

# Winziges Energiepaket

## Schwerpunkt Nanotechnologie

- ▶ Nanobatterien ..... S. 54
- ▶ Rastersondenmikroskope ..... S. 57
- ▶ Funktionstextilien ..... S. 58
- ▶ Die Chemie von Nanowasser .... S. 62
- ▶ Gefährliche Nanopartikel? ..... S. 64
- ▶ Atomgenaues Positionieren ..... S. 66

Im Vergleich zu Mikrochips wirken Batterien wie klobige Relikte aus den Urzeiten der Elektronik. Nanotechnik soll dem bald abhelfen.

Von Charles Q. Choi

Seit der Erfindung des Transistors sind fast sechzig Jahre vergangen. Doch vergleicht man den etwa 2,5 Zentimeter breiten Stammvater mit seinen Millionen Nachfahren auf einem heutigen Computerchip, scheinen Äonen vergangen. Für Batterien, die mobile elektronische Geräte mit Strom und Spannung versorgen, fällt dieser Vergleich weit weniger schmeichelhaft aus. Denn während Transistoren auf ein Hunderttausendstel ihrer Größe schrumpften, werden die Abmessungen der Ladungsspeicher noch in Zentimetern gemessen.

Das Konzept des Transistors wurde in den Bell Laboratories geboren. Inzwischen bilden die »Bell Labs« die Ideenschmiede des Netzwerk giganten Lucent Technologies und sind längst nicht mehr auf den Firmensitz in Murray Hill (New Jersey) beschränkt. Obwohl elektrische Energiespeicher eigentlich nicht das Geschäft dieses Unternehmens sind, hat Bell Labs nun beschlossen, die Batterie neu zu erfinden. Abmessungen im Nanometerbereich und eine Massenfertigung mit den Verfahren der Halbleiterindustrie, so lauten die ehrgeizigen Ziele. Dann nämlich lassen sich die Speicher in die Schaltungen integrieren, also gemeinsam mit den Transistoren fertigen. Allerdings denken die Wissenschaftler dabei nicht an eine permanente Stromversorgung von Mikro-

chips, sondern an Systeme, die auf ein Signal hin erwachen und rasch Energie freisetzen. Netzwerke von Sensoren zur Überwachung von Atomanlagen oder Mülldeponien wären eine mögliche Anwendung, auch massenhaft gefertigte Sensoren für Giftgase, die von Flugzeugen über Kampfgebieten abgeworfen würden. Sobald der Alarmfall eintritt, soll ein solcher Messfühler ein Signal senden. Dazu benötigt er eine Stromversorgung, die lange auf ihren Einsatz warten kann – mindestens 15 Jahre sollen die neuen Nanobatterien ruhen können, ohne an Ladung zu verlieren.

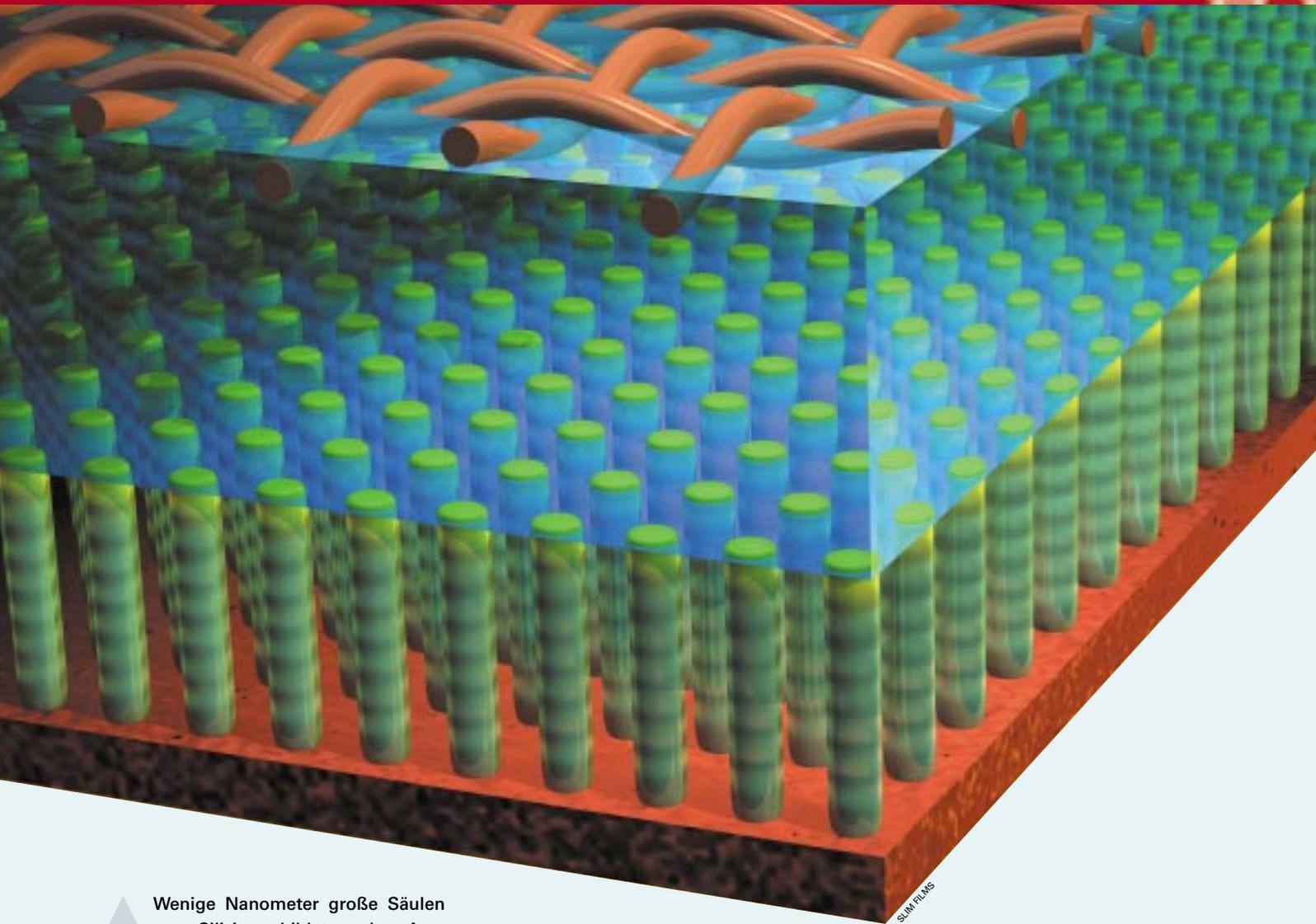
### Kontaktscheue Linsen

Die entscheidende Idee hatte Tom Krupenkin, der bei Bell Labs über flüssige Mikrolinsen forschte, wie sie inzwischen in vielen Fotohandys zu finden sind. Diese Linsen verändern ihre Form und damit ihre Brennweite, wenn sich die Benetzbarkeit ihrer Kontaktfläche ändert: Ist sie »hydrophil«, breitet sich die Flüssigkeit darauf aus, ist sie aber »superhydrophob«, versucht die Linse sozusagen, den Kontakt zu vermeiden und ballt sich zur Kugel. Der jeweilige Zustand lässt sich elektrisch umschalten, ein Effekt, den man *electrowetting* nennt. Freilich muss die Flüssigkeit dazu Strom leiten können. Die Steu-

erspannung wird über eine Elektrode hinter dem Substrat appliziert, das seinerseits aus einem Isolator besteht.

Krupenkin überlegte nun, auf diese Weise auch winzige chemische Reaktoren zu bauen. Er ersann eine Anordnung dicht stehender Reihen nur wenige Nanometer hoher »Säulen«, deren Oberfläche von superhydrophob auf hydrophil zu schalten sein sollte. Solange sie sich im ersteren Zustand befinden, würden flüssige Reagenzien winzige Tropfen bilden, die in den Lücken zwischen den Säulen verharren. Schaltet man ihre Oberflächen auf hydrophil, müssten Kapillarkräfte die Tröpfchen zwischen den Säulen auf den Boden ziehen – wo diese mit dort wartenden Substanzen in Kontakt kämen. Krupenkin erkannte das Potenzial, auf diese Weise erstmals eine Nanobatterie zu realisieren.

Eine typische Einwegbatterie besteht aus Anode und Kathode, eingetaucht in einen Elektrolyten. Der vermittelt eine chemische Reaktion zwischen den beiden Elektroden, dabei werden Elektronen ausgetauscht – es fließt Strom. Solange kein Verbraucher angeschlossen ist, sollte die elektrochemische Reaktion unterbleiben. Tatsächlich verliert eine Batterie pro Jahr etwa sieben bis zehn Prozent der gespei-



▲ Wenige Nanometer große Säulen aus Silizium bildeten das Ausgangsdesign für ein völlig neuartiges Batteriekonzept, bei dem der Elektrolyt von der Kathode ferngehalten wird, bis die jeweilige Anwendung Energie benötigt.

cherten elektrischen Energie. Dies können Barrieren zwischen Elektroden und Elektrolyten zwar verhindern. Doch das macht solche Ladungsspeicher voluminös, sie werden deshalb nur als Notfallreserve etwa auf Intensivstationen oder in militärischen Systemen eingesetzt.

Krupenkins Konzept bot dazu eine echte Alternative. »Lucent Technologies ist eigentlich in diesem Marktsegment nicht tätig, wir würden aber dennoch gern die Batterietechnik revolutionieren«, erklärte David Bishop, stellvertretender Leiter der Nanoforschung bei Bell Labs. Geeignete Partner fand er bei einer Präsentation vor drei Jahren. Das ebenfalls in New Jersey ansässige Unternehmen mPhase

fertigte vor allem Komponenten für den Breitband- und Video-DSL-Markt für Privatkunden, suchte aber nach Möglichkeiten, in der Nanotechnologie Fuß zu fassen. Dabei war allerdings klar, dass jegliche Aktivität drei Kriterien genügen müsste: keine lange Entwicklungszeit, mögliche militärische Anwendungen, geringe Kosten in der Anlaufphase.

Die Nanobatterien erfüllten offenbar alle diese Anforderungen und im Februar 2004 unterzeichneten die beiden Unternehmen einen Kooperationsvertrag. mPhase begann sogleich, die Erwartungen potenzieller Kunden zu eruiieren. Lucent stellte Lizenzen, einen 450 Millionen Dollar teuren Reinraum sowie Kontakte zu Halbleiterexperten zur Verfügung.

Im September darauf präsentierten die Forscher bereits einen funktionsfähigen Prototyp in Sandwichbauweise. Zur Stromerzeugung nutzten sie Verbindungen, wie sie in den weit verbreiteten Alkali-Mangan-Batterien verwendet wer-

den: eine Kathode aus Mangandioxid (so genannter Braunstein) und eine Anode aus Zink. Beide bildeten den Deckel beziehungsweise den Boden des Sandwichs. Dazwischen sollten 350 Nanometer breite, sieben Mikrometer hohe und im Abstand von etwa zwei Mikrometern platzierte Siliziumsäulen eine Zinkchlorid-Lösung zwischen den Elektroden auf Widerruf separieren. Dazu wurden die Spitzen der Säulen mit Fluorkohlenstoff überzogen, dessen Benetzbarkeit sich durch eine Steuerspannung einstellen lässt. Der Rest der Säulen wurde mit Siliziumdioxid elektrisch isoliert.

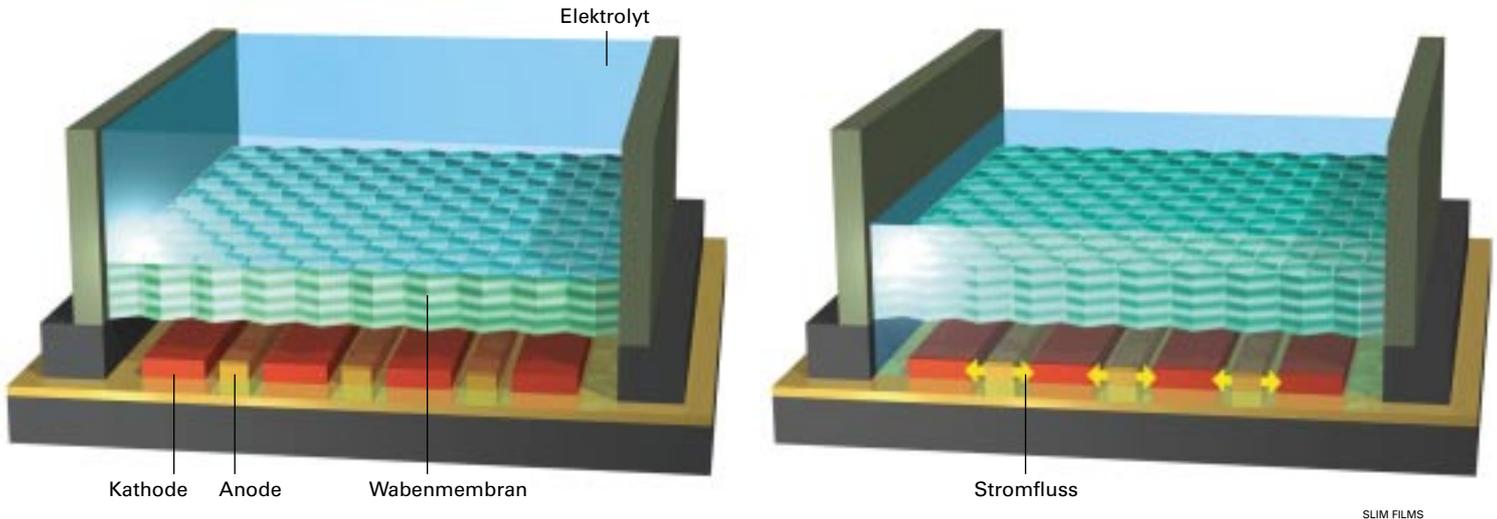
### Problematischer Bodendecker

Doch auf dem Boden Zink abzuscheiden, erwies sich als schwierig. Das Standardverfahren zur Metallisierung von Oberflächen ist das Galvanisieren: Das zu beschichtende Objekt wird an den Minuspol ▶

## Design einer Nanobatterie

Eine Wabenmembran aus Silizium separiert im aktuellen Prototyp den Elektrolyten von den nebeneinander angeordneten Elektroden (links). Auf diese Weise unter-

bleibt jegliche chemische Reaktion, bis eine Steuerungspannung die Membran durchlässig macht und die Batterie Strom liefert (rechts).



SLIM FILMS

▷ einer Spannungsquelle angeschlossen, eine Metallanode löst sich im Elektrolyten und schlägt sich am fraglichen Ort nieder. Dazu musste der Boden freilich elektrisch leiten können. Doch bei der Fertigung bildete sich auch dort Siliziumdioxid. Es gelang den mPhase-Entwicklern, diese Oxidschicht so dünn zu machen, dass ionisiertes Gas es wegätzen konnte, während die Säulen noch ausreichend bedeckt blieben.

### Alles auf Anfang!

Im nächsten Schritt wurde in einem nasschemischen Verfahren Nickel oder Titan auf dem Boden abgeschieden. Erst darauf konnte dann die Zinkschicht aufwachsen. Das sollte natürlich so gleichmäßig wie möglich erfolgen. Es durfte sich also weder lokal Zink anhäufen noch an anderer Stelle fehlen. In vielen Testreihen entdeckten die Forscher die optimale Kombination von Temperaturen, Konzentrationen und Stromstärken. »Rückwirkend betrachtet wundert es mich, dass wir dafür nur ein Jahr gebraucht haben«, bekundet Steve Simon, stellvertretender Forschungsleiter bei mPhase.

Doch als die Forscher ihren Prototyp potenziellen Kunden präsentierten, begann die Arbeit von vorn. Denn insbesondere Angehörige des Militärs äußerten sich kritisch über das Sandwichdesign. Es störte sie, dass der Elektrolyt permanent Kontakt zur oben liegenden Kathode hat-

te, unerwünschte chemische Reaktionen seien da nicht auszuschließen. Inzwischen bildet er die oberste Lage eines neuen Sandwichs – eine wabenartige Nanostruktur trennt ihn von den inzwischen nebeneinander auf dem Boden angeordneten Elektroden (siehe Bild oben).

Dementsprechend haben sich die Entwickler auch von der Säulenstruktur verabschiedet. Sie bietet zwar ein Maximum an Reaktionsoberfläche bei einem Minimum an Platzbedarf. Doch ihre Fertigung erwies sich ohnehin als sehr diffizil. Die Poren der Siliziumwaben sind zwanzig Mikrometer weit, die Wände 0,6 Mikrometer dick. Sie werden aus einem Wafer geätzt, danach wächst Siliziumdioxid in einem 1000 Grad Celsius heißen, von Sauerstoff durchströmten Ofen auf. Abschließend wird die gesamte Wabe mit Fluorkohlenstoff beschichtet.

Die ersten Prototypen gelangen im Oktober 2005. Ein großer Vorteil der neuen Struktur: Um neue Anoden-Kathoden-Kombinationen zu testen, muss nicht erst aufwändig ermittelt werden, wie sich die Anodenschicht zwischen Nanosäulen abscheiden lässt. Bell Labs und mPhase arbeiten zurzeit gemeinsam mit der Rutgers University, der Staatsuniversität von New Jersey, daran, lithiumbasierte Nanobatterien für Digitalkameras und Handys zu entwickeln. Es gibt viele Ideen, wie diese Technik zu nutzen sei.

So könnten weitere Chemikalien den Elektrolyten nach Gebrauch wieder neutralisieren. Gerade bei Netzen von Umweltsensoren wäre das eine wichtige Anforderung. Statt Silizium ließe sich vielleicht auch ein Kunststoff verwenden, um die Nanobatterien zudem flexibel zu machen. mPhase und Bell Labs haben zudem ein mikromechanisches Magnetometer entwickelt, das in mehr als zehn Meter Entfernung eine Eisenstange aufspüren kann, dabei kommt auch die Nanobatterie zum Einsatz. Dieses System könnte die Sicherheit im zivilen Luftverkehr erhöhen, wird aber wohl zunächst vor allem militärische Anwendungen finden. Die Firma mPhase rechnet damit, in zwei bis drei Jahren Muster an potenzielle Kunden versenden zu können. ◀



Der Journalist **Charles Q. Choi** ist Mitarbeiter von United Press International und Experte in Sachen Nanotechnologie.

From rolling ball to complete wetting: the dynamic tuning of liquids on nanostructured surfaces. Von T.N. Krupenkin, J.A. Taylor, T.M. Schneider und S. Yang in: Langmuir, Bd. 20, S. 3824, 11. Mai 2004

A novel battery architecture based on superhydrophobic nanostructured materials. Von A. Lifton und S. Simon. Im Internet unter: [www.mphasetech.com/nanobattery-architecture.pdf](http://www.mphasetech.com/nanobattery-architecture.pdf)

## Wiener Schnitzel aus der Atomfabrik?

Diesseits utopischer Prophezeiungen mausern sich Rastersondenmikroskope zu wichtigen Werkzeugen.

Von Bernd Müller



**Es ist gut zehn Jahre her:** Auf der vierten Foresight Conference über molekulare Nanotechnologie in Palo Alto präsentierte ein Physiker namens Eric Drexler winzige Maschinen aus wenigen hundert oder tausend Atomen, die Atome transportierten, zusammensetzten und Kopien von sich selbst schufen. Eines Tages würden diese so genannten Assembler beliebige Gegenstände – vom Auto bis zum Wiener Schnitzel – wie aus Legosteinen aufbauen, versprach Drexler. Das Publikum verehrte ihn wie einen Messias. Der Haken an der Sache: Die Molekülmaschinen waren eine Computeranimation und sind auch heute noch nicht mehr als ein Hirngespinnst.

Dabei klang Drexlers Argumentation plausibel: Auch die Natur arbeitet mit molekularen Maschinen. Und Anfang der 1990er Jahre war es Don Eigler vom IBM-Forschungslabor in Almaden gelungen, mit der Nadelspitze eines Rastertunnelmikroskops einzelne Atome auf Oberflächen zu bewegen und so Bilder und Buchstaben zu kreieren – Nanotechnik schien zum Greifen nahe. Doch schaut man heute auf die Internetseiten von Drexler und Eigler, stehen dort dieselben Bilder wie vor zehn Jahren. Nichts Neues also bei Rastersondenmikroskopen und Assemblern?

Der Schein trügt: »Die Rastersondenmikroskopie hat in den letzten Jahren große Durchbrüche erlebt«, erklärt Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg, der diesem Forschungsgebiet wichtige Impulse gegeben hat. Allerdings habe die Öffentlichkeit das nach der anfänglichen Euphorie kaum wahrgenommen. Tatsächlich sind beispielsweise Rasterkraftmikroskope näher an der Anwendung als damals, nur eben anders als Drexler dachte, zum Beispiel als Analysewerkzeuge in der Molekularbiologie.

**Vor allem Atomkraftmikroskope haben sich gemausert.** Sie bestehen aus einer 50 bis 500 Mikrometer langen Blattfeder, die eine wenige Mikrometer kurze Spitze trägt; ein an der Feder reflektierter Laserstrahl misst noch so winzige Auslenkungen. Fährt man damit über eine Oberfläche, ergibt sich eine Art atomare Landkarte, bewegt sich die Nadel in Querrichtung, verdreht sich die Feder auf Grund der Reibung. Eine Variante des Prinzips versetzt die Nadel in Schwingung, das Gerät misst dann die Elastizität der Oberfläche.

Führend in der Rasterkraftmikroskopie sind nicht mehr die USA oder Europa, sondern Japan. Dort gelangen die beiden aufsehenerregendsten Entwicklungen der letzten Zeit. Toshio Ando von der Universität Kanazawa filmte die Dynamik einzelner Moleküle in einer Lösung, jedes Einzelbild wurde in jeweils zwanzig Millisekunden mit einer Sonde aufgenommen. Die Nadelspitze deformiert allerdings die Moleküloberfläche etwas, sodass die

Auflösung nur einige Nanometer beträgt – zu grob, um auch die einzelnen Atome zu sehen. Doch innerhalb der nächsten Jahre dürfte dieses Problem gelöst sein: Varianten des Verfahrens arbeiten ohne Oberflächenkontakt, indem sie die schwachen Kräfte zwischen Spitze und Oberfläche messen.

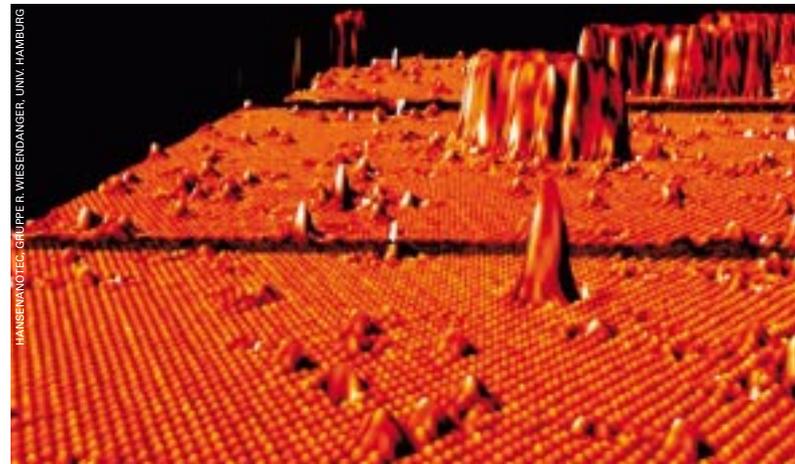
In Don Eigers Fußstapfen trat Seizo Morita von der Universität Osaka. Er nutzt Rasterkraftmikroskope, um Atome auf Oberflächen zu manipulieren. Doch nicht nur auf metallischen Oberflächen wie der IBM-Forscher, sondern auch auf Halbleitern. Damit eröffnet sich ein riesiges Anwendungspotenzial. Automatisierte Mikroroboter, die auf der Nanoskala Computerchips zusammensetzen, scheinen auf jeden Fall möglich.

**Bevor Produkte auf den Markt kommen,** die mittels Rasterkraftmikroskopen hergestellt wurden, werden diese selbst Teil von Konsumartikeln sein. Beispiel Computerfestplatten: Ihre Speicherdichte steigt rasant und damit schrumpfen die magnetischen Inseln, die einzelne Bits repräsentieren. Heute sind sie noch zweihundert Nanometer breit und zwanzig Nanometer lang; über kurz oder lang müssen wenige Atome für das Speichern genügen. Dann benötigt man aber andere Schreib-Lese-Köpfe als bisher. An der Universität Hamburg werden bereits neuartige Magnetkraftmikroskope mit speziellen Spitzen betrieben, die magnetische Eigenschaften eines Materials bis zur Auflösung einzelner Atome messen können (siehe Bild).

Die Japaner haben in den 1990er Jahren enorme Summen in die Nanoforschung investiert. Der Erfolg gibt ihnen Recht. Deutschland und die Europäische Union scheinen das Versäumte nun nachholen zu wollen und stecken inzwischen Milliarden in dieses Gebiet. Doch Insider sind enttäuscht: Das Geld fließt hier zu Lande größtenteils in traditionelle Technologien wie die Mikrochipfertigung und die Materialforschung, die sich die Vorsilbe »Nano« zu Nutze machen, um leichter an Fördergelder zu kommen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft und der Wissenschaftsrat scheinen das erkannt zu haben: In der Exzellenzinitiative von Bund und Ländern haben es nur drei »echte« Nanoforschungsverbände in die zweite Runde des Exzellenzcluster-Wettbewerbs geschafft.

Der Journalist **Bernd Müller** hat schon alle »Großen« der Rastersondenszene wie Don Eigler oder den Nobelpreisträger Gerd Binnig interviewt.

▶ **Mit neuartigen spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopen lassen sich nanoskalige magnetische Eiseninseln auf einer antiferromagnetischen Atomlage sichtbar machen.**



HANSEANANOTEC, GRUPPE R. WIESENDANGER, UNIV. HAMBURG