da gilt, dass man nicht alles für bare Münze nehmen darf. So sagen die Marktforscher von Lux Research voraus, dass 2014 mit der Nanotechnologie weltweit 2,9 Billionen US-Dollar umgesetzt werden. Der Vorsitzende des bayrischen Landesverbandes der chemischen Industrie, Dr. Rudolf Staudigel, taxierte dagegen kürzlich den Weltmarkt im Jahr 2015 auf 750 Milliarden Euro, was nach derzeitigem Kurs etwa 1,2 Billionen Dollar entspräche. Unabhängig von solchen Abweichungen, sind die im Raum stehenden Summen auf jeden Fall gewaltig. Auf sie kommt man allerdings nur, wenn man mit dem Wert des Endprodukts statt mit dem bloßen Materialwert der Nanokomponente rechnet. Das heißt etwa: Angesetzt werden der Wert für transparente Sonnencremes und nicht die paar Cent für die enthaltenen Titandioxid-Nanopartikel, die vor der gefährlichen UV-Strahlung schützen. Weil die Nanokomponente über die Wettbewerbsfähigkeit des Produkts entscheidet, eine durchaus berechnete Kalkulation. „Die Nanotechnologie hat eben eine große Hebelwirkung“, kommen-

tiert Schimmel. „Nanoprodukte an sich haben zwar meist einen relativ geringen Wert, doch ohne sie wären heute schon etliche Produkte vom PC bis zum Auto nicht mehr konkurrenzfähig.“

### COMPUTER ALS TREIBENDE KRAFT

Eine treibende Kraft der Nanotechnologie ist die umsatzstarke Computerindustrie, von deren Fortschritt längst alle anderen Industriezweige abhängen. Sie erhofft sich von den Nanoforschern, dass sie die Grenzen der Transistortechnik überwinden, die derzeit in Computerprozessoren steckt. Zwar sagen Fachleute schon seit rund 40 Jahren voraus, dass diese Technik in je 10 bis 15 Jahren ausgedient hat. Doch heute hat die Elektronikindustrie tatsächlich Grund anzunehmen, dass sich die stetige Verkleinerung der Chipstrukturen nicht fortsetzen lässt: Wenn die Isolatorschicht im Transistor nur noch wenige Atomlagen misst, stören Quanteneffekte die Funktion. Dann helfen nur noch neue Prozessorarchitekturen, die mit der Nanotechnologie realisiert werden sollen.

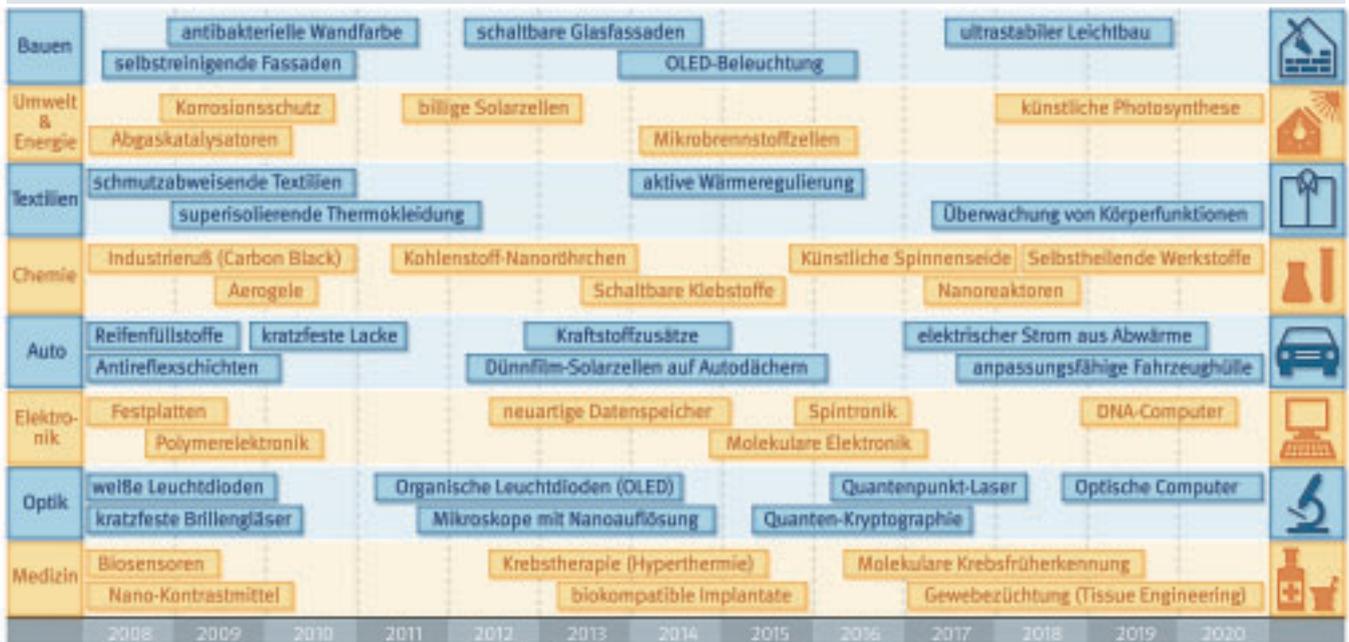
Die Forscher verfolgen diverse Konzepte: Im Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“ in Baden-Württemberg arbeiten sie an einer neuartigen Elektronik, bei der einzelne Atome als Schalter fungieren. Mit Erfolg: So haben Wissenschaftler der Uni Karlsruhe



den ersten atomaren Transistor entwickelt. „Durch das kontrollierte Umlagern eines einzigen Silber-Atoms wird ein elektrischer Stromkreis geöffnet und geschlossen“, erklärt Schimmel. Das Nanobauteil verbraucht nur ein Zehntausendstel des Stroms, den ein Transistor in einem heutigen Prozessor

## DIE NANOWELLE ROLLT

Beispiele für bestehende und zu erwartende Nano-Produkte und -Anwendungen



Grafik: K. Marx, Quelle: BMBF, VDI Z



Scurrile Gebilde: Mit ihrem Arsenal an Werkzeugen formen die Forscher eine Vielzahl von Objekten im Nanomaßstab.

B. Müller

## MEHR ZUM THEMA

### LESEN

Forschungsergebnisse im Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“ (Englisch): Hrsg.: Landesstiftung Baden-Württemberg, Thomas Schimmel, Hilbert von Löhneysen, Matthias Barczewski, Christian Obermair  
**NANOTECHNOLOGY – PHYSICS, CHEMISTRY, AND BIOLOGY OF FUNCTIONAL NANOSTRUCTURES**  
 Schriftenreihe der Landesstiftung Baden-Württemberg Bd. 32, Stuttgart 2008  
 ISBN 978-3-00-024461-2

### INTERNET

Homepage des Kompetenznetzes mit Informationen zu allen Projekten sowie den Kontaktdaten der Wissenschaftler:  
[www.nanonetz-bw.de](http://www.nanonetz-bw.de)

Hintergründe zu den vielfältigen Aktivitäten der Landesstiftung Baden-Württemberg:  
[www.landesstiftung-bw.de](http://www.landesstiftung-bw.de)

Onlineversion dieses bdw-Sonderhefts mit zusätzlichen Infos wie kurzen Videoclips zu einzelnen Projekten unter den Adressen:  
[bdw-landesstiftung-bw.de/nano](http://bdw-landesstiftung-bw.de/nano)  
[nano.bdww.de](http://nano.bdww.de)

Nanotechnologie in Deutschland – auf der Website des VDI Technologiezentrums:  
[www.nano-map.de](http://www.nano-map.de)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe:  
[www.isi.fraunhofer.de](http://www.isi.fraunhofer.de)

Forschen in Baden-Württemberg – Infos des Landesregierung:  
[www.landesregierung-bw.de/de/forschen/86211.html](http://www.landesregierung-bw.de/de/forschen/86211.html)

Umfassende Infos zur Nanotechnologie und Broschüren zum Herunterladen beim BMBF:  
[www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php](http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php)

Rastersondenmikroskop zum Selberbauen der Universität Münster:  
[sxm4.uni-muenster.de](http://sxm4.uni-muenster.de)

Rastertunnelmikroskop-Bausatz der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt:  
[www.upob.de/deutsch/projekte/schueler-stm/internet/schueler-stm-start.htm](http://www.upob.de/deutsch/projekte/schueler-stm/internet/schueler-stm-start.htm)

Schülerforschungszentrum Südwürttemberg:  
[www.szf-bw.de](http://www.szf-bw.de)

benötigt. Andere Forscher arbeiten an Spintronik-Bauelementen, die neben der Ladung des Elektrons dessen magnetische Eigenschaften ausnutzen, seinen Spin. Am umwälzenden, aber auch am schwersten zu verwirklichen, ist der Quantencomputer: Anders als traditionelle Rechner arbeitet er nicht mit Bits, die nur die Werte Eins und Null annehmen können, sondern mit Quantenzuständen etwa von Atomen oder Photonen. Ein Quantencomputer könnte komplizierteste Rechnungen in wenigen Schritten und rasend schnell ausführen.

Während die meisten Nanotechnologen daran feilen, Bedürfnisse der Menschen zu erfüllen, sind manche einfach davon fasziniert, was machbar erscheint. So unterstützt die NASA Pläne, einen Fahrstuhl ins All zu konstruieren. Dabei soll ein Band aus extrem zugfesten Kohlenstoff-Nanoröhrchen – einen Meter breit und dünner als Papier –

mit konventioneller Raketen- und Satellitentechnik rund 100 000 Kilometer in den Weltraum gespannt werden. An ihm entlang könnten tonnenschwere Nutzlasten in den Erdorbit gebracht werden.

Weniger aufsehenerregend, aber viel bedeutender: Inzwischen nutzen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen in vielen Branchen die Methoden und Erkenntnisse der Nanowissenschaftler – egal ob sie preiswerte und effiziente Solarzellen, in der Lichtdurchlässigkeit schaltbare Glasfassaden, Kraftstoffzusätze, schmutzabweisende Kleidung, organische Leuchtdioden für ultraflache, biegsame Bildschirme, elektronische Nasen zur Umweltüberwachung oder langzeitdosierbare Medikamentenspeicher herstellen wollen. „Kaum ein Zweig der Wirtschaft und kaum ein Lebensbereich werden von den Folgen der Nanotechnik unberührt bleiben“, ist Thomas Schimmel überzeugt. ■

## IMPRESSUM

### DER GROSSE WURF

Eine Sonderpublikation von bild der wissenschaft in Zusammenarbeit mit der Landesstiftung Baden-Württemberg

**HERAUSGEBERIN:** Katja Kohlhammer

**VERLAGSLEITUNG:** Joachim Bettinger

**VERLAG:** Konradin Medien GmbH

Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen

**CHEFREDAKTEUR:** Wolfgang Hess

**PROJEKTEAM (TEXT):** Ralf Butscher (Projektleitung), Wolfgang Hess, Frank Frick

**GRAFISCHE GESTALTUNG:** Karl Marx

**BILDREDAKTION:** Ruth Rehbock

**BERATUNG:** Thomas Schimmel (Uni Karlsruhe, FZK), Rudi Beer, Simone Plahuta (Landesstiftung BW)

**VERTRIEB:** Rüdiger Eichholz

**DRUCK:** Konradin Druck

Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen

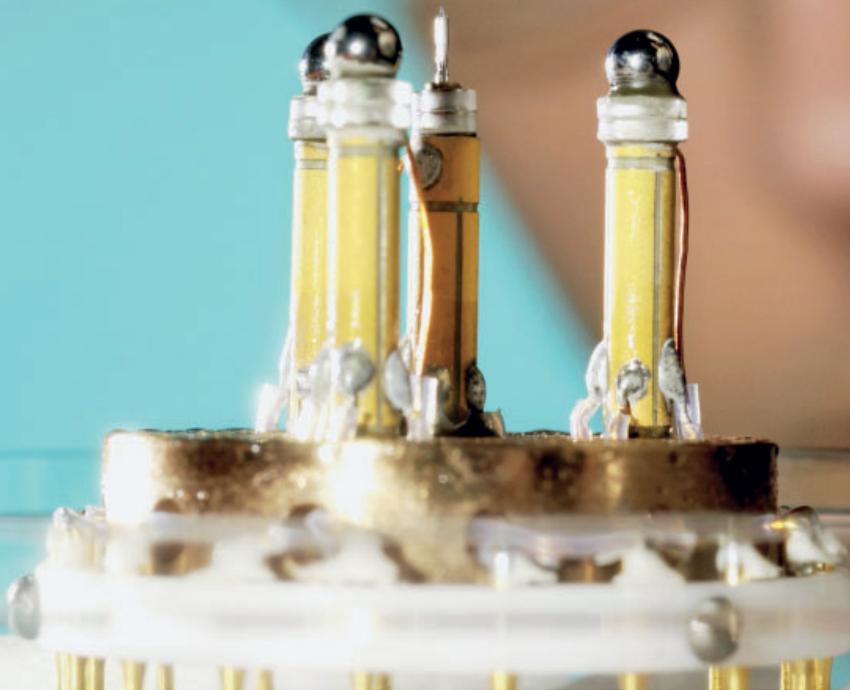
Weitere Exemplare von „Der große Wurf“ können Sie anfordern bei:

Leserservice bild der wissenschaft

Tel.: 01805-260 155

leserservice@wissenschaft.de

Fühler für das Allerkleinste:  
Bei Rastertunnelmikroskopen für die Forschung ist höchste Präzision gefragt. Das macht die Instrumente sündhaft teuer.



# ATOME STREICHELN



1986 erhielten Heinrich Rohrer und Gerd Binnig für die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops den Nobelpreis. Heute können sich Schüler das Gerät nachbauen.

Text: Frank Frick

**ALS HEINRICH ROHRER** vom IBM-Labor in Rüschlikon bei Zürich 1978 den Frankfurter Gerd Binnig anheuerte, wollten die beiden Physiker sehr dünne Schichten auf Metalloberflächen untersuchen. Dabei verfolgten sie die Idee, den quantenmechanischen „Tunneleffekt“ zu nutzen: Danach können Elektronen durch nicht leitende Barrieren – dazu zählt auch das Vakuum – „tunneln“, sodass ein Strom fließt. Sie konstruierten ein Gerät, bei dem eine feine Nadelspitze mit extrem geringem Abstand über die Oberflä-

che einer Probe fährt. Bewegt wurde die Halterung der Spitze dabei mit einem Piezokristall, der sich ein wenig ausdehnt oder zusammenzieht, wenn man eine elektrische Spannung anlegt.

Nach 27 Monaten Arbeit, am 16. März 1981, erhielten Rohrer und Binnig das erste eindeutige Ergebnis: Die Stromstärke stieg drastisch an, je näher die Spitze an der Oberfläche war. Umgekehrt bedeutete das: Wenn man die Stromstärke auf einem be-

stimmten Wert hält, bleibt die Spitze stets im gleichen Abstand zur Oberfläche. Auf diese Weise gesteuert, hebt sich die Spitze bei jedem Buckel. Das Rastertunnelmikroskop „ertastet“ sich somit Informationen über die Oberfläche. Bilder entstehen daraus, indem ein Oszillograph oder PC diese elektronischen Informationen für das Auge aufbereitet. Bis die Physiker und späteren Nobelpreisträger tatsächlich atomgenaue Profile des Untergrunds aufnehmen konnten, vergingen noch einmal zwei Jahre.

V. Steger/SPL/Agentur Focus; picture-alliance/dpa

Mit Rastertunnelmikroskopen kann man nur Proben untersuchen, die elektrisch leitend sind. Diese Beschränkung ließ Binnig nicht ruhen. So kam er auf das Prinzip des Rasterkraftmikroskops. Bei ihm ist die Tastspitze an einer Tastfeder, dem sogenannten Cantilever, befestigt. Die Spitze erspürt die winzigen Kräfte, die von den Atomen der Oberfläche ausgehen. Als Folge davon biegt sich der Cantilever nach unten oder oben – je nachdem, ob die Kräfte anziehend oder abstoßend sind. „Das Prinzip des Kraftmikroskops erinnert an das eines Plattenspielers“, sagt der Karlsruher Prof. Thomas Schimmel, Experte für die Rasterkraftmikroskopie.

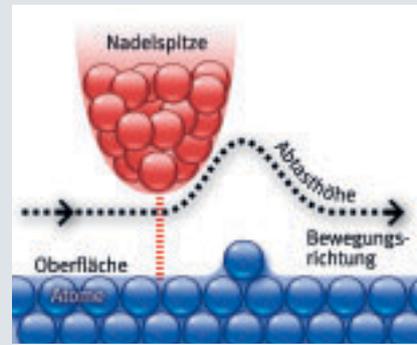
### DEN ÄLTEREN BRUDER VERDRÄNGT

Binnig baute das erste Kraftmikroskop gemeinsam mit Calvin Quate und Christoph Gerber Mitte der Achtzigerjahre. Heute ist das Rasterkraftmikroskop (Atomic Force Microscope, kurz AFM) in der Industrie und in Forschungseinrichtungen längst zu einem Standardinstrument geworden. Dabei hat es seinen älteren Bruder, das Rastertunnelmikroskop, in den Bereich der universitären Grundlagenforschung zurückgedrängt. Ein übliches AFM für Forschungszwecke kostet zwischen 80 000 und 300 000 Euro.

Für Schulen oder Privatpersonen sind solche Geräte fast unerschwinglich. Doch es geht auch billiger: So kostet ein kompaktes Rastertunnelmikroskop (Scanning Tunneling Microscope, STM) für den Unterricht, das die Schweizer Firma Nanosurf verkauft, 7500 Euro. Physiker der Universität Münster haben gar ausgetüftelt, wie man sich für weniger als 1000 Euro optischen Zutritt zur Nanowelt verschaffen kann. Sie haben alle nötigen Infos dazu – Bauplan, Einzelteile, Software – ins Web gestellt ([sxm4.uni-muenster.de](http://sxm4.uni-muenster.de)). Außerdem bietet das Münsteraner Team um Prof. Harald Fuchs einen kompletten Bausatz an, der seit 2001 rund 200-mal bestellt wurde. „Wir verdienen daran nichts“, betont Fuchs. „Wir sind keine Konkurrenz zu kommerziellen Anbietern, sondern schließen mit unserem Angebot eine Lücke, die anders wohl nicht zu schließen wäre.“ Über ein Webforum helfen die Forscher Schülern und Studenten, das STM zu verbessern.

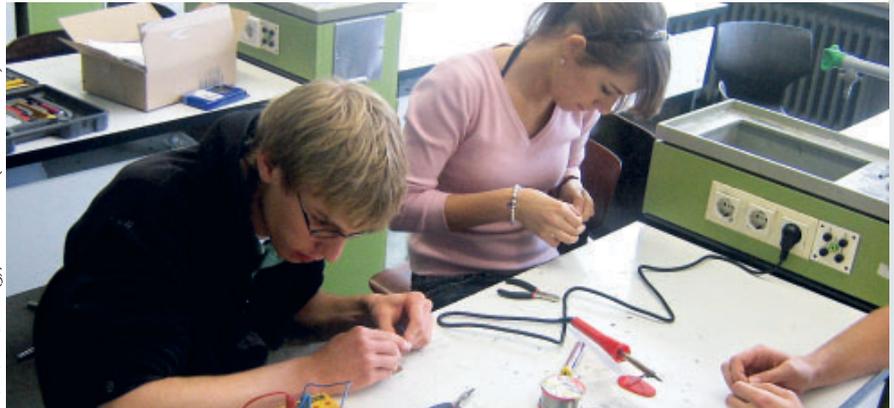
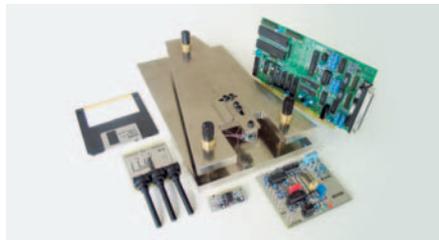
An mehreren Orten werden die Weichen gestellt, damit auch das technisch bedeutsamere AFM für Schüler zugänglich wird.

### SUPERFEINE FINGERSPITZE



Mit einer ultrafeinen Nadel, die an einer Tastfeder angebracht ist, tastet das Mikroskop die Probe ab. Beim Rastertunnelmikroskop fließt ein schwacher elektrischer Strom zwischen den Atomen an der Oberfläche und der Nadelspitze. Beim Rasterkraftmikroskop „fühlt“ man die Kräfte zwischen den Atomen. Sie bewirken eine Auslenkung der Tastfeder, die sich mithilfe eines Laserstrahls messen lässt. Dadurch erhält man ein Bild der atomaren Struktur der Oberfläche.

Grafik: K. Marx

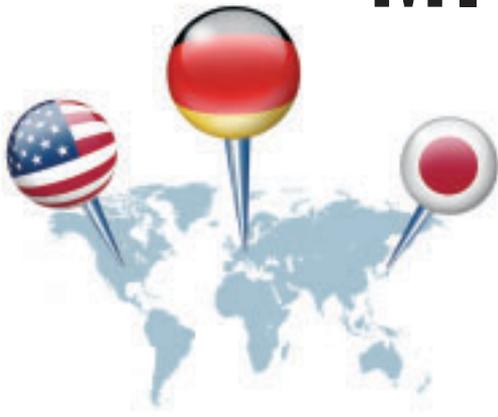


**Nanolupe zum Selberbasteln: Inzwischen gibt es simple und preisgünstige Bausätze für Rastermikroskope – spannende Unterrichtsmaterialien für Schüler und Studenten.**

So bauen in einem Projekt Wissenschaftler der Universität Ulm und Lehrer des Schülerforschungszentrums Südwürttemberg in Bad Saulgau gemeinsam mit Schülern ein Rasterkraftmikroskop. Bei der Geschäftsstelle des „Nanotechnologie Kompetenzzentrums Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig existiert schon ein funktions-

fähiges Schüler-AFM. Der Bausatz wird zunächst Schulen in der Umgebung angeboten, um ihn zu testen. Der Preis soll zwischen 2000 und 4000 Euro liegen. Die Münsteraner Physiker gehen nun mit einem ähnlichen Gerät an den Start. Vielleicht wird ein künftiger Nobelpreisträger einmal berichten, dass sein Interesse an der Forschung durch ein Rastermikroskop in der Schule geweckt wurde. ■

# „WELTSPITZE ZUSAMMEN MIT USA UND JAPAN“



In den letzten Jahrzehnten ist Deutschland oft zu spät auf Trendsetter-Technologien aufgesprungen. Bei der Nanotechnologie soll das nicht passieren. Wie sich Baden-Württemberg auf diese Herausforderung vorbereitet, beschreiben die Minister Peter Frankenberg und Ernst Pfister.

*Das Gespräch führten Ralf Butscher und Wolfgang Hess*

**bild der wissenschaft:** *Welches persönliche Erlebnis verbinden die Minister Frankenberg und Pfister mit dem Begriff „Nano“?*

**PFISTER:** Jeder weiß inzwischen, dass Nano etwas mit klein und kleinst zu tun hat. Was das aber konkret heißt, wurde mir bei einem Besuch am Forschungszentrum Karlsruhe so richtig klar. Dort sagte man mir, dass man durch Nanotechnologie den Inhalt einer 25-bändigen Enzyklopädie auf der Oberfläche eines Sandkorns unterbringen kann.

**FRANKENBERG:** Meine Faszination für dieses Thema resultiert ebenfalls aus einem Erlebnis an einem Forschungsinstitut. Dort präsentierte man mir Gedanken zum Computer der Zukunft, der mit Licht rechnen soll. Die dazu notwendigen Bausteine wären so winzig, dass sie nur noch aus wenigen Atomen bestünden. Dass so etwas technisch machbar sein könnte, begeistert mich.

**bdw:** *Wo ist die Nanotechnologie reif für Durchbrüche?*

**PFISTER:** Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie. Das heißt: Herkömmliche Technologien können dadurch revolutioniert werden. Profitieren könnte davon eine Reihe von Wirtschaftszweigen, die wir in Baden-Württemberg haben: beispielsweise die Medizintechnik, die Optik, der Automobilsektor, die Informationstechnologie.

**FRANKENBERG:** Nanotechnologie wird viele Technologiefelder durchdringen. Uns steht demnach ein ähnlicher Schub bevor, wie er vor zwei Jahrzehnten durch die Informationstechnologie ausgelöst wurde. Die Menschen werden sich an die Vorteile der Nanotechnologie gewöhnen, die in vielem steckt.

**bdw:** *Die Landesstiftung Baden-Württemberg engagiert sich seit Jahren in der Förderung von exzellenter Forschung. Ein Schwerpunkt ist das Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“. Welche Ziele verfolgt das Land mit solchen Förderungsprogrammen?*

**FRANKENBERG:** Lange Zeit haben forschende und produzierende Institutionen nebeneinander her gearbeitet. Durch die Förderung

der Landesstiftung, aber auch des Landes, arbeiten die Institutionen partnerschaftlich zusammen und erzielen Synergie-Effekte, die dem ganzen Bundesland zugutekommen.

**PFISTER:** Vor wenigen Monaten haben wir in Baden-Württemberg einen ersten Landeskongress zum Thema „Cluster“ veranstaltet. Der hatte über 300 Teilnehmer. Clusterpolitik ist einmal die geschickte Vernetzung von Forschungseinrichtungen untereinander. Weiterhin gehört dazu auch die Vernetzung mit Unternehmen. Rund 80 Unternehmen beschäftigen sich inzwischen allein in Baden-Württemberg intensiv mit der Nanotechnologie. Das Ziel dieser Clusterpolitik ist klar definiert: Die Wertschöpfung soll ausgeweitet werden und es sollen dadurch neue, anspruchsvolle Arbeitsplätze entstehen.

**bdw:** *Die Bedeutung von Nanotechnologie ist nicht nur in Baden-Württemberg erkannt worden. Auch andere Bundesländer, der Bund und die EU fördern Projekte. Heißt das, dass geschickt agierende Forschergruppen gleich mehrere Fördertöpfe anbaggern können?*

**PFISTER:** Um Nanotechnologie nach vorne zu bringen, können wir gar nicht genug tun. Dennoch ist es natürlich wichtig, dass Programme aufeinander abgestimmt sind.

**Die Nanotechnologie wird viele Technologiefelder durchdringen und einen Schub auslösen.**





Prof. Peter Frankenberg

ist seit 2001 Minister für Wissenschaft, Forschung und Kunst in Baden-Württemberg. Frankenberg (Jahrgang 1947) promovierte 1976 in Geographie, wurde 1983 als Professor für Physische Geographie an die Katholische Universität Eichstätt berufen und nahm 1986 den Ruf der Universität Mannheim an. 1994 wurde er dort Rektor. Seit 1999 ist Frankenberg Mitglied im Landesvorstand der baden-württembergischen CDU.

**FRANKENBERG:** Bei der Förderaktivität unterscheidet sich die Nanotechnologie nicht von anderen Disziplinen. Wir haben sehr häufig die Situation, dass für ein und dasselbe Projekt eine Förderung mit EU-Mitteln, Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bundesmitteln oder Landesmitteln in Frage kommt. Von leistungsfähigen Forschergruppen wird auch erwartet, alle Fördermöglichkeiten zu nutzen. Dabei ist es unumgänglich, dass sich die Gutachter und Betreuer der Drittmittelgeber wie der Landesstiftung absichern, um eine Doppelförderung desselben Projekts auszuschließen.

**bdw:** *Ehrgeiziges Ziel der Forschungsförderung durch die Landesstiftung Baden-Württemberg ist es, Patente zu gewinnen, die die Wirtschaft des Bundeslandes stärken. Wie verträgt sich dieser Ansatz mit der Freiheit der Forschung?*

**FRANKENBERG:** Die Vorwürfe, dass die Freiheit der Forscher durch Drittmittel gesteuert oder sogar eingeschränkt werde, gibt es seit Langem. Ich sage dann stets: Die Forscher beantragen diese Mittel freiwillig und aus eigenem Interesse. Dass daraus dann ein Mehrwert für das Land entstehen soll, liegt auf der Hand – schließlich ist das ja auch Sinn von Wissenschaft und Hochschule.

**bdw:** *Baden-Württemberg ist das Land der mittelständischen Unternehmen. Sie leisten sich nur selten eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilungen, tun sich aber auch bei der Vernetzung zu staatlichen Forschungseinrichtungen schwer. Das ist ein großes Handicap für die rasche Integration der Querschnittstechnologie „Nano“ in die bestehende Wirtschaftsstruktur.*

B. Müller (4)

**PFISTER:** 99,5 Prozent aller Unternehmen im Land haben weniger als 500 Beschäftigte. 95 Prozent haben weniger als 50. Schon vor Jahrzehnten haben wir deshalb Strukturen geschaffen, den Mittelstand am Wissen der Hochschulen teilhaben zu lassen. Es gibt etwa 30 wirtschaftsnahe Forschungseinrichtungen, die grundlagenbasierte Wissenschaft so aufbereiten, dass auch ein kleiner Mittelständler damit etwas anfangen kann. Dass diese Einrichtungen für Dynamik sorgen, kann ich belegen. Im Bundesdurchschnitt schaffen es 6 Prozent aller Unternehmen, innerhalb von zwei Jahren ein neues Produkt oder eine neue Dienstleistung auf den Markt zu bringen. In Baden-Württemberg schaffen das 15 Prozent. Wenn das kein Maß für unsere Innovationskraft ist!

**bdw:** *Berührungspunkte zwischen Wissenschaft und Wirtschaft – gibt es die noch?*

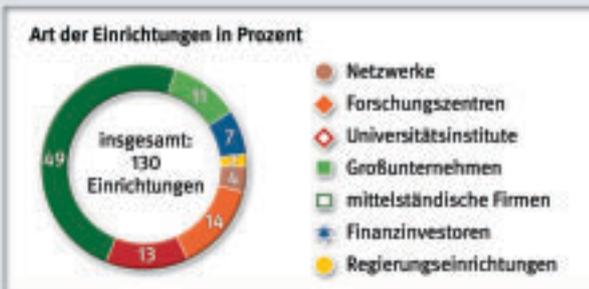
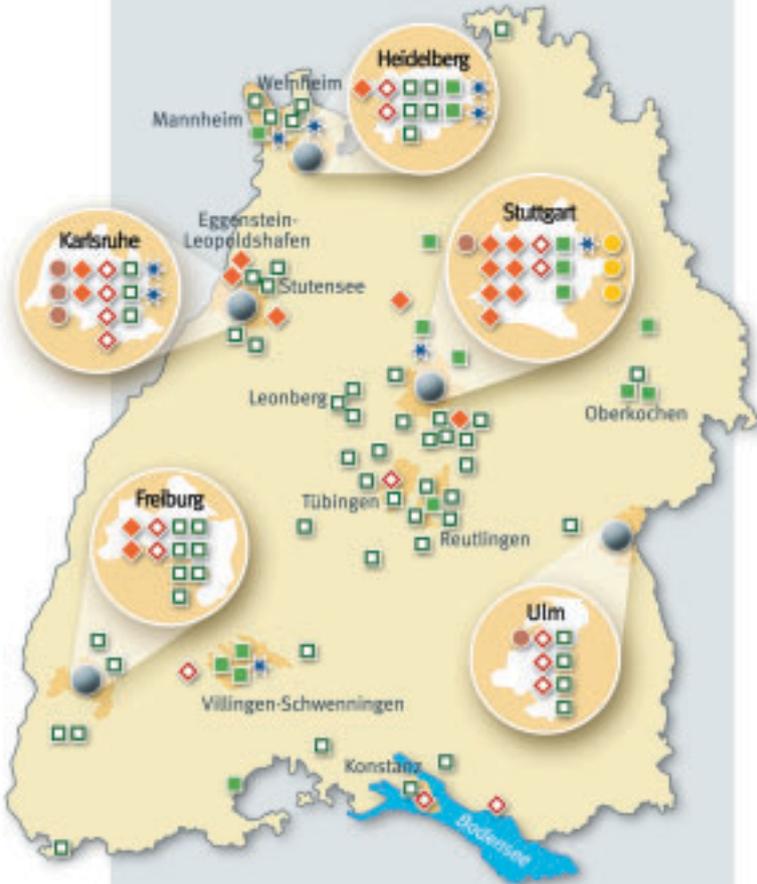
**PFISTER:** Das Aufkommen an Forschungsförderung insbesondere durch Drittmittel bei wirtschaftsnahen Forschungsprojekten ist in den vergangenen Jahren sehr deutlich gestiegen. Für mich ist das der schlagende Beweis, dass Wirtschaft und Wissenschaft heute besser als früher verzahnt sind.

**FRANKENBERG:** Stuttgart hat die drittmittelstärkste Universität in Deutschland. Im Übrigen hatten wir in Baden-Württemberg nie die Berührungspunkte, die in anderen Bundesländern lange Zeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft geherrscht haben. Denn bei uns gilt seit Jahrzehnten: Fachhochschul-Professoren werden aus der Wirtschaft berufen. Auch die Universitäten berufen im Ingenieurbereich Professoren mit einschlägiger Wirtschaftserfahrung. Darüber



## BREITE BASIS FÜR DIE ZUKUNFT

Zentren der Nanotechnologie in Baden-Württemberg



Das Land Baden-Württemberg kann sich auf ein breit gefächertes Netz aus Forschungsinstituten, Unternehmen und staatlichen Stellen stützen, die sich mit der Nanotechnologie beschäftigen. Insgesamt 130 solche Einrichtungen hat das Düsseldorfer Technologiezentrum des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) in einer Analyse gezählt. Auffällig ist die hohe Zahl an Betrieben jeder Größe, die auf die Entwicklung und Anwendung der Nanotechnologie bauen. Während sich die Nanoforschung in den Universitätsstädten und drumherum konzentriert, sind die in Sachen „Nano“ aktiven Unternehmen über das ganze Land verstreut.

hinaus haben wir das Bewusstsein für einen engen Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft weiter geschärft: Jede Hochschule hat einen Aufsichtsrat, in dem Unternehmensvertreter mitwirken.

**bdw:** Die Abwanderung von hoffnungsvollen Nachwuchswissenschaftlern vor allem in die USA wird oft beklagt. Wie beängstigend ist dieser sogenannte Brain-Drain für Baden-Württemberg?

**FRANKENBERG:** Internationale Mobilität ist notwendig, auch um andere Forschungssysteme kennenzulernen. Allerdings sollte man mehr gute Wissenschaftler dauerhaft gewinnen als verlieren. Wir stellen neuerdings fest, dass sehr viele junge Wissenschaftler, die in die USA gegangen sind, wieder gerne auf Professuren in Deutschland zurückkehren. Wenn ich mir die Berufungslisten auf interessante akademische Positionen in den Naturwissenschaften ansehe, sind darunter viele Deutsche, die aus den Vereinigten Staaten zurückkehren.

**bdw:** Hat sich da etwas geändert in den sieben Jahren, seit Sie baden-württembergischer Wissenschaftsminister sind, Herr Frankenberg?

**FRANKENBERG:** Die Zahl derer, die zurückwollen, steigt – auch deshalb, weil wir für jüngere Wissenschaftler erheblich attraktiver geworden sind. Gute Leute haben bei uns inzwischen ähnliche Karrierechancen wie in den USA. Da Baden-Württemberg auch für Forscher aus Osteuropa sehr attraktiv ist, sind wir sogar Gewinner im Sinne eines Brain-Gain.

**PFISTER:** Am Zentrum „Funktionelle Nanostrukturen“ in Karlsruhe arbeiten derzeit 145 Wissenschaftler. 40 davon stammen aus dem Ausland, was nichts anderes heißt, als dass das Zentrum weltweit attraktiv ist. Und dass Baden-Württemberg auch für Studenten aus aller Welt attraktiv ist, belegt deren Anteil am gesamten Studentenaufkommen: Fast 15 Prozent unserer Studierenden sind Ausländer, im Bundesdurchschnitt hingegen nur 10 Prozent.

**bdw:** Zurück zur Nanotechnologie. Wo positionieren Sie Ihr Bundesland im nationalen, wo im internationalen Maßstab?

**PFISTER:** Ein Beispiel: Die meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen in Deutschland zu Nanostrukturen aus Kohlenstoff produziert Baden-Württemberg – bezogen auf die Zahl der Einwohner. Wir liegen mit weitem Vorsprung vor Sachsen. Mehr noch: Bereits 2005 urteilte die „Wirtschaftswoche“ in einem Überblick der Top-Wissenschaftler über die deutsche Nanotechnologie: Das Forschungszentrum Karlsruhe und die Universität Karlsruhe liegen gleichauf auf dem ersten Rang, gefolgt vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Mein drittes Argument zur Güte der Nanotechnologie in unserem Land entnehme ich einer Studie der Fraunhofer-Gesellschaft aus dem Jahr 2007, wonach die Wertschöpfungskette in Baden-Württemberg am breitesten angelegt ist. Und was die internationale Bedeutung angeht: Eine Analyse der Boston Consulting Group besagt unter internationalem Blickwinkel, dass die deutsche Nanotechnologieforschung zusammen mit der Forschung in den USA und Japan an führender Stelle steht.

**bdw:** Haben Sie keine Bedenken, dass dieser Vorsprung verspielt werden könnte, wenn sich die Debatte in Deutschland auf mögliche gesundheitliche Folgen der Nanotechnologie verlagert?



Ernst Pfister

ist seit Juni 2004 Wirtschaftsminister des Landes Baden-Württemberg. Pfister (Jahrgang 1947) studierte Politikwissenschaften, Germanistik und Sport. Er unterrichtete von 1975 bis 1984 – zuletzt als Oberstudienrat – an Gymnasien. Seit 1980 ist er baden-württembergischer Landtagsabgeordneter. Von 1996 bis 2004 war er Vorsitzender der FDP-Landtagsfraktion.

**FRANKENBERG:** Die meisten Ängste beziehen sich auf gesundheitliche Folgen von Nanoteilchen in Aerosolen, zum Beispiel in Sprays. Das ist aber nicht die Nanotechnologie, um die es hier geht. Bei den innovativen Ansätzen sind die Nanopartikel fest in ein System eingebunden. Ich denke, das Risiko, dass dabei geringe Mengen von Nanoteilchen freigesetzt werden, lässt sich beherrschen. Mögliche Risiken der Nanotechnologie müssen aber erforscht und nach dem Vorsorgeprinzip beachtet werden.

**PFISTER:** Natürlich stellen wir uns dieser Problematik. Es gibt allein am Forschungszentrum Karlsruhe mehrere Projekte, bei denen die gesundheitlichen Risiken untersucht werden. Sobald Resultate vorliegen, werden wir diese der Öffentlichkeit präsentieren.

**bdw:** *Nicht selten werden Ängste vor neuen Forschungsansätzen dadurch geschürt, dass sich Wissenschaftler unverständlich oder zu*

*kompliziert ausdrücken. Auch die Nanotechnik steht vor diesem Problem.*

**FRANKENBERG:** Jeder, der es mit einem komplexen wissenschaftlichen System zu tun hat, ist gut beraten, wenn er die Sprache der Öffentlichkeit spricht. In unseren Hochschuldidaktikzentren schulen wir die Professorinnen und Professoren darin, sich gegenüber Studierenden verständlich auszudrücken. Denn das ist die Mindestvoraussetzung, um sich auch bei interessierten Bürgern Gehör zu verschaffen.

**PFISTER:** Wichtig ist, stets gute Beispiele an der Hand zu haben. Wenn ein Mediziner zeigen kann, wodurch Nanostrukturen operative Eingriffe vereinfachen und wie sie Klinikaufenthalte zeitlich verkürzen, erweist er seiner Forschung einen wahren Dienst.

**bdw:** *Wo positionieren Sie ihr Bundesland in Sachen Nanotechnologie um das Jahr 2020?*

**PFISTER:** Das Besondere an der Nanotechnologie ist deren Hebelwirkung. Sie führt dazu, dass in bestehenden Strukturen – Maschinenbau, Elektrotechnik, Automobilindustrie – eine zusätzliche Wertschöpfung entsteht.

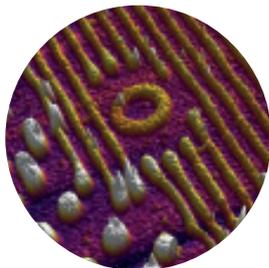
**FRANKENBERG:** Das Gebiet „Nano“ ist viel umfassender als etwa die Informationstechnologie. Es beeinflusst die Biologie ähnlich stark wie die Chemie und die Physik. Inwieweit das zu einem größeren Marktwert führt, ist schwer einzuschätzen. Wenn sich Nanostrukturen in Massenprodukten etablieren, wird die Wertschöpfung viel größer sein, als wenn sich die Anwendungen auf wenige Hochtechnologieprodukte beschränken. ■



**Steigende Drittmittel belegen: Wirtschaft und Wissenschaft sind besser verzahnt als früher.**



# ARCHITEKTEN DES ALLERKLEINSTEN



Forscher erschaffen Nanohöhlen und Nanostraßen, errichten Nanosäulen und Nanospitzen. Dabei lassen sie die Natur auf raffinierte Weise für sich arbeiten.

Text: Frank Frick

**DIE MEISTEN NANOFORSCHER** haben inzwischen ihre Visitenkarte in der Nanowelt hinterlassen. Vorreiter waren 1990 Don Eigler und Erhard Schweizer, die aus 35 Edelgas-Atomen mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops den Schriftzug ihres Geldgebers IBM erzeugten. Die Aufnahme davon ist hundertfach in Zeitungen und Zeitschriften abgedruckt worden. Hauptsächlich wohl, weil darauf der Traum der Nanotechnologie bereits verwirklicht scheint: technische Kontrolle über einzelne Atome und Moleküle.

In mancher Hinsicht ist diese Kontrolle auch heute – 18 Jahre später – immer noch eine Illusion. Eigler und Schweizer froren das IBM-Logo bei bitterkalten minus 269 Grad Celsius gleichsam ein – bei höheren Temperaturen wären die Atome nicht an ihrem Platz geblieben. Außerdem legten sie zwar einzelne Atome gezielt auf eine glatte Oberfläche, doch das Stapeln von mehreren Atomen aufeinander hätte sie vor unüberwindbare Probleme gestellt.

Insofern entwickeln Wissenschaftler weltweit weiterhin Methoden, mit denen sich gezielt und effizient Atome und Moleküle zusammenfügen lassen zu stabilen Nanostrukturen oder Nanoobjekten – quasi die Straßen, Fundamente und Bauwerke einer Nanowelt. Eine Reihe von Forschern lässt

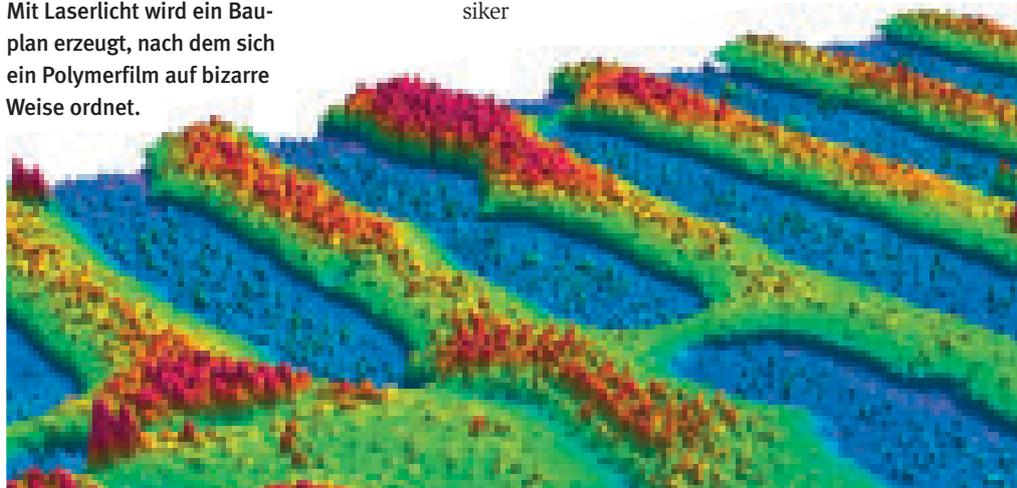
sich dabei von der Idee leiten, natürliche Prozesse so für sich einzuspinnen, dass die gewünschten Objekte und Strukturen sich wie von selbst bilden. Diese Selbstorganisation verschafft dem Baumeister einen gewaltigen Zeitvorteil. Denn mit ihrer Hilfe kann er Millionen von Objekten parallel zueinander errichten lassen. Allerdings handelt er sich auch Probleme ein. So ist die Natur ein eher schlampiger Arbeiter und hält sich nur ungern an die Vorgaben des Meisters. „Geführte Selbstorganisation“ lautet daher das Zauberwort für Dr. Johannes Boneberg. Der Physiker, außerplanmäßiger Professor an der Universität Konstanz: „Selbstorganisation alleine ist nicht ideal. Man muss die Selbstorganisation in die Richtung zwingen, die man realisieren möchte.“

**Topographie auf Verlangen:  
Mit Laserlicht wird ein Bau-  
plan erzeugt, nach dem sich  
ein Polymerfilm auf bizarre  
Weise ordnet.**

Die Strategie scheint einfach, ist aber schwer umzusetzen – ähnlich der, einem Kind große Freiheiten zu lassen und es gleichzeitig zu führen. Dass sie dennoch aufgehen kann, zeigen die Forschungsergebnisse von Boneberg und seinen Mitstreitern im Kompetenznetz. Gemeinsam mit Dr. Stefan Walheim vom Forschungszentrum Karlsruhe hat Boneberg Methoden entwickelt, mit denen sich selbst einige Quadratzentimeter große Oberflächen aus halbleitenden Materialien oder Kunststoff in kurzer Zeit strukturieren lassen. Die erschaffenen Nanostrukturen ähneln Parkettmustern oder Autoheckscheiben mit aufgeklebten Heizdrähten.

## **TINTE WIRD WEGGESCHOSSEN**

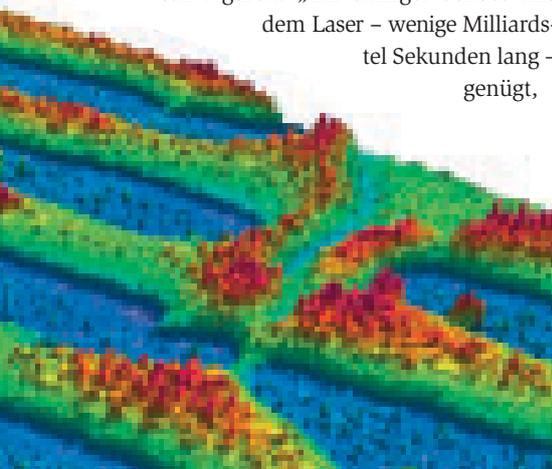
Die Wissenschaftler nutzen dabei die Möglichkeit, Metalloberflächen mit einem Film aus einer Art Tinte zu bedecken. Die Spezialität der Konstanzer Physiker





Unter dem Rastersondenmikroskop lässt sich die Nanoabstelle inspizieren.

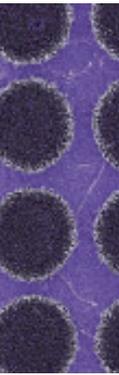
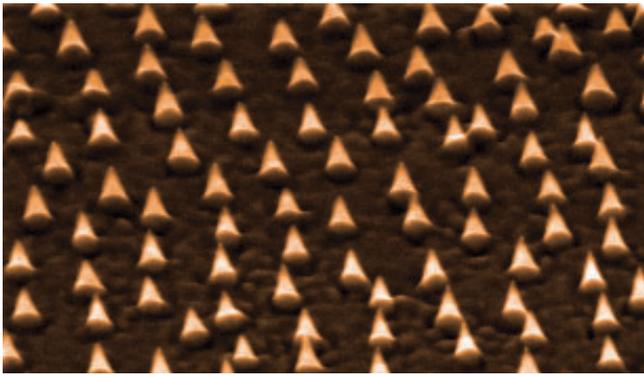
B. Müller ist es, diese ein Nanometer dünne Tinte mit Laserlicht wegzuschießen. Dabei teilen sie das intensive Laserlicht in mehrere Strahlen und führen sie auf der Oberfläche so wieder zusammen, dass sich die Lichtwellen überlagern und ein in regelmäßigen Abständen wiederkehrendes Interferenzmuster bilden – von einfachen Linien bis hin zu komplizierten Figuren. „Ein einziger Schuss mit dem Laser – wenige Milliardenstel Sekunden lang – genügt,



um die Tinte zu entfernen und das Muster gleichsam auf die Oberfläche zu schreiben“, sagt Boneberg. „Um zwei unterschiedliche Muster zu erzeugen, brauchen wir nur unsere Apparatur etwas umzubauen – das dauert wenige Minuten.“ Alternativ übertragen die Wissenschaftler Muster mit einem Stempel auf die Metalloberfläche, indem sie einen winzigen gummiartigen Block mit dem eingeschriebenen Muster in die Tinte tauchen und ihn dann auf die Oberfläche drücken. Durch wiederholtes Stempeln lassen sich auch größere Flächen bedrucken. Allerdings benötigt man für verschiedene Strukturen jeweils einen eigenen Stempel.

So oder so – ein Tintenmuster, bei dem die Tinte nur einen Nanometer dünn auf der Oberfläche liegt, ist noch keine dreidimen-

sionale Nanostruktur. „Dieses Muster muss in seiner Dicke deutlich verstärkt werden“, erklärt Walheim. Ein Rezept dazu hat der Karlsruher Forscher entdeckt: Man tropfe eine Flüssigkeit, in der zwei verschiedene Polymere gelöst sind, auf Metallplättchen samt Tintenmuster. Lässt man das Plättchen auf einem Drehteller rasch rotieren, verteilt sich die Lösung, die Flüssigkeit verdunstet. Zurück bleibt nach diesem sogenannten Spincoating ein 100 Nanometer dünner Polymerfilm. Der Clou dabei: Die eine Sorte Polymer sammelt sich nur dort, wo die Tinte ist, die andere nur dort, wo die Tinte nicht ist. Taucht man nun das Plättchen samt Film in ein Lösungsmittel, das nur das Polymer abseits der Tinte löst, bleibt der Film auf der Tinte übrig: Aus dem Muster ist eine 100 Nanometer dicke Struktur geworden.



Auf einer Oberfläche lassen sich regelmäßige Nanolandschaften kreieren. Links: 60 Nanometer hohe Diamantspitzen. Mitte: Hügel aus Gold. Die in 75 Nanometer Abstand platzierten Goldkuppen kann man zu rund tausendmal größeren Strukturen arrangieren (rechts).

„Solche Methoden, Polymerstrukturen zu erzeugen, sind interessant etwa für die Herstellung von Antireflexschichten oder organischen Leuchtdioden“, sagt Walheim. Übrigens würden sich die beiden Polymere beim Spincoating auch ohne Tintenmuster-Vorlage entmischen und selbstorganisiert Strukturen bilden – doch die wären kurvenreich und würden keinem Bauplan entsprechen. Forscher des Kompetenznetzwerks

setzen solche Strukturen als „Testgelände“ für lebende Zellen ein („Panik bei 73 Nanometern, S. 38).

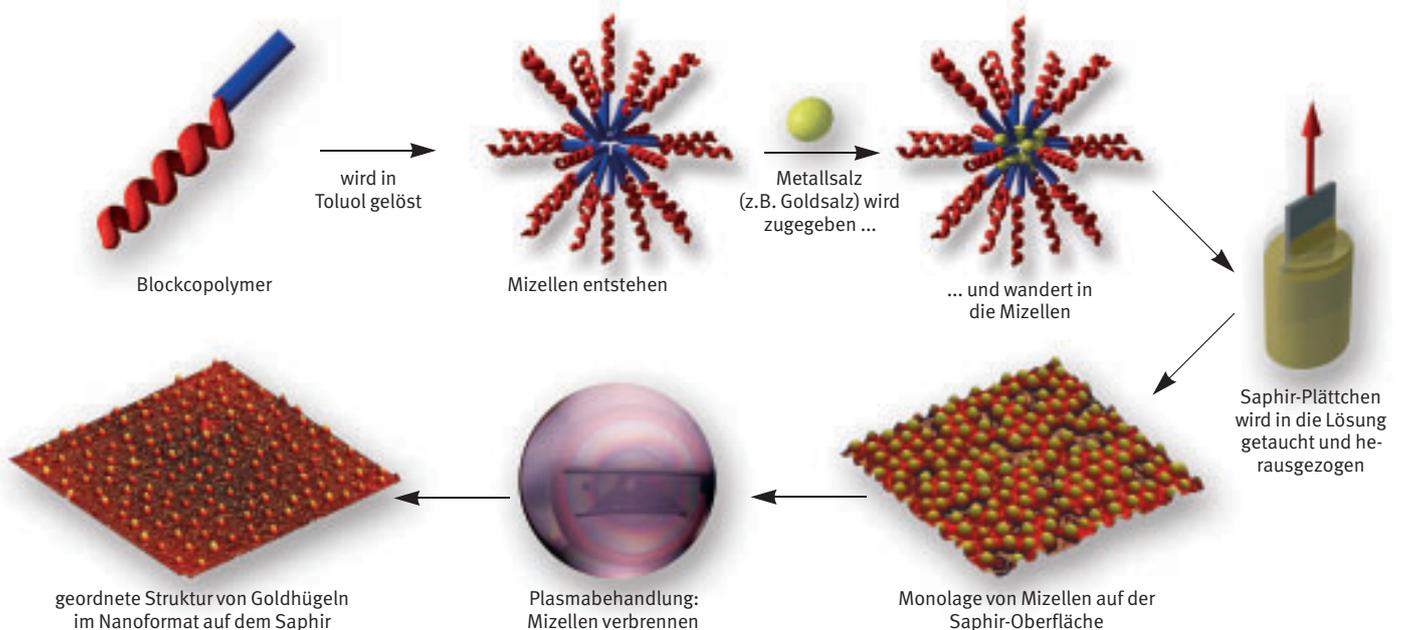
„Man könnte mit solchen Strukturen auf einfache Weise Implantate oder Bioreaktor-Platten großflächig beschichten, um das Verhalten von Zellen zu beeinflussen“, schaut Walheim voraus. Ihr Rezept haben die Wissenschaftler inzwischen geschickt

abgewandelt. Sie benutzen Substanzen, die sich zwar ähnlich verhalten wie Polymere, aus denen sich aber durch Erhitzen Wolframtrioxid und andere halbleitende Materialien gewinnen lassen. „Wolframtrioxid hat schaltbare Eigenschaften. So ist es etwa in hochwertigen Autorückspiegeln im Einsatz, die sich zum Blendschutz von selbst verdunkeln, wenn nachts Scheinwerferlicht auf sie fällt“, sagt Boneberg. Nanostraßen und

Grafik: K. Marx; Quelle: P. Ziemann (Uni Ulm)

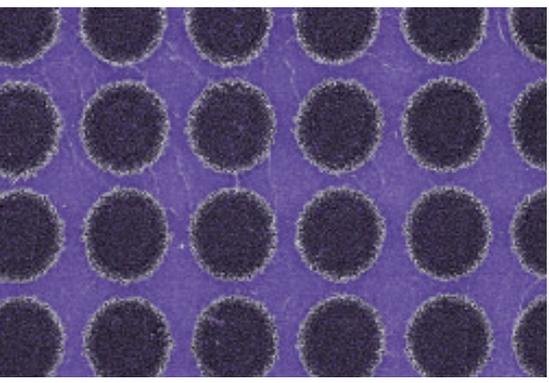
## GOLDENE BUCKEL WACHSEN IN LILIPUT

Herstellung von Nanostrukturen aus Metall



Um geordnete Nanostrukturen auf einer Oberfläche zu erzeugen, verwenden die Ulmer Wissenschaftler Blockcopolymere, die aus zwei unterschiedlichen Bausteinen bestehen. In Toluol lagern sich die Polymere zu Mizellen zusammen – kugelige Gebilden, in denen

sich Goldpartikel einnisten können. Auf einem Plättchen, das in die Lösung getaucht und wieder herausgezogen wird, bilden die Mizellen ein regelmäßiges Muster. In einem Plasma werden die Mizellen verbrannt – übrig bleibt eine Nanolandschaft aus Goldteilchen.



Laser sind ein wichtiges Utensil der Nano-Baumeister.

B. Müller

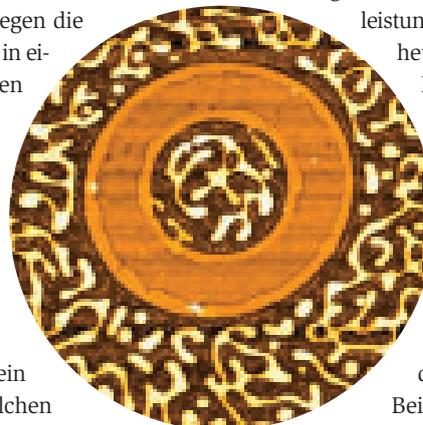
Nanoschluchten aus Wolframtrioxid sind auch denkbare Bausteine von künftigen Sensoren, die auf Gase, Ionen oder UV-Licht reagieren. „Entscheidend ist zu wissen, wie man definierte Nanostrukturen großflächig, schnell und möglichst ohne aufwendige Vakuumtechnik erzeugen kann – die Anwendungen kommen dann von ganz allein“, ist Walheim überzeugt.

#### EIN MUSTER AUS RUNDEN BERGEN

Eine Ansicht, die auch Paul Ziemann teilt, Physik-Professor an der Universität Ulm. Er und sein Team haben gemeinsam mit Ulmer Chemikern Möglichkeiten gefunden, auf ebenen Oberflächen runde Nanoberge aus Metall zu errichten. Das Besondere: Die Nanoberge ordnen sich in einem regelmäßigen Muster an, wobei sich ihre Größe und ihr Abstand genau steuern lassen. Ausgangspunkt eines der Verfahren sind sogenannte Blockcopolymere, deren langkettige Moleküle aus wiederkehrenden Blöcken zweier unterschiedlicher Bausteine bestehen. Zunächst geben die Ulmer Forscher ein käufliches, pulverförmiges Blockcopolymer in Toluol, eine benzinähnliche Flüssigkeit, in der es sich innerhalb einer Woche löst – allerdings nicht so wie Zucker in Wasser. Denn ein Ende jedes langkettigen Moleküls fühlt sich von der Flüssigkeit angezogen, während das jeweils andere Ende den Kontakt zum Lösungsmittel vermeiden möchte. Daher lagern sich die Moleküle von selbst zu kleinen runden Tröpfchen – Fachsprache: Mizellen – zusammen, wobei sich jeweils ihr eines Ende zum Lösungsmittel und ihr anderes Ende zum Inneren der Mizellen hin ausrichtet. Dorthin wandern auch die Metallsalze, die zudosiert werden.

Die Wissenschaftler tauchen ein Plättchen etwa aus Saphir senkrecht in die Lösung ein und ziehen es langsam wieder heraus. Das Ergebnis kann man im Rasterkraftmikroskop betrachten: Das Plättchen ist mit einer durchgehenden Schicht Mizellen bedeckt. Dabei haben sich die Mizellen nirgends übereinandergestapelt. Sie haben eine „Monolage“ gebildet. Darin sind die Mizellen recht gut geordnet, ähnlich wie Tischtennisbälle, die in einer durchgehenden Schicht auf einer Platte liegen. Danach legen die Physiker das Plättchen in eine Kammer und zünden

**Aus den kurvigen Formen der Natur schaffen Forscher klare Strukturen.**



darin ein Plasma – ein Gas, das geladene Teilchen wie Elektronen und Ionen enthält. In dem Plasma verbrennen die Mizellen, das in dem zudosierten Salz enthaltene Metall bleibt übrig. „Letztlich haben wir die Mizellen nur als Omnibus benutzt, in dem wir das Metall transportiert haben. Ist das Metall am Zielort angekommen brauchen wir den Omnibus nicht mehr“, sagt Ziemann. „Das Erstaunliche ist: Das Metall bleibt genau da auf der Oberfläche liegen, wo vorher die Mizellen waren.“

Die Forscher können recht genau festlegen, ob alle entstehenden Metallpartikel etwa ein, drei, vier, sieben oder zehn Nanometer groß werden. Dazu müssen sie nur die Menge des

Metallsalzes variieren. Und der Abstand der Nanoberge hängt davon ab, wie groß die Mizellen waren. Deren Durchmesser lässt sich zwischen 40 und 120 Nanometern durch die Wahl des Blockcopolymers steuern. Die Forscher gestalten mit ihren Methoden etwa Nanolandschaften, deren Berge aus einer Eisen-Platin-Mischung bestehen. „Eisen-Platin in einem bestimmten Zustand ist ein vielversprechendes Material für künftige magnetische Datenspeicher, die weit

leistungsfähiger sind als die heutigen“, sagt Ziemann.

Die Forscher nutzen das Muster der Berge auch, um die Oberfläche darunter zu strukturieren. Sie setzen dazu das „reaktive Ionenstrahlätzen“ ein. Mit dieser Methode tragen sie das Material der Oberfläche ab – zum Beispiel Diamant. Wo die metallischen Nanoberge sind, können die Ionen zunächst nicht angreifen. Dort bleibt der Diamant erhalten – in Form von 60 Nanometer hohen Spitzen. „Solche Spitzen bieten als winzige Sendemasten für Elektronen sehr interessante Möglichkeiten. So könnte man mit ihrer Hilfe extrem flache Bildschirme konstruieren“, sagt Ziemann. Verwendet man Oberflächen aus Silizium, entstehen statt Spitzen fast senkrechte Säulen. Diese lassen sich in maximal 180 Nanometer tiefe Höhlen verwandeln. Damit ist aus der geordneten Berglandschaft eine Landschaft aus Nanohöhlen geworden – die als Kleinstgefäße für einzelne, in Flüssigkeit gelöste Moleküle dienen können. ■

# KREATIVES GEFLECHT



Das Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“ bringt die besten Nanoforscher im Ländle zusammen. Finanziell unterstützt durch die Landesstiftung Baden-Württemberg schaffen sie die Basis für die Hochtechnologie von morgen.

Text: Ralf Butscher

**MIT NEIDISCHEM BLICK** schaut Prof. Falko Netzer auf Baden-Württemberg. Im Visier hat der österreichische Forscher, der am Institut für Physik der Universität Graz die Arbeitsgruppe für Oberflächenwissenschaften leitet, dabei das Kompetenznetz „Funktionelle Nanostrukturen“. Darin arbeiten über hundert Wissenschaftler mehrerer Universitäten und Forschungseinrichtungen im Südwesten Deutschlands gemeinsam an zentralen Schlüsselthemen der Nanotechnologie: Sie entwickeln winzige und zugleich extrem leistungsfähige Bausteine für die Elektronik der Zukunft. Sie kreieren neuartige molekulare Wirkstoffkapseln, die eine zielgenaue und schonende Bekämpfung von Krebs ermöglichen. Und sie schaffen es mit trickreichen Verfahren, auf einfache Weise komplexe Strukturen in der Dimension weniger Nanometer herzustellen – beispiels-

weise als Basis für leuchtstarke Mini-Laser oder hochempfindliche Sensoren.

die Landesstiftung Baden-Württemberg. „Die Kompetenzen der einzelnen Zentren werden in dem Netz sehr wirkungsvoll gebündelt – etwas Vergleichbares ist auch international schwer zu finden“, schwärmt der Grazer Physiker. Netzer weiß, wovon er spricht, denn er ist seit Jahren als Gutachter für die Landesstiftung und das Nano-Kompetenznetz tätig. Er war an der Auswahl der – mit im Schnitt über 100000 Euro pro Jahr – geförderten Projekte beteiligt und verfolgt mit großem Interesse die Fortschritte der Forscher.

Dasselbe gilt für Dr. Werner Grünwald. Der inzwischen im Ruhestand lebende Experte für Werkstoffforschung und Nanotechnologie aus Gerlingen bei Stuttgart hat sich über viele Jahre hinweg für die Robert Bosch GmbH mit neuen Technologien beschäftigt – eine Tätigkeit, bei der er „einen breiten Überblick über die weltweiten Forschungsaktivitäten auf dem Feld der Nanotechnologie gewann“, wie Grünwald berichtet. Daher weiß der Materialforscher, der sich – trotz beruflichen Ruhestands – weiterhin mit großem Engagement seiner Gutachtertätigkeit

kurzfristig in Produkte umsetzbaren Forschungsergebnissen geschickt wird.“ Daher hält es Grünwald für besonders wichtig und bemerkenswert, dass die Landesstiftung Baden-Württemberg mit der Unterstützung des Nanotechnologie-Forschungsverbunds ein Zeichen gegen diesen Trend setzt.

Gegründet wurde das einzigartige Geflecht von Forschern und Instituten im Jahr 2003. Es ging hervor aus mehreren Schwerpunkten zur Nanotechnologie, die sich zuvor bereits an den Universitäten Karlsruhe, Konstanz, Stuttgart und Ulm, am Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung sowie am Forschungszentrum Karlsruhe herausgebildet hatten. „Ziel war es, durch Zusammenführen dieser Forschungsbrennpunkte zu einem Netz die starke Position des Bundeslandes bei der Nanotechnologie zu festigen und auszubauen“, sagt Rudi Beer, der bei der Landesstiftung Baden-Württemberg den Bereich Wissenschaft und Forschung leitet. Die unterschiedlichen Kompetenzen sollten gebündelt, Synergien zwischen den Forschungsteams effektiv genutzt – und damit letztlich auch das Profil jeder einzelnen der miteinander kooperierenden Institutionen geschärft werden. „Wir wollten ein umfassendes Wissensnetz von Experten schaffen, das verhindert, dass das Rad an unterschiedlichen Stellen immer wieder neu erfunden wird“, sagt Beer.

Die Gründung des Kompetenznetzes stieß bei den Nanowissenschaftlern in Baden-Württemberg auf ein immenses Interesse. Dass man dort auf eine exzellente Basis aufbauen kann, belegt die Qualität der Projek-

**„Alle sind begeistert bei der Sache. Die Projekte sind durch die Bank von hoher Qualität.“**

Dr. Werner Grünwald (Gutachter) ehem. Robert Bosch GmbH, Stuttgart



N. Grünwald

weise als Basis für leuchtstarke Mini-Laser oder hochempfindliche Sensoren.

Was Falko Netzer an dem eng verzahnten Forschernetzwerk beeindruckt, ist die brandaktuelle Grundlagenforschung, die die beteiligten Wissenschaftler betreiben, – und die effiziente Förderung ihrer Arbeiten durch

keit für die Projekte des Kompetenznetzes widmet, um deren hohen Stellenwert im internationalen Vergleich. „Die Grundlagenforschung, wie sie dort betrieben wird, ist von großer Bedeutung für Wirtschaft und Gesellschaft“, betont Grünwald. „Sie wird jedoch im allgemeinen immer weniger gefördert, da immer mehr nach möglichst

Von links nach rechts: FZ Karlsruhe; Univ. Karlsruhe; Univ. Stuttgart; MPI für Festkörperforschung, Stuttgart; Univ. Ulm; R. Metzger/Univ. Konstanz

Vereinte Kräfte:  
Wissenschaftler aus  
diversen Disziplinen  
und Forschungsein-  
richtungen in Baden-  
Württemberg ziehen  
in Sachen „Nano“  
an einem Strang.



**„Etwas Vergleichbares  
wie das Kompetenznetz  
ist schwer zu finden.“**

Prof. Falko Netzer (Gutachter)  
Karl-Franzens-Universität Graz



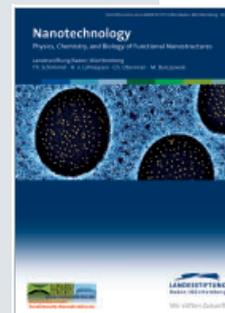
te, mit denen sich die Forscher für eine Förderung bewarben. „Sie war durch die Bank hervorragend“ lobt Gutachter Werner Grünwald. „Daher wurde bei rund drei Viertel der Projekte eine Förderung durch die Landesstiftung bewilligt.“ Und: „Es machen auch etliche Teams mit, die kein Geld dafür beantragt haben“ – ein eindeutiges Indiz für den großen Nutzen, den die Wissenschaftler aus der Zusammenarbeit ziehen,

Nesper. „Die wichtigsten Durchbrüche gelingen erfahrungsgemäß immer an Schnittstellen zwischen verschiedenen Disziplinen.“ Auch in der Schweiz hat man das erkannt. Dort gibt es seit Kurzem nationale Kom-

An eine sehr erfolgreich beendete erste Runde schloss sich ab 2006 eine zweite, dreijährige Projektphase für das Kompetenznetz an. „Schon das ist ungewöhnlich bei den von uns geförderten Projekten“, sagt Bereichsleiter Rudi Beer von der Landesstiftung Baden-Württemberg. Insgesamt flossen bislang fast 10 Millionen Euro in den Nanoforschungsverbund, davon 1,1 Millionen im Rahmen der Biotechnologie-Offensive vom baden-württembergischen Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst. „Und es wird sich sogar noch eine dritte Runde anschließen“, kündigt Beer an. „Die Fördergelder in Höhe von 5 Millionen Euro wurden im Februar genehmigt.“ ■

## NANOFORSCHUNG IM FOKUS

Band 32 der Schriftenreihe der Landesstiftung Baden-Württemberg fasst auf 500 Seiten die wichtigsten Forschungsergebnisse im Kompetenznetz zusammen. Das auf Englisch verfasste Buch bietet damit einen exzellenten Überblick über den aktuellen Stand der Forschung



in den Schlüsselbereichen der Nanotechnologie. Herausgeber von „Nanotechnology – Physics, Chemistry, and Biology of Functional Nanostructures“ sind neben der Landesstiftung Baden-Württemberg die Karlsruher Wissenschaftler Prof. Thomas Schimmel, Prof. Hilbert von Löhneysen, Dr. Matthias Barczewski und Dr. Christian Obermair. Das Buch kann man kostenlos beziehen über die Landesstiftung Baden-Württemberg gGmbH, Im Kaisemer 1, 70191 Stuttgart, [www.landesstiftung-bw.de](http://www.landesstiftung-bw.de) oder über die Geschäftsstelle des Kompetenznetzes Funktionelle Nanostrukturen, Institut für Angewandte Physik der Universität Karlsruhe, Wolfgang-Gaede-Straße 1, 76131 Karlsruhe, [www.nanonetz-bw.de](http://www.nanonetz-bw.de)



**„Die wichtigsten Durchbrüche  
gelingen an den Schnittstellen  
verschiedener Disziplinen.“**

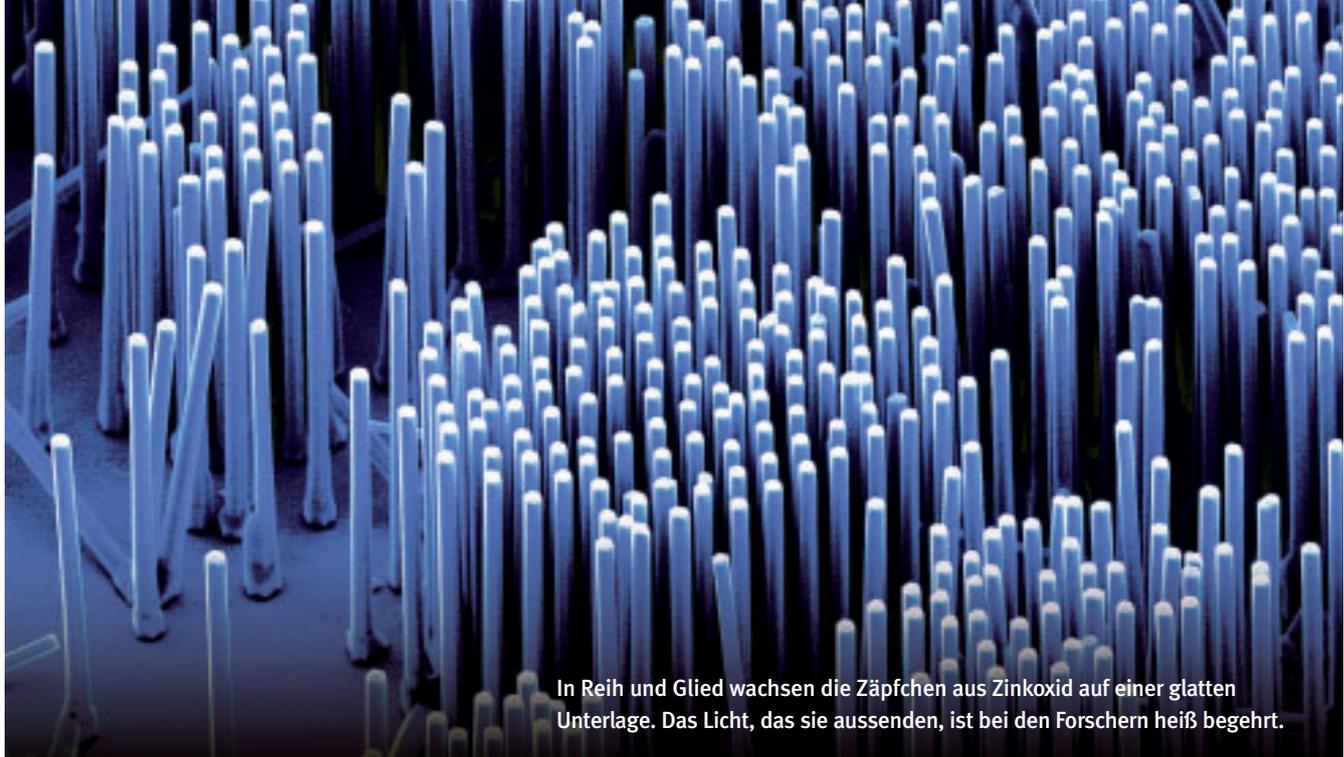
Prof. Reinhard Nesper (Gutachter)  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

und für die Wertschätzung, die sie dem Netz entgegenbringen. „So etwas kenne ich sonst nirgendwo“, sagt Grünwald.

„Der entscheidende Pluspunkt des Netzes ist die Zusammenarbeit der Forscherteams über räumliche Distanzen und über die Grenzen verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen hinweg“, sagt Prof. Reinhard Nesper, Leiter der Instituts für Anorganische Chemie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich und ebenfalls Gutachter für die Landesstiftung Baden-Württemberg. „Gerade bei der Nanotechnologie, die als Schlüsseltechnologie für unterschiedlichste neuartige Anwendungen angesehen wird, ist es entscheidend, die wissenschaftlichen und experimentellen Grundlagen interdisziplinär zu erarbeiten“, betont

sichern, Ingenieuren und Werkstoffwissenschaftlern ein gemeinsames Ziel. In regelmäßigen Seminaren und Workshops tauschen sie ihre Ergebnisse aus. „Die Vorträge, Postersitzungen und Diskussionen auf diesen Veranstaltungen sind ein idealer Nährboden für neue Motivation und kreative Ideen“, sagt Werner Grünwald. „Und sie sind eine gute Gelegenheit für junge Nachwuchswissenschaftler, Zugang zur etablierten Forschercommunity zu bekommen“, ergänzt sein Gutachter-Kollege Falko Netzer.





In Reih und Glied wachsen die Zäpfchen aus Zinkoxid auf einer glatten Unterlage. Das Licht, das sie aussenden, ist bei den Forschern heiß begehrt.

Universität Karlsruhe

# BLAULICHT AUS DEM SÄULENWALD



Nanosäulen aus Zinkoxid wecken die Hoffnung auf LEDs und Laserdioden, die billiger und besser sind als die heutigen.

Text: Bernd Müller

**WAS HABEN** Mineraldietabletten, Sonnenschutzcremes, Autoreifen und Schweinefutter gemeinsam? Antwort: Sie enthalten Zinkoxid. Das weiße Pulver wird jedes Jahr in Mengen von mehreren Hunderttausend Tonnen hergestellt und vielen Produkten beigemischt. So blockt es in Cremes schädliches UV-Licht oder leitet die Wärme ab, die beim Walken des Autoreifens entsteht.

Nachdem das Forschungsinteresse an dem „alten“ Stoff zwischenzeitlich erlahmt war, ist es nun wieder sehr groß – jährlich 2000 wissenschaftliche Publikationen belegen das. Auch Prof. Claus Klingshirn hat an der Universität Karlsruhe die Forschung am Zink-

oxid wieder aufgenommen, zusammen mit Prof. Dagmar Gerthsen und Prof. Heinz Kalt sowie zwei Professoren der Universität Ulm, Rolf Sauer und Klaus Thonke. Denn: „Kristalle aus Zinkoxid leuchten – fluoreszieren –, wenn man sie mit einem Laser anregt“, sagt Klingshirn. Dabei hängt die Fluoreszenzfarbe – Gelb, Grün, Blau oder Rot – nur von kleinsten Mengen zugemischter Stoffe ab. Diese Eigenschaft hat die Hoffnung geweckt, aus den Kristallen Halbleiterstrukturen bauen zu können, die auch beim Anlegen einer elektrischen Spannung leuchten – heller als heutige Leuchtdioden (LEDs) und möglichst mit blauer Farbe.

Zwar finden sich bereits in jedem DVD-Player blaue Laserdioden, die technologisch auf blauen LEDs beruhen. Doch die Industrie ist nicht zufrieden. Der Grundstoff Galliumnitrid in blauen und grünen LEDs ist schwer herzustellen, teuer und obendrein giftig. Besonders ärgerlich ist, dass die wichtigen Patente in der Hand des japanischen Forschers Prof. Shuji Nakamura liegen, der Mitte der Neunzigerjahre LEDs und die erste blaue Laserdiode auf Basis von Galliumnitrid entwickelt hat. Anders Zinkoxid: Der essbare Stoff ist in großen Mengen spottbillig erhältlich und wächst in verschiedensten Kristallformen und Größen fast von selbst. Mit ihm wären auch groß-

M. F. Chillimaid/SPL/Agentur Focus

flächige Anordnungen von LEDs zu verwirklichen – und damit energiesparende weiße Leuchten. Denn aus Blau, Grün und Rot lassen sich alle Farben darstellen. Daneben elektrisiert die Forscher die Aussicht, aus Zinkoxid eines Tages besonders effektive blaue Laser zu bauen, die in den Nachfolgern der DVD-Player – Blue-Ray-Player oder spätere Gerätegenerationen – genutzt werden könnten.

Damit sich ein Stoff zur Leuchtdiode eignet, muss er ein Halbleiter sein – eine Bedingung, die Zinkoxid von Natur aus erfüllt. Zudem muss sich das Material dotieren lassen: Dazu spickt man es mit einer bestimmten Menge Fremdatomen, die freie Ladungsträger zur Verfügung stellen, sodass Strom fließen kann. Der entscheidende physikalische Effekt findet in einer Diode dort statt, wo zwei unterschiedlich dotierte Halbleitermaterialien zusammenstoßen – der n-Leiter und der p-Leiter. Der n-Leiter besitzt einen Überschuss freier Elektronen, der p-Leiter einen Überschuss freier Löcher, zwischen denen die Elektronen hüpfen können. Haben die Energieniveaus der beiden Halbleiter einen bestimmten Abstand, leuchtet ein pn-Übergang, wenn man eine Spannung anlegt, durch Vereinigung von Elektronen und Löchern.

### ES MANGELT AN LÖCHERN

Doch das ist nicht einfach zu erreichen. Derzeit versucht man als p-Dotierung Stickstoff-, Phosphor- oder Arsen-Atome statt Sauerstoff einzubauen sowie Lithium- statt Zink-Atomen. Inzwischen ist es einigen Teams, vor allem in Japan und Korea, aber auch in Deutschland, gelungen, p-dotiertes Zinkoxid herzustellen. Doch die Zahl der Leitungslöcher ist noch zu gering. Trotzdem reicht es offenbar schon für einen funktionierenden pn-Übergang, denn in den letzten Monaten haben einige Arbeitsgruppen gemeldet, sie hätten LEDs hergestellt. Von „heller Emission“ sei teilweise in diesen Publikationen zu lesen, schmunzelt Klingshirn. Doch was als „hell“ angepriesen werde, lasse sich allenfalls bei heruntergelassenen Fensterläden als Licht erahnen.

Anstatt ein bisschen Licht aus dem Material zu quetschen, setzen Klingshirn und seine Kollegen im Projekt der Landesstiftung Baden-Württemberg vorwiegend auf Er-

**Fülle von Anwendungen: Schon heute findet sich Zinkoxid in zahlreichen Produkten – zum Beispiel in Sonnencremes, Dragees, Autoreifen und Schweinefutter. Eine neue Einsatzmöglichkeit bietet sich dem vielseitigen Stoff künftig als Material für winzige blaue Laser- und Leuchtdioden.**

kenntnisgewinn. „Die Physik muss so interessant sein, dass die Forschung im Fall des Scheiterns kommerzieller Anwendungen dennoch profitiert“, fordert Gerthsen. Zwar ist Forschern kürzlich das Experiment gelungen, winzigen nadelförmigen Kristallen aus Zinkoxid Laserlicht zu entlocken. Doch warum die Nanosäulen lasern, ist derzeit noch nicht klar. In fast allen wissenschaftlichen Publikationen steht, dass Zinkoxid bei Raumtemperatur aufgrund sogenannter exzitonicer Prozesse lasert. Exzitonen sind gebundene Zustände aus Elektron und Loch. „Falsch“ sagt Klingshirn. Die Versuche an der Karlsruher Universität zeigten, dass das Lasern bei der für die Anwendung wichtigen Raumtemperatur durch ein sogenanntes Elektron-Loch-Plasma stattfindet.

### BLEISTIFT-BÜNDEL IN MINIATUR

In Zukunft wollen sich die Karlsruher Wissenschaftler verstärkt auf die Herstellung von Zinkoxid-Nanosäulen konzentrieren. Die sehen unter dem Elektronenmikroskop aus wie ein Bündel Bleistifte, sind aber nur 30 bis 300 Nanometer dünn und zwei bis drei Mikrometer lang. Das Schöne daran: Die Nadeln organisieren sich praktisch von selbst zu perfekten Säulen. Tatsächlich können viele Forschungsgruppen auf der Welt Säulen aus Zinkoxid wachsen lassen, vorzugsweise auf einer Unterlage aus Saphir. Dort sind die Atome ähnlich angeordnet wie im Zinkoxid, sodass dieses leicht andocken kann.

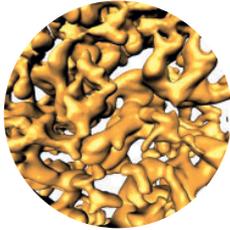
Doch mit der Saphir-Unterlage kann der Karlsruher Physiker Heinz Kalt keinen Laser bauen. Der benötigt einen Spiegel an jedem Ende der Nanosäule. Seine Projektpartner Rolf Sauer und Klaus Thonke von der Universität Ulm nehmen als Substrat deshalb Silizium, das einen deutlich höheren Brechungsindex hat als Zinkoxid und damit als Spiegel wirkt. Am oberen Ende der Nadel ist Luft mit einem sehr geringen Brechungsindex – auch an dieser Grenzfläche wird das Licht zurückgeworfen, sodass es sich in der Nanosäule aufschaukeln kann.



Diesen komplizierten Aufbau beherrschen weltweit nur wenige Teams, weil das Zinkoxid normalerweise nicht als Kristall auf Silizium wächst. Der Trick: In einem Ofen bei 900 bis 1000 Grad Celsius verdampfen Zinkoxidpulver und Graphit und reagieren zu reinem Zink und Kohlendioxid. Der Zinkdampf dringt in kleine Goldtröpfchen ein, die zuvor aufs Substrat platziert werden und wächst bei Zugabe von Sauerstoff darunter zur Säule, hebt also das Goldtröpfchen in die Höhe. „Unsere Nanosäulen sind bei den optischen Eigenschaften Spitze“, schwärmt Sauer. Falls alles nach Plan läuft, werden Leuchtdioden in einigen Jahren nicht mehr aus einem Stapel von Schichten diverser Halbleiter bestehen, sondern aus einem Einzelemitter: Wenn man der Zinkoxidnadel Strom zuführt, wird sie leuchten. ■

A-PIV/BS; A. Oetting/Jump fotoagentur; Haag & Kropp/artpartner-images.de; Sascha/plus 49 (von oben nach unten)

# MUSKELN AUS GOLD



Poröse Edelmetalle mit einer 100 000-mal vergrößerten Oberfläche dehnen sich sichtbar, wenn man eine elektrische Spannung anlegt.

Text: Bernd Müller

**DR. JÖRG WEIßMÜLLER HÄLT** eine durchsichtige Plastikschachtel vors Licht. Darin schimmert silbern ein stecknadelkopfklares Körnchen. „Drei Viertel Silber, ein Viertel Gold“, verrät der Physiker und Privatdozent vom Forschungszentrum Karlsruhe. Der Inhalt einer zweiten Schachtel sieht weit weniger wertvoll aus. Das Körnchen ist grauschwarz, wie ein Stück Bleistiftmine.

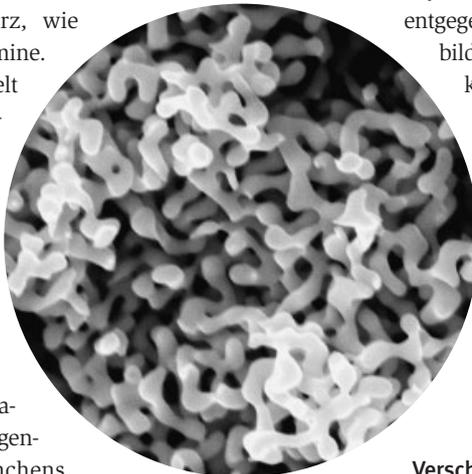
„Reines Gold“, lächelt Weißmüller, der verblüffte Reaktionen gewohnt ist. Dass dieses Gold nicht wie Gold aussieht, liegt daran, dass es porös ist wie ein Schwamm. Die dadurch riesige Oberfläche ändert dramatisch die optischen Eigenschaften des Körnchens.

Bereits den Schöpfern alter Kirchenfenster war bekannt, dass kleingehacktes Gold rot glänzt und sich mit ihm Glas färben lässt. Und die Nanotechnologen von heute wissen, dass Goldpartikel schwarz aussehen, wenn sie nur noch einige zehn Nanometer klein und zusammengedrückt sind.

An der Farbe des Edelmetalls ist Weißmüllers Team vom Institut für Nanotechnologie (INT) des Forschungszentrums kaum interessiert. Ihn faszinieren andere Eigenschaften, die sich auch ändern, wenn die Ober-

fläche eines Metalls extrem vergrößert wird. Auf herkömmlichen Metalloberflächen gleichen sich elektrische Ladungen aus, wenn man eine Spannung anlegt. Ausnahme: Befindet sich das Metall in einer speziellen Flüssigkeit, einem Elektrolyt, sammelt sich Ladung an seiner Oberfläche, da sich im Elektrolyt eine Antischicht mit entgegengesetzter Ladung bildet. Doch das hat

keine Auswirkungen auf das Verhalten des gesamten Metalls, weil sich nur die äußerste Atomschicht auflädt – Form und Farbe des Materials bleiben also gleich.



**Verschlungenes Labyrinth: Unter dem Rasterelektronenmikroskop erkennt man die extrem poröse Struktur des Edelmetalls im Nanoformat.**

## NICHTS ALS OBERFLÄCHE

Diese Beschränkung ließ Jörg Weißmüller nicht ruhen. Gemeinsam mit seinen Kollegen Prof. Dieter Kolb und Prof. Ulrich Herr von der Universität Ulm hat das Team vom Karlsruher Forschungszentrum auf zwei verschiedene Weisen Metalle hergestellt, die so porös sind, dass sie praktisch nur noch

aus Oberfläche bestehen – „hunderttausendmal größer als bei einem massiven Klotz“, schätzt Weißmüller. Bei dem einen Herstellungsverfahren verdampfen die Nanotechniker die Atome des Edelmetalls in einer Vakuumkammer, die mit etwas Heliumgas gefüllt ist. Das Helium bremst und kühlt die heißen Metallatome, die kondensieren und sich an einer kalten Edelstahlwalze als Nanopartikel absetzen. Dort werden sie abgekratzt und in einem Stempel zu kleinen Tabletten gepresst. Die andere Herstellungsverfahren geht von einem massiven Metallklotz aus, der aus 75 Prozent Silber und 25 Prozent Gold besteht. Das Silber wird mit einer Säure herausgeätzt, zurück bleibt das poröse Gold.

Welche Herstellungsweise man auch wählt – die porösen Metalle ändern ihre Eigenschaften dramatisch, wenn man elektrische Ladungen aufbringt. „Indem wir den Oberflächenatomen Ladung hinzufügen, spielen wir das gleiche Spiel wie die Natur, wenn sie im Periodensystem von Element zu Element geht“, erklärt Weißmüller. Zwar sind die Elemente im Periodensystem nach der Zahl ihrer Protonen im Atomkern sortiert, doch die chemischen Eigenschaften werden von der Zahl der Elektronen in der Atomhülle bestimmt. „Nun denken sie natürlich, wir sind Alchemisten“, schmunzelt Weißmüller. Indes:



**Brutstätte für Metallschwämme:** In einer Heliumkondensationsanlage stellen Mitarbeiter des Karlsruher Forschungszentrums die nanostrukturierten Partikel her.

Bislang können die Wissenschaftler im Schnitt nur ein halbes Elektron pro Metallatom aufbringen und die negative Ladung anheben. Damit bleiben sie im Periodensystem auf halbem Wege zwischen zwei Ordnungszahlen stecken. Der Wunsch, etwa dem Kupfer die magnetischen Eigenschaften von Nickel zu übertragen, bleibt schon deshalb unerfüllt, weil sich die Atomkerne nicht parallel zur Elektronenzahl ändern. Auch der Traum vom künstlich hergestellten Gold platzt beim Blick ins Periodensystem: Vor Gold steht Platin und das ist noch teurer.

Reich werden die Karlsruher Nanotechnologen also nicht, sie hoffen allenfalls auf ein Zubrot durch Patente, wenn es gelingt, die neuen Eigenschaften ihrer Metallschwämme für technische Anwendungen zu nutzen. Und dafür stehen die Chancen gut, es sind schon Firmen interessiert – etwa an ei-

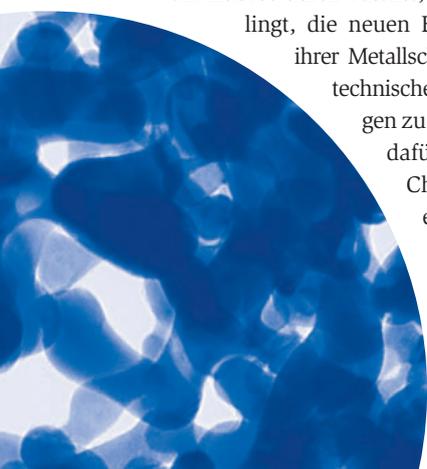
nem Effekt, über den die Forscher im Fachmagazin „Science“ berichtet haben: Wird die Metalloberfläche im Elektrolyt mit Ladungen übersättet, benötigen die Atome mehr Platz, der Schwamm dehnt sich aus. Diese Längendehnung ist so groß, dass man sie in mit bloßem Auge sichtbare Bewegungen umsetzen kann. „Das hat mit Metallen noch niemand geschafft“, freut sich Weißmüller.

#### **DIE LADUNG DEHNT DAS GOLD**

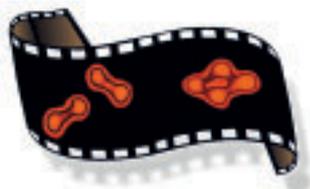
Die Vorgänge, die auf atomarer Ebene ablaufen und zur Dehnung des Metalls führen, sind noch nicht im Detail bekannt. Insbesondere war bislang umstritten, ob chemische Reaktionen an der Oberfläche zum Effekt beitragen. Daher untersuchten die Karlsruher und Ulmer Forscher auch dünne Goldfilme, die sich etwas durchbiegen, wenn sich die Oberfläche verändert. Ergebnis: Es ist allein die Ladung, die bei Nanometallen zur Dehnung führt. Bei Keramiken sind Dehn- und Bewegungseffekte schon lange bekannt: Sogenannte Piezoelemente werden in riesigen Stückzahlen hergestellt und steuern Einspritzvorgänge im Motor oder die Düsen von Tintenstrahl Druckern.

In den letzten Jahren wurden zudem Kunststoffe entwickelt, die enorme Längenänderungen erzielen – von künstlichen „Muskeln“ ist dort die Rede. Wozu braucht man dann „Muskeln“ aus Metall? Gegenüber Piezoelementen, die hohe Spannungen benötigen, haben Metallschwämme einen wichtigen Vorteil: Ein Volt reicht für Dehnungen, für die Piezos über 100 Volt benötigen.

Jedoch gibt es bei den Metallmuskeln noch Verbesserungsbedarf. Die Proben im Labor des INT benötigen etwa eine Sekunde für die volle Dehnung – das ist noch zu langsam für Einspritzvorgänge. Und da Metalle wie Nickel oder Kupfer im Elektrolyt korrodieren, sind die Forscher vorerst auf Gold und Platin angewiesen. Doch die Korrosion unedler Metalle lässt sich womöglich künftig mit einer neuen Klasse von Elektrolyten – „Ionischen Flüssigkeiten“ – verhindern. Für Besucher von Weißmüller wäre der Aha-Effekt zwar kleiner, wenn er ihnen nicht mehr das grauschwarze poröse Goldkörnchen zeigen würde. Doch für Anwendungen wäre es ein echter Fortschritt, auf das teure Edelmetall verzichten zu können. ■



# LEGO FÜR ERWACHSENE



Forscher entwickeln molekulare Bausteine, die sich von selbst zusammenfinden – und dabei menschlichen Konstruktionsplänen folgen.

Text: Tobias Beck

**WENN NANOSKOPISCH** feine Oberflächen ihr Geheimnis preisgeben sollen, müssen andere Oberflächen schon mal leiden. „Bitte keine Grundreinigung!“ steht groß an der Labortür im sechsten Stock des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart. Das Schrubben und Bohnern des Bodens ist hier zu Messzeiten verboten. Nur wenn kein Poltern von außen die Ruhe der Atome stört, die in luftleeren Probekammern auf den Oberflächen blank polierter Metalle sitzen, können die Forscher sie mit ihren Rastertunnelmikroskopen beobachten.

Gleich mit neun dieser übermannsgroßen Geräte machen die Forscher am Rand der Stadt Jagd auf die Funktionsprinzipien, die den Bauplänen der Natur zugrunde liegen. Die Zahl der Atome im Körper eines Menschen hat 27 Nullen. Doch anstatt ins Chaos zu verfallen, sortieren sich diese Atom-scharen wie von selbst, zu mehr als hundert-tausend Formen verschiedener Einheiten, die unserem Körper zu seinen Funktionen

verhelfen. Manche Kohlenstoff- und Eisen-atome helfen bei der Energieversorgung der Zellen, andere Molekülgruppen lassen Muskeln kontrahieren, die nächsten wiederum Gedanken entstehen. „Genau diesen Übergang, wie aus dem Wirrwarr eine atomare Struktur entsteht, das wollen wir hier verstehen“, erläutert Prof. Klaus Kern.

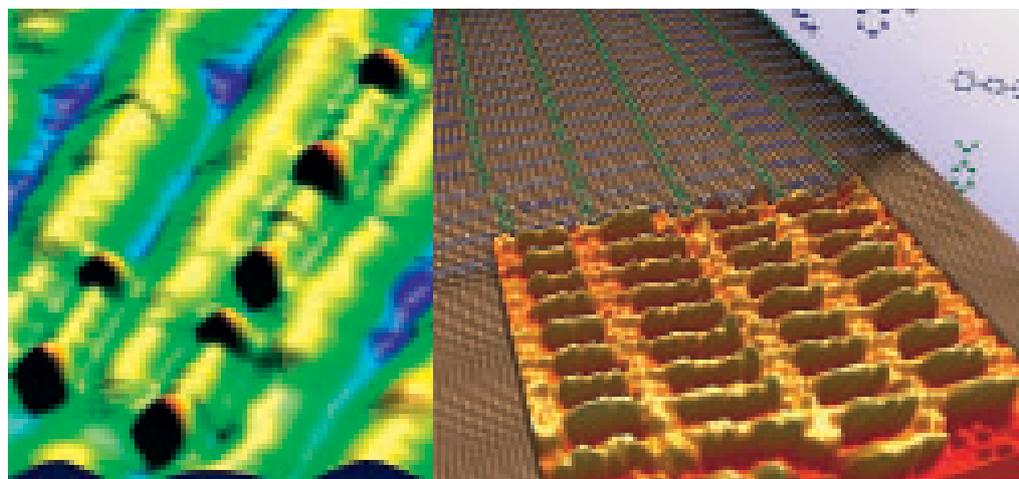
## ANERKENNUNG VON ANGELA MERKEL

Doch es geht dem Physiker, den die Bundeskanzlerin Anfang dieses Jahres mit dem höchstdotierten deutschen Forschungspreis – dem Leibniz-Preis – ausgezeichnet hat, noch um mehr. Mit seinem Team untersucht er, wie man eine derartige Selbstorganisation von Atomen und Molekülen ausnutzen kann, um eine ganz spezielle Funktion zu erzielen. „Wir arbeiten quasi mit einem Legosystem aus winzigen Bausteinen, lassen die Legosteine sich selbst zusammenbauen und schaffen es schon in gewissen Grenzen, vorherzusagen, was diese selbstorganisierte Legomaschine dann kann“, sagt Kern.

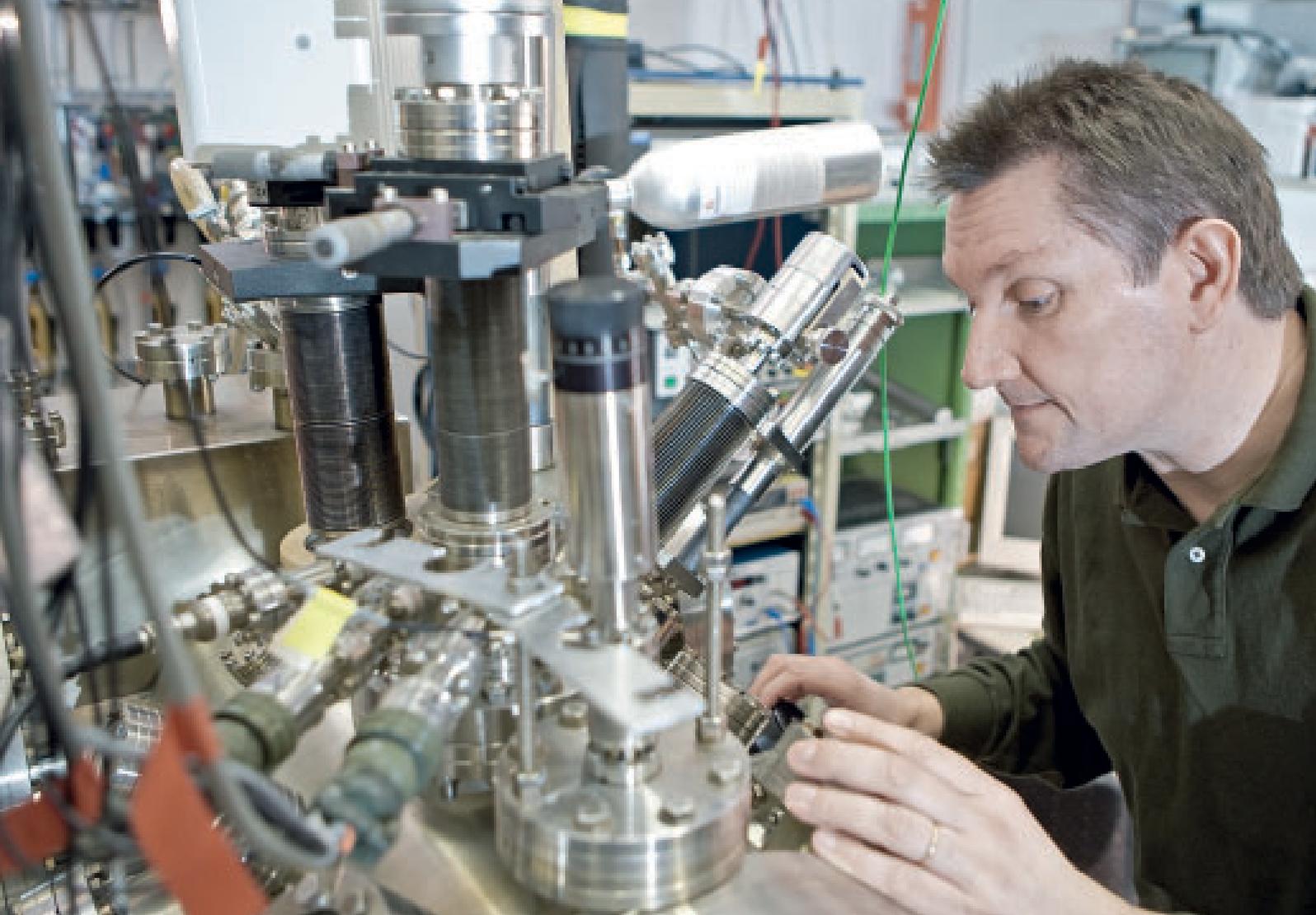
Um diesen großen Blickwinkel auf die Welt des Kleinsten erhalten zu können, müssen Grenzen wissenschaftlicher Disziplinen und Institutionen überschritten werden. Beim Projekt „Nanofunktionalisierte Oberflächen“ sitzen Physiker, Chemiker und Biologen gemeinsam im Boot. Am Forschungszentrum Karlsruhe bauen Forscher Nano-Legosteine, aus denen sich neue Strukturen bilden. In Stuttgart werden diese dann betrachtet und analysiert. An der Universität Ulm testen Experten, wie sich die Nanomuster verhalten. Die Zusammenarbeit funktioniert so schnell, reibungsfrei und konstruktiv wie selten bei interdisziplinären Forschungsprojekten, lobt Kern.

Die Erfolge sprechen für sich. Im letzten Jahr konnten die Forscher in Stuttgart zum ersten Mal zusehen, wie sich nanometer-große, organische Legobausteine auf einer Kupferoberfläche zu einem leiterförmigen Nanomuster zusammenfanden. Das Besondere daran: Die Karlsruher Forscher hatten

**Molekulares Spielbrett:**  
Ähnlich wie man aus Legosteinen Häuser und Figuren bauen kann, kreieren die Forscher nanometerkleine Gebilde aus einzelnen Klötzchen. Doch die fügen sich von selbst zusammen.



FZK u. MPI für Festkörperforschung (unten rechts); MPI für Festkörperforschung (2)



**Blick auf den Nano-Baukasten: Komplizierte Apparate sind nötig, um Atome und Moleküle dazu zu bringen, sich eigenständig zu komplexen Strukturen zu organisieren. Forscher wie der Stuttgarter Physiker Klaus Kern nehmen dabei die Natur zum Vorbild.**

<sup>A. Griesch</sup> die molekularen Bausteine genau auf diese Eigenschaft hin entworfen. Dazu konstruierten sie zwei unterschiedliche Arten organischer Moleküle, sogenannte Pyridine und Carboxylsäuren. Jede Molekülarart gab es – ganz im Sinn eines Legospiels – wiederum in unterschiedlichen Längen.

#### **DIE MUSTER KOMMEN VON SELBST**

Über das Verhalten, das die Nano-Legos dann an den Tag legten, freut sich Klaus Kern noch heute: „Je nach Mischung der Moleküle zeigten sich unterschiedlich große, verschieden geformte Nanostrukturen“. Trafen jeweils einige Bausteine der einen Molekülarart auf Bausteine der anderen Art, so formten sich mal kleine rechteckige, mal größere, fast quadratische Muster. Die Größe der Gitter konnten die Forscher über die Länge der Bausteine genau steuern. Ein langes Pyridin und eine kurze Carboxylsäure ergaben ein Leitmuster. Ein großes Pyridin und eine große Carboxylsäure lieferten da-

gegen ein Nano-Schachbrett. Verwendeten die Wissenschaftler einen ganzen Beutel unterschiedlich langer Nano-Bausteine, wurden die Muster komplizierter und verwinkelter – so wie man eben mit einem Beutel verschiedener Legosteine auch kniffligere Konstruktionen bauen kann. Der Unterschied zum Lego aber war: Die Muster kamen von selbst, ohne dass die Forscher einzelne Moleküle platzieren mussten. Der Schritt vom Betrachten der Nanowelt zum selbstständigen Konstruieren war eindrucksvoll gezeigt.

In der Natur kommen viele Moleküle nicht nur in einer Bauweise, sondern auch in einer zweiten, spiegelverkehrten Form vor. Für die Funktion eines großen Komplexes aus Molekülen ist es aber meist wichtig, dass sich zwei exakt gleich gebaute Moleküle finden. Die Forscher konnten mithilfe ihres Mikroskops filmen, wie sich zwei Aminosäuren einander nähern, um sich zu einem Dimer genannten Molekülpaar zusammenzuschlie-

ßen. Die Bildsequenz zeigt, wie die Aminosäuren ihre Gleichartigkeit erkennen. Es ist ähnlich wie bei dem Handschlag zweier Menschen: Nur zwei rechte Hände – oder zwei linke – können gut ineinandergreifen.

Mit dem Film verstehen die Forscher, wie die Natur funktionierende Baueinheiten zusammensetzt: In fast allen biochemischen Prozessen in Lebewesen müssen sich Aminosäuren in Eiweißen auf diese Weise erkennen und zusammenarbeiten. Atomare Strukturen für beliebige Aufgaben gezielt herstellen – eine verlockende Aussicht. Wann werden Nano-Legos also den Alltag verändern? „Trotz aller Erfolge ist unsere Forschung reine Grundlagenarbeit“, sagt Klaus Kern. Doch das Ziel haben die Wissenschaftler fest im Blick: Sie wollen ein Nano-Lego in 3D entwickeln. „Dieser Baukasten würde wirklich nach dem Prinzip der Natur arbeiten“, sagt Kern. Allerdings: Die Natur hat mehrere Zehntausend Jahre Vorsprung. ■



# WIE GUT IST DER STANDORT SÜDWEST?

Die Qualität von wissenschaftlicher Arbeit wird über die Zahl der Fachpublikationen sowie der Zitaten gemessen. Hier die Resultate für die Nanoforschung.

*Text: Privatdozent Dr. Ulrich Schmoch und Dr. Torben Schubert, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe*

SEIT MITTE DER NEUNZIGERJAHRE steigen die Forschungsaktivitäten in der Nanotechnologie rasant an (erste Flut an Nanotech-Veröffentlichungen). Europa liegt dabei vor den USA und deutlich vor Japan. Auffallend ist das starke Wachstum der Publikationen der übrigen Länder. Daran hat China einen großen Anteil (alle Zahlen basieren auf der US-Publikationsdatenbank Science Citation Index, Kürzel: SCI, die sich als weltweiter Standard eingebürgert hat).

Der Anteil Deutschlands an den europäischen Nanotech-Publikationen lag 2006 bei 31 Prozent, wobei 22 Prozent der aus Deutschland kommenden Publikationen aus Baden-Württemberg stammen.

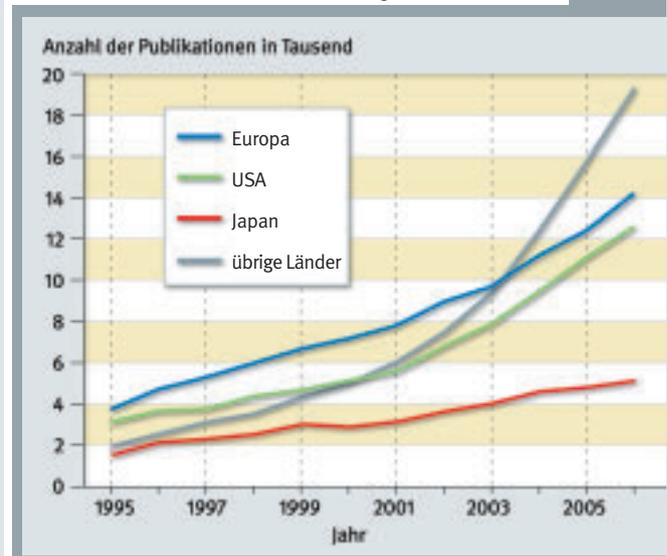
Die Auswertung der Publikationsdatenbank erlaubt es, besonders aktive Einrichtungen zu ermitteln. Bei den Universitäten betrachteten wir speziell Fachbereiche, weil das am ehesten einen Vergleich mit den ausländischen Universitäten – etwa Cambridge und Oxford – oder mit außeruniversitären Forschungsinstituten wie dem Max-Planck-Institut für Polymerforschung ermöglicht.

## DIE AKTIVSTEN: TOP 20 IN EUROPA

In der Liste der 21 Einrichtungen mit den meisten Publikationen in Europa stammen 14 aus Deutschland (baden-württembergische Einrichtungen in Orange). Mit dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart steht ein Institut aus Baden-Württemberg an der Spitze. Und zwei weitere Einrichtungen aus Baden-Württemberg sind unter den Top 20: das Max-Planck-Institut für Metallforschung – ebenfalls in Stuttgart – und das Institut für Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe.

## 1. FLUT AN NANOTECH-VERÖFFENTLICHUNGEN

SCI-Publikationen im internationalen Vergleich



## 2. DIE AKTIVSTEN: TOP 20 IN EUROPA

Zahl der Publikationen 2006

1	MPI für Festkörperforschung, Stuttgart	169
2	MPI für Polymerforschung, Mainz	131
3	MPI für Mikrostrukturphysik, Halle	116
4	Uni Oxford, Department of Materials (GB)	113
5	Uni Cambridge, Cavendish Laboratory (GB)	105
6	Uni Cambridge, Depart. of Materials Science & Metallurgy (GB)	103
7	CSIC, Instituto de Ciencia de Materiales, Madrid (E)	102
8	Uni Erlangen-Nürnberg, Naturwissenschaftliche Fakultät	98
9	MPI für Metallforschung, Stuttgart	97
10	MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam	93
11	TU Berlin, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften	84
12	A. F. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg (RUS)	82
13	Uni Cambridge, Department of Chemistry (GB)	80
14	Uni Münster, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät	77
14	Humboldt-Uni Berlin, Math.-Naturwissenschaftl. Fakultät	77
16	FZ Karlsruhe, Institut für Nanotechnologie	76
17	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin	74
18	Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, Dresden	66
19	European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble (F)	64
20	TU Berlin, Institut für Festkörperphysik	61

### 3. DIE AKTIVSTEN: TOP 20 IN DEUTSCHLAND



Zahl der Publikationen 2006

1	MPI für Festkörperforschung, Stuttgart	169
2	MPI für Polymerforschung, Mainz	131
3	MPI für Mikrostrukturphysik, Halle	116
4	Uni Erlangen-Nürnberg, Naturwissenschaftliche Fakultät	98
5	MPI für Metallforschung, Stuttgart	97
6	MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam	93
7	TU Berlin, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften	84
8	Uni Münster, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät	77
8	Humboldt-Uni Berlin, Mathematisch-Naturwiss. Fakultät	77
10	FZ Karlsruhe, Institut für Nanotechnologie	76
11	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin	74
12	Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, Dresden	66
13	TU Berlin, Institut für Festkörperphysik	61
14	Hahn-Meitner-Institut, Berlin	51
15	FU Berlin, Fakultät für Physik	51
16	Uni Karlsruhe, Fakultät für Physik	39
17	Uni Konstanz, Fachbereich für Physik	36
18	Uni Augsburg, Fakultät für Physik	35
18	Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin	35
20	TU München, Walter-Schottky-Institut	33

### 4. NANOTECH IN BADEN-WÜRTTEMBERG



Zahl der Publikationen 2006

1	MPI für Festkörperforschung, Stuttgart	169
2	MPI für Metallforschung, Stuttgart	97
3	FZ Karlsruhe, Institut für Nanotechnologie	76
4	Uni Karlsruhe, Fakultät für Physik	39
5	Uni Konstanz, Fachbereich Physik	36
6	Uni Tübingen, Fakultät für Chemie und Pharmazie	26
7	Uni Karlsruhe, Fakultät für Chemie und Biowissenschaften	22
8	Uni Heidelberg, Fakultät für Chemie und Geowissenschaften	15
9	Uni Heidelberg, Fakultät für Physik und Astronomie	14
10	Uni Freiburg, Material Research Center	14

### 5. DIE MEISTGENANNTEN



Zitate pro im Jahr 2004 veröffentlichter Publikation

	Massachusetts Institute of Technology	22,18
	FZ Karlsruhe, Institut für Nanotechnologie	17,04
	MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam	15,82
	MPI für Polymerforschung, Mainz	12,76
	MPI für Festkörperforschung, Stuttgart	10,80
	MPI für Mikrostrukturphysik, Halle	10,70
	Uni Cambridge, Depart. of Materials Science & Metallurgy	10,69
	Humboldt-Uni Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftl. Fakultät	10,09
	MPI für Metallforschung, Stuttgart	9,67
	Uni Erlangen-Nürnberg, Naturwissenschaftliche Fakultät	9,62
	Uni Münster, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät	9,36
	CSIC, Instituto de Ciencia de Materiales, Madrid	9,22
	Uni Oxford, Department of Materials	8,80
	TU Berlin, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften	7,63
	Uni Cambridge, Cavendish Laboratory	7,36

### DIE AKTIVSTEN IN DEUTSCHLAND

Die Auswertung von Einrichtungen mit den meisten Publikationen für Deutschland enthält fünf baden-württembergische Institutionen. Neben zwei Max-Planck-Instituten und dem Forschungszentrum Karlsruhe sind das auch die Universität in Karlsruhe sowie die Universität Konstanz. Die zehn publikationsstärksten Forschungseinrichtungen im Südwesten folgen in der nächsten Tabelle.

Institute der Fraunhofer-Gesellschaft sind nirgendwo verzeichnet – obwohl sie nach Experten-Meinung in der Nanotechnologie sehr leistungsfähig sind. Ursache ist die SCI-Datenbank, die stark auf Grundlagenforschung ausgerichtet ist. Fraunhofer-Institute dagegen betreiben vor allem angewandte Forschung.

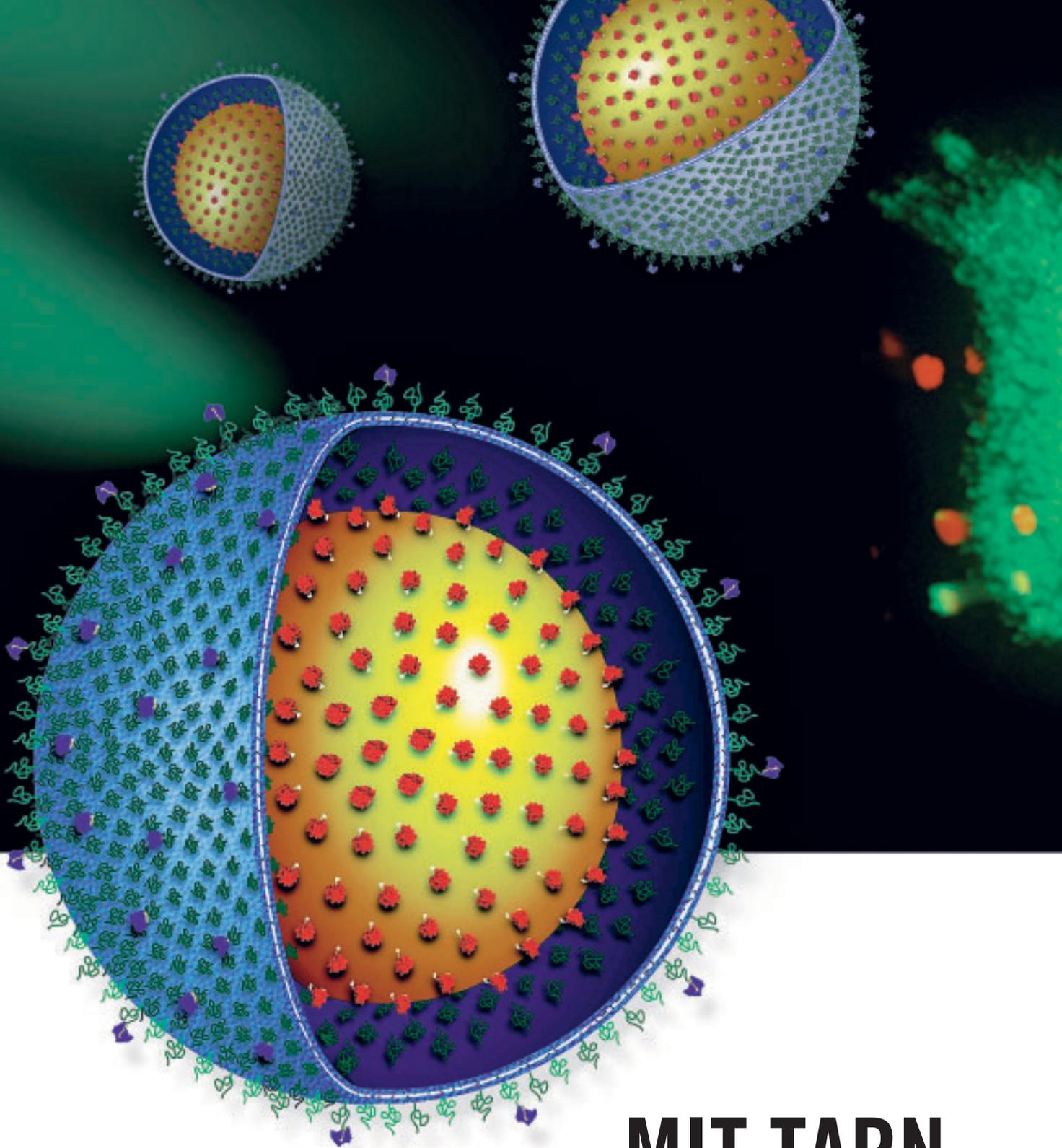
### DIE MEISTGENANNTEN

Eine große Zahl an Veröffentlichungen allein ist nur beschränkt aussagefähig. Denn hinter häufigen Publikationen könnte die Strategie stehen, viele kleinteilige Ergebnisse zu veröffentlichen, um so die Bilanz aufzupolieren. Deshalb wird die Zahl der Publikationen häufig um qualitative Merkmale ergänzt. Hier hat sich vor allem die Zahl der Zitate bewährt. Denn wichtige Veröffentlichungen werden von späteren Publikationen gerne als Quelle angeführt.

Für die Zitatauswertung betrachteten wir Publikationen des Jahres 2004. Auch wenn es einen anderen Anschein hat, ist dieses Bezugsjahr höchst aktuell: Zwischen der eigentlichen Publikation und dem Zeitpunkt, zu dem diese von anderen Wissenschaftlern wahrgenommen und zitiert wird, vergehen oft Jahre. Konkret analysierten wir die Zitatquoten der nach der Zahl der Publikationen führenden deutschen Einrichtungen. Diese stellten wir den aktivsten europäischen Einrichtungen sowie dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA gegenüber, das als weltführend gilt. Nach Zitaten pro Publikation ist das MIT in der Nanotechnologie mit einem Wert von etwa 22 überragend, wobei das Institut für Nanotechnologie (INT) am Forschungszentrum Karlsruhe mit einem Index von 17 nur wenig dahinter liegt.

### FAZIT

Mit den beiden Stuttgarter Max-Planck-Instituten für Festkörperforschung und Metallforschung verfügt Baden-Württemberg über zwei weltweit beachtete Forschungszentren der Nanotechnologie, die nach Zahl ihrer Publikationen in Europa zur Spitzengruppe gehören. Große Bedeutung hat auch der Standort Karlsruhe, an dem sich die Universität und das Forschungszentrum zum Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Anfang 2008 zusammengeschlossen haben. Betrachtet man die Publikationszahlen der hier untersuchten Forschungseinrichtungen, so steht das KIT in Europa bereits an zweiter Stelle (Forschungszentrum + Uni, Physik, + Uni, Chemie und Biowissenschaften = 137 Publikationen). Bemerkenswert ist vor allem die hohe Qualität der Forschung des Instituts für Nanotechnologie, einer zentralen Säule des KIT: Dieses spielt in derselben Liga wie die weltweit führenden Forschungszentren. ■



# MIT TARN- KAPPEN GEGEN KREBS

Winzige Nanopartikel, beladen mit Molekülen des Immunsystems, sollen Tumorzellen in den Selbstmord treiben.



Sicher verpackt und vor der Immunabwehr des Körpers verborgen: Nano-Kügelchen sollen Wirkstoffe zu Tumorzellen schleusen. Dieses Ziel verfolgt der Stuttgarter Zellbiologe Peter Scheurich.

Text: Bernd Müller

**MIT KOPFSCHMERZEN** fängt es an, dann kommen Gliederschmerzen und Fieber dazu – eine Grippe. Wer tagelang das Bett hüten muss, schiebt die Schuld auf fiese Viren, die überall durch die Luft schwirren. Doch die Erreger sind gar nicht für die Krankheitssymptome verantwortlich. Kopfschmerz und Fieber sind eine Antwort des Immunsystems, ausgelöst durch Signalstoffe wie den Tumornekrosefaktor (TNF). Er steuert die Abwehrreaktion unserer 60 Billionen Körperzellen.

Doch TNF ist ein zweischneidiges Schwert: Wohldosiert bekämpft er Krankheiten, im Überfluss führt er zu Überreaktionen des Körpers und sogar zum Tod, weil er Zellen in den Selbstmord treibt. Doch auch das hat eine gute Seite: Der amerikanische Chirurg und Krebsforscher William Coley beobach-

tete bereits vor hundert Jahren, dass eine heftige Immunabwehr Tumore verschwinden lassen kann. Als 1985 gentechnisch hergestelltes, gereinigtes TNF bei Tieren die gleiche Wirkung zeigte, titelten die Gazetten von Stern bis Spiegel: „Krebs besiegt“.

„Das war mal wieder voreilig“, findet Prof. Peter Scheurich, der sich am Institut für Zellbiologie und Immunologie der Universität Stuttgart mit dem Tumornekrosefaktor beschäftigt. In den letzten gut 20 Jahren wurde zwar intensiv an TNF als Krebskiller geforscht, doch der Einsatz beim Menschen erwies sich schwieriger als gedacht. Denn die Dosis, die zum Absterben von Krebszellen führt, ist 25-mal höher als es der Körper verträgt. Der Krebs wäre dann tot, der Patient aber leider auch. So machten Mediziner umständliche Klimmzüge, etwa indem sie

tumorbefallene Gliedmaßen an einen separaten künstlichen Blutkreislauf anschlossen und dann TNF spritzten. Doch solche Therapien sind für Massenkrankheiten wie Darmkrebs oder Brustkrebs keine Lösung.

Vor etwa drei Jahren kamen die Professoren Roland Kontermann, Peter Scheurich und Klaus Pfizenmaier auf die Idee, die TNF-Moleküle so zu verpacken, dass sie unerkannt vom Immunsystem und seinen Fresszellen durch den Blutkreislauf wandern und ihre zerstörerische Kraft erst entfalten, wenn sie auf Krebszellen treffen. Den entscheidenden Impuls zur Umsetzung fanden sie durch Zufall: Ein Mitarbeiter von Institutsleiter Klaus Pfizenmaier traf Prof. Katharina Landfester von der Universität Ulm. Die Chemikerin hatte Erfahrung mit Nanopartikeln, die zum Beispiel mit Medikamenten

oder anderen Substanzen beladen werden können. Die vier Forscher gründeten eine Arbeitsgruppe, um gemeinsam Fährten für TNF zu konstruieren, die Krebszellen gezielt bekämpfen.

### KEINEN MÜLL IM KÖRPER LASSEN

Was die Stuttgart-Ulmer-Allianz bauen will, ist ein Wunderwerk der Biochemie mit einer ausgeklügelten Kombination aus Wirkstoff, Trägermaterial, Hülle, Tarnkappe und „Adresslabel“. So ein multifunktionaler Tarnkappenbomber misst 150 Nanometer und besteht aus folgenden Komponenten:

- **Kunststoff.** Ein Kügelchen aus Polystyrol dient als Träger der funktionellen Moleküle. In seinem Inneren enthält es fluoreszierende Moleküle, die es den Forschern erleichtern, die Nanopartikel im Körper aufzuspüren und bei der Arbeit zu beobachten. Die könnten später bei einem Medikament durch weitere Zellgifte ersetzt werden oder durch magnetische Partikel, die im Kernspintomograph sichtbar sind. „Das Paket ist modular aufgebaut und lässt sich beliebig bestücken“, verspricht Katharina Landfester. Skurril ist die Art und Weise, wie sie die Partikel aus Tröpfchen bildet und die Bauteile ins Innere bringt: mit Ultraschall, der die Ingredienzien so in Schwingung versetzt, dass sie sich wie gewünscht zusammenfinden. Ge-

Grafik: K. Marx; Quelle: R. Kontermann (Uni Stuttgart)



plant ist, Polystyrol durch biologisch abbaubare Polymere wie Polymilchsäure zu ersetzen. „Wir wollen schließlich keinen Müll im Körper des Patienten hinterlassen“, sagt Peter Scheurich.

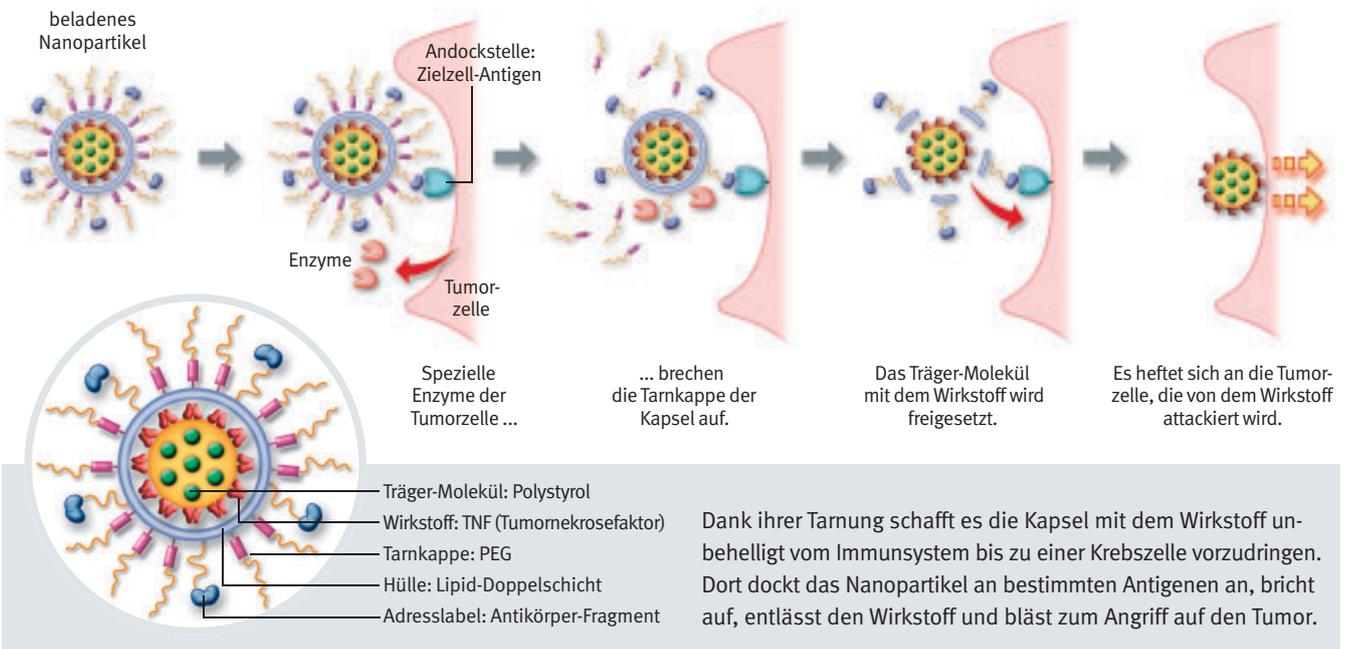
- **TNF.** Die Moleküle des Tumornekrosefaktors sitzen an der Oberfläche des Polymerkügelchens. Am Einsatzort sollen sie sich

auf der Tumorzelle anreichern und diese dazu bringen, Selbstmord zu begehen. Schon wenige Nanopartikel dürften genügen, um eine Krebszelle abzutöten. Das klappt allerdings nur, wenn beide TNF-Rezeptoren auf der Zelle aktiviert werden.

- **Lipid-Doppelschicht.** Sie umhüllt das Polymer-Kügelchen samt TNF-Molekülen

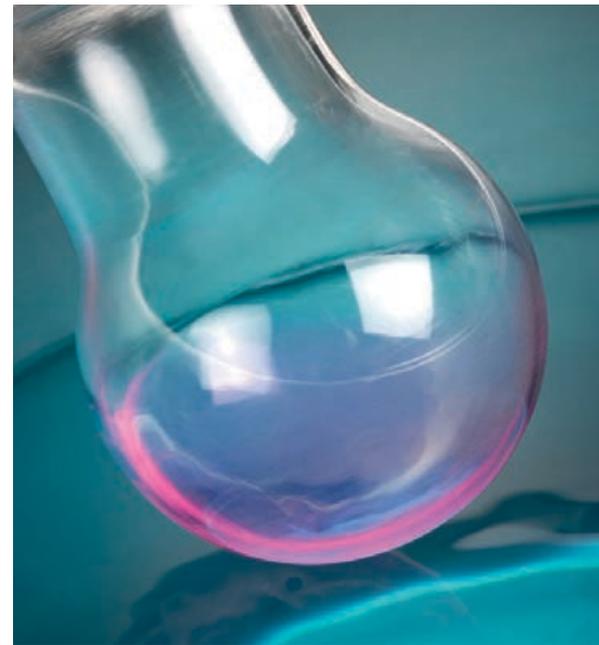
## TROJA AM TUMOR

### Funktionsweise eines getarnten Wirkstoff-Nanopartikels





**Verhüllung:** Doktorandin Sylvia Messerschmidt präpariert eine Lösung, aus der Lipidfilme zum Ummanteln der Nano-Kapseln gewonnen werden (links). Im Rundkolben entstehen die Filme durch Verdampfen (rechts). Unten: Schalen zur Kultivierung von Krebszellen.



auf ihrem Weg zum Einsatzort. Die Hülle ähnelt einer Zellmembran und wird unter anderem aus Cholesterin erzeugt.

- Tarnkappe. Ohne Tarnung wären die Partikel eine leichte Beute fürs Immunsystem, bevor sie ihre heilende Wirkung entfalten können. Roland Kontermann: „Die Fresszellen würden sich freuen.“ Einfache Polyethylenglykol-Moleküle (PEG), wie sie auch in nicht-ionischen Tensiden in Waschmitteln und Seife verwendet werden, igeln das Partikel ein und machen es unsichtbar für die Immunpatrouille im Blut.

- Adresslabel. Damit die Nanopartikel ihr Ziel finden, bestücken die Biologen und Chemiker die Lipidhülle zusätzlich mit Antikörper-Fragmenten, die bevorzugt an die Oberfläche von Tumorzellen andocken. Fragmente deshalb, weil komplette Antikörper wieder die Immunabwehr des Körpers alarmieren und die Nanopartikel gar nicht ihr Ziel erreichen würden.

Für Bau und Beladen des Pakets hat Sylvia Messerschmidt zwei Jahre gebraucht. Sie ist eine von zwei Doktorandinnen, die aus Mitteln der Landesstiftung Baden-Württemberg finanziert werden. Die Wissenschaftler wollen das getarnte Paket bis Ende 2008 so verändern, dass es seine gefährliche Fracht bei Kontakt mit einer Tumorzelle freisetzt. Die Tumorzellen sollen dabei selbst beim Aufschneiden des Pakets helfen. Der Plan



des Teams um Roland Kontermann: Spezielle Enzyme der Tumorzelle, über die gesunde Zellen nicht verfügen, spalten Sollbruchstellen in der Tarnkappe der Nanopartikel. Anschließend schwächen sie die Lipidhülle so, dass diese zerfällt. Die TNF-Moleküle auf dem Polymer-Kügelchen heften sich dann im Tumor an ihre Bindepartner, die TNF-Rezeptoren, und zünden die Lunte.

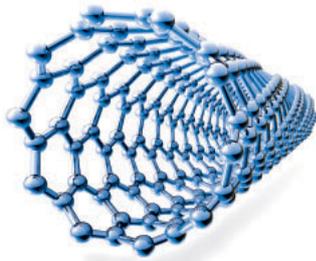
#### MÄUSE ALS VERSUCHSKANINCHEN

Wenn der gesamte Prozess aus komplizierten biochemischen Reaktionen wie geplant funktioniert, sollen die Nanopartikel im institutseigenen Labor an Mäusen getestet werden. Bis zum zugelassenen Medikament werde es aber noch viele Jahre dauern, glaubt Roland Kontermann: „10 bis 15 Jahre sind für die Zulassung eines Medikaments

normal.“ Hinzu kommt, dass die Pharmafirmen zu komplexe Therapeutika scheuen. „Einfache Moleküle, einfache Wirkprozesse – das ist den Herstellern lieber“, stellt Roland Kontermann fest.

Mit simplen Nanomedikamenten, etwa Lipidkügelchen als Hülle für Arzneien und Nahrungsergänzungstoffe, werden schon heute 5,4 Milliarden Dollar jährlich umgesetzt. Katharina Landfester ist daher sicher, dass auch ihre komplizierteren Nanopartikel aus dem Baukasten eine Zukunft haben, weil sie sich mit fast beliebigen Substanzen beladen lassen und außer in der Medizin zu vielen weiteren Zwecken eingesetzt werden können: „Kosmetik, Druckerfarben, selbstheilende Autolacke – die Möglichkeiten sind enorm.“ Kein Zweifel auch, dass die Stuttgart-Ulm-Connection die Entwicklung bei medizinischen Anwendungen maßgeblich mitbestimmen wird – auch wenn die Zahl der Patentanmeldungen in der Nanomedizin laut einer Studie des VDI-Technologiezentrums in Düsseldorf seit Anfang des Jahrzehnts steil angestiegen ist. „Wir sind die einzigen, die solche komplexen Nanopartikel herstellen können“, sagt Kontermann. Das gehe eben nur, wenn diverse Forschungsdisziplinen zusammenarbeiten. Und dazu gehöre neben Geld und Räumen auch das Glück, die richtigen Partner zu finden. ■

# RECHNEN MIT RÖHRCHEN



Nanometerdünne Röhren aus Kohlenstoff lassen sich als Bauteile für neuartige Transistoren verwenden. Computer sollen damit bald noch leistungsfähiger werden.

Text: Ralf Butscher

**WINZIGKLEINE LICHTPUNKTE** funkeln auf einem Scheibchen, das Dr. Marko Burghard auf dem Messtisch seines Labors am Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung fixiert hat. Sie werden von einem Lasermikroskop erzeugt, dessen fein fokussierter Strahl einen Transistor auf dem Scheibchen beleuchtet. Während er mit dem Laserlicht bestimmte Punkte des Transistors ins Visier nimmt, misst Burghard den elektrischen Strom, der dadurch in der Probe fließt. „Dieser Photostrom ermöglicht es, sogenannte Potenzialbarrieren in dem Transistor aufzuspüren und zu untersuchen“, erklärt der Physikochemiker, der die Molekularelektronik-Forschungsgruppe in der Abteilung für Nanowissenschaften von Prof. Klaus Kern leitet. Die Potenzialbarrieren stemmen sich dem Strom als Widerstand entgegen. Das stört die Funktion des Transistors – eines Halbleiter-Elements, dessen Aufgabe es ist, schwache elektrische Ströme zu verstärken und zu schalten. Auf jedem Mikrochip, der in einem Computer, Mobiltelefon oder Navigationsgerät seinen Dienst tut, drängeln sich Abermillionen oder gar Milliarden einzelner Transistoren.

Die Transistoren, denen Marko Burghard unter dem Mikroskop zu Leibe rückt, zeichnen sich durch eine Besonderheit aus: Sie enthalten Kohlenstoff-Nanoröhrchen – wenige Nanometer dünne, aber mikrometerlange Moleküle mit der Gestalt von Makkaroni, die nur aus Kohlenstoff bestehen. Die Kohlenstoff-Atome sind darin zu einem ebenen Netz verwoben, das zu einem Röhrchen aufgerollt ist. Wie ein feiner Faden

spannt sich ein solches Nano-Makkaroni in einem Molekültransistor – und verbindet zwei Zuführungen, über die er an einen externen Stromkreis angedockt ist: Elektroden, die man als Source (Quelle) und Drain (Abfluss) bezeichnet.

„Die Potenzialbarrieren entstehen dort, wo das Kohlenstoff-Nanoröhrchen mit den Elektroden aus Metall in Kontakt steht“, erklärt Burghard. Soweit wissen die Forscher über die Vorgänge im Inneren eines Molekültransistors Bescheid. „Wie genau die Barrieren von der Art des Elektrodenmaterials abhängen und vor allem, warum sie auch von Röhrchen zu Röhrchen verschieden sind, wissen wir bisher nicht“, gesteht Burghard. Das sind Fragen, denen sich die Wissenschaftler in Stuttgart widmen. Denn erst, wenn man die mikroskopischen Prozesse

im Molekültransistor genau kennt, lassen sich die Eigenschaften solcher Bauelemente optimieren, sodass sie als Teile einer neuen Art von Elektronik salonfähig werden. Diese „Molekulare Elektronik“ soll Computer zu bisher nicht möglichen Leistungen bringen.

## DER KANAL MACHT KOPFZERBRECHEN

Die heute in der Mikroelektronik gebräuchlichen Transistoren bestehen aus Silizium. Für die Herstellung der komplexen Bauteile mit ihren winzigen, filigranen Strukturen ist man auf einen aufwendigen und teuren Prozess angewiesen. Manche Strukturen auf einem modernen Transistor messen nur ein paar Dutzend Nanometer. „Besonders klein sind die Dimensionen des Gatekanals“, sagt Burghard. Diese Rinne aus speziell präpariertem Silizium verbindet Source- und Drain-Elektrode miteinander. Sie bildet eine enge Schleuse, durch die sich Elektronen zwingen, wenn ein Strom fließt. Da im Silizium der Strom nicht widerstandslos fließt, muss der Kanal einerseits möglichst kurz sein, andererseits ist für einen nutzbaren Strom eine gewisse Breite erforderlich. Gerade die Kürze des Gatekanals von wenigen Nanometern bereitet den Chipherstellern, die immer kleinere Gebilde im Silizium erschaffen, zunehmend Kopfzerbrechen.

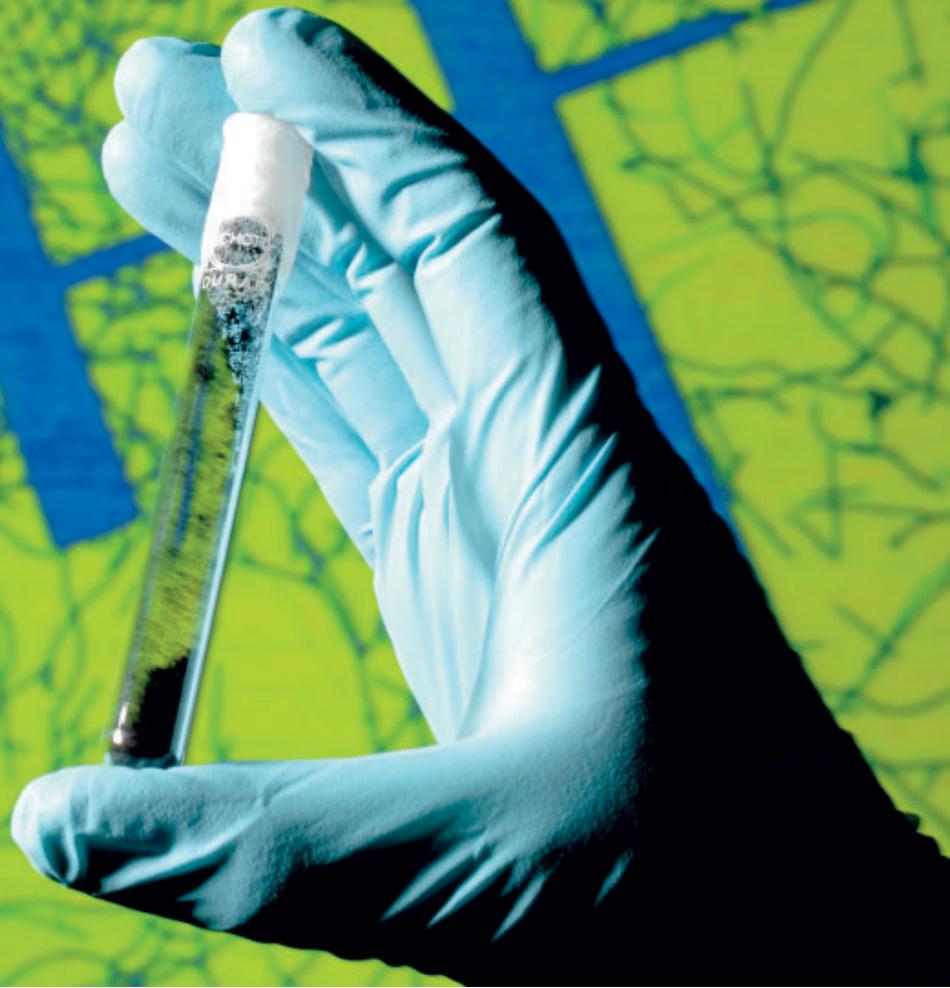
Hier kommen die Kohlenstoff-Nanoröhrchen ins Spiel. Die extrem schlanken Moleküle bilden von Natur aus einen idealen Kanal, um Elektronen durch einen Transistor zu schleusen. Da sich die Ladungsträger praktisch widerstandsfrei durch die Röhre bewegen können, versprechen sie einen sehr



Röhrchen im Visier: Durch Messen des Photostroms unterm Lasermikroskop wird der Molekültransistor untersucht.

B. Müller (2)

Hoffnungsträger für die Elektronik:  
Der schwarze Ruß besteht aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen – wenige Nanometer dünnen, fadenartigen Molekülen (Projektion im Hintergrund).



geringen Energieverbrauch. Die Forscher um Marko Burghard tüfteln daher seit Jahren an Transistoren, in denen Kohlenstoff-Nanoröhrchen integriert sind. Doch die Sache ist nicht so einfach, es gibt gleich mehrere Hürden, die vor einem Einsatz in Elektronikgeräten noch zu überwinden sind.

Ein Hindernis sind die unterschiedlichen Strukturen der Nanoröhrchen. Bei der Herstellung der Makkaroni-Moleküle entsteht stets ein Gemisch aus zwei Arten: Röhrchen, die metallische Eigenschaften haben, und andere, die halbleitend sind. Brauchbar für elektronische Anwendungen sind aber nur die halbleitenden Exemplare. „Bisher hat man es nicht geschafft, gezielt halbleitende Kohlenstoff-Nanoröhrchen zu produzieren“, sagt Burghard. Stattdessen müssen die Forscher aus der Mixtur mühsam die tauglichen Röhrchen herausklauben. Eine weitere Schwierigkeit ist die Integration der Röhrchen auf der Oberfläche eines Trägermaterials, also die Ausrichtung in der für die Funktion des Transistors nötigen Weise. Das Team um Burghard bezieht die Nanoröhrchen vom Institut für Angewandte Physik der Uni-

versität Tübingen. Dort untersuchen Wissenschaftler um Prof. Dieter Kern Möglichkeiten, die schlauchartigen Moleküle an den gewünschten Stellen und in der gewünschten Ausrichtung auf den Substraten anzuordnen. Sie synthetisieren die Röhrchen aus kohlenstoffhaltigen Gasen mithilfe spezieller Katalysatoren. Per Elektronenstrahl-Lithographie positionieren die Tübinger Forscher kleinste Katalysator-Elemente genau da, wo die Röhrchen gebraucht werden.

#### DER SILIZIUMTECHNIK EBENBÜRTIG

Dann schlägt die Stunde der Stuttgarter Kollegen am Max-Planck-Institut. „Unser Ziel ist es, die Physik hinter dem Molekültransistor zu verstehen, um seine Leistungsdaten so weit verbessern zu können, dass er einem Silizium-Transistor mindestens ebenbürtig ist“, sagt Marko Burghard. Dabei richten er und sein Team das Augenmerk vor allem auf die Potenzialbarrieren an den Kontakten. Durch das Dotieren – das Anbringen von bestimmten Fremdmolekülen – gelang es ihnen, den störenden Einfluss der Barrieren drastisch zu senken. So erhalten sie bereits Röhrchen-Transistoren, die hinsichtlich

des maximalen Stroms, der durch sie hindurch geschickt werden kann, Exemplare aus Silizium deutlich übertreffen.

Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend. „Nun geht es zum Beispiel darum, die Stabilität der Molekültransistoren zu erhöhen und ihre Steuerung zu vereinfachen“, sagt Marko Burghard. Dazu dient ein dritter Kontakt über dem Gatekanal. Legt man dort eine elektrische Spannung an, lässt sich der Stromfluss durch den Kanal fein dosiert beeinflussen. „Entscheidend dabei ist, die Steuerelektrode möglichst dicht an den Kanal heranzubringen, sie aber dennoch gut gegen ihn zu isolieren“, erklärt Burghard. Dafür haben die Stuttgarter Max-Planck-Forscher ein neues Konzept entwickelt: Sie bringen zwischen Nanoröhrchen und Steuerelektrode eine ultradünne Isolatorschicht aus einem Polymer, dessen Eigenschaften sich gezielt einstellen lassen. „An der Realisierung dieses Konzepts arbeiten wir derzeit“, sagt Burghard – ein weiterer wichtiger Schritt hin zu einer künftigen neuen Elektronik, deren Grundgerüst nanometerfeine Molekül-Makkaroni bilden könnten. ■

# VÖLLIG NEUE DIMENSIONEN

Welche Rolle die Nanotechnologie beim weltweit größten Automobilzulieferer spielt, erklärt Siegfried Dais. Er ist stellvertretender Vorsitzender der Robert Bosch GmbH auch für Forschung und Entwicklung verantwortlich.



Bosch; FZ Karlsruhe(2); Montage: K. Marx

Das Gespräch führte Wolfgang Hess

**bild der wissenschaft:** *Bosch und die Nanotechnologie – wie charakterisieren Sie diese Beziehung, Herr Dr. Dais?*

**DAIS:** Der industrielle Weg hin zu kleineren Maßstäben ist vorgegeben. Strukturgrößen vieler moderner Materialien und Funktionselemente liegen bereits bei 50, 20 oder sogar nur 10 Nanometern. Sensoren, Keramiken und Metalle bekommen dadurch neue Eigenschaften.

**bdw:** *Die mögliche Anwendungsbreite ist erst ansatzweise bekannt. Muss Bosch selbst in die Grundlagenforschung einsteigen?*

**DAIS:** Die Grundlagen an sich, etwa das quantenmechanische Verständnis von Nanoschichten, ist nicht Ziel unserer Forschung. Unsere Forscher und Entwickler setzen auf grundlegenden Erkenntnissen auf, um neuartige Produkte entwickeln zu können, die in hoher Qualität und großen Stückzahlen zu fertigen sind.

**bdw:** *Seit wann ist Nanotechnologie bei Bosch ein Thema?*

**DAIS:** Seit gut zehn Jahren beschäftigen wir uns damit.

**bdw:** *Und wie viele Mitarbeiter arbeiten daran?*

**DAIS:** Die Abgrenzung ist schwierig. 100 Mitarbeiter sind es sicher.

**bdw:** *Sind das alles Nano-Spezialisten?*

**DAIS:** Unsere Forscher und Entwickler stoßen von ihrem Fachgebiet her kommend – etwa von der Materialforschung, der Halbleitertechnik oder der Mikrosystemtechnik her – zu immer kleineren Strukturen vor. Beispielsweise arbeiten wir an winzigen Mikrofonen, deren Membranen nur noch um wenige Nanometer ausgelenkt werden.

**bdw:** *Wozu braucht man so kleine Mikrofone?*

**DAIS:** Sie können etwa in Mobiltelefonen eingesetzt werden oder allgemein gesagt: überall dort, wo es darum geht, Schallpegel zu

erfassen. Andere Beispiele für immer kleiner werdende Bauteile sind Druck-, Drehzahl- und Abgassensoren. Ihre Abmessungen zu reduzieren, bringt auch Kostenvorteile: Beim Produktionsprozess finden dadurch auf einem Wafer oder einem Keramiksubstrat wesentlich mehr Bauteile Platz. Das senkt die Kosten pro Bauteil.

**bdw:** *Bietet die Nanowelt neben dem Preis noch andere Vorteile?*

**DAIS:** Mit der Nanotechnologie lassen sich völlig neue Funktionen erschließen. Diesel-Einspritzsysteme arbeiten mittlerweile mit bis zu 2000 Bar Druck. Um diesen Systemen eine lange Lebensdauer zu geben, müssen wir die Widerstandsfähigkeit der Oberflächen einzelner Komponenten deutlich erhöhen und zugleich die Reibung zwischen den Komponenten gravierend verringern. Das gelingt hervorragend mit wenige Nanometer dünnen Schichten.

**bdw:** *Welche Beziehungen unterhält Bosch zu Grundlagenforschern?*

**DAIS:** Allein auf dem Gebiet der Nanotechnologie sind es weltweit an die 20 Forschungsinstitute, mit denen wir Kontakte pflegen. Mit einigen Instituten arbeiten wir sehr eng zusammen. Oft sind junge Wissenschaftler motiviert, nach ihrer Promotion bei uns zu arbeiten, um das Thema weiterzutreiben. Daneben bietet Bosch die Chance, in Abstimmung mit Hochschulen Doktorarbeiten in unseren Labors anzufertigen. Bei uns promovieren zurzeit 200 junge Menschen.

**bdw:** *Treffen Sie auch auf Wissenschaftler, die mit der Industrie nichts zu tun haben wollen?*

**DAIS:** Damit hatten wir nie ein Problem – wohl auch deshalb nicht, weil Bosch an allen Hochschulen als Hightech-Arbeitgeber bekannt ist. Wenn man sich die Umfragen nach den beliebtesten Arbeitgebern in Deutschland ansieht, ist Bosch im Bereich Technik stets ganz oben auf dem Treppchen. Das hilft sehr, gute junge Mitarbeiter zu finden.

**bdw:** *Wie viele Hochschulabsolventen stellt Bosch pro Jahr ein?*

**DAIS:** Im Jahr 2007 waren es allein in Deutschland 1800. Doch unsere Forschung ist nicht auf Deutschland begrenzt. Wir haben etwa einen Forschungsstandort im kalifornischen Palo Alto – direkt vor den Toren der renommierten Universitäten Stanford und Berkeley. Wir bauen ein Forschungslabor in Singapur auf. Und wir gehen nach Russland, wo es viele hervorragende Mathematiker und Physiker gibt.

**bdw:** *In Deutschland sind es zu wenige. Da mangelt es auch an Jungingenieuren. Warum? Am Gehalt liegt es nicht, denn das ist bei Berufseinsteigern schon deutlich höher als in anderen Berufsgruppen.*

**DAIS:** Es sind sicher nicht allein die Verdienstaussichten, sondern zum Beispiel auch die gesellschaftliche Anerkennung eines Berufszweigs, die die Berufswahl junger Menschen beeinflusst. Viele Technologien werden in Deutschland eher kritisch begleitet. Die damit verbundenen Chancen treten dagegen leider oft in den Hintergrund.

**bdw:** *Fußt die Einstellung auf einer unzureichenden Ausbildung?*

**DAIS:** Naturwissenschaften in ihrem Kern zu begreifen, ist schwieriger, als etwa eine der gängigen Sprachen zu erlernen. Fleiß allein genügt nicht. Man muss begreifen, was hinter einem physikalischen oder mathematischen Problem steckt. Lehrer haben da einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die spätere Berufswahl ihrer Schüler. Ich hatte einen Mathelehrer, der es verstand, uns die Augen für tiefergehende Zusammenhänge zu öffnen. Und das, indem er abweichend vom Unterrichtsplan mit uns etwa die Mondlandung berechnete, was uns faszinierte und motivierte. Damit ich aber nicht falsch verstanden werde: Begeisterung durch spannende Experimente zu wecken, reicht nicht, man muss auch aufzeigen, warum etwas funktioniert.

**bdw:** *Was verbindet das Unternehmen Bosch mit der Landesstiftung Baden-Württemberg?*

**DAIS:** Die Landesstiftung fördert wissenschaftliche Erkenntnis. Bosch ist ein überzeugter Nutzer wissenschaftlicher Erkenntnis, die wir in Produkte umsetzen. Insofern profitieren wir unmittelbar von den Investitionen der Landesstiftung.

**bdw:** *Ein wichtiges Anliegen der Landesstiftung ist die Stärkung von Netzwerken. Die gab es doch schon immer!*

**DAIS:** Wir denken und arbeiten heute weitaus stärker über Disziplinengrenzen hinweg. Es zeigt sich in vielen Anwendungen, dass deutliche oder überraschende Fortschritte nur erreicht werden, wenn man Herausforderungen domänenübergreifend angeht.

**bdw:** *Wie beurteilen Sie den Standort Baden-Württemberg?*

**DAIS:** Baden-Württemberg ist eine erstrangige Hightech-Region. Hier werden 4,2 Prozent des Bruttoinlandsprodukts für Forschung und Entwicklung ausgegeben – weltweit ein Spitzenwert.

**bdw:** *Die Region um Stuttgart – ein anderes Silicon Valley?*

**DAIS:** Wir haben andere Strukturen, ein anderes Klima, eine andere Mentalität, sind aber auf unseren Arbeitsgebieten ebenso erfolgreich.

**bdw:** *Zum Abschluss noch ein Blick auf die aktuelle CO<sub>2</sub>-Diskussion: Die EU will den Ausstoß bei Neuwagen ab 2012 auf 120 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer begrenzen. Wie steht Bosch dazu?*



**Dr. Siegfried Dais**

ist seit 2004 stellvertretender Vorsitzender der Geschäftsführung der Robert Bosch GmbH. Der promovierte Physiker (Jahrgang 1948) ist zuständig für den Geschäftsbereich Bosch Rexroth. Außerdem trägt er die Verantwortung für die Produktplanung und Technik der Unternehmensbereiche sowie für die Zentralbereiche Forschung und Voraentwicklung.

**DAIS:** Es gibt schon Autos, die diesen Wert unterschreiten – gerade auch von den viel gescholtenen deutschen Premiumherstellern. Für schwerere Fahrzeuge wird es auf absehbare Zeit nicht möglich sein, die Technik so weiterzuentwickeln, dass sie die diskutierten Emissionswerte unterschreiten. Da hilft nur eine Regelung, die sich auf die Durchschnittswerte über die ganze Flotte bezieht und das Gewicht der Fahrzeuge angemessen berücksichtigt. Die Zeitvorgabe wäre für die Automobilhersteller ein höchst ambitioniertes Ziel, denn sie lässt weniger Zeit für die Serieneinführung neuer Modellreihen, als im Grunde für die Entwicklung eines neuen Autos gebraucht wird. Daher wird man sich über den Zeitpunkt der Einführung der neuen Grenzwerte ebenso unterhalten müssen wie darüber, welche CO<sub>2</sub>-senkenden Maßnahmen angerechnet werden. Wir als Zulieferer von Fahrzeugtechnik haben bereits einige Technikpakete im Portfolio, die zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Und wir werden weiterhin mit aller Kraft technisch sinnvolle Lösungen erarbeiten, um die Entwicklung umweltschonender Kraftfahrzeugtechnik voranzutreiben. ■



Blick in eine andere Welt:  
Ein konfokales Mikroskop  
zeigt Zellen und Protein-  
fasern auf Nanostrukturen.

# PANIK BEI 73 NANOMETERN

Zellen reagieren sehr empfindlich auf winzigste Strukturen in ihrer Umgebung. Diese Erkenntnis weist womöglich den Weg zu neuen und besseren Implantaten.

Text: Konstantin Zurawski

**DIE NATUR KANN ES.** Sie weiß, wo welche Zellen benötigt werden. Im menschlichen Körper wächst die Leber da, wo sie hingehört. Und ein Knochen entsteht dort, wo die mechanische Belastung sehr groß ist. Wie funktioniert das genau? „Wir wissen es nicht. Aber mit unserer Forschung könnten wir dem Geheimnis ein Stück näher gekommen sein“, sagt Joachim Spatz. Er ist Professor für Biophysikalische Chemie an der Universität Heidelberg und Leiter der Abteilung Neue Materialien und Biosysteme am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart. Die Biologen, Chemiker und Physiker seiner Arbeitsgruppen in Stuttgart und Heidelberg verfolgen gemeinsam ein Ziel: Sie wollen herausfinden, wie Zellen von der Strukturierung ihrer natürlichen Umgebung beeinflusst werden. Ein wichtiges Ergebnis haben sie schon: Eine Differenz von 15 Nanometern kann über Leben und Tod einer 3000-mal größeren Zelle entscheiden. Aber von vorn.

B. Müller (4)

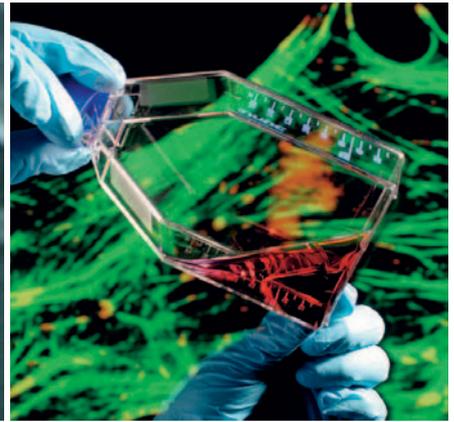
Die Haut des Menschen besteht zu großen Teilen aus Kollagen – ein Protein, das auch wesentlicher Bestandteil von Knochen, Sehnen und Bändern ist. Produziert wird Kollagen von Zellen. Diese Zellen müssen sich zuerst mit schon vorhandenem Kollagen verbinden, um später Gewebe bilden zu können. Die Forscher haben nun untersucht, unter welchen Bedingungen die Zellen das tun.

Dazu analysierten sie die Oberfläche des Kollagens. Sie fanden heraus, dass die Oberfläche aus Strukturen im Nanomaßstab besteht. Die Strukturen enthalten so etwas wie Fallen, in denen sich genau die Moleküle verfangen, die sich mit dem Kollagen verbinden sollen: „Eine Art chemische Hand schnappt zu, wenn das richtige Molekül der Zelle in ihre Nähe kommt“, erläutert Spatz. Das war das erste Ergebnis. Das zweite: Der Abstand der chemischen Hände zueinander beträgt immer 67 Nanometer.

Ist das Zufall? Nein. Ist es bedeutungslos? Schon gar nicht. Spatz und seine Kollegen bauten nun eine Art Versuchsgelände auf. Sie wollten herausfinden, wie Zellen reagieren, wenn man den Abstand der chemischen Hände auf der Kollagenoberfläche ändert. Daher entwickelten sie eine Methode, um künstliche nanostrukturierte Oberflächen herzustellen, mit denen sich die Verhältnisse an der Kollagenoberfläche nachahmen lassen.

Ausgangspunkte dieser Methode sind fünf bis zehn Nanometer kleine Goldpartikel, die von einem großen organischen Molekül – einem Polymer – umringt sind. Das Gebilde ist somit wie ein Berliner Pfannkuchen aufgebaut, wobei das Polymer der Teig ist und der Goldpartikel die Erdbeermarmelade. Der Berliner heißt in der Fachsprache „geladene Mizelle.“ Geladen deswegen, weil es auch ungeladene gibt – also Berliner, die noch mit Marmelade gefüllt werden müssen.

**Forschung mit Fingerspitzengefühl: Aus Mizellen, kugelförmigen Polymermolekül-Aggregaten, wachsen Nanopartikel aus Gold (links). Auf einer nanofeinstrukturierten Oberfläche in einer Nährlösung lassen sich Zellen untersuchen (rechts).**



Die geladenen Mizellen werden nun dicht nebeneinander auf eine Glasoberfläche aufgetragen. Das alles passiert mithilfe eines Lösungsmittels. Taucht man eine Glasplatte in die Lösung, in der sich die geladenen Mizellen befinden, bleiben diese an der Platte haften. Der Abstand zwischen den Goldpartikeln ergibt sich nun aus der Größe des Polymers, das den Goldpartikel umschließt. Oder, um im Bild zu bleiben: Die Dicke des umhüllenden Teigs bestimmt, wie weit entfernt voneinander die Marmeladenfüllungen zu liegen kommen.

Die Forscher verwendeten Polymere, die zu Abständen der Goldpartikel von 58 oder 73 Nanometer führen. „Das entspricht zwar nicht ganz den 67 Nanometern, wie sie hauptsächlich im menschlichen Körper vorkommen, doch hat die Methode ein spektakuläres Ergebnis geliefert“, freut sich Joachim Spatz. Zu guter Letzt wurden die Polymere zerstört. Was bleibt, ist eine Oberfläche mit regelmäßig angeordneten Goldpartikeln. Jedes der Partikel ahmt auf der künstlichen Oberfläche nun eine chemische Hand nach, die Moleküle fangen

kann. Diese Methode zu entwickeln, war zwar aufwendig, aber trotzdem erst die Vorbereitung für den eigentlichen Versuch.

### ZELLEN, DIE SICH WOHLFÜHLEN

„Wir ließen Hautzellen oder Knochenzellen quasi auf die künstlichen Oberflächen fallen und schauten, was passiert“, sagt Spatz. Die Zellen zeigten zwei völlig unterschiedliche Verhaltensweisen: Betrug der Abstand der Goldpartikel 58 Nanometer, bildeten die Zellen Fortsätze aus und vermehrten sich später. Spatz: „Sie fühlten sich wohl.“ Erhöhte man den Abstand der Goldpartikel jedoch um nur 15 Nanometer, wanderten die Zellen 24 bis 48 Stunden lang auf der Oberfläche herum. „Sie schwirrten panisch umher und suchten nach einer geeigneten Andockstation“, sagt Spatz. Dann starben sie – der programmierte Zelltod.

Aus Sicht der Forscher bedeutet das: Über unterschiedlich strukturierte Oberflächen lässt sich steuern, ob Zellen leben oder sterben. Wichtiger noch ist, dass die Wissenschaftler auch festlegen können, wo sich die Zellen ansiedeln. „Zellen finden die

richtige Umgebung“, sagt Spatz. Auf einer Oberfläche, die zu einer Hälfte aus einer 58-Nanometer-Struktur und zur anderen Hälfte aus einer 73-Nanometer-Struktur besteht, lassen sich die Zellen auf der 58-Nanometer-Hälfte nieder.

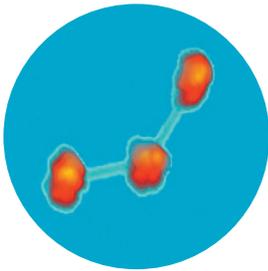
Die Wissenschaftler werden von der Vision angetrieben, den Zellen weitere Kommandos geben zu können. Neben dem Ort möchten sie beispielsweise auch festlegen können, welche Zellen sich zu welchem Zeitpunkt ansiedeln. Denn das wäre von großer praktischer Bedeutung. Bislang verhalten sich Zellen gegenüber medizinischen Implantaten nicht immer wie gewünscht. Ein solches medizinisches Implantat ist zum Beispiel der Stent: Dieses Metallröhrchen wird unter anderem in vormals verengte und operativ erweiterte Blutgefäße eingesetzt, um zu verhindern, dass sie sich erneut verschließen.

Das Problem: Bei 30 Prozent aller Patienten wächst das Metallröhrchen mit Muskelzellen zu. Die Blutgefäße benötigen jedoch sogenannte Endothelzellen, die unter anderem die Fließfähigkeit des Blutes regulieren. Bisher wird mit einer Art Gift verhindert, dass sich die falschen Zellen ansiedeln. „Das ist nicht die intelligenteste Lösung“, findet Joachim Spatz. Und weiter: „Besser wäre es, wenn sich die Stent-Oberfläche so strukturieren ließe, dass sich dort direkt nur die benötigten Zellen niederlassen.“ Die Forschungsergebnisse seines Teams lassen hoffen, dass sich medizinische Implantate künftig besser an den menschlichen Körper anpassen lassen – damit sie dann genau die Funktionen erfüllen, die sie erfüllen sollen. ■



**Zellen aus der Kälte: Im Kühlschrank wachsen die Organismenbausteine auf verschiedenen Nährlösungen.**

# MIT VIREN STRIPPEN ZIEHEN



Stuttgarter Forscher nutzen Tabakmosaikviren als Gussform für perfekte, nur vier Nanometer dünne Drähte.

Text: Bernd Müller

**VIREN ÜBERTRAGEN** Krankheiten – das weiß man, seitdem der Russe Dimitri Iwanowski 1892 herausfand, dass Tabakmosaikviren gesunde Tabakpflanzen ohne die Hilfe von Bakterien oder anderen Zellen infizieren können. Das Virus – selbst nicht in der Lage, sich zu vervielfältigen – schleust sein Erbgut in die Wirtszelle und zwingt diese dazu, massenhaft neue Viren zu produzieren. Grüne Blätter färben sich dadurch stellenweise braun oder entwickeln typische Mosaikmuster und Deformationen. Das Tabakmosaikvirus ist auch heute noch eine Plage für viele Pflanzenzüchter: Es befällt Hunderte von Pflanzenarten – vom Alpenveilchen bis zur Zuckerrübe.

Was Landwirte ärgert, freut Dr. Alexander Bittner. Für den Physikochemiker vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart ist das Tabakmosaikvirus ein ideales Forschungsobjekt. Physiker und Viren? Normalerweise sind das getrennte Welten. Doch mit der Nanotechnologie ziehen auch biologische Organismen in die physikalischen Labors ein, weil sie Eigenschaften haben, die Forscher gerne für technische Anwendungen nutzen möchten.

Ein Problem, das Physiker umtreibt, sind die immer kleineren Strukturen von mikroelektronischen Schaltkreisen, die nötig sind, wenn Computer immer schneller und strom-

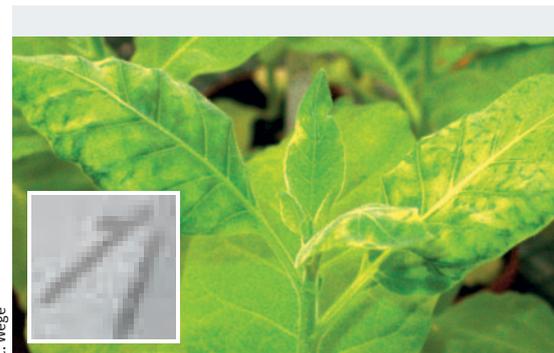
sparender werden sollen. Die Chips werden heute in Scheiben aus Silizium geätzt. Doch einfache Metalldrähte dünner als 30 Nanometer lassen sich mit diesem Top-down-Ansatz nicht fabrizieren. Anders die Bottom-up-Strategie: Wie die ersten Bausteine des Lebens vor 3,8 Milliarden Jahren könnten sich auch die Bauteile künftiger Nanodrähte und Schaltkreise selbst anordnen – idealerweise im Reagenzglas mit wenigen Chemikalien. Da liegt es nahe, mit biologischen Substanzen zu experimentieren.

## PLAGEGEISTER IN BLEISTIFTFORM

Warum Bittner so an Tabakmosaikviren interessiert ist, lässt ein Blick ins Elektronenmikroskop erahnen: Die Plagegeister sehen wie dünne Bleistifte aus. Röntgenanalysen zeigen, dass das Virus eine Hülle aus rund 2100 identischen Proteinen besitzt, die zu einer 300 Nanometer langen und 18 Nanometer dicken Röhre gestapelt sind. Darin eingebettet ist ein Strang Ribonukleinsäure (RNA), die eine infizierte Pflanzenzelle zur Produktion neuer Hüllproteine anregt. Die Idee von Bittner und seinen Kooperationspartnern, Dr. Christina Wege und Prof. Holger Jeske am Biologischen Institut der Universität Stuttgart: So ein Virus wäre eine ideale Gussform für Metalle. Gelänge es, Metall auf der Hülle des Virus abzuscheiden, hätte man einen perfekten röhrenförmigen Draht, zumal sich die RNA im Labor fast be-

liebig verlängern lässt und das Virus damit eine entsprechend längere Hülle aufbaut. Erste Experimente scheiterten. So wollten die Stuttgarter Forscher auf den Proteinen Goldkörnchen abscheiden. Doch das Virus schüttelte den Ballast einfach ab.

Inzwischen ist es Weges Team gelungen, das Virus genetisch so zu verändern, dass es eine Hülle aus Metallen akzeptiert. Noch viel dünner – vier Nanometer – wäre so ein Draht, wenn man den inneren Kanal im Virus mit Metall füllen könnte. Das funktioniert tatsächlich. Die Herstellung klingt simpel: „Wir werfen die Viren in eine Palladiumsuppe“, sagt Bittner. Das Palladium bildet im Inneren des Virusröhrchens einen Pfropfen. Dann werden die Viren gewaschen und in eine zweite „Suppe“ aus Kobalt gegeben.



**Nützlicher Schädling:** Viren, die Tabakpflanzen befallen, sind eine Plage. In der Elektronik können sie aber hilfreich sein.



Nanoforschung im Gewächshaus: Die Stuttgarter Wissenschaftler Alexander Bittner und Christina Wege kultivieren die Viren für ihre Experimente auf Tabakpflanzen in einer botanischen Versuchsstation.

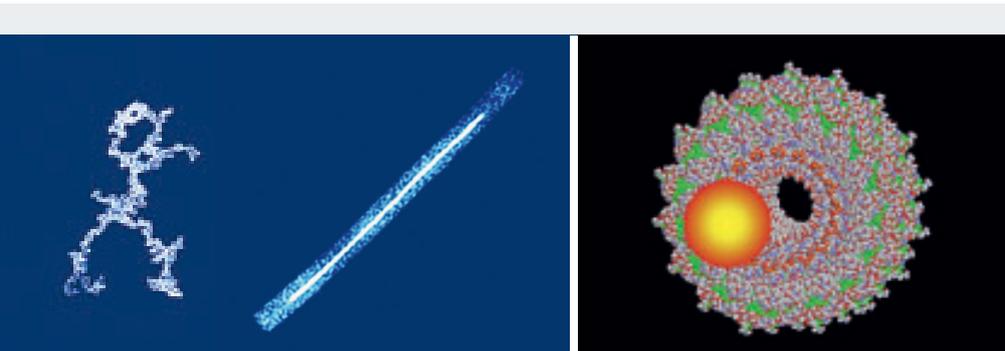
B. Müller Das Kobalt wächst an beiden Enden des Palladium-Pfropfens und bildet einen hauchdünnen Metallstab, der das Virus ausfüllt. „Das muss in wenigen Minuten ablaufen, denn sonst klappt es nicht“, hat Bittner herausgefunden.

#### VIREN MIT GOLDENEM ANHANG

Das nächste Ziel ist es, die Metallstäbchen mit anderen Leitern elektrisch zu verbinden, denn ein Draht ohne Kontakt zur Außenwelt ist nutzlos. Noch in weiter Ferne ist die

Herstellung eines Koaxialkabels. Das Virus würde dann innen und außen Metalle tragen. Bei ihren Experimenten erzeugten die Max-Planck-Forscher auch interessante „Abfallprodukte“, etwa Viren, bei denen sich Goldpartikel weder innen noch außen anlagerten, sondern an den Enden des Röhrchens andockten. Unter dem Mikroskop sehen die Viren dann aus wie Hantelstangen mit Metallgewichten an den Enden. Wie sich herausstellte, bricht das edle Metall einige Proteine an den Enden des Virus aus der

Hülle, die dadurch ein Zehntel kürzer wird. Am heraushängenden RNA-Strang halten sich die Goldpartikel fest. Hat das Edelmetall angedockt, kann es als Basis für weitere Metalle dienen, etwa für Kobalt. Das ist magnetisch und würde aus dem Virus eine Transportfähre machen, die sich per Magnetfeld lenken lässt. So könnten Mediziner das Virus vielleicht mit Medikamenten beladen und mit Metallen verschlossene Virus-hüllen zu Tumorzellen lotsen. Wenn sich die Hüllen dann durch magnetische Wechselfelder in Schwingung versetzen und samt Kobaltbrocken absprengen ließen, hieße das: freie Bahn für neue Krebsmedikamente.



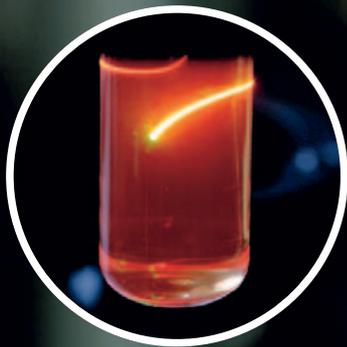
Tabakmosaikviren bilden Röhrchen, in die man Metall füllen kann. So entstehen Drähte mit 4 Nanometer Dicke – weniger als ein Zehntausendstel so dick wie ein Haar. Verklumpen sie, bilden sich komplexe Strukturen (links). Simulation rechts: Gold-Partikel auf einem Virus.

<http://pqs.ebi.ac.uk/pqs-bin/macmol.pl?filename=vm>

Bis Drähte oder ganze Mikrochips aus Viren in Serie gefertigt werden, wird es noch viele Jahre dauern. Dann jedoch stellt sich die Frage: Wie reagieren die Verbraucher, wenn sie virushaltige Produkte kaufen sollen – auch wenn die Viren harmlos und längst nicht mehr aktiv sind? Vielleicht hilft ein Hinweis von Christina Wege: „Raucher inhalieren täglich tausendfach Tabakmosaikviren, die sogar funktionsfähig sind.“ ■

Glimmen aus der Nanowelt:  
In einer Lösung werden win-  
zige Halbleiterkristalle – die  
Quantenpunkte – von einem  
Laser zum Leuchten angeregt  
(kleines Bild). Großes Bild:  
optischer Versuchsaufbau.

# GEFANGEN IM QUANTENPUNKT



Neuartige optische Transistoren für schnellere Computer rücken in Reichweite, wenn es gelingt, mit einem einzelnen Lichtteilchen ein einzelnes Elektron anzusteuern.

*Text: Konstantin Zurawski*

**OB DIE FORSCHER** für ihre Arbeiten den Nobelpreis bekommen werden? Der sei nicht ausgeschlossen, aber planen könne man das nicht. Man ist bescheiden und weiß, dass auf jeden Fall noch viel Arbeit wartet.

Wir befinden uns in Konstanz, an der südlichsten Universität Deutschlands. Der Campus liegt direkt am Wald, zum Bodensee sind es fünf Minuten zu Fuß. Die Umgebung gefällt auch Dr. Rudolf Bratschitsch: „Wo wir arbeiten, machen andere Urlaub.“

Bratschitsch ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Moderne Optik und Quantenelektronik an der Uni Konstanz. Zusammen mit Prof. Alfred Leitenstorfer ist er hauptverantwortlich für ein Projekt, das sich mit den schwer verständlichen Begriffen Festkörperquantenoptik oder Nanophotonik beschreiben lässt. Anwendungen liegen noch in weiter Ferne; doch vielleicht werden die Ergebnisse von Leitenstorfer und Bratschitsch einmal die Basis für eine neue, schnellere Generation von Transistoren bil-

den – Bauteile zum Schalten und Verstärken von Signalen, die in jedem PC und Handy zu finden sind. Was steckt dahinter?

Die Fortschritte in der Nanotechnik ermöglichen es inzwischen, Feststoffe mit Strukturen von nur wenigen Nanometer Größe herzustellen. Das machen sich die Konstanzer Forscher zunutze: Sie verwenden einen fünf Nanometer großen Halbleiterkristall – einen „Quantenpunkt“, der so konstruiert ist, dass man dort ein einzelnes Elektron

„einsperren“ kann. Im Quantenpunkt verfügt das eingeschlossene Elektron über eine bestimmte Menge an Energie, es befindet sich in einem „Quantenzustand“. Nach den Regeln der Quantenphysik sind nur bestimmte Zustände möglich, andere Energieportionen kann das Elektron nicht aufnehmen. Da es sich damit ähnlich verhält wie ein Elektron in einem Atom, nennt man dieses Nano-Objekt auch „künstliches Atom“. Mit Laserlicht lässt sich der Quantenzustand eines darin fixierten Elektrons ändern. Dazu muss man dem Teilchen genau die Menge an Energie zuführen, die nötig ist, um es in einen anderen „erlaubten“ Zustand zu bugisieren. Das geht zum Beispiel mithilfe eines Lichtteilchens, eines Photons. Trifft ein Photon mit der passenden Energie auf das eingeschlossene Elektron, kann es dieses entweder in einen energiereicheren Quantenzustand heben oder es zum Übergang in einen energieärmeren Zustand veranlassen – das Elektron klettert, wie auf den Sprossen einer Leiter, die erlaubten Energiestufen auf und ab. Die Intensität des einfallenden Lichts wird dabei – je nach Kletterrichtung – entweder geschwächt oder verstärkt.

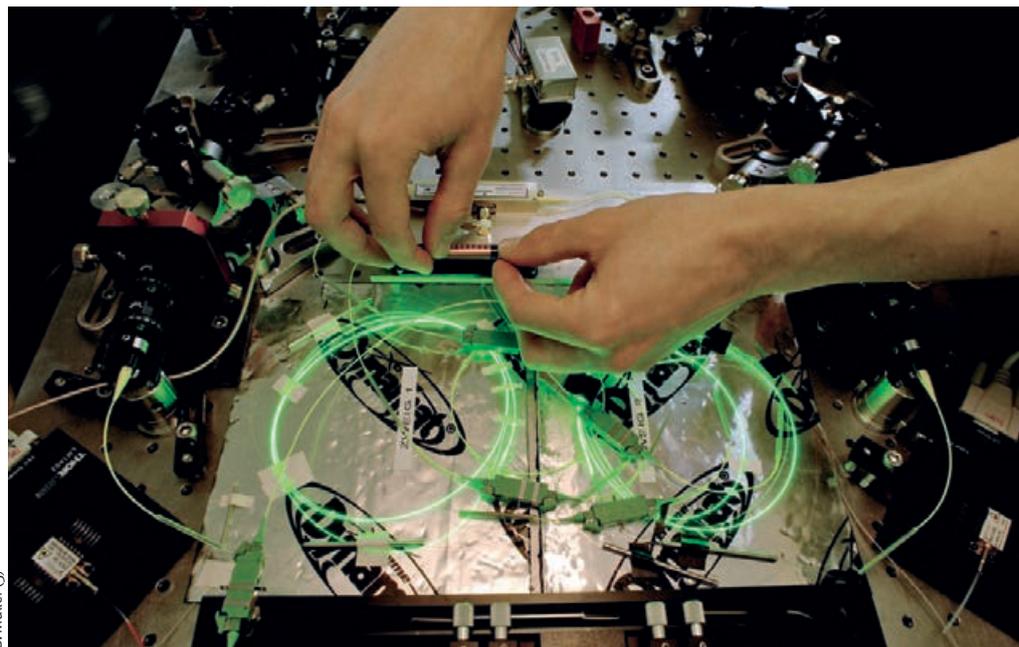
### EIN PHOTON SOLL ES SCHAFFEN

So zumindest die Theorie. Die Praxis ist viel schwieriger. Unter anderem, weil sich ein Elektron nicht leicht einsperren lässt. Dennoch haben das die Forscher kürzlich geschafft. „Wir konnten genau ein Elektron anregen und auslesen. Allerdings haben wir dafür rund 10000 Photonen gebraucht“, sagt Leitenstorfer. Die Forscher wollen den Vorgang nun so perfektionieren, dass nur noch ein Photon benötigt wird, um den Quantenzustand eines Elektrons zu steuern – das wäre am effektivsten. Dazu müssen sie zwei Fragen beantworten: Wie schafft man es, dass das Photon genau da hin fliegt, wo es hin soll? Und wie bringt man das Photon dazu, sich mit dem Elektron zu verbinden? Die Wissenschaftler verfolgen zwei Ansätze, um dieses Ziel zu erreichen.

Der erste Ansatz ist eine optische Antenne. Im Bild der Quantenphysik ist ein Photon Teilchen und Welle gleichzeitig. Ein Problem ist, das Photon – wenn man es als Welle betrachtet – auf den kleinen Bereich des Quantenpunkts zu konzentrieren. Denn die Wellenlänge des benutzten Lasers beträgt circa 500 Nanometer und muss auf den nur fünf

Nanometer großen Quantenpunkt „ein- und ausgekoppelt werden“. Gelingen soll das mit einer Nanoantenne, die das Laserlicht am Quantenpunkt einfängt und zum Schalten des darin eingeschlossenen Elektrons nutzbar macht. Der zweite Ansatz baut auf einen Mikroresonator. Der besteht, einfach gesagt, aus zwei Spiegeln. Sie reflektieren das Photon – hier wieder als Teilchen angesehen –

Gelänge es, mit nur einem Photon ein Elektron anzuregen, wäre das der erste Schritt zu einem optischen Transistor, der – genau wie ein elektronischer – Signale schalten und verstärken könnte. Die optische Variante hätte neben der winzigen Größe und einem minimalen Energieverbrauch jedoch den großen Vorteil, dass sie schneller als das elektronische Pendant wäre. Ein optischer



B. Müller (3)

Die Photonen eines Faserlasers ändern den Zustand einzelner Elektronen in einem Quantenpunkt.

bis zu 10000-mal hin und her. Die Reflexionen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass das Lichtteilchen das Elektron trifft. Die Quantenpunkte platzieren die Forscher in der Mitte der Antenne, die aus zwei separaten Teilen besteht. Die Antenne wiederum soll sich zwischen den beiden Spiegeln des Mikroresonators befinden.

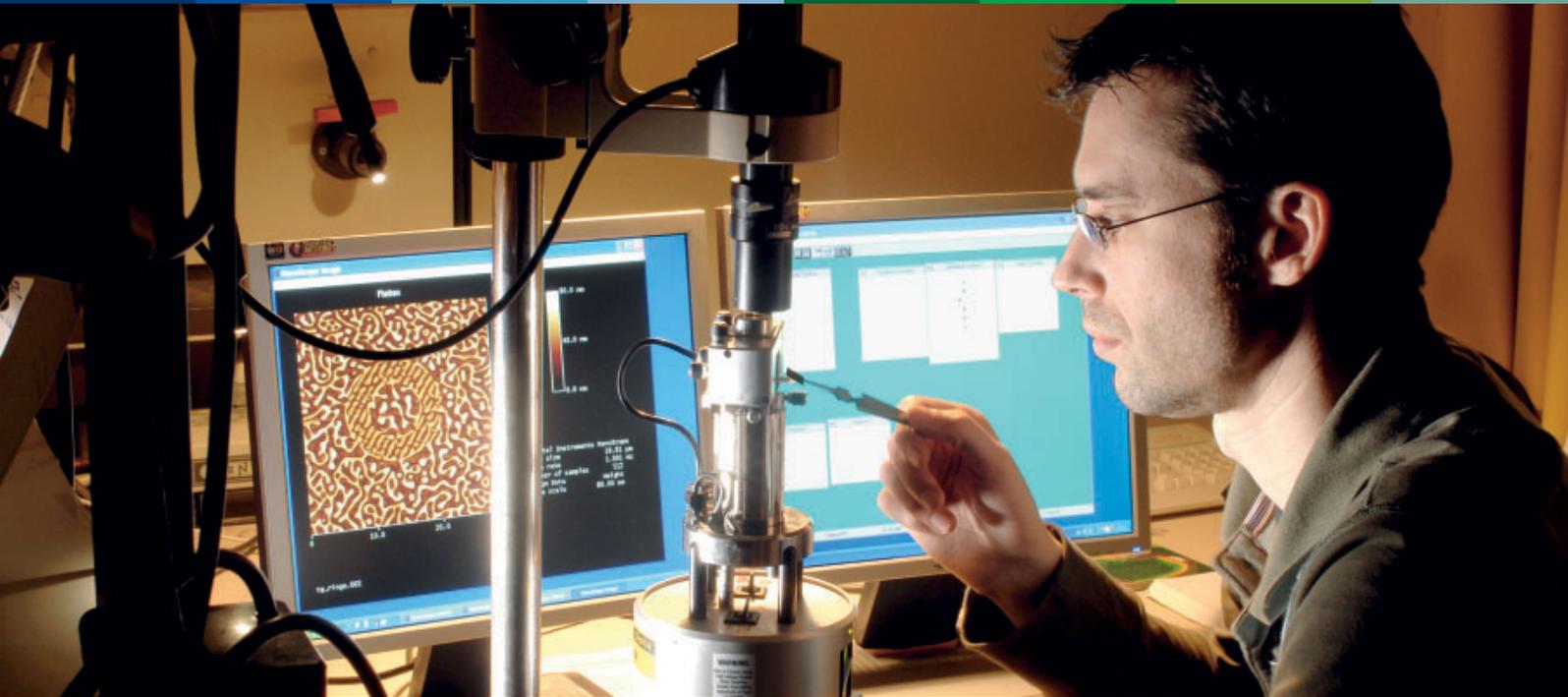
### RAFFINIERTER KOMPOSITION

„Man könnte auch einen Badezimmerspiegel nehmen“, schmunzelt Rudolf Bratschitsch, „da wäre aber nach ein paar Dutzend Reflexionen Schluss.“ Denn ein Badezimmerspiegel hat einen Reflexionsgrad von 97 Prozent. Dagegen erreichen die Spiegel des Mikroresonators einen Wert von 99,9 Prozent. Das verdanken sie hauptsächlich ihrer raffinierten Materialkombination. Hergestellt werden die Spiegel, die nur ein paar Hundert Nanometer klein sind, an der Uni Konstanz mit einem fokussierten Ionenstrahl – von einer 1,5 Millionen Euro teuren Maschine.

Transistor schafft theoretisch eine Schaltfrequenz von 5000 Gigahertz – er wäre damit bis zu 50-mal schneller als ein elektronischer Transistor. Rein rechnerisch könnte man also auch 50-mal schnellere Computerprozessoren und Flash-Speicher bauen.

Bis wirklich nur noch ein Photon benötigt wird, um ein Elektron auszulesen und zu schalten, werden noch drei bis fünf Jahre vergehen, schätzen die Forscher. Optimistisch sind sie trotzdem, auch weil sie unter guten Bedingungen arbeiten. „Wir haben hier die besten Geräte und arbeiten am technischen Limit – das macht Spaß“, sagt Bratschitsch. Daneben freut er sich über ein gutes Netzwerk – über Ländergrenzen hinweg: Die Halbleiter-Quantenpunkte kommen im Reagenzglas – per Post aus England. ■

# Eine Stiftung als Zukunftswerkstatt für Baden-Württemberg



Die Landesstiftung Baden-Württemberg ist eine der größten Stiftungen bundesweit. Sie realisiert Projekte, die wichtige Impulse für die Standortsicherung des Bundeslandes geben. Durchgeführt werden überwiegend eigene Projekte, schwerpunktmäßig aus Wissenschaft und Forschung, Bildung und dem Bereich Soziale Verantwortung.

Im Mittelpunkt steht die Spitzenforschung in der Hochtechnologie und in den Lebenswissenschaften, die Schaffung von Chancengleichheit und die Internationalisierung und Talentförderung. Die Landesstiftung sieht sich außerdem in der gesellschaftlichen Verantwortung, Minderheiten, soziale Randgruppen und Benachteiligte in die Gesellschaft zu integrieren und zu fördern.

Ein Blick auf die Internetseite zeigt die Prozesse einer Zukunftswerkstatt: [www.landesstiftung-bw.de](http://www.landesstiftung-bw.de)

  
**LANDESSTIFTUNG**  
*Baden-Württemberg*

Wir stiften Zukunft