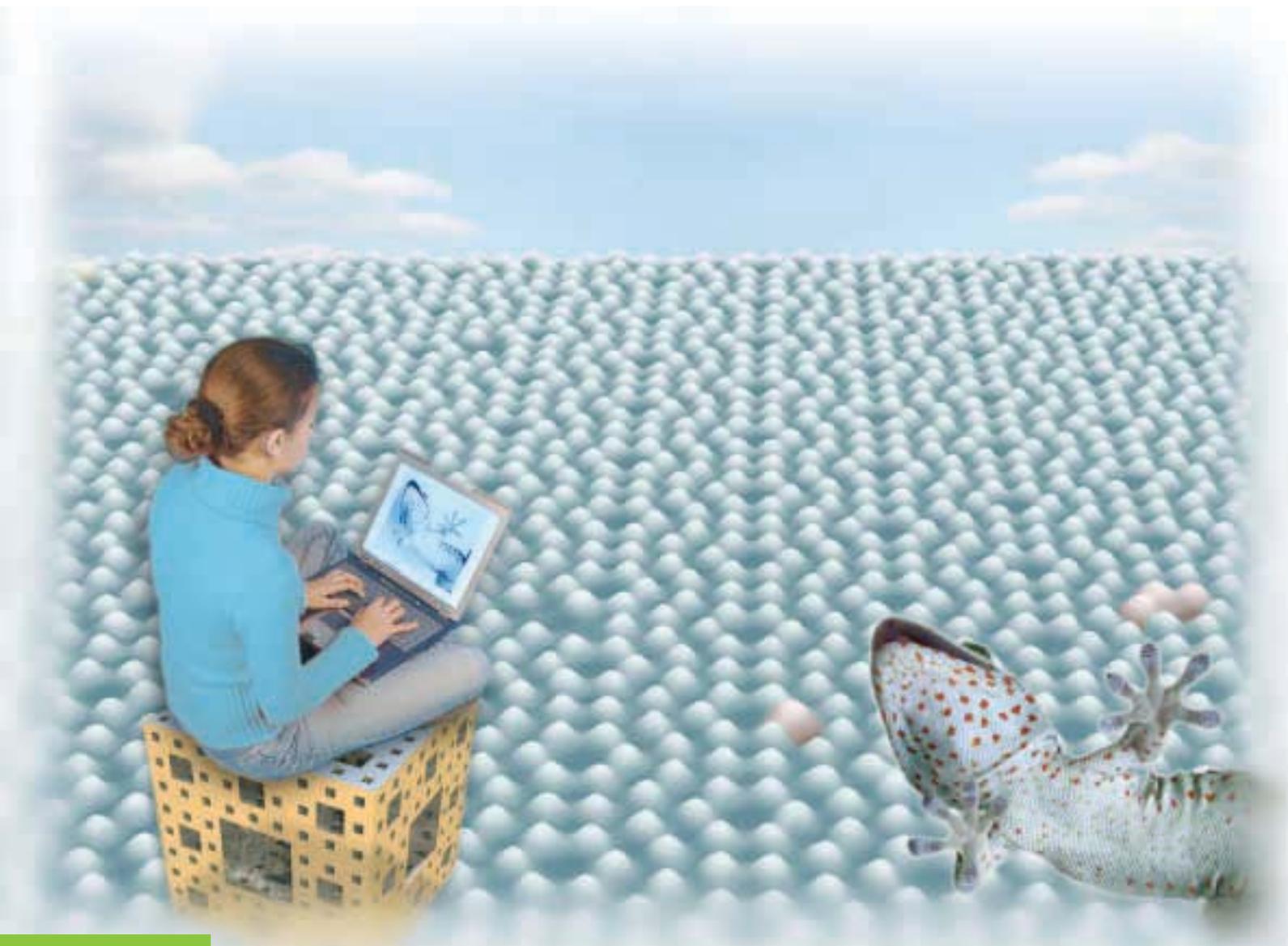




Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Nanotechnologie

Innovationen für die Welt von morgen



INNOVATION

Deutschland. Das von morgen.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Publikationen; Internetredaktion
11055 Berlin

Bestellungen

Schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn

oder per

Tel. : 01805 - 262 302

Fax: 01805 - 262 303

(0,12 Euro/Min.)

E-Mail: books@bmbf.bund.de

Internet: <http://www.bmbf.de>

Koordination

VDI - Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

Dr. Wolfgang Luther

Dr. Gerd Bachmann

Autor

Dr. Mathias Schulenburg, Köln

Gestaltung

Suzy Coppens, Köln

www.bergerhof-studios.de

Druckerei

Druckhaus Locher GmbH, Köln

Gedruckt auf Recyclingpapier

Mai 2004

Bildnachweis Titelseite:

Atomwiese: Gruppe Prof. Köhler, RUB Bochum

Gecko: Dr. Stanislav Gorb, MPI f. Metallforschung,
Stuttgart

Menger-Schwamm: University of California,
Berkeley, USA

Mädchen und Wolken, Montage: Suzy Coppens,
BergerhofStudios, Köln

Nanotechnologie

Innovationen für die Welt von morgen



Vorwort

Selbstreinigende Fenster, Bibliotheken am Handgelenk oder Prothesen aus biokompatiblen Stoffen? Das alles kann Wirklichkeit werden, wenn die Nanotechnologie in unseren Alltag, in Schulen oder Gesundheitszentren Einzug hält. Doch nicht nur unser Alltagsleben wird sich verändern, diese Zukunftstechnologie bietet auch ein immenses wirtschaftliches Potenzial.

„Kleiner – schneller – klüger“ lautet die Devise bei den künftigen Fortschritten der Nanotechnologie. Mittels nanotechnologischer Forschung und Entwicklung können Materialien hergestellt werden, die völlig neue Funktionen haben, die umweltverträglich, energiesparend oder ressourcenschonend sind. Auf diese Weise kann es gelingen klügere Produkte zu entwickeln, die nachhaltig zum gesellschaftlichen Fortschritt beitragen. Sie können einen Beitrag zum leisen und abgasarmen Verkehr leisten, eine deutlich verbesserte technische Kommunikation und Information ermöglichen sowie unsere medizinische Versorgung optimieren.

Die Einführung einer neuen Technologie ist jedoch manchmal auch mit Ängsten und Vorbehalten behaftet. Insbesondere dann, wenn komplexe naturwissenschaftliche bzw. technische Sachverhalte diese Technologien schwer verstehbar machen. Diese Broschüre „Nanotechnologie – Innovationen für die Welt von morgen“ möchte deshalb nicht nur einen ersten Einstieg in die spannende Welt der kleinsten Dimensionen bieten, sondern auch komplexe und schwierige Dinge genau erklären.

Ziel dieser Broschüre ist es darüber hinaus, Interesse an diesem hochaktuellen zukunftssträchtigen Innovationsfeld zu wecken und gleichzeitig eine Basis für die weitere gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema zu schaffen. Es gilt, die großen Chancen dieser neuen Schlüsseltechnologie zu nutzen, dabei aber auch Risiken zu analysieren und mögliche Gefährdungspotenziale frühzeitig einzudämmen. Das Bundesforschungsministerium hat die Fördermittel für die Nanotechnologieforschung deutlich erhöht, um so den Weg für neue Produkte und hochwertige Arbeitsplätze zu bereiten.

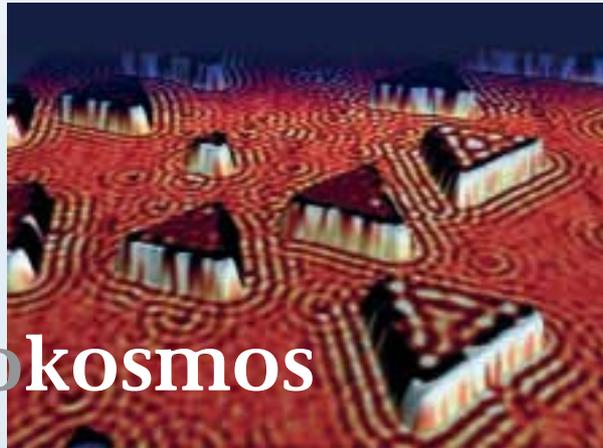
Edelgard Bulmahn
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Inhalt

3 Vorwort

4-5 Inhalt

Reise in den Nanokosmos



6-7 **Das Atom: Alte Idee und Neue Wirklichkeit**

8-13 **Nanotechnologie in der Natur**

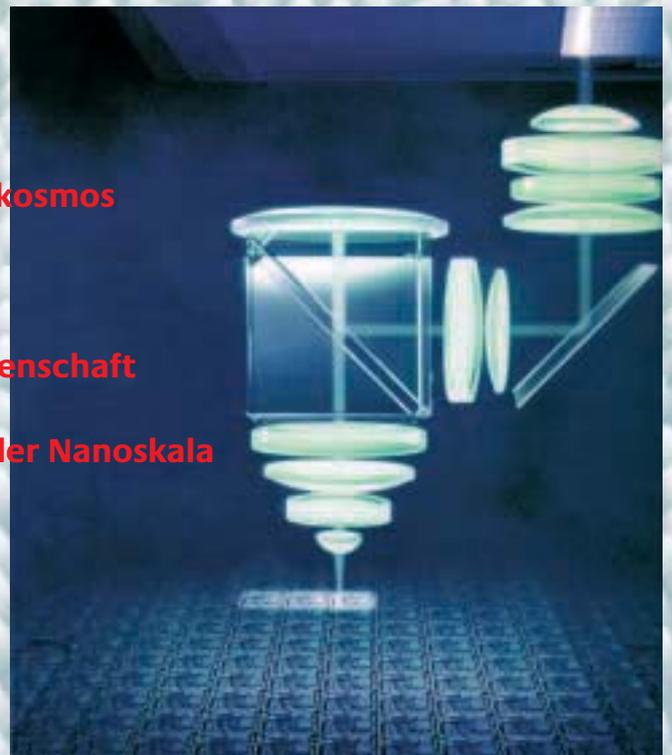
Instrumente und Verfahren

14-15 **Augen für den Nanokosmos**

16-17 **Schreibgeräte**

18-19 **Impulse für die Wissenschaft**

20-21 **Materialdesign auf der Nanoskala**



Nanotechnologie für die Gesellschaft



- 22-27 **Vernetzte Welt: Nanoelektronik**
- 28-29 **Nanotechnologie im künftigen Alltag**
- 30-33 **Mobilität**
- 34-37 **Gesundheit**
- 38-41 **Energie und Umwelt**
- 42-43 **Nanotechnologie für Sport und Freizeit**

44-45 Visionen

46-47 Chancen und Risiken



Weiterführende Informationen

- 48 **Wie werde ich Nano-Ingenieur?**
- 49 **Ansprechpartner, Links, Literaturhinweise**
- 50-51 **Glossar**
- 52 **Bildnachweis**

Reise in den Nanokosmos

Das Atom: Alte Idee und Neue Wirklichkeit

Amedeo Avogadro (1776-1856), Physikprofessor in Turin, der den Regentropfen berechenbar gemacht hat.



Unsere materielle Welt besteht aus Atomen. Das hatte vor rund 2400 Jahren schon der griechische Denker Demokrit behauptet. Die modernen Griechen dankten es ihm mit einem Portrait auf ihrer Zehn-Drachmen-Münze. Diese war weit verbreitet, ebenso wie Atome. Ein Regentropfen enthält 1.000.000.000.000.000.000.000 davon, denn Atome sind winzig, ein Zehntel Nanometer groß. Ein Nanometer ist ein Millionstel Millimeter.

Das Durchmesser-
verhältnis von
Magnesiumatom/
Tennisball ist gleich
dem von Tennisball/
Erde. Bei der nächsten
Magnesiumtablette
daran denken!



Der Geist Demokrits schwebt über der Nano-Szene, einem Meer von unendlich vielen Möglichkeiten.

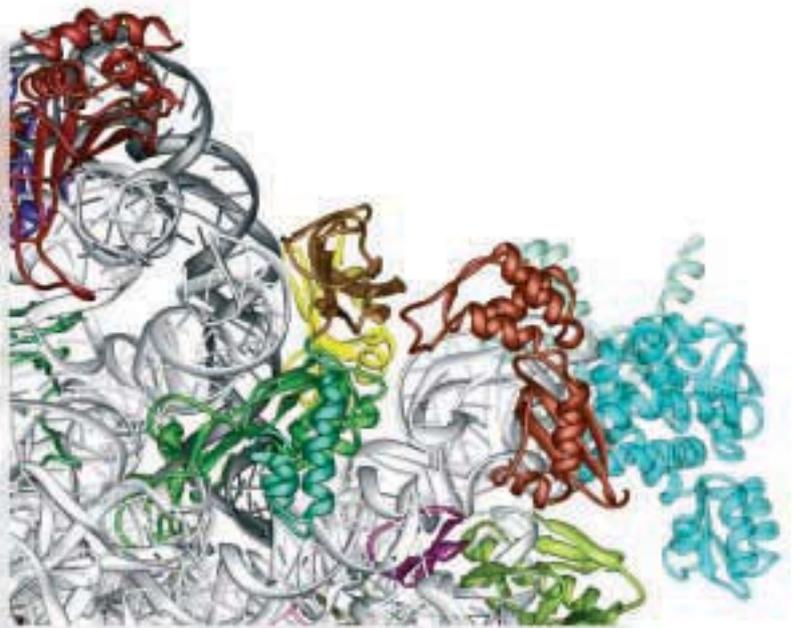
Lucretius, römischer Literat, machte ein paar Jahrhunderte später ein Gedicht auf Atome:

Das Universum besteht aus einem unendlichen Raum und einer unendlichen Anzahl von nicht reduzierbaren Partikeln, Atomen, deren Artenzahl gleichwohl endlich ist. ... Atome unterscheiden sich nur in Form, Größe und Gewicht; sie sind undurchdringlich hart, unveränderlich, die Grenze physischer Teilbarkeit ...

Das war schon ganz gut, wenn auch reine Spekulation. Dann wurde lange nicht mehr über solche Dinge nachgedacht.

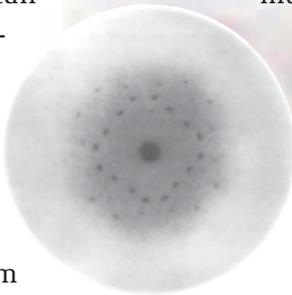
Im siebzehnten Jahrhundert machte sich Johannes Kepler, der berühmte Astronom, Gedanken über Schneeflocken, die er 1611 veröffentlichte: Die regelmäßige Form könne eigentlich nur einfachen, gleichförmigen Baublöcken zu danken sein. Die Idee vom Atom bekam neuen Glanz.





Nanomaschinen wie das Ribosom können von Ada Yonath, DESY, kristallographisch entschlüsselt werden.

Gelehrte, die sich mit Mineralen und Kristallen beschäftigten, hielten Atome immer häufiger für bare Münze. Aber erst 1912 gelang an der Universität München ein direkter Beweis: Ein Kupfer-
 vitriolkristall fächerte Röntgenlicht so ähnlich auf wie Regenschirmstoff das Licht der Laterne –
 der Kristall musste aus Atomen bestehen, in Reih' und Glied geordnet, Garn im schirm- Oder ein stapel im



Regen-
 stoff.
 Orangen-
 Basar.

Moderne Analysegeräte haben solche hoch komplexen Bestandteile der lebendigen Materie bis in den Nanomaßstab herunter sichtbar machen können.

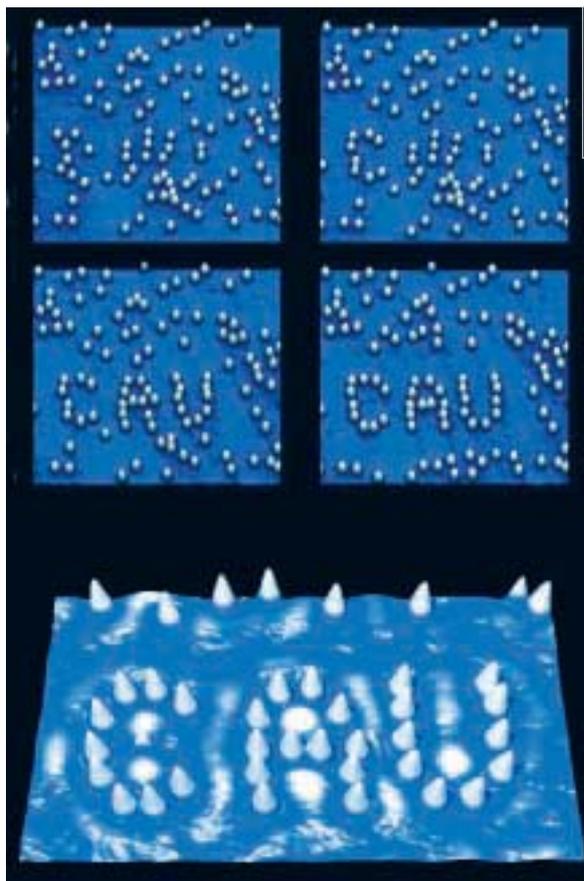
Schließlich wurde in den 1980ern mit dem Raster-
 tunneltmikroskop ein Instrument geschaffen, mit dem sich einzelne Atome eines Kristalls nicht nur abbilden - nicht wenige hielten die ersten Bilder für Schwindel - sondern sogar herumschubsen ließen.

Die Bühne war nun bereit für eine sehr vitale Bewegung: Nanotechnologie.

Der Grund, weshalb sich die Atome im Kristall so regelmäßig einreihen, ist einfach: Die Materie sucht sich so wie möglich, und Reih' und Glied ist das Bequemste. Schon in der Schale gerüttelte Nüsse bilden regelmäßige Muster, Atomen fällt das noch viel leichter.



Einfache Muster aber sind nicht immer die vermehrungsfreudigsten. Von Selbstordnungs-
 kräften getrieben, hat die Materie auf der Erde in Milliarden Jahren phantastisch komplexe, lebende Formen angenommen.



Manganatome dürfen bei Professor Berndt in Kiel das Logo der Christian-Albrechts-Universität darstellen.

Nanotechnologie in der Natur

Nanotechnologen liegt die belebte Natur sehr am Herzen. Die nämlich hat in den vier Milliarden Jahren ihrer Existenz teils verblüffende Lösungen für ihre Probleme gefunden. Typisch dabei ist: Das Leben strukturiert seine Materie bis ins Feinste, bis auf die Ebene der Atome hinunter. Nanotechnologen wollen das auch.



Atome werden nicht geliebt. Wer von ihnen hört, denkt an gewaltige Explosionen oder gefährliche Strahlung. Das kann aber nur Techniken betreffen, die sich mit dem Atomkern beschäftigen. Nanotechnologie befasst sich mit den Atomhüllen, das ist die Skala, auf der nanotechnologisch die Musik spielt.

Um aber jeden Zweifel auszuräumen, dass Atome tatsächlich ganz alltägliche, in Verbindungen sogar wohlschmeckende Gebilde sind, wählen wir als Ort des Abstiegs in den Nanokosmos einen Käse.

Mimolette wurde in Flandern erfunden. Die mit kleinen Höhlen gespickte Oberfläche lässt ahnen: Der Käse ist bewohnt. Mit Duldung des Besitzers, denn die Milbenaktivitäten kommen dem Aroma des Mimolette zugute. Die Milben sind ein Zehntel Millimeter groß. Das ESEM, ein spezielles Rasterelektronenmikroskop, kann Milben sogar lebend beobachten. Wie anderes Leben auch sind Milben aus Zellen aufgebaut. Maßstab der Zelle ist das Mikrometer. Eine Zelle besitzt eine hochkomplexe Maschinerie. Wichtiger Teil dieser Maschinerie sind Ribosomen, die nach Vorgabe der Erbsubstanz DNA alle möglichen Proteinmoleküle herstellen. Die Größenordnung des Ribosoms: 20 Nanometer. Teile der Ribosomenstruktur sind jetzt bis auf einzelne Atome herunter bestimmt worden. Die ersten Früchte dieser Art Nanobiotechnologie: Neue Medikamente, die Bakterienribosomen blockieren.



Die Lotusblume reinigt ihre Blätter mit dem nach ihr benannten Lotus-Effekt.

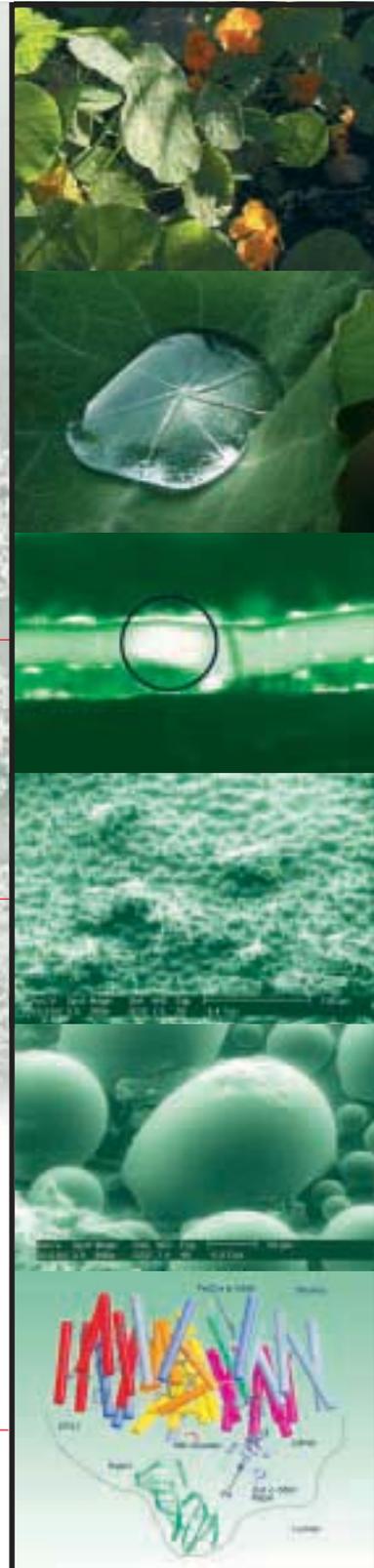
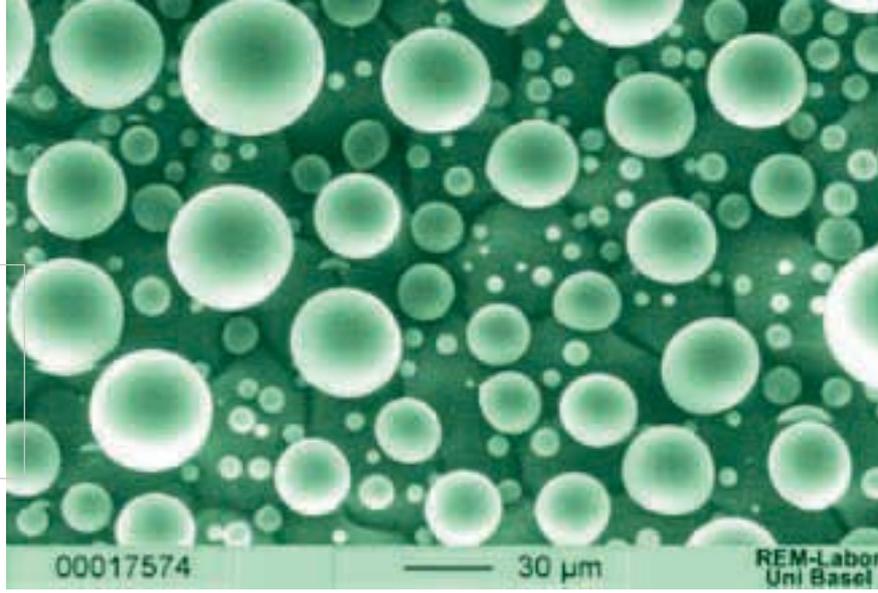
Wassertröpfchen auf einem Kapuzinerkresseblatt, abgebildet mit einem speziellen Elektronenmikroskop (ESEM) der Universität Basel.

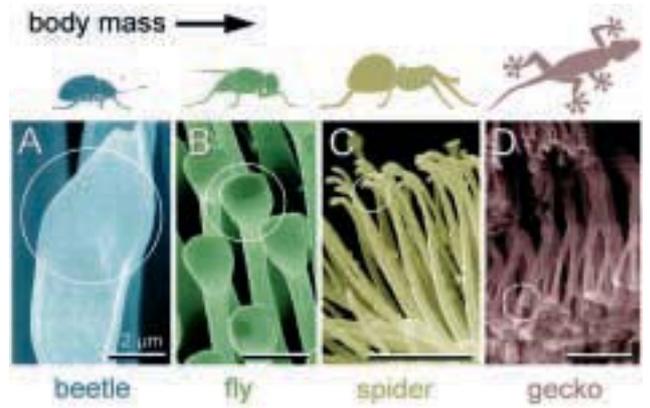
Lotuseffekt & Co.

Kapuzinerkresse hält ihre Blätter mit dem Lotuseffekt sauber. Das ESEM-Rasterelektronenmikroskop zeigt, wie sich Wassertröpfchen von der Blattfläche distanzieren. Das rührt von der Noppenstruktur der Blätter her. Die lässt Wasser mit hoher Geschwindigkeit abperlen, dabei wird der Schmutz mitgerissen. Der - besonders eingehend von Professor Barthlott und Mitarbeitern an der Universität Bonn erforschte - Lotus-Effekt hat bereits Eingang in eine Reihe von Produkten gefunden, Fassadenfarben etwa, an denen das Wasser Schmutz lösend abperlt. Sanitärkeramik mit Lotusstruktur ist pflegeleicht.

Pflanzenblätter haben noch mehr Nanotechnologie. Ihr Wasserhaushalt wird häufig von Forisomen geregelt. Das sind mikroskopisch kleine Muskeln, die im Kapillarsystem der Pflanze Wege öffnen oder - wenn die Pflanze einmal verletzt wird - schließen. Gleich drei Fraunhofer-Institute und die Universität Gießen versuchen jetzt, den Pflanzenmuskel technisch zu verwenden, etwa für mikroskopisch kleine Linearmotoren, vielleicht für das Lab-on-a-Chip.

Im atomaren Maßstab wieder raffinierteste Technik: Der Photosynthesekomplex, der die Energie für das Leben auf der Erde sammelt. Es kommt auf jedes einzelne Atom an. Wer das nanotechnologisch kopieren kann, hat Energie für alle Zeiten.





Mit Nano an der Decke : der Gecko

Geckos können jede Wand hinauflaufen, kopfunter über die Decke flitzen und mit einem einzigen Fuß an ihr hängen bleiben. Das geht mit – natürlich – Nanotechnologie. Der Geckofuß ist mit feinsten Haaren bestückt, die so anschmiegsam sind, dass sie sich der Unterlage über weite Strecken auf wenige Nanometer nähern können. Dann beginnt die sogenannte Van-der-Waals-Bindung zu wirken, die eigentlich sehr schwach ist, durch Millionen von Haftpunkten aber tragend wird. Die Bindungen lassen sich durch „Abschälen“ leicht lösen, so, wie man einen Tesafilm abzieht. So kann der Gecko die Decke entlanglaufen. Materialwissenschaftler freuen sich bereits auf ein synthetisches „Geckolin“.

leicht klebend verzögern. Bei Lockstoff-Höchststand kleben die Leukozyten fest an, andere Klebemoleküle ziehen die Blutkörperchen dann durch die Gefäßwand zur Einstichstelle, wo sie sich über etwaige Eindringlinge hermachen – Klebekunst in Vollendung. Nanotechnologische Imitate werden unter dem Stichwort „bonding on command“ erforscht - Kleben auf Kommando.



Käfer, Fliegen, Spinnen, Geckos haben am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart Geheimnisse ihrer Haftkraft gelassen. Sie haften mit Härchen, die mit dem Untergrund eine Van-der-Waals-Bindung eingehen. Je schwerer das Tier, desto feiner und zahlreicher die Härchen.

Kleben fürs Leben

Leben existiert, weil seine Bestandteile von einer raffinierten nanotechnologischen Klebekunst zusammengeheftet werden. Auch bei Verletzungen, Beispiel Mückenstich: Die Einstichstelle wird rot, weil sich feinste Blutgefäße erweitern, durch die dann Schwärme von Leukozyten, Weiße Blutkörperchen, treiben. Zellen am Einstichort sondern einen Lockstoff ab. Abhängig von dessen Konzentration fahren die

Zellauskleidungen der Blutgefäße und die Leukozyten aufeinander abgestimmte Klebemoleküle aus, die die Leukozytenfahrt an der Gefäßwand



Fliegenfüße ganz nah



Miesmuschel mit Byssusfäden und Fuß



Das Fraunhofer-Institut IFAM in Bremen forscht an modifizierten Muschelklebern, die sogar Bruchporzellan spülmaschinenfest zusammenkleben sollen. Auch das Kompetenznetzwerk „Neue Werkstoffe und Biomaterialien“ in Rostock und Greifswald hat Muscheln fest im Auge.

Biominalisation

Muscheln aber können noch mehr. Ihr Perlmutter besteht aus zahllosen winzigen Kalkkriställchen in der Gestalt des Minerals Aragonit, die allein sehr spröde wären. In der Muschel aber sind sie mit schraubenartigen, hochelastischen Proteinen miteinander verkittet. Drei Gewichtsprozent Protein genügen, um den Panzer der Abalonenmuschel dreitausendfach bruchzäher als einen reinen Calcitkristall zu machen. Seeigel verstärken so ihre mitunter dreißig Zentimeter langen Stacheln, die dann der Brandung standhalten können.

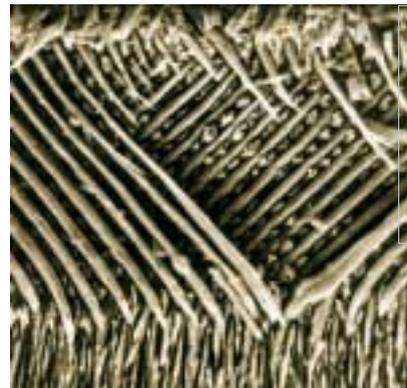
Die Biominalisation konstruiert auch sehr filigrane Gebilde. In einem kleinen Gebiet in der Nähe der philippinischen Inseln lebt am Grunde der See ein Schwamm, der „Venusblumenkörnchen“ genannt wird. Das Ding ist gebogen wie die Scheide eines türkischen Krummdolches, dabei aber um seine Längsachse rund. Seinen Namen verdankt der Schwamm der Struktur des Innenskeletts seiner Hülle.

Sie ist ein Gewebe aus feinen Kieselnadeln, durchlöchert wie das Korbgeflecht am Rücken eines Holzstuhls. Dieses Gewebe ist sowohl in einem rechtwinkligen Netz als auch über die Diagonalen verflochten. Das



Venusblumenkörnchen gilt als Meisterwerk der Biominalisation: Im Durchmesser drei Nanometer kleine Elementarbausteine aus Kieselerde (Siliziumdioxid) fügen die Zellen des Schwamms zunächst zu hauchfeinen Schichten zusammen. Die werden dann so eingerollt, dass sich die Kieselnadeln bilden. Grundelement wieder für das Korbgeflecht, das hohen Druckwechseln widerstehen kann.

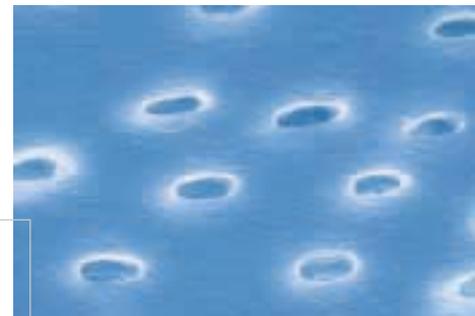
Venusblumenkörnchen – der Tiefseeschwamm wird derzeit als biologisches Vorbild für Lichtwellenleiter studiert.



Das dreidimensionale Biomimetalgeflecht im Zahnschmelz eines Wühlmausbakenzahns bewahrt die Kaufläche vor Brüchen.

Technische Biominalisation: Nanopartikel reparieren Zähne

Wenn Zähne sehr kälteempfindlich werden oder Saures weh tut, sind meist kleine Kanäle im Zahnschmelz dafür verantwortlich, offene Dentin-Tubuli. Diese Kanäle lassen sich mit Nanopartikeln der Firma SusTech aus Calciumphosphat (Apatit) und Protein zehnmal schneller verschließen als mit herkömmlichen Apatit-Präparaten. Die neu mineralisierte Materialsicht verhält sich im Mund genauso wie körpereigenes Zahnmateriell.



Von (einst) geradezu strategischer Bedeutung ist die Biomineralisation bei Diatomeen, Kieselalgen. Die mikroskopisch kleinen Lebewesen schützen sich mit Kieselsäurepanzern, deren Hauptbestandteil SiO_2 ist, Siliziumdioxid. Wie Quarzglas, das ebenfalls aus Siliziumdioxid besteht, sind auch Kieselsäurepanzer ziemlich unempfindlich gegenüber vielen ätzenden Säuren und Laugen, weshalb sie von Nanotechnologen als Reaktionsgefäße für Kriställchen im Nanometermaßstab angedacht werden. Ein Kniff nämlich, nanoskalige Partikel durch chemische Reaktionen zu bekommen, besteht darin, das Reaktionsvolumen zu begrenzen. Wenn der Reaktionsstoff darin aufgebraucht ist, bleiben die durch die Reaktion wachsenden Kriställchen klein. Und in den Diatomeenpanzern sind viele nanoskalige Poren, Nanoreaktoren.

Wie wiederum kommen die teils sehr kunstvoll wirkenden Diatomeenpanzer zustande? Erste Antworten gibt es. Forscher der Universität Regensburg haben gefunden, dass Varianten einer bekannten Proteingruppe, der „Polyamine“, in einer richtig dosierten Kieselsäurelösung Nanokügelchen mit einstellbaren Durchmesser messern produzieren können, zwischen 50 und 900 Nanometer. Von Selbstordnungskräften getrieben, ganz spontan. Ähnlich spontan sollten, nach einfachen Wachstumsmodellen, die Kieselsäurepanzer entstehen.

Warum sollten Diatomeenpanzer eine „strategische Bedeutung“ gehabt haben? 1867 fand der Schwede Alfred Nobel, dass Kieselgur, Kieselerde aus fossilen Ablagerungen von Diatomeenpanzern, Nitroglycerin aufsaugte und dabei die Neigung dieses Sprengmittels zu spontanen Explosionen dämpfte. Die Mischung nannte Nobel „Dynamite“, dessen guter Absatz den Grundstock für die Stiftung legte, aus dem heute die Nobelpreise finanziert werden.

Diatomeenpanzer – oben das Analogon zu einem „Mengerschwamm“ (s. a. S.21) – haben durch Optimalformen höchste Stabilität bei kleinstem Gewicht und, wahrscheinlich, Lichtsammlersysteme für ihre Photosynthese-Apparate, Chloroplasten.



Der Seestern *Ophiocoma wendtii* ist mit einem perfekten Mikrolinsensystem zum optischen Sehen ausgestattet. Oben: Der Anblick bei Tag, unten: Bei Nacht.



Panzerschuppe und Mikrolinsensystem zugleich

Nanotechnologie in der Natur: *Ophiocoma wendtii*, ein handtellergroßer Haarstern, gab lange Zeit Rätsel auf. Das Tier, dessen scheibenförmigem, gepanzertem Körper fünf Arme entsproßen, eilt bei der Annäherung möglicher Feinde in ein Versteck, obwohl es keine Augen zu erkennen gibt. Die wurden schließlich im Kalkpanzer des Lebewesens gefunden. Der nämlich ist mit perfekten Mikrolinsen-Feldern übersät, die den ganzen Körper des Haarsterns zu einem Komplexauge machen. Die Nanotechnologie? Die einzelnen Linsen sind so kristallisiert, dass die Eigenart des Kalkspats, ein Doppelbild zu erzeugen, nicht zum Tragen kommt – Kristallisationskontrolle auf der nanotechnologischen Ebene. Und dann sind die Linsen durch subtile Beigaben von Magnesium auch noch auf „sphärische Abberation“ korrigiert, um ungewollte Farbsäume zu vermeiden. *Ophiocoma* beherrscht somit nanotechnologische Feinheiten, die einst Carl Zeiss zu Ruhm verholfen haben.



Das Institut für Neue Materialien in Saarbrücken, INM, hat Nanopartikel-Verfahren entwickelt, Metallteile mit fälschungssicheren, abriebfesten Hologrammen zu beschichten.



Auch das kann die Natur nicht: Mit Nanoruß dotierte Keramik für korrosionsfeste Glühzünder, etwa für Gasthermen. Die einstellbare Leitfähigkeit der Keramik erspart einen Transformator.

Grenzen der Natur, Vorzüge der Künstlichkeit

Nanotechnologie also ist Natur pur, dennoch sind die Möglichkeiten der belebten Natur begrenzt, sie kann weder mit hohen Temperaturen umgehen, wie Keramiker, noch mit metallischen Leitern. Der modernen Technik stehen dagegen sehr künstliche Bedingungen zur Verfügung – extreme Reinheiten, Kälte, Vakua – unter denen die Materie überraschende Eigenschaften erkennen lässt. Dazu zählen ganz besonders Quanteneffekte, die teils in starkem Widerspruch zu den Gesetzen der Alltagswelt zu stehen scheinen. So

bekommen Teilchen im Nanokosmos zugleich Welleneigenschaften. So kann ein Atom, das ja ein Ganzes ist, wie eine Welle zwei Spalte zugleich passieren, um hinterher wieder nur ein Ganzes zu sein.

Partikel bekommen ganz neue Eigenschaften, wenn sich ihre Größe dem Nanometer nähert: Aus Metallen werden Halbleiter oder Isolatoren. Ganz unscheinbare Substanzen wie Cadmiumtellurid (CdTe) fluoreszieren im Nanokosmos in allen Farben des Regenbogens, andere wandeln Licht in Strom.

Wenn Partikel nanoskopisch klein werden, nimmt der Anteil ihrer Oberflächenatome stark zu. Oberflächenatome haben aber häufig andere Eigenschaften als die in der Mitte des Partikels, meist werden sie reaktionsfreudiger. Gold etwa

wird im Nanomaßstab ein guter Katalysator für Brennstoffzellen (s. a. Mobilität). Nanopartikel lassen sich auch mit anderen Substanzen beschichten, in Materialien aus diesen Verbundpartikeln sind dann mehrere Eigenschaften kombiniert. Beispiel: Nano-Keramikpartikel mit organischen Hüllen, die die Oberflächenspannung von Wasser herabsetzen, für die Beschichtung von beschlagfreien Badezimmerspiegeln.

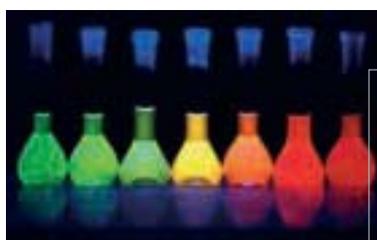
Speziell beschichtete nanoskalige Partikel aus Magnetit, einem Eisenoxid, bilden mit Öl eine magnetisch formbare Flüssigkeit, ein Ferrofluid. Ferrofluide werden in immer mehr Anwendungen eingesetzt, etwa als Dichtungsmittel für Drehdurchführungen für Vakuumbehälter und Festplattengehäuse, oder in steuerbaren Schwingungsdämpfern für Maschinen oder Autos.

Von der Kompliziertheit der Nanotechnologie sollte sich niemand schrecken lassen, auch ein Apfel ist kompliziert – Zellen, Ribosomen, DNA – was die Beliebtheit dieser Frucht aber nicht gemindert hat. Denn Äpfel sind sehr einfach zu handhaben – wie gute Nanotechnologie.

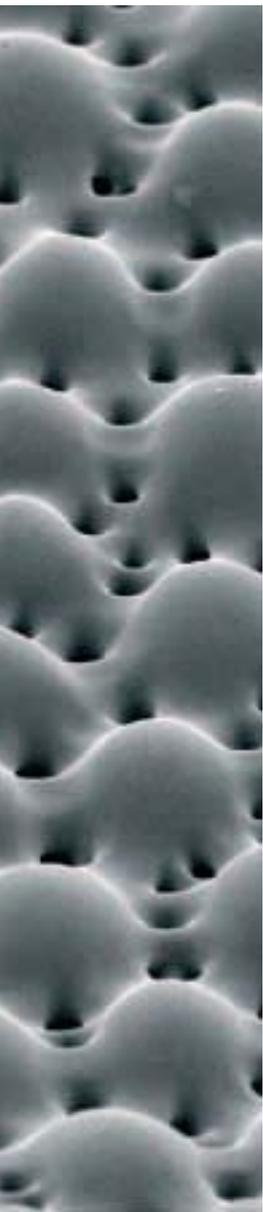
Magnetit-Nanopartikel in Öl. Die Flüssigkeit lässt sich magnetisch formen.



„Magnetotacticum bavaricum.“ Magnetbakterien können Ketten von Nanomagnetiten synthetisieren und als Kompassnadel nutzen.



Cadmium-Tellurid-Partikel fluoreszieren, die Farbe hängt nur von der Partikelgröße ab.



Instrumente und Verfahren

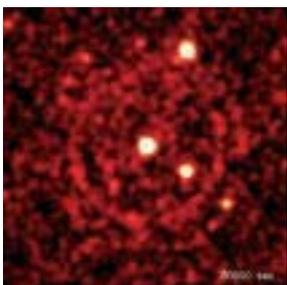
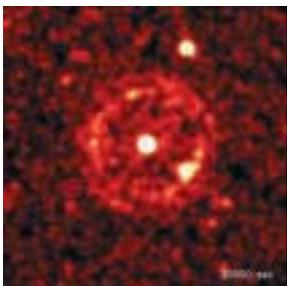
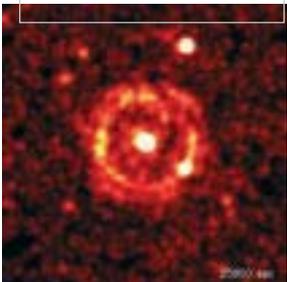
Augen für den Nanokosmos



Nano im All: Die Spiegel des europäischen Röntgenteleskops „Newton“ sind im Mittel auf 0,4 Nanometer glatt poliert und sehen hier Röntgenstrahler im Andromeda-Nebel



Eine wissenschaftliche Sensation: Ein Gammastrahlenblitz brennt Ringe in eine galaktische Staubwolke.



Was hat das europäische Röntgenteleskop „Newton“ mit Nano zu tun? Es sammelt die Röntgenstrahlung ferner Objekte mit 58 papierkorbgroßen, zwiebelartig ineinander geschachtelten, mit Gold bedampften Spiegelschalen. Die haben eine mittlere Oberflächenrauigkeit von nur 0,4 Nanometern – eine Meisterleistung, an der die Carl Zeiss AG maßgeblichen Anteil hat.

Präzisionsröntgenspiegel für die Röntgenspektroskopie und -mikroskopie sind aus mehreren hundert Schichten zweier verschieden schwerer Elemente aufgebaut. Die Anforderungen an solche Spiegel sind noch extremer, die Schichten dürfen im Mittel nur Bruchteile eines Atomdurchmessers vom Ideal abweichen. Diese Technik wird am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden beherrscht.

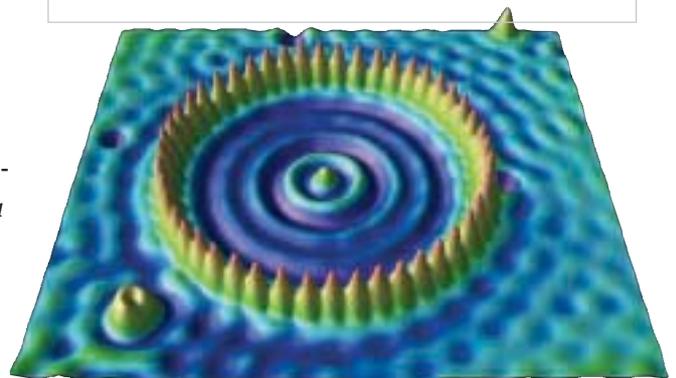
Den Trick mit dem Schichtreflektor hat für den Bereich sichtbaren Lichtes auch die Natur herausgefunden: Der nachtaktive Tintenfisch *Euprymna scolopes* richtet mit Spiegelchen aus Reflectin-

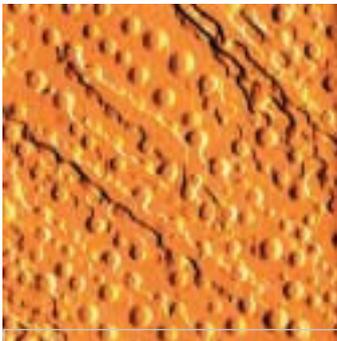
Proteinen das Licht von Leuchtbakterien nach unten und gaukelt damit unter ihm schwebenden Feinden ein Stück Sternenhimmel vor. Dieses Beispiel biologischer Nanotechnologie wurde kürzlich an der Universität Hawaii entdeckt.

Rastersonden

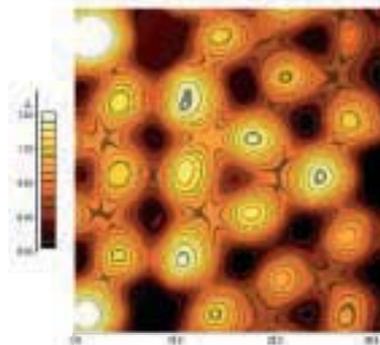
Rastersonden als Augen für den Nanokosmos scheinen wenig spektakulär, sie sind es aber, schließlich hat es für die Entwicklung des Urahns aller Rastersonden, das Rastertunnelmikroskop, den Nobelpreis gege-

„Quantum Corral“, von Don Eigler, IBM. Die Wellen im Inneren spiegeln die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron zu treffen.

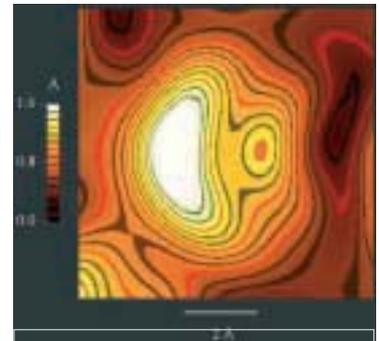




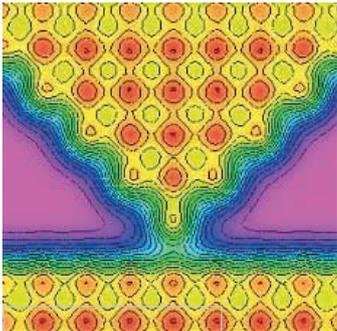
Kaliumbromid-Kristall mit Atomterrassen. So ähnlich sieht das Salz auf dem Frühstücksei aus.



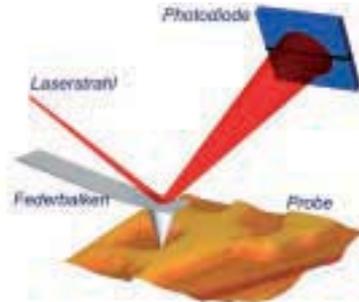
Silizium ganz nah, Elektronendichte-Konturen im Rasterkraftmikroskop



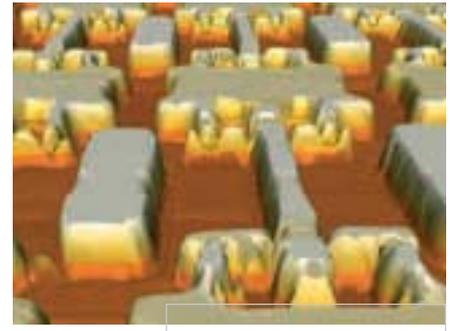
Das Front-Atom einer Tastspitze lässt zwei Elektronenwölkchen heraushängen, Orbitale, ganz wie im Lehrbuch.



Klassische Spitze eines Rastertunnelmikroskops (schematisch)



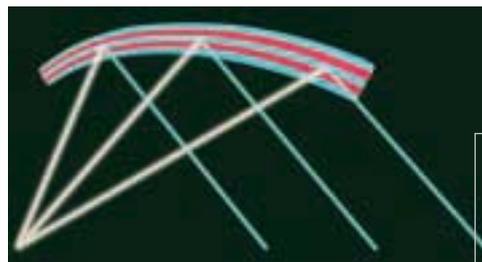
Rasterkraftmikroskop: Die Auslenkung der Abtastnadel wird von einem Laserstrahl an eine Photozelle gemeldet.



Mit „kapazitiven“ Sonden lassen sich auch die Schaltvorgänge auf einem Chip abbilden.

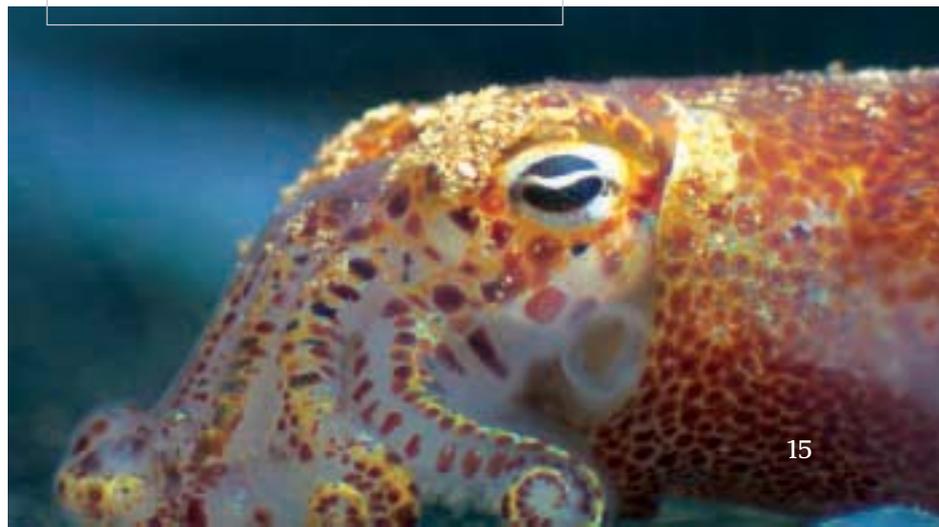
ben. In Rastersonden führen Piezokristalle eine Tastspitze wieder und wieder leicht versetzt über den Gegenstand ihres Interesses, etwa Felder von Atomen. Die Bewegungen sind winzig, der Abstand Spitze-Atomfeld meist kleiner als ein Atomdurchmesser. Dabei passiert etwas: Mal fließt ein Strom, mal werden winzige Magnetfelder detektiert. Computer breiten die Messungen graphisch auf einer Fläche aus, es entsteht ein Bild, je nach Messprinzip atomgenau und besser. Besonders gewitzt: Das Rasterkraftmikroskop. Es erspürt die winzigen Kräfte, die die Atome des Atomfeldes auf das vorderste Atom der Tastspitze

ausüben. Das Verfahren kann sogar in die Elektronenhüllen der Atome hineinblicken – Geheimnistenthüllung auf unterster Ebene. Den derzeitigen Weltrekord in Sachen Auflösung hält die Universität Augsburg.

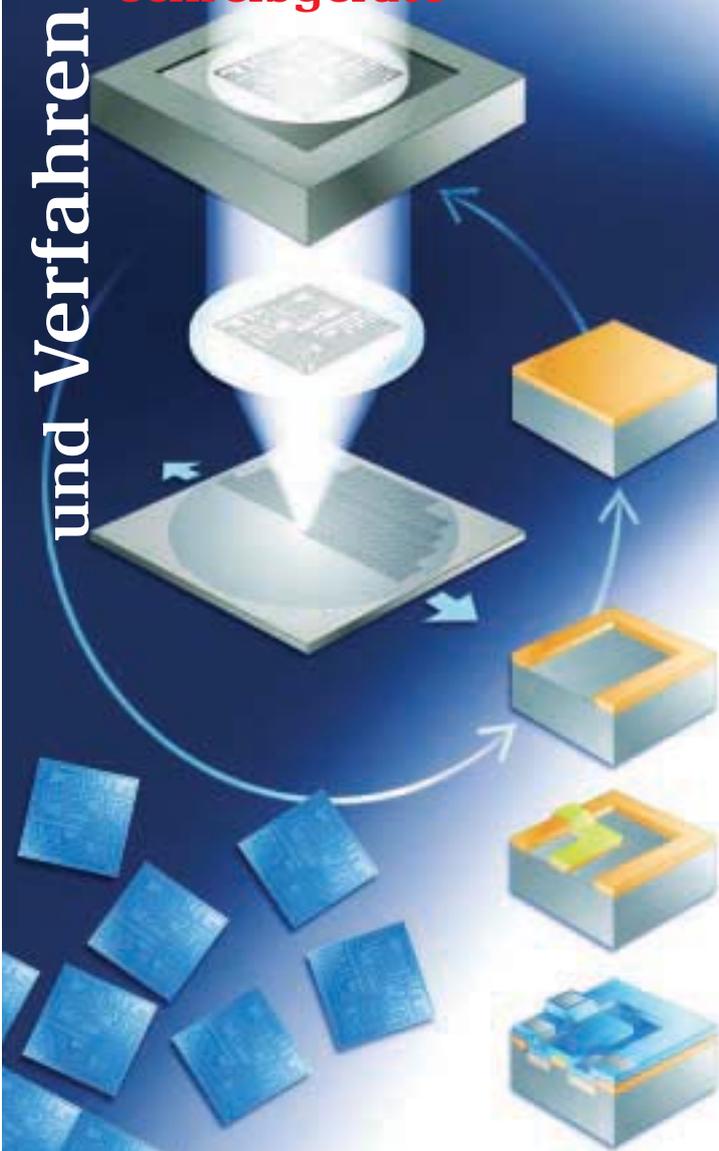


Gekrümmter Mehrschichtspiegel für die leistungsstarke Röntgenanalyse

„Euprymna scolopes“ täuscht seine Feinde mit Mehrschicht-Lichtspiegeln aus Reflectine-Protein. Das Licht liefern Leuchtbakterien.



Schreibgeräte



Lithographie

In der Computerwelt steht Lithographie für die Technik der Strukturierung von Computerchips mit Hilfe von Licht. Dabei überzieht man die hochpolierte Scheibe eines Halbleitermaterials, einen Silizium-Wafer, mit einem lichtempfindlichen Schutzlack, auf dem das Bild einer Struktur abgebildet wird. Die Entwicklung des Schutzlacks gibt die belichteten (oder unbelichteten) Stellen des Wafers frei, die dann durch struktur erzeugende Prozesse wie Ätzen, Implantation von Fremdatomen und Abscheidung die gewünschten elektrischen Eigenschaften bekommen. Die Wiederholung des Prozesses mit immer neuen Strukturbildern, Masken, lässt schließlich die komplexesten Gebilde entstehen, die Menschen je hervorgebracht haben: Höchstintegrierte Schaltungen, Chips. Mittlerweile haben die Transistordichten

Lithographieprozess:

Ein Chip ist ein dreidimensionales Gebilde, bei dem sich alle Schaltelemente in einzelnen Ebenen anordnen. Für einen modernen Hochleistungschip werden 25 bis 30 solcher Ebenen benötigt, die jeweils eine eigene Lithographiemaske erfordern. Die Strukturen der Maske werden durch das Licht und das Linsensystem des Wafersteppers, ähnlich einem Diaprojektor, auf dem Wafer abgebildet. Jede neue Maske eines Maskensatzes bringt neue Funktionalitäten auf den Chip und erhöht dessen Komplexität.

so zugenommen, dass unter eine Bleistiftspitze eine halbe Million und mehr Transistoren zu liegen kämen.

Moderne Chips haben Strukturen, die kleiner sind als die Wellenlänge des Lithographie-Lichtes, so werden Kryptonfluorid-Laser mit einer Wellenlänge von 193 Nanometer benutzt, um Strukturbreiten von 130 und demnächst 90 Nanometer zu realisieren, was mit einer Reihe subtiler optischer Tricks wie „Optical Proximity Correction“ und „Phase Shifting“ möglich ist. Derzeit werden die Grundlagen für die Lithographie mit extremem Ultraviolett gelegt, die EUV-Lithographie, die Lichtwellenlängen von 13 Nanometer benutzt und schließlich Strukturen von nur mehr 35 Nanometer Breite in Silizium bringen soll. Die Anforderungen an das Maskenmaterial sind extrem, so darf sich eine zehn Zentimeter lange Platte bei einer Erwärmung um ein Grad Celsius nur um wenige Zehntel Nanometer ausdehnen, also nur um wenige Atomdurchmesser. Auch die geforderte Ebenheit von wenigen Atomdurchmessern liegt an der Grenze des prinzipiell Machbaren.

Die Entstehung des Elektronikstandortes Dresden ist eine Erfolgsstory deutscher Forschungsförderung. In der Region sind etwa 16.000 Arbeitsplätze mit hoher Innovationsbreitenwirkung für die gesamte deutsche Wirtschaft entstanden. In BMBF-geförderten Projekten haben 44 Partner aus Industrie und staatlichen Forschungseinrichtungen, darunter 21 mittelständische Unternehmen, den Standard für die künftige Verwendung von 300-Millimeter-Wafern, Siliziumkristallscheiben, bei der Produktion hochkomplexer integrierter Schaltungen entwickelt. Dem Maskentechnologiezentrum in Dresden, in dem die Mittel zur Strukturierung künftiger Nanoelektronik-Chips entwickelt werden, kommt dabei eine Schlüsselstellung zu.



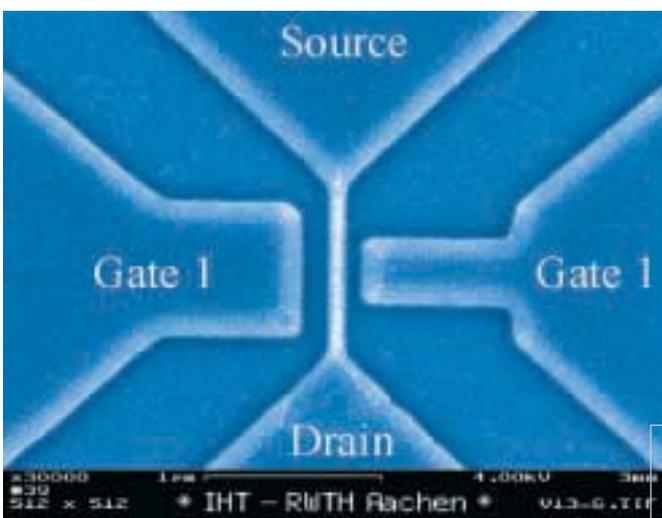
Prototyp einer EUV-Waferstepper-Anlage für die Produktion zukünftiger Chip-Generationen

Nano-Stempel für den Mittelstand

Wer an Nanoelektronik denkt, hat meist Millionen, milliardenteure Einrichtungen vor Augen, die dann aber durch die schiere Masse ihres Outputs bezahlbare Produkte liefern. Es gibt aber auch Wege in den Nanokosmos, die dem Mittelstand offen stehen. Die Methoden muten auf den ersten Blick archaisch an; beim Verfahren des UV-Nano-Imprint etwa presst man die Nanostrukturen mechanisch – tatsächlich mechanisch – in einen Lack ein, der das elektronische Trägermaterial, etwa Silizium, abdeckt. Der Stempel, der die filigranen Nanostrukturen enthält, ist aus Quarzglas, und Quarzglas ist durchsichtig für UV-Licht. Wenn sich der Stempel in den Lack abgesenkt hat, lässt ein UV-Lichtimpuls den lichtempfindlichen Lack polymerisieren, also aushärten. Dann wird der Stempel zurückgezogen und das Lackrelief darunter gedünnt. Das freigelegte Silizium ist dann nach Wunsch manipulierbar; durch

mehrfaches Wiederholen des Prozesses mit immer anderen Stempeln entsteht schließlich die komplexe Struktur eines Chips mit Transistoren, Leiterbahnen etc. Im Laborversuch sind minimale Strukturgrößen von 10 Nanometern erreicht worden. Der Prozess ist nicht auf elektronische Bauteile beschränkt, man kann so auch Metalle hauchfein strukturieren, oder Plastik. Der Prozess könnte auch in das Lab-on-a-Chip führen. Die Kosten für eine UV-Nano-Imprint-Maschine werden derzeit auf weniger als eine Million Euro geschätzt, ein Bruchteil dessen, was die entsprechenden Geräte einer modernen konventionellen Chipfabrik kosten. Dennoch wird UV-Nano-Imprint keine billigeren Produkte hervorbringen, weil der Durchsatz viel kleiner ist. Für spezielle Mini-Serien – „mini“ gemessen an den Großserien der Prozessor-Produzenten – könnte UV-Nano-Imprint aber das Mittel der Wahl werden.

Zerodur für Lithographiemasken, die Spezialkeramik bleibt selbst auf der Nanoskala formstabil.



Mit Stempeln in den Nano-Kosmos: Am Institut für Halbleitertechnik (IHT) der RWTH Aachen sind mit mechanisch/optischen Methoden bereits Chip-Strukturweiten von 80 Nanometern realisierbar. Anwendung: Kleinserien hochkomplexer Schaltungen.

Impulse für die Wissenschaft

Herkömmliches Spektrometer für die Röntgenstruktur-analyse. Solchen Instrumenten verdankt die Wissenschaft große Teile ihrer Kenntnis vom Nanokosmos.

Unterirdische Rennbahn für schnelle Elektronen



Quanteneffekte

An der Ludwig-Maximilians-Universität in München wird Materie mittlerweile routiniert in nanotechnologische Extreme getrieben, unter denen sie dann bizarre Eigenschaften erkennen lässt. Wenn etwa ein Dampf von hunderttausenden Rubidiumatomen auf ein Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt (-273 °C) heruntergekühlt und von einem Magnetfeld zusammengetrieben wird, treten die Atome zu einem „Bose-Einstein-Kondensat“ zusammen. Darin bilden die Atome eine Einheit, wie ein Block marschierender Soldaten. Einen solchen Block können die Münchener Quantenoptiker in ein dreidimensionales Geflecht aus stehenden Laserwellen treiben und manipulieren, z. B. die Lichtfallen so stark machen, dass die Einheit des Blocks in ein „Mott-Kondensat“ zerbricht. Dafür gab es einen angesehenen Preis. Warum? Forschung dieser Art füllt die Quantentheorie mit Leben, und die hat im Nanokosmos das Sagen. Wer sie genau versteht, kann z. B. genauere Zeit-Standards entwickeln. Genauere Uhren könnten wieder helfen, den Datenverkehr im Internet zu beschleunigen - die scheinbar esoterische Forschung zahlt sich also aus.

Der XFEL Röntgenlaser – starkes Licht für die Nanotechnologie

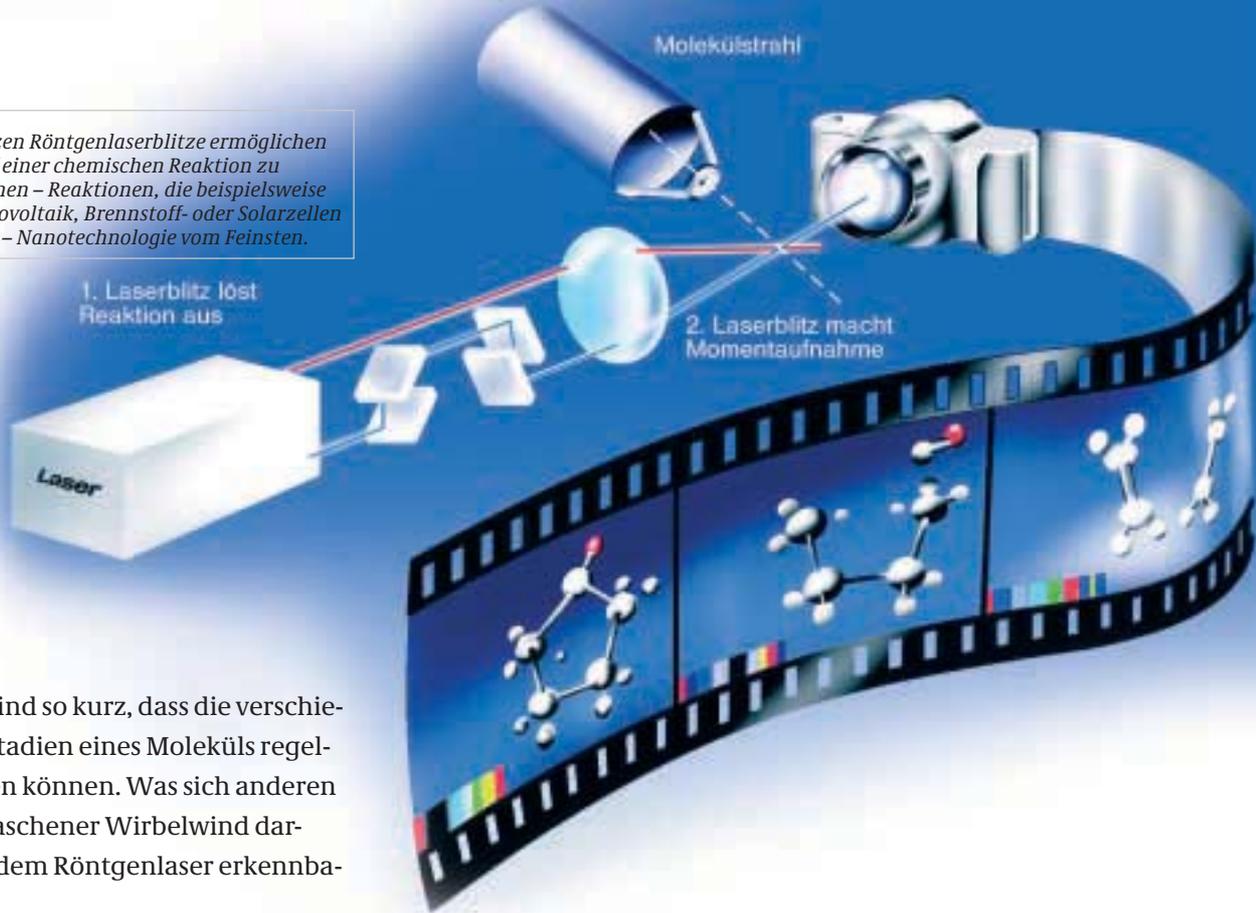
Wenn alles nach Plan verläuft, werden im Jahr 2012 ein paar Milliarden Elektronen etwas sehr Aufregendes erleben. Auf dem DESY-Gelände in Hamburg-Bahrenfeld beginnend, werden sie von einem supraleitenden Elektronenbeschleuniger auf sehr hohe Energie beschleunigt, um 3,3 Kilometer weiter von Magneten systematisch auf Schlangenlinien aus der Bahn geworfen zu werden. Dabei entsteht kurzweilige Röntgenstrahlung einer ganz besonderen Art: Laserstrahlung. Diese Strahlung wird die wertvollste sein, über die Wissenschaftler je verfügt haben. Mit einem einzigen Schuss wird sich damit die Struktur eines einzelnen (!) Biomoleküls bestimmen lassen. Für die heute verfügbaren Röntgenstrahlungsquellen werden gut gebaute Kristalle eines Biomoleküls benötigt, was häufig nicht machbar ist.



„Mott-Kondensat“ - exotische Materie für die ultragenauere Zeitmessung

Supraleitende Elemente für die Elektronenbeschleunigung

Die femtosekundenkurzen Röntgenlaserblitze ermöglichen es, den genauen Verlauf einer chemischen Reaktion zu verfolgen und zu verstehen – Reaktionen, die beispielsweise in Optoelektronik, Photovoltaik, Brennstoff- oder Solarzellen ihre Anwendung finden – Nanotechnologie vom Feinsten.



Die Röntgenblitze sind so kurz, dass die verschiedenen Bewegungsstadien eines Moleküls regelrecht gefilmt werden können. Was sich anderen Methoden als verwaschener Wirbelwind darstellt, nimmt unter dem Röntgenlaser erkennbare Gestalt an.

Die Geheimnisse der Reibung können entschlüsselt werden. Was wie miteinander reibt, wird von nanoskaligen Inseln weniger hundert Atome bestimmt.

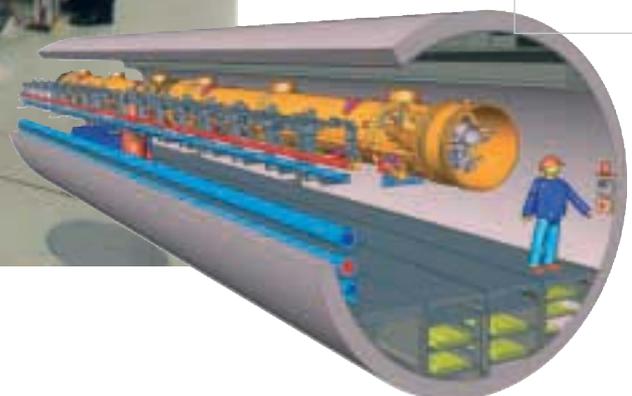
Die Eigenheiten von einzelnen Clustern, Häufchen von wenigen hundert Atomen, sind mit dem XFEL ebenfalls besser erforschbar als mit

jedem anderen Instrument. Kurz: Wissenschaft und Technik werden mit Europas stärkstem Stück in Sachen Nanotechnologie einen mächtigen Schub erhalten. Die dafür eingeplanten 684 Millionen Euro Gesamtkosten (Stand 2003) werden sich aller Voraussicht nach mehr als bezahlt machen. Keineswegs nur mit reiner Erkenntnis, sondern mitbarer Münze.



Der Freie-Elektronen-Laser im Aufbau

So wird die Elektronenbeschleunigungsstrecke unter der Erde aussehen.

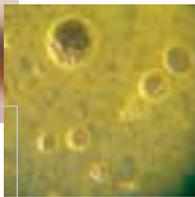


Sol/Gel- Schlüsselverfahren für neue Werkstoffe

Die Sauce Bearnaise wurde zu Ehren Henry IV, König von Frankreich, so genannt, weil der aus Bearn kam. Das Rezept ist unter anderem bei www.weltderphysik.de/themen/stoffe/magazin/materie/ zu finden, weil die Sauce ein schönes (und sehr wohlschmeckendes) Beispiel für ein kolloidales System ist. Man spricht



*Sol/Gel für einen König:
Sauce Bearnaise zu Ehren
Heinrich IV von Frankreich*



von einem Kolloid, wenn viele Tröpfchen einer Substanz stabil in einer zweiten schweben. Bei der Sauce Bearnaise schwimmen Essigtröpfchen in Butterfett. Cremes und Anstrichfarben sind ebenfalls Kolloide. Mit der Sol/Gel-Technik führen Kolloide geradewegs in die Hochtechnologie.

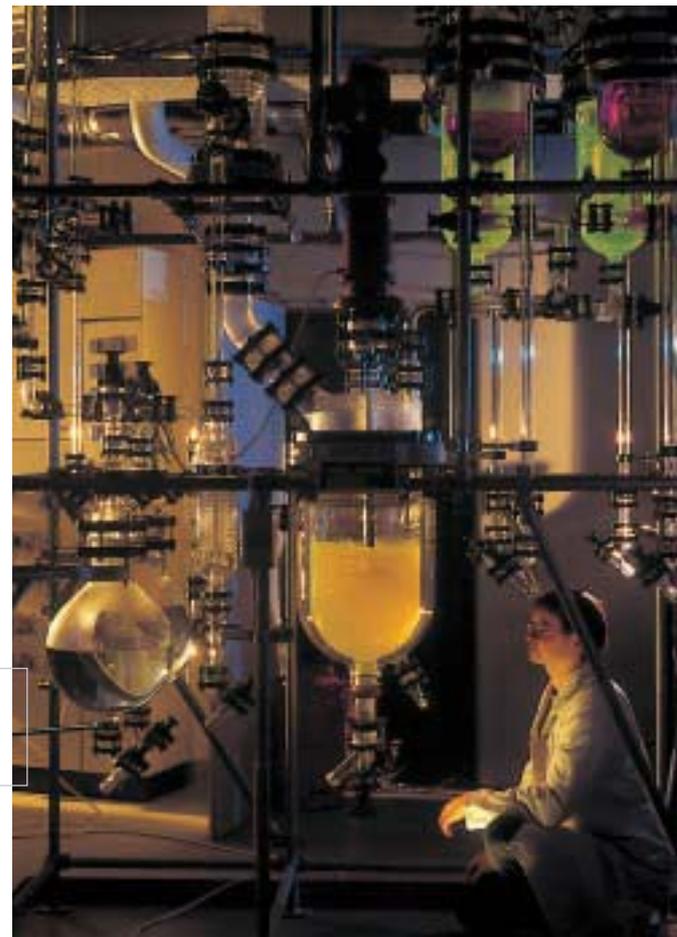
Bei der Sol/Gel-Technik wird aus löslichen Verbindungen etwa des Siliziums ein (meist kolloides) Sol hergestellt, bei dem siliziumhaltige Tröpfchen in einer Trägerflüssigkeit schwimmen. Wenn die etwa auf ein Blech aufgesprüht und erwärmt wird, schwindet die Trägerflüssigkeit und die Siliziumtröpfchen bilden ein Netzwerk, sie gelieren. Schließlich wird das gelierte Netzwerk zu einer harten keramischen Schicht. Das Blech ist vor Korrosion und Kratzern geschützt.

*Fit für feinste
Teilchen: Sol/Gel-
Teilchenreaktor*

Sol/Gel-Technik gibt es in hunderterlei Variationen für zahlreiche Substanzen. Gelierte Sole lassen sich auch zu Fäden formen, die – gebrannt – zu Keramikfasern mutieren. Aus Solen können nanoskalige Pulver fabriziert werden, die wesentlich leichter und bei niedrigeren Temperaturen als herkömmliche Pulver zu Keramikkörpern zusammenbacken, die höchsten Drücken und Temperaturen standhalten.

Sol/Gel-Technik taugt selbst für die Herstellung raffinierter optischer Komponenten wie Lichtleitfasern, Frequenzverdoppler, Mikrolinsfelder und so fort. Diese Art von Nanotechnologie verspricht nicht weniger als eine Revolution der Werkstofftechnik.

Das Lösungsmittel eines Gels lässt sich unter Umständen auch so entfernen, dass der Gelkörper sein äußeres Volumen behält, dann erhält man ein hochporöses Material sehr geringer Dichte, ein Aerogel.





Mit Aerogel aufgefüllte Doppelverglasung stoppt Wärmeverluste.



Aerogel als wissenschaftlicher Staubfänger. Auftreffende Partikel werden sicher in geschmolzener Aerogelmasse eingeschlossen.

Der Komet „Wild 2“ wurde von einem Aerogel besucht.



Aerogele

Aerogele sind Alltag, es gibt sie seit jeher beim Bäcker unter dem Namen „Baiser“. Das ist gezuckertes, aufgeschäumtes Eiklar, gebacken. Der Name „Baiser“ bedeutet „Küsschen“, und wer das in die Hand nimmt, spürt, wie die Finger warm werden. Das liegt daran, dass die Luft im Baiser in Millionen mikroskopisch feine Bläschen eingeschlossen ist. Dadurch kann sie nicht zirkulieren, keine Wärme tauschen, das Baiser ist ein Wärmeisolator, wie Styropor. Ähnlich aufgebaute Aerogele aus geschäumtem Glas sind denn auch ein erstklassiger Wärmeisolator.

Eiklar ist farblos, das Baiser aber weiß. Das liegt an der Kammerung des Eiweißschaums in mikrometerfeine Bläschen. An *mikrometer*-feinen Strukturen aber streut sich das Licht mit allen Farben, die Summe ist weiß. *Nanometer*-feine Poren streuen das Licht nicht mehr. Durch einen nanoporigen Schaum aus glasartigem Material kann man fast genauso klar sehen wie durch gewöhnliches Fensterglas. Mit solchem Schaum gefüllte Doppelscheiben geben gutes Fensterglas mit hervorragenden Wärmedämmwerten ab.

Weil solche Schäume fast nur aus Luft bestehen, nennt man sie Aerogele. Die Bezeichnung „Gel“ verdanken sie dem Produktionsprozess: Der wässrigen Lösung eines geeigneten Materials wird ein Katalysator zugegeben, der winzige,

dünnwandige Hohlkugeln entstehen lässt, die sich zu Ketten und schließlich Kettenhaufen zusammenfinden, einem Gel. Das wird durch Trocknung zu einem federleichten Aerogel.

Das am weitesten gereiste Aerogel befindet sich im Staubanalysator CIDA der Hoerner & Sulger GmbH, der im Januar 2004 nach fünf Jahren Reisezeit und einer Strecke von 3,22 Milliarden Kilometer Staub des Kometen „Wild 2“ eingefangen hat.

Ein Material, das von vielen Bläschen durchsetzt ist, hat eine große innere Oberfläche. Die größtmögliche Oberfläche, unendlich, hat der Menger-Schwamm, dabei ist sein Volumen Null. Der Schwamm existiert nur in den Köpfen von Mathematikern. Die reale innere Oberfläche von Aerogelen aber ist ebenfalls groß genug, erstaunliche Effekte zuzulassen. So finden in einem zuckerwürfelgroßen Aerogel aus Kohlenstoff 2.000 Quadratmeter innerer Oberfläche Platz. Diese und andere Eigenschaften sichern Aerogelen aus Kohlenstoff einen sicheren Platz in der Energietechnik der Zukunft. So lassen sich aus ihnen Kondensatoren mit bis zu 2500 Farad bauen, die als Energiespeicher für Strombedarfs-spitzen etwa im Elektroauto taugen. Der geniale Schaum wird auch bessere Lithiumbatterien möglich machen, neuartige Brennstoffzellen etc. Selten hat so gut wie nichts ein solches Potential gezeigt. Typisch Nano.

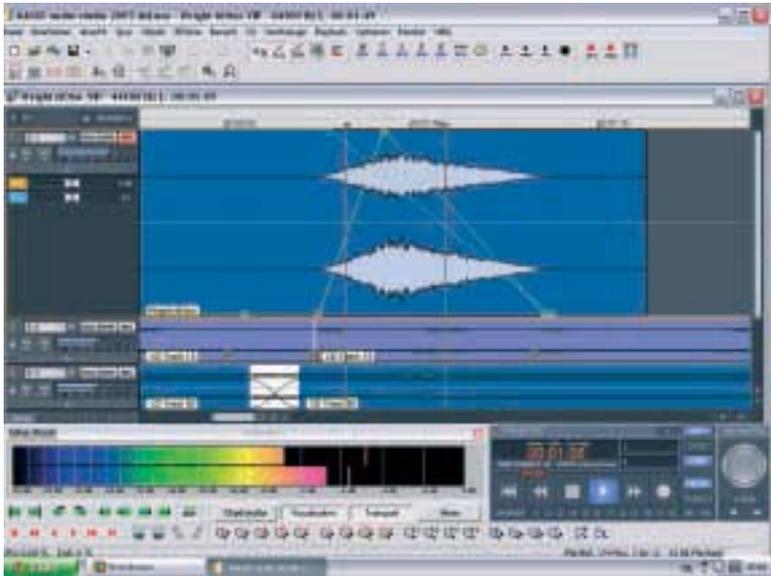
Der Menger-Schwamm gilt Mathematikern als „Universalkurve“. Er entsteht, wenn die unten dargestellte Prozedur unendlich oft fortgeführt wird.



Nanotechnologie für die Gesellschaft

Vernetzte Welt: Nanoelektronik

Vom Notebook im Studio zu Studios im Notebook – Stand der Technik

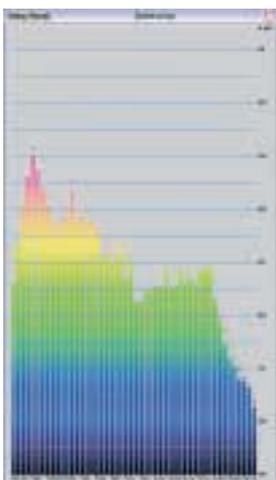


Soundprogramm auf verschiedene Spuren übereinander gelegt. Das Flugzeug fliegt von links nach rechts, einstellbar mit Panorama-Kurven. Das Motorgeräusch schwillt an und ab, einstellbar mit Lautstärkekurven. Und dann fliegt Orville Wright sehr überzeugend mit dem *Flyer One* über die *Kill Devil Hills*, wie am 17. Dezember 1903, mit Brandung und Dünengraspfeifen – im Notebook. (Andere Flugpioniere wie der Deutsche Gustav Weißkopf waren schon 1901 durch die Luft geknattert, hatten ihre Entwicklungen aber nicht praktikabel machen können.)

Der Auftrag: Viereinhalb Minuten Radio über den ersten Motorflug der Gebrüder Wright, mit ein bisschen Atmo. Was macht ein Rundfunk-Autor, der mit Liebe bei der Sache ist? Er sieht sich zunächst den Tatort an. Der virtuelle Globus zeigt Kitty Hawk an einem wenige Kilometer breiten Landstreifen am Nordatlantik liegend, die *Kill Devil Hills* am Rand, also werden die Wrights Brandungsgrummeln gehört haben. Das ist im

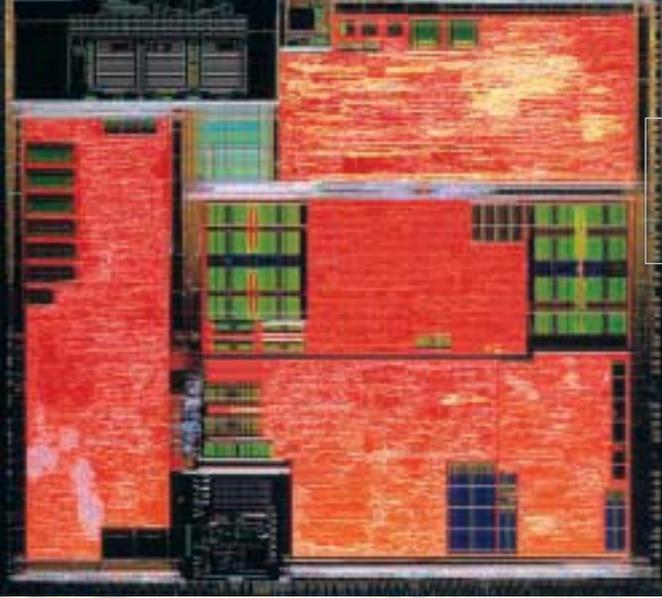


Schallarchiv, ebenso die steife Brise beim Erstflug, von der die *Encyclopaedia Britannica* schreibt, mit Dünengrasrascheln. Der Motor drehte mit 1.200 Umdrehungen pro Minute, im Schallarchiv ist ein Chrysler-Oldtimer, der schön tief brummt. Das Spektroskop im Soundprogramm zeigt plausible Frequenzen an, akzeptiert. Zwölf Sekunden hat der Erstflug gedauert, ausgewählt wird eine Passage, bei der sich der Ton am Ende absenkt, des Dopplereffektes beim Vorbeiflug wegen. Alles wird im



Vor zwanzig Jahren noch wäre diese Aktion für eine Einzelperson unbezahlbar gewesen und hätte tonnenschweres Equipment in Anspruch genommen, heute genügen ein Notebook, ein Mini-Schreibtisch und ein paar Stunden Zeit. Die Enzyklopädie hat auf einer DVD Platz gefunden, die 30 schwere Bände ersetzt und für die schnelle Suche ungleich komfortabler als ihr papierenes Gegenstück ist. Das Soundprogramm ist gänzlich immateriell auf der Festplatte verankert und bietet in vielen virtuellen Racks Effekte ohne Ende. Die Entwicklung des modernen Computers hat eine Entmaterialisierungswelle in Gang gesetzt, die auch eine Verringerung der Energieströme zur Folge haben wird. Der Preisverfall bei Hard- und Software hat zugleich auch unbeachteten Kreativen traumhafte Produktionsmittel in die Hand gelegt.

Künftig wird die Bibliothek am Handgelenk nichts Ungewöhnliches sein, ebenso wenig die interaktive mobile Kommunikation.



Fernsehstudio auf dem Fingernagel: Multimedia-Chip mit Controller für die hochauflösende Display-Steuerung, mit dem Energiebedarf einer Taschenlampe

Go Nano! Die kommenden Jahre

Die heute in Computerprozessoren arbeitende Transistortechnik heißt CMOS (nach Complementary Metal Oxide Semiconductor), sie wurde unter anderem für die ersten elektronischen Armbanduhren entwickelt, da sie sehr viel weniger Strom verbraucht als ihre Vorgänger. Seit den 1970er Jahren sagen Fachleute voraus, dass die Technik in jeweils zehn bis fünfzehn Jahren an ihre Grenzen stößt. So auch heute. Diesmal freilich hat die Elektronik-Industrie einen zwingenden Grund, einen Bruch der Tradition von der fortwährenden Verkleinerung ihrer Strukturen anzunehmen: Auf dem Weg in den Mikrokosmos wird allmählich die Körnigkeit der Materie sichtbar, ihr atomarer Aufbau. Die elektronischen Hüllen der Atome aber sind die kleinsten Bausteine, die sich unter Normalbedingungen zu dauerhaften technischen Strukturen fügen lassen. Ein prinzipieller Limes also ist in Sicht. Eine Leiterbahn kann nicht dünner als ein Atom sein.

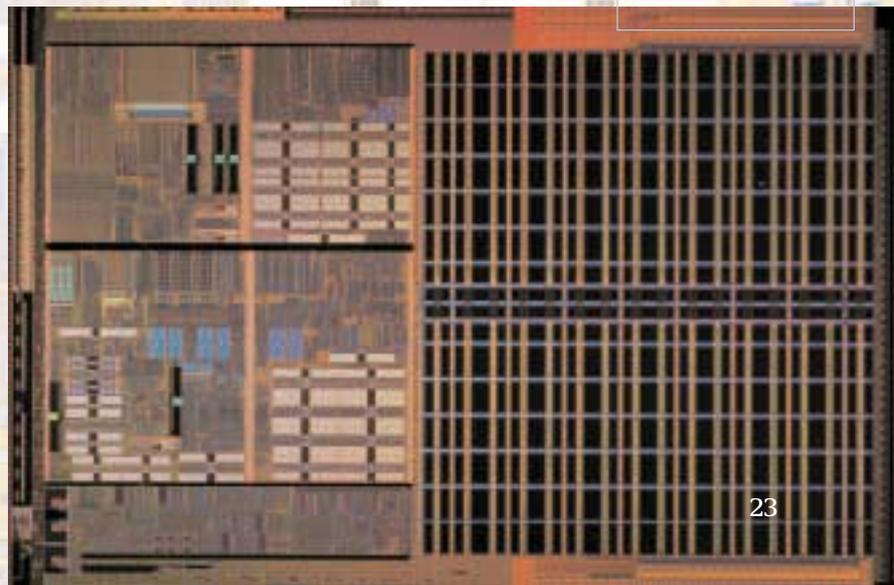
Der CMOS-Technologie sind freilich schon lange vorher Grenzen gesetzt, die z.T. durchaus kurios wirken. So sind die Leiterbahnen, die die Transistoren eines Chips miteinander verbinden, jetzt schon so klein, dass Aluminium-Atome instabil wären. Sie würden wie Kiesel in einem Bach vom Elektronenfluss regelrecht weggespült, der Fachausdruck heißt „Elektromigration“. Die erfolgreiche Abhilfe: Leiterbahnen aus Kupfer, das auch noch besser leitet, was den Signalfluss

auf einem Chip beschleunigt. Die Leiterbahnen sind mittlerweile auch so dicht aneinander gerückt, dass dadurch eine fühlbare Kapazität entsteht, wie bei einem Kondensator. Würde dieser Effekt beim Chip-Design nicht berücksichtigt, könnte der Chip aus dem Takt geraten.

Bestimmte Strukturen der Chip-Transistoren werden allmählich kleiner als zwanzig Nanometer. Damit ist das Reich der Quantentheorie erreicht, es beginnt der Tunneleffekt zu wirken: Es fließen Ströme, wo bei größeren Transistoren keine fließen sollten – das elektronische Schließensystem bekommt Lecks. Zwar sind die Ströme winzig, bei Millionen von Transistoren addieren sie sich aber zu beträchtlichen Verlusten, der Prozessor wird heiß. Außerdem bewirken vagabundierende Ladungen Logikfehler, die fatal sein können.

Bei sehr feinen Strukturen schließlich beginnt – wie von der Quantentheorie beschrieben – die Wellennatur des Elektrons sichtbar zu werden. Diesen Umstand allerdings sehen viele Wissenschaftler auch als Chance, zu einer ganz neuen Art von Elektronik zu kommen, die womöglich einen Quantencomputer hervorbringt, der ganz neue mathematische Universen erschlosse.

64bit-Prozessor von AMD für PC-Anwendungen mit 106 Mio. Transistoren in 130nm-Technologie

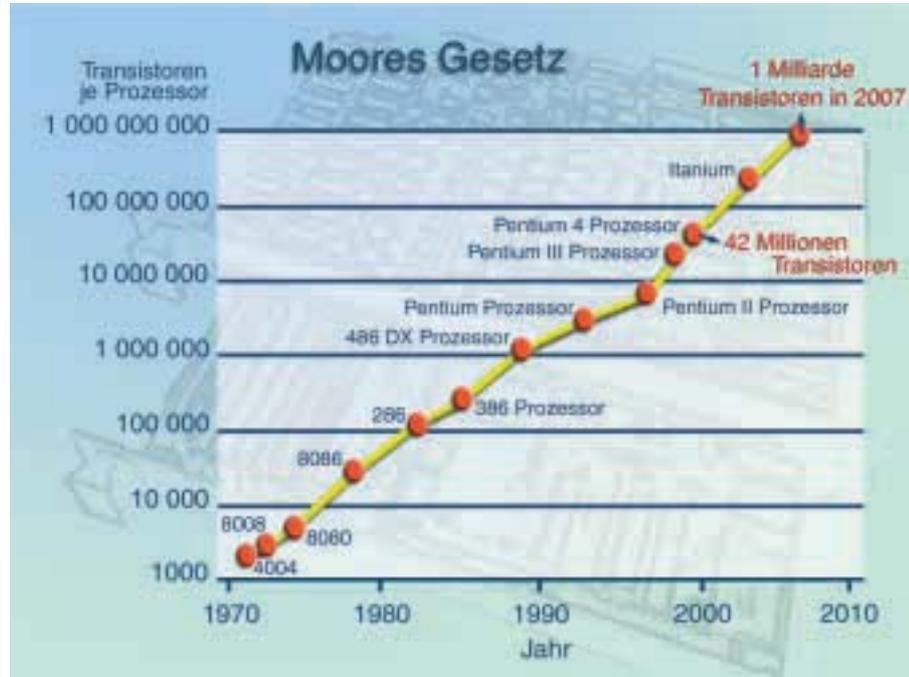


Moore's Gesetz am Limit

Schon 1965 fand Gordon Moore, Mitbegründer der Firma Intel, dass sich die Kapazität von Mikrochips etwa alle 18 Monate verdoppelt. Dieses „Gesetz“ wird jetzt auch durch ein sehr menschliches Problem in Frage gestellt. Während die rund 50 Prozent jährliches Wachstum bei der Transistorzahl auf einem Chip tatsächlich erreicht wird, hat die Chipdesign-Produktivität, klagen Analytiker, nur um 20 Prozent pro Jahr zugelegt. Die Industrie habe

dem mit einer ständigen Vergrößerung der Design-Teams entgegen-gesteuert - jetzt hätten diese mit 250 bis 300 Menschen eine Häupterzahl erreicht, die nicht mehr zu managen ist.

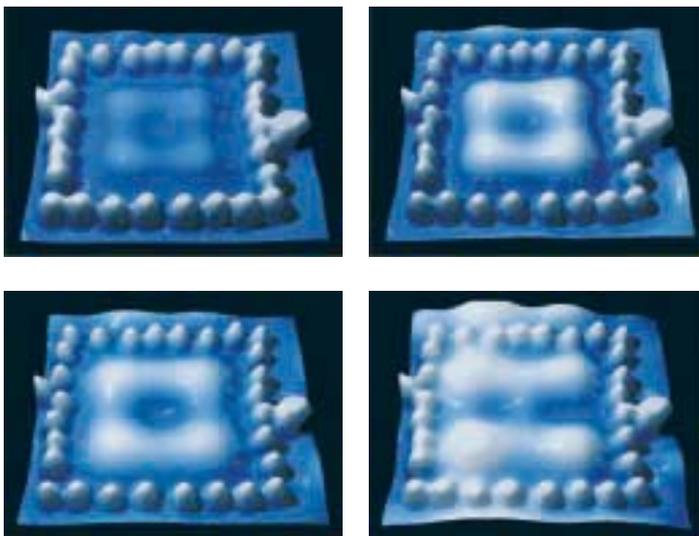
Einem ewigen Wachstum steht auch das 2. Gesetz von Moore entgegen, wonach mit der Strukturverkleinerung eine Verteuerung der Fertigungsstätte einhergeht. Bis alle diese Einschränkungen die Entwicklung dauerhaft beeinträchtigen, wird die Nanotechnologie einen immer größeren Raum in der Nanoelek-



tronik einnehmen. Bereits heute haben aktuelle CPUs kleinste Strukturen unter 100nm und mehr als 100 Millionen Transistoren. Glaubt man der Roadmap der Halbleiterindustrie, deren Vorhersagen meistens von der realen technischen Entwicklung geschlagen wurden, dann erwarten uns in wenigen Jahren 45nm-Strukturen (2010), die uns mehr als eine Milliarde Transistoren pro Chip bescheren werden. Damit ergeben sich Nutzungsmöglichkeiten von denen wir heute nur träumen können.



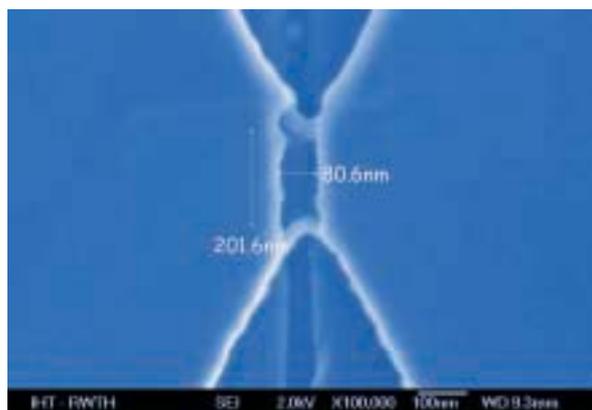
Eine kleine Siliziuminsel auf einem Siliziumkristall löst sich bei 450 Grad langsam auf. Die Kenntnis solcher Vorgänge ist für die Qualität dünner Schichten wichtig.



Manganatome auf Silber, an der Christian-Albrechts-Universität Kiel. Die vom Manganatomzaun eingeschlossenen Elektronen bilden Verteilungsmuster, die von der angelegten elektrischen Spannung abhängen. Effekte wie diese werden für die Elektronik von morgen wichtig sein.

Phasenwechselspeicher (Phase Change RAM)

Heutige Datenspeicher beruhen auf diversen Technologien mit jeweiligen Vor- und Nachteilen. Die magneto-mechanische Festplatte hat eine sehr hohe Speicherdichte, speichert Daten auch ohne ständige Stromversorgung, ist aber sehr langsam. Der DRAM ist schnell, vergisst aber ohne ständiges „Refresh“ in Form von Strompulsen seine Daten. Flash-Speicher, die z. B. in MP3-Playern, Mobiltelefonen und Kameras zu finden sind, behalten ihre Daten auch ohne Stromversorgung, sind aber nicht so schnell wie DRAMs und können nur ca. 1 Million mal beschrieben werden. Zukünftige nanotechnologische Speicherkonzepte, welche im Wesentlichen nur die obengenannten Vorteile: hohe Speicherdichte, Schnelligkeit, Datenerhalt ohne Stromversorgung und lange Lebensdauer versprechen, sind aus heutiger Sicht der MRAM (Magnetic Random Access Memory) und der im Folgenden beschriebene Phase Change RAM. Feste Substanzen können in zwei Extremzuständen auftreten: Einmal kristallin, dann sind die Atome streng geordnet wie die Fichten in einem Nutzwald, oder amorph, die Atome sind regellos arrangiert. Verbreitete amorphe Festkörper sind Gläser, wie etwa Quarzglas; die gleiche Substanz, Siliziumdioxid, gibt es im Mineralienhandel auch kristallin, als Bergkristall. Kristallin – amorph, von diesen beiden Materiezuständen wird künftig wohl häufiger zu hören sein, denn sie werden wahrscheinlich die Massenspeicher der Zukunft bestimmen. Manche Festkörper lassen sich mehr oder minder willig vom amorphen in den kristallinen Zustand überführen und

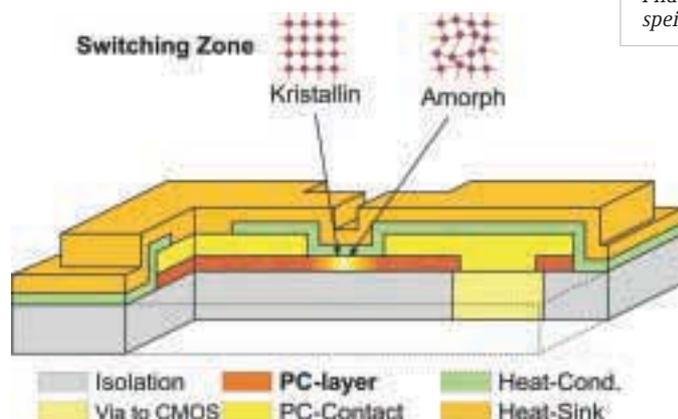


umgekehrt; dieser meist durch Wärmewirkung erreichte Phasenwechsel hat in optischen Speichermedien eine breite Anwendung gefunden. Wenn etwa eine wiederbeschreibbare DVD beschrieben wird, wechselt eine spezielle Beschichtung auf der DVD durch den Wärmeschock eines Laserimpulses ihre Phase lokal von „kristallin“ auf „amorph“ und verändert damit ihre Reflektionseigenschaften, so dass sich ein lesbares Bitmuster schreiben lässt. Längere und stärkere Lasereinwirkung macht die amorphen Stellen wieder kristallin, damit kann die DVD neu beschrieben werden.

Phasenwechselmaterialien steht jetzt mit großer Wahrscheinlichkeit eine weitere Karriere bevor, in *elektronischen* Speichern, Phasenwechselspeichern, Phase Change RAM. Der Phasenwechsel wird darin nicht optisch, sondern elektronisch vorgenommen. Kurze Stromstöße machen das Material amorph mit einem hohen elektrischen Widerstand, längere Impulse machen es wieder kristallin mit einem geringen Widerstand. Zum Lesen der Information wird der Widerstand der Speicherelemente abgefragt. Mit Phase Change RAM sollten sich Speicherdichten erreichen lassen, die auf einer Briefmarke ein Terabit abzulegen gestatten – zehn Stunden unkomprimiertes Video, also feinste Qualität. Notebooks mit dieser Technik würden einfach da wieder anfangen, wo ihr Besitzer aufgehört hat – Booten wäre nicht mehr nötig.

Rechts: Mit Stromstößen und damit verbundenen Wärmeimpulsen verschiedener Länge lassen sich Phasenwechselschichten (PC-Layer) für die Bit-Speicherung zwischen amorph und kristallin hin- und herschalten. Das patentierte Design des IHT der RWTH-Aachen ermöglicht schnelle Speicher mit geringem Energiebedarf.

Links: Konkrete Ausführung eines Phasenwechselspeichers



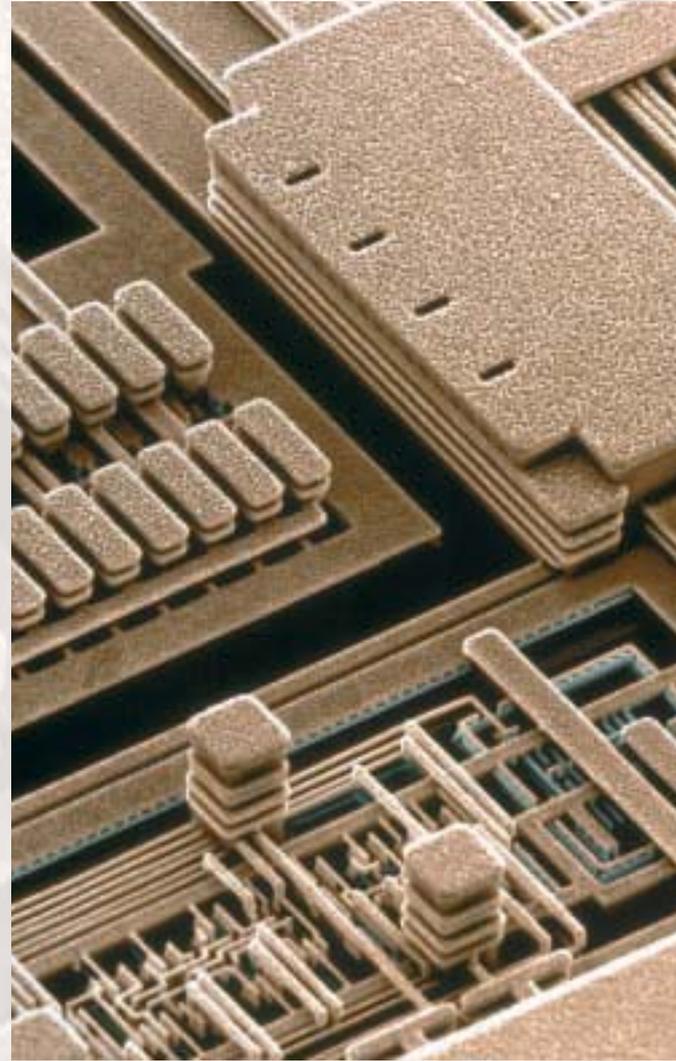
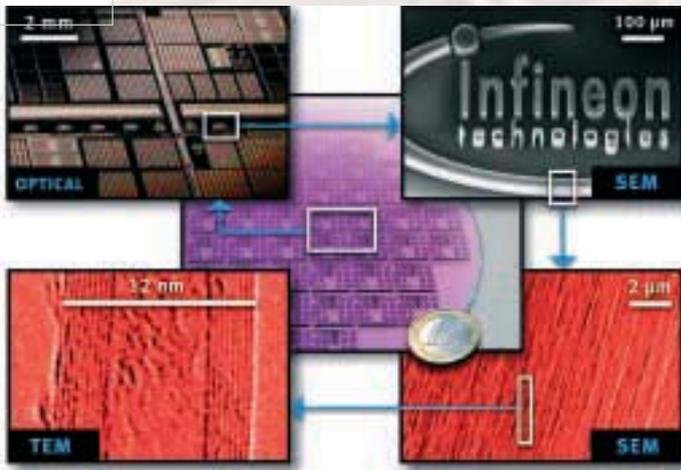
Vernetzte Welt: Nanoelektronik

Weiter mit 3D - Chips wachsen in die Höhe

Wolkenkratzer waren auf dem knappen Grund Manhattans die ökonomische Lösung der Wahl, als es darum ging, neuen Büro- und Wohnraum zu schaffen. Natürlich hatten auch die Chipdesigner schon früh an die dritte Dimension gedacht, die Versuche scheiterten aber an einer ganzen Reihe von Widrigkeiten.

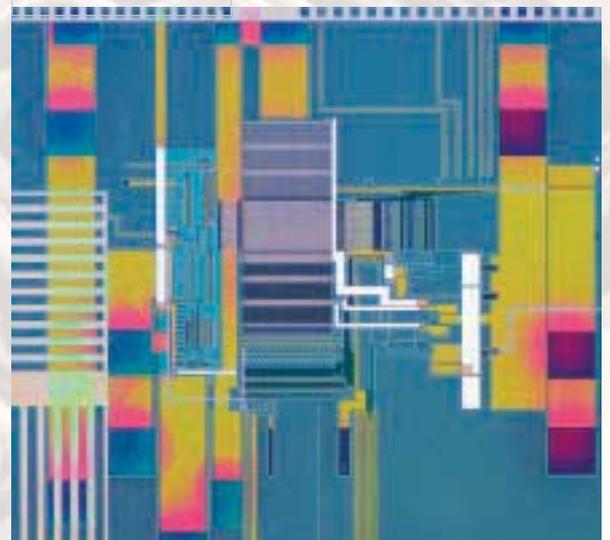
Ein Weg zur Dritten Dimension könnte die Infineon AG, München, gefunden haben. Dort gelingt es mittlerweile reproduzierbar, Carbon Nanotubes, CNTs, planvoll auf Wafer – polierte Siliziumscheiben, auf denen die Computerchips entstehen – aufwachsen zu lassen. Die Fullerenröhrchen sind erstklassige Stromleiter, produzieren also wenig Abfallwärme und können als auch mechanisch belastbare Verbindungen, VIAs, zwischen den verschiedenen Verdrahtungsebenen eines Chips eingesetzt werden. Auf lange Sicht halten Infineon-Forscher es für möglich, mit CNTs zu einer echten 3D-Technologie für Chips zu kommen, zumal CNTs als hervorragende Wärmeleiter Wärme aus dem Inneren des 3D-Chips abführen könnten.

Gezieltes Wachstum von Carbon-Nanotubes an vordefinierten Stellen einer Siliziumscheibe durch ein mikroelektronikkompatibles Verfahren



10 μm

Modernste Kunst: Experimentelle Strukturen für Spintronik-Speicher

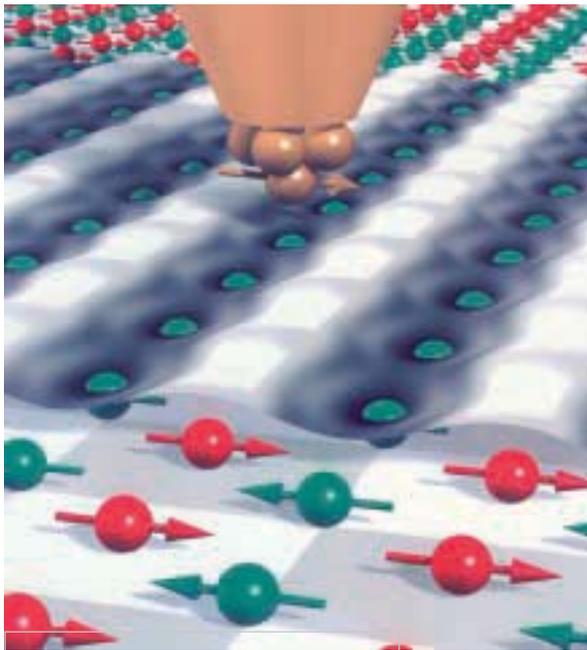




Komplex wie eine Stadt – freigeätzte Kupferverdrahtung eines Chips (IBM), abgebildet mit dem Rasterelektronenmikroskop. Moderne Chips haben bis zu 9 Verdrahtungsebenen.

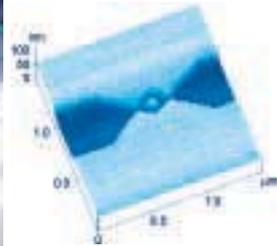


Einzelne organische Moleküle sitzen auf Silizium herum. Rastertunnelmikroskop-Aufnahme, Ruhruniversität Bochum



Die magnetische Sonde eines Spin-polarisierten Rastertunnelmikroskops ertastet die magnetischen Eigenschaften einzelner Atome.

Fingerübungen für den Quantencomputer: „Aharonov-Bohm-Interferometer“, an der Ruhr-Universität Bochum mit einem Rasterelektronenmikroskop strukturiert

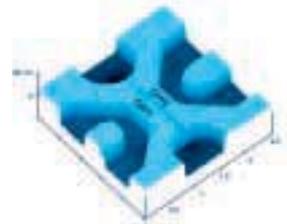


Tunnelgekoppelte Quantendrähte – Elektronen durchqueren Passagen, die in der klassischen Theorie gesperrt wären. Nanotechnologische Experimente beginnen die Theorie einzuholen.

basierend – sehr kleine magnetische Domänen entdecken und so sehr hohe Speicherdichten zulassen.

In MRAMs, magnetischen Speicherchips, ist die Information im Spin der magnetischen Schichten gespeichert. Die Entwicklung ist für nicht-flüchtige Hauptspeicher interessant und könnte auf lange Sicht zur Ablösung mechanisch bewegter Festplatten führen.

Die Spintronik ist schließlich ebenfalls als Technologie für einen Quantencomputer im Gespräch, u. a. an der Uni Würzburg.



Neue Effekte für starke Festplatten: Der Lesekopf nutzt den Riesenmagnetwiderstand, mit einem Halbleiterelement aus über zwanzig nanoskaligen Schichten.

Spintronik – Rechnen mit kreisenden Elektronen

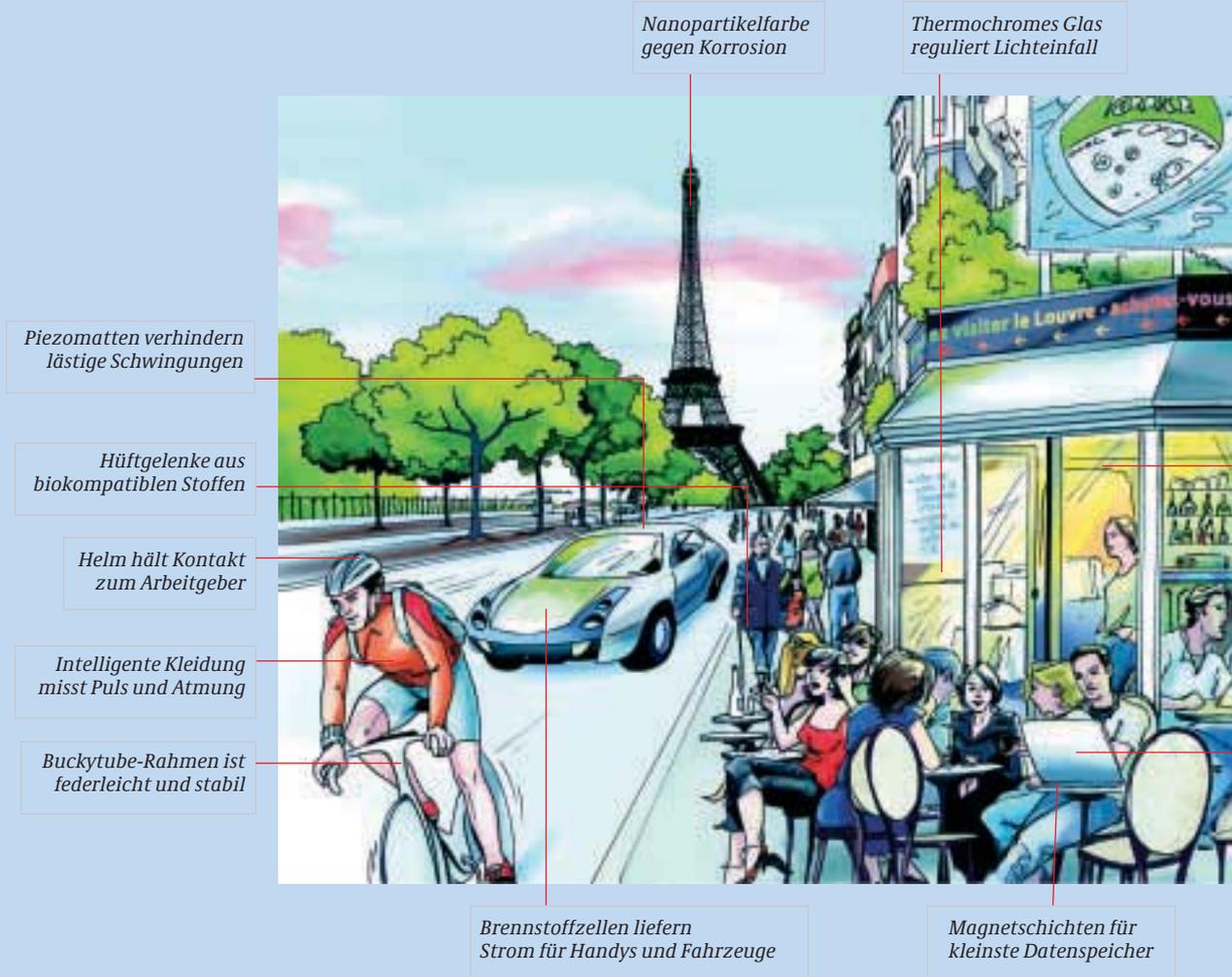
Eine wirkliche Revolution, die Moores Gesetz wohl weit in die Zukunft trägt, könnten Spintronik-Bauelemente auslösen, die zusätzlich zu den elektrischen Eigenschaften des Elektrons dessen magnetische Eigenschaften nutzen, ihren Spin. Der Elektronenspin äußert sich als winziges magnetisches Moment, das mit anderen magnetischen Gegebenheiten komplex reagiert und so für elektronische Funktionen genutzt werden kann. Eine Anwendung dieser Spintronik oder Magneto-elektronik ist bereits im Alltag: Neue Festplatten verfügen über „Spin Valve“-Dünnschichtlesköpfe, die – auf dem Riesenmagnetowiderstand



Nanotechnologie

für die Gesellschaft

Nanotechnologie im künftigen Alltag

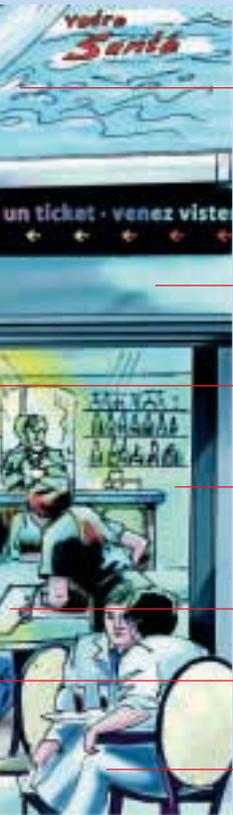


Wenn Nanotechnologie in den Alltag einzieht, muss sich äußerlich nichts Dramatisches ändern. Die Menschen werden immer noch gern in einem Straßencafé sitzen, dann sogar noch lieber als jetzt. Denn das Dröhnen der Explosionsmotoren hat ein dezentes Summen und Zischen abgelöst, wie es zu hören ist, wenn sich im Raumschiff *Enterprise* ein Schott schließt. Der Gestank verbrannten Kraftstoffs ist einer gelegentlichen, kaum wahrnehmbaren Methanolfahne gewichen, das die Brennstoffzellen speist. Der Service wird sehr flott sein: Das Antippen des Gewünschten auf der elektronischen Speisekarte mobilisiert schon mal die Küche. Gezahlt wird, indem man auf der Speisekarte die Ecke mit dem aufgedruckten Eurozeichen mit der Geldkarte berührt. Trinkgeld gibt es immer noch in barer Münze, weil es so schön klimpert, allerdings ist es hygienisch mit antibakteriellen Nanoteilchen beschichtet. Die Fenster des Cafés sind ganz

schön teuer geworden, weil sie so viel Funktionen haben – was sie im Ergebnis wieder billig macht: Sie sind schmutzabweisend und kratzfest, sie dunkeln ab, wenn es zu hell wird, wandeln Licht in Strom und leuchten, wenn es gewünscht wird, als Riesendisplay auf: Es macht Spaß, im Café oder davor mit anderen Leuten die Weltmeisterschaft zu gucken.

Mit einer reifen Nanoelektronik sind Geräte von bestechender Eleganz denkbar, wie ein wirklicher PDA (Personal Digital Assistant) im Format einer Kreditkarte (nicht, dass es nicht kleiner ginge, aber Menschenhände brauchen etwas Handhabbares).

Das Ding könnte ein mattschwarzer Monolith ohne erkennbare Strukturen sein, die Schwärze sammelt Sonnenlicht und wandelt es in Strom; es wäre kratzfest mit einer hauchdünnen Diamantschicht überzogen, hätte darunter eine dünne



OLEDs für Displays

Photovoltaik-Folien wandeln Licht in Strom

Leuchtdioden machen Glühbirnen Konkurrenz

Kratzfest beschichtete Scheiben mit Lotus-Effekt

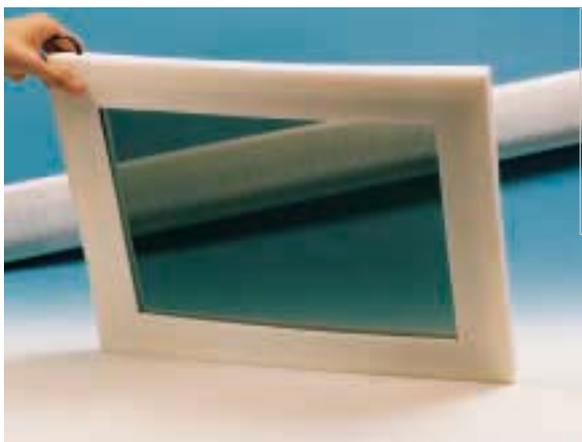
Menükarte aus elektronischem Karton

Nanoröhren für neue Notebook-Displays

Gegen Flecken beschichteter Stoff



Nanopartikel von Nanosolutions fluoreszieren im UV-Licht, sind ansonsten aber völlig unsichtbar. In Flüssigkeiten fein verteilt, lassen sie sich mit Tintenstrahl-drucktechnik auftragen, ohne Design und Funktion des markierten Gegenstandes zu verändern. Die Nanopigmente lassen sich somit sehr gut als Fälschungsschutz verwenden.

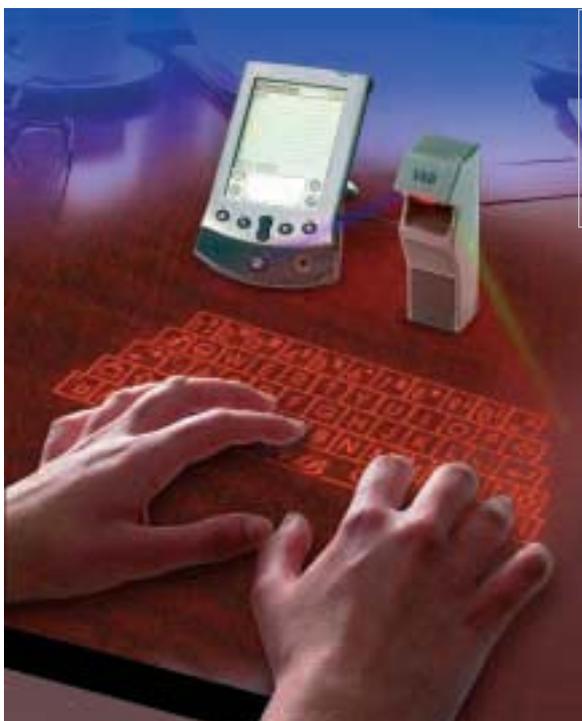


„Photochromes Glas“: Die Lichtdurchlässigkeit solcher Gläser ist spannungssteuerbar – für die Büroklimatisierung von morgen.

Piezokeramikschiicht, die Schall in Spannung wandelt und umgekehrt, so dass eine sprachliche Verständigung möglich ist. Natürlich würde es auch den Datentransfer über Licht und Funk beherrschen.

Das Ding könnte mit einem flachen Objektiv und einem höchstauflösenden Bildwandlerchip auch sehen, würde auf Wunsch als Display aufleuchten und wäre so Ton„band“, Kamera, Videorekorder, TV, Handy und, via GPS, Orientierungshilfe in einem, würde auf eine Bitte hin in einem Pariser Café die Speisekarte lesen, übersetzen, erläutern und den Menüwunsch in freundlichem Französisch weitergeben und die Rechnung bezahlen.

Natürlich würde es Stimme und Fingerabdrücke derer kennen, die es bedienen soll und sich so vor Missbrauch schützen.



Virtuelle Tastatur: Die Berührung eines projizierten Tastaturelementes wird vom System erkannt und als Tastendruck gewertet.

Nanotechnologie für die Gesellschaft

Mobilität

Wie bei anderen Maschinen, wird auch im Auto Nanotechnologie Masse durch Klasse ersetzen. Das Mehr an Technik kann mit einem Weniger an Materie auskommen, die Technik versöhnt sich mit der Natur.

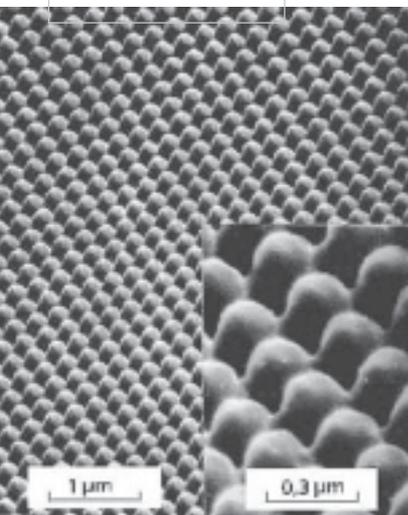
Kleine Noppen, großer Durchblick: Mit Hilfe regelmäßiger mikroskopischer Noppenstrukturen werden störende Lichtreflexionen an Displays und Scheiben im Auto vermieden. Als Vorbild dient das Auge der Motte. Die will bei Nacht möglichst viel sehen und dabei selbst nicht gesehen werden.

Nanotechnologie im Automobil

Windschutzscheiben können mit Sol/Gel-technisch hergestellten Beschichtungen, die harte, nanoskalige Partikel enthalten, kratzfest gemacht werden. Bei völliger Transparenz, denn Nanopartikel sind so klein, dass sie das Licht nicht streuen. Das Prinzip funktioniert schon für Brillengläser, wenn auch noch nicht vollkommen. Der Autolack könnte mit einer Lotusblattstruktur versehen sein, die Schmutz abperlen lässt.

Bei der Klimatisierung des Autos könnten Windschutzscheiben mit nanoskaligen Komponenten helfen, die spannungsgesteuert Licht und Wärmestrahlung mal mehr, mal weniger reflektieren. Eine solche Technik würde, auf Büroräume angewandt, sehr viel Energie einsparen helfen.

Das vom Auto benötigte Licht schließlich ist heute schon zu einem guten Teil nanotechnologisch erzeugt: Die Leuchtdioden hochwertiger Bremslichter etwa haben – wie alle LEDs – raffinierte, Nanometer messende Schichtsysteme in sich, die mit sehr hoher Effizienz Strom in Licht wandeln. Ein weiteres Plus: LEDs wandeln den Strom für den menschlichen Sehsinn praktisch sofort in Licht um, Bremslichter mit Glühbirnen brauchen etwas länger. Die Differenz kann einige Meter Bremsweg ausmachen. Mittlerweile ist die Lichtstärke der LEDs so hoch, dass Gruppierungen von ihnen schon das Tages-Abblendlicht der Frontscheinwerfer bereitstellen können.



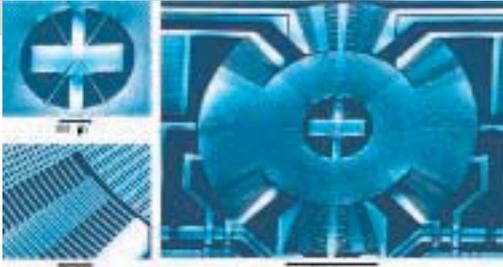
LEDs in Ampeln sparen Servicezeit und Energie. Die Amortisationszeit liegt bei nur einem Jahr.



Heutige elektronische Sicherheitssysteme wie ABS oder ESP greifen bei kritischen Fahr-situationen ein, künftige Systeme weichen Gefahren automatisch aus.



Einspritzdüse für Dieselfahrzeuge. Künftige Systeme tragen wenige zehn Nanometer dünne diamantartige Verschleißschutzschichten.



Gleichgewichtsorgane aus Silizium: Drehraten-sensor für die Fahrzeugstabilisierung.



Weißer LEDs sind so lichtstark geworden, dass sie zukünftig als Lichtquellen für Tageslicht-Front-scheinwerfer eingesetzt werden können.

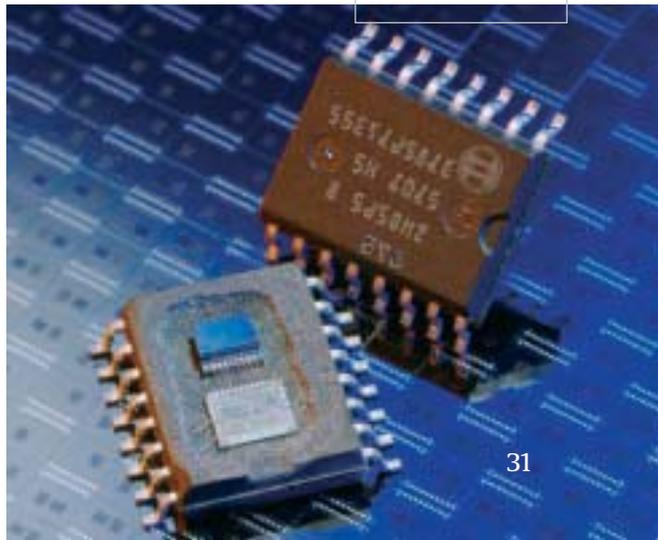
Die Lackierung könnte nanotechnologisch sogar als Solarzelle ausgelegt werden (Option, noch nicht realisiert). Deren Strom würde auf dem Parkplatz die Batterie nachladen – mit konventionellen Solarzellen ist das schon zu haben – oder den Innenraum mit einer Wärmepumpe kühl halten. Die Wärmepumpe könnte wiederum aus

einem halbleitenden nanotechnologischen Schichtsystem ohne bewegte Teile bestehen. Wenn umgekehrt die beträchtliche Abwärme eines Explosions-Motors über einen solchen Halbleiter geführt wird, entsteht wieder Strom – siehe auch „Thermoelektrik“ in „Energie und Umwelt“.



Brennstoffzellen (s. S.33) werden Automobilen zu einer schadstofffreien Fahrt verhelfen. Wenn der wasserstoffhaltige Treibstoff auch noch aus regenerativen Energiequellen kommt, ist die Antriebsart ausgesprochen umweltfreundlich.

Rechts: Elektronik für den rettenden Knall: Beschleunigungs-sensor für einen Front-Airbag



Nanoskalige Duftkapseln machen Leder stimmungsvoll.

Goldkatalysator

Nanotechnologie kann auch Gold zu einer neuen Karriere verhelfen. Während „grobes“ Gold als Katalysator weit hinter Platin zurück fällt, geben nanoskalige Goldpartikel auf einem porösen Träger einen brauchbaren Katalysator ab, der schon beim Kaltstart Stickoxide und Kohlenmonoxid in harmlose Substanzen zerlegt. Goldnanopartikel sind auch ein aussichtsreicher neuer Katalysator-kandidat für Brennstoffzellen.

Natürlich würden alle diese Fortschritte auch den Verkehrstechniken zugute kommen, die nichts mit dem Automobil zu tun haben. Das Fahrrad etwa würde sich mit Nanotechnologie ganz ausgezeichnet vertragen, vor allem mit Brennstoffzellen und Solarzellen, für das „ewige Mobil“, das nur von Licht, Luft und Wasser getragen lautlos über die Lande zieht, federleicht das alles durch Carbon-Nanofaserrahmen, LED-Lichter und mehr.

Raststätten-Urinal mit vandalismus-fester Mikrosystem-technik. Nanoskalige „Lotuseffekt“-Beschichtungen sollen die Wartung weiter vereinfachen.

Nanopartikel aus Gold für neue Katalysatoren

Gold gegen Gerüche

Katalysatoren mit Gold-Nanopartikeln werden derzeit auch als Geruchszerleger angetestet. In Kleinklimaanlagen wie solchen für das Auto können sie die Geruchsbelastigungen durch dort siedelnde Bakterien beseitigen. In Japan tun sie sogar schon in Toiletten Dienst.

Nanotechnologie in der Raststätte

Deutsche Autofahrer können in der Raststätte zumindest schon Mikrosystemtechnik begegnen. Die Urinalbecken fortschrittlicher Toiletten enthalten Sensoren, die der dahinter geschalteten Elektronik jeden Temperaturanstieg melden, woraufhin eine Spülung ausgelöst wird. Die elektrische Energie dafür wird von einer bei der Spülung betriebenen Mini-Wasserturbine geliefert. Das System kann nicht – wie die Anlagen mit Infrarotaugen – durch einen Kaugummi außer Gefecht gesetzt werden.

Nanotechnologische Urinale dagegen funktionieren zugleich einfacher und raffinierter: Durch den Lotuseffekt an der Beckenwand perlen die Flüssigkeiten ab, sickern durch eine geruchssperrende Flüssigkeitschicht hindurch und verschwinden, ohne Spuren zu hinterlassen – wie wahr das ist, muss die Praxis zeigen. Private Haushalte sind für solche Techniken natürlich auch aufnahmefähig.



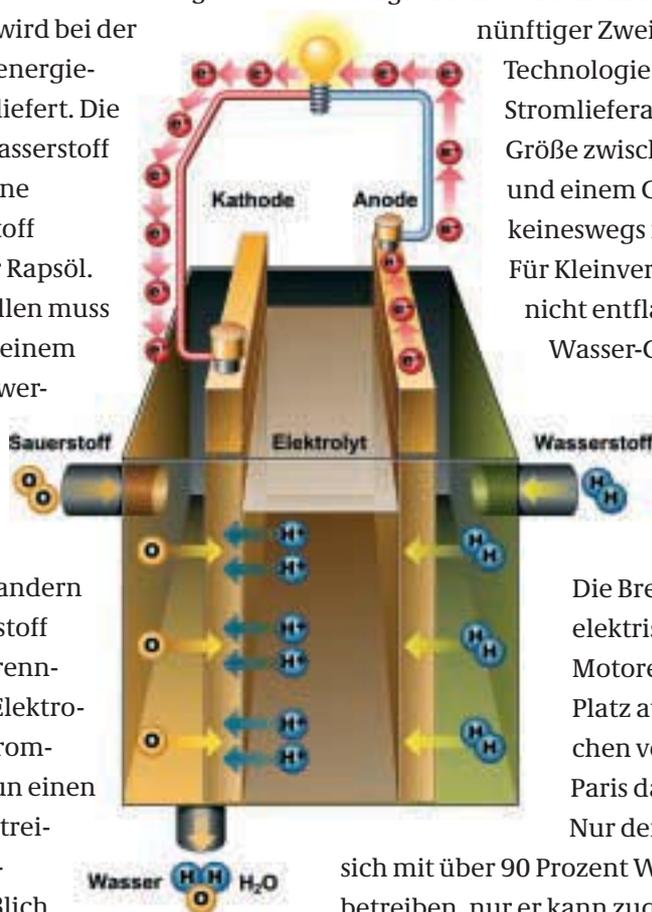
Metallische „Nanocubes“ der BASF können mit ihrer Nanoporesität große Mengen Wasserstoff speichern.

Brennstoffzelle - ein Aggregat für tausend Fälle

Brennstoffzellen ähneln Batterien: Sie liefern Strom. Während aber das chemische Inventar einer Batterie irgendwann aufgebraucht ist, wird bei der Brennstoffzelle ständig energie-reiche Substanz nachgeliefert. Die Substanz kann reiner Wasserstoff sein oder ein Gas oder eine Flüssigkeit, die Wasserstoff enthält, wie Erdgas oder Rapsöl. In den letzten beiden Fällen muss dann der Wasserstoff in einem „Reformer“ abgetrennt werden, bevor er in der Brennstoffzelle wirken kann. Wenn sich Wasserstoff und Sauerstoff verbinden, wandern Elektronen vom Wasserstoff zum Sauerstoff. In der Brennstoffzelle werden diese Elektronen in einen äußeren Stromkreis gezwungen, der nun einen Motor und Ähnliches antreiben kann. Als Reaktionsprodukt entsteht schließlich reines Wasser.

Brennstoffzellen haben einen guten Wirkungsgrad, der – abhängig vom Typ – auch weitgehend unabhängig von der Größe ist. Sie werden in vielen verschiedenen Varianten gefertigt. Die Nanotechnologie kann zu dieser Technik keramische Folien, nanostrukturierte Oberflächen und katalytisch wirksame Nano-Partikel beisteuern.

In den letzten Jahren sind weltweit 6-8 Milliarden Dollar für die Brennstoffzellentechnologie aufgebracht worden und es besteht kein vernünftiger Zweifel, dass aus dieser Technologie etwas wird. Die stillen Stromlieferanten werden in der Größe zwischen einer Briefmarke und einem Container liegen und keineswegs nur für Autos da sein. Für Kleinverbraucher könnte ein nicht entflammendes Methanol/Wasser-Gemisch die Wasserstoffquelle werden, „getankt“ würde dann im Supermarkt.



Die Brennstoffzelle wird dem elektrischen als bestem aller Motoren wieder zu einem Platz auf dem Siegertreppchen verhelfen (1881 fuhr in Paris das erste Elektroauto). Nur der Elektromotor lässt

sich mit über 90 Prozent Wirkungsgrad betreiben, nur er kann zugleich als Generator wirken und Bewegungsenergie, etwa beim Bremsen eines Autos, in elektrische Energie zurückverwandeln. Die extrem guten Magnetwerkstoffe neuer Elektromotoren und Generatoren sind natürlich auch nanokristallin.

Brennstoffzellen werden auch in den Haushalt einziehen und Strom und Wärme zugleich liefern.



Ein Frühstück mit Folgen, im Jahr 2020:

Gibt es noch Kaffee? Wohl doch, und Orangensaft ? Natürlich, aber an der Verpackung könnte etwas Besonderes sein, wie eine „Elektronische Zunge“ im Inneren, die den Saft auf eventuelles Verdorbensein vorkostet.

Oder einen Sensor außen, der aus dem Schweiß der greifenden Finger Calciummangel und andere Defizite herausanalysiert, die durch „Functional Food“ behoben werden könnten. Oder konventionellen Ziegenkäse, das OLED-Etikett auf der Packung wird das Richtige empfehlen.

Der Badezimmerspiegel ist mit Nanoelektronik gespickt, spiegelt nicht nur sondern informiert auf Anfrage und steht dem Orangensaft etwas reserviert gegenüber. Denn Orangensaft ist zuckrig, Zucker hilft, Karies erzeugen. Wieder ist Nanotechnologie gefragt: In der Zahnpasta (gibt es schon) stecken nanodimensionierte

*Bild oben links:
Folien mit Nanopartikeln halten Lebensmittel länger frisch.*

*Bild oben rechts:
Intelligente Verpackung mit Transponder-Chip auf Polymerbasis*

Intelligente Umgebung – der mit Nanoelektronik smart gemachte Spiegel erteilt Zahnputz-Unterricht.



Kügelchen aus Apatit und Protein, dem natürlichen Zahnmaterial, das dem Zahn wieder zu seiner Substanz verhilft (s. a. Biomineralisation).

Die Tagescreme (gibt es schon) enthält Nanokügelchen aus Zinkoxid gegen schädliche UV-Strahlung. Die Kügelchen sind unsichtbar, weil nanoskaliert, die Creme ist also nicht weiß, sondern vollkommen durchsichtig.

Spione an der Fingerspitze

Mit Nanotechnologie, Nanoelektronik, Mikrosystemtechnik & Co. werden komplexe Analysegeräte möglich, die auch für den Privathaushalt erschwinglich sind. Ein Piekser in den Finger wird für die künftige Blutanalyse reichen. Stimmen die Cholesterinwerte? Liegt der Zuckerpegel im Normalbereich? Die Befunde könnten via Internet in das nächstgelegene Nano-Medicenter gemailt werden, wo dann eine genauere Analyse angemahnt oder in Mikroreaktoren ein ganz individuelles Medikament nanobiotechnologisch zusammengebraut wird. Die Medizin im Körper transportieren wieder Nanopartikel, die so beschichtet sind, dass sie nur am Krankheitsherd haften bleiben. „Drug delivery“, punktgenau. Der Arzt des Vertrauens hat die Sache im Blick.



Diagnostik von morgen. Die immer aufwändigeren Methoden bleiben mit Nanotechnologie bezahlbar.

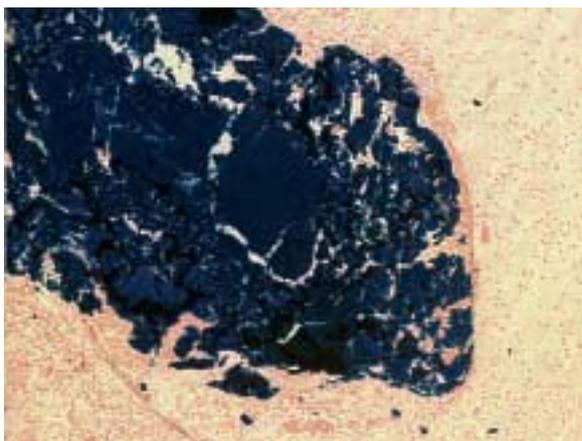
Supramolekulare Medikamentenkapseln

Die verabreichten Medikamente könnten wieder außerordentlich raffiniert sein. Sie würden in supramolekularen Hohlmolekülen (in Arbeit) stecken, nanoskaligen Transportbehältern, die Antennen besitzen, an denen Antikörpern ähnliche Tastproteine befestigt sind. Wenn die mit Strukturen in Kontakt kommen, die für das krank machende Agens typisch sind – die Hüllen von Krebszellen, Bakterien –, docken sie an und senden ein Signal an das Hohlmolekül, das daraufhin aufklappt und seinen Inhalt entlässt. Mit solcher Nanotechnologie ließen sich Medikamente hoch dosiert an den Krankheitsherd bringen ohne den Rest des Organismus zu belasten.

Magnetpartikel für die Krebstherapie

Mit ähnlichen Kniffen lassen sich auch nanoskalige Magnetpartikel an Krebsherde lenken, die dann von einem elektromagnetischen Wechselfeld erwärmt werden und den Tumor zerstören können. Nanopartikel passieren auch das „Blut-Hirnschranke“ genannte Filtersystem und ließen sich so auch an Hirntumore heranführen. Diese sogenannte Magnet-Flüssigkeits-Hyperthermie

wurde von der Arbeitsgruppe um den Biologen Andreas Jordan entwickelt. Derzeit beginnt die klinische Erprobung.



Krebszellen eines Glioblastom-Gehirntumors haben sich bis dicht an die Grenze zum gesunden Gewebe mit speziell beschichteten Magnet-Nanopartikeln „vollgefressen“. Wenn dann ein elektromagnetisches Feld die Partikel erwärmt, wird der Tumor für ergänzende Maßnahmen sensibel. Die medizinische Freigabe der Technik soll bereits 2005 erfolgen.

Schränke auf dem Chip

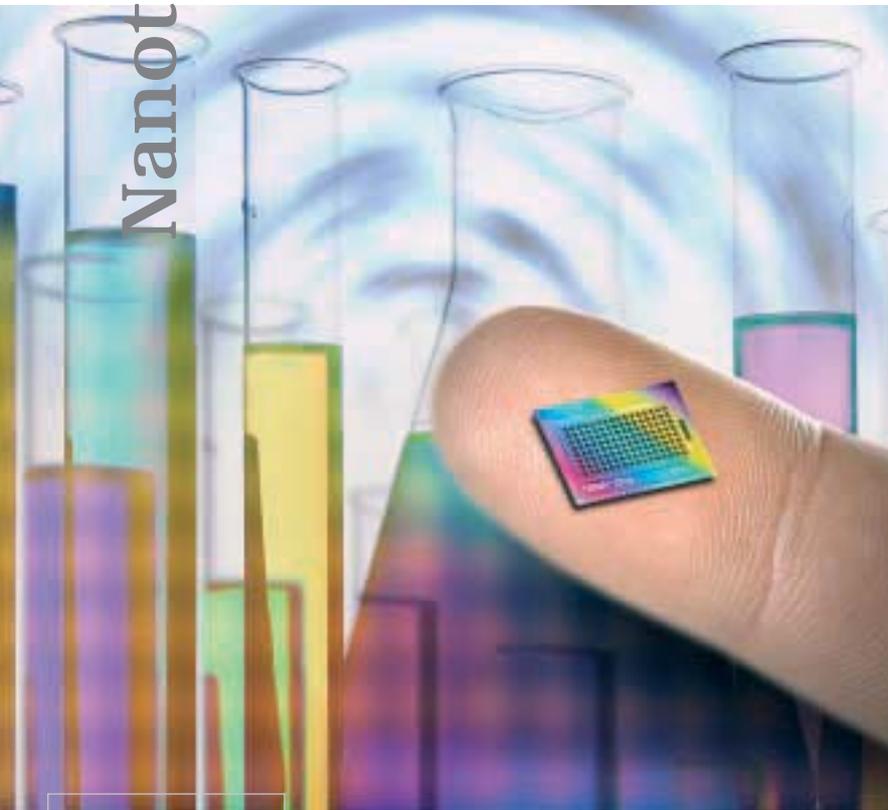
Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie – die Übergänge sind fließend – werden sich im medizinischen Sektor allein dadurch bezahlt machen, dass sie bekannte Techniken verkleinern und verbilligen, fallweise um das Hunderttausendfache und mehr. Das wird unter anderem für die raffinierten Maschinen gelten, die Millionen von Zellen, Blutzellen etwa, zu Tausenden pro Sekunde auf bestimmte Merkmale hin prüfen und lebend aussortieren können. Das kann so gehen: Dem

Mit nanoskaligen Ausgangspulvern lassen sich fehlerarme, zuverlässige Keramikkörper, etwa für Implantate, brennen (sintern).

Blut werden Antikörper zugegeben, die sich an die interessierenden Zellen – und nur an diese – anheften und zugleich einen Farbstoff tragen, der im Licht eines Lasers aufleuchtet, fluoresziert. Im Zellsortierer werden die Zellen dann, in Tröpfchen eingeschlossen, an einem solchen Laser vorbeigeführt; wenn ein Fluoreszenz-Signal aufblinkt, lenken elektrische Felder das Tröpfchen und damit die Zelle in einen Sammelbehälter – die Technik ist teilweise dem Tinten-



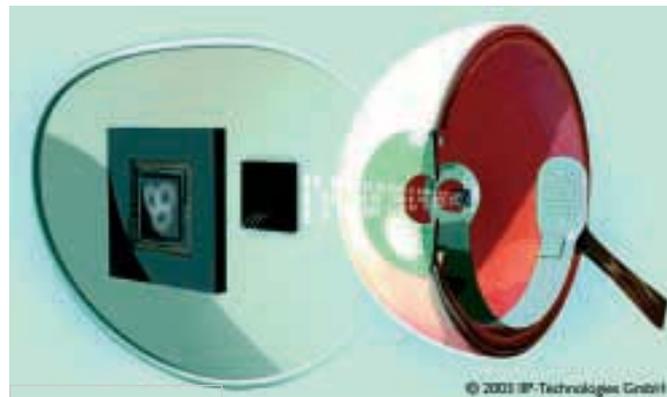
men führende Entwickler, würden sich Millionen von Nanogerätschaften tummeln, die für ihre Aufgabe koordiniert zusammenarbeiten. Die Chips wären Quadratzentimeter groß, riesig also im Vergleich zu den auf ihnen ruhenden Nanomaschinen, was daran läge, dass Flüssigkeiten in ihnen kreisen müssten, die im Nanokosmos zäh wie Honig sind, also Platz zum Fließen brauchen. Labs-on-a-Chip werden die Biologie revolutionieren, wenn man künftig mit dem Nano-Lab an einzelnen Zellen Schritt für Schritt verfolgen könne, was gerade vor sich geht. Schließlich ließe sich so eine Art Video rekonstruieren, ein Video des Lebens. Und man würde sich nicht damit begnügen, die Zelle zu beobachten, man werde sie zwicken, sehen, wie sie reagiert, und so die Rätsel des Lebens entschlüsseln.



Klein aber fein, das „Lab-on-a-chip“ ein Labor auf der Fingerspitze

strahlendrucker entlehnt. Zellsortierer sind sehr anspruchsvolle Geräte, in denen Mikromechanik, Optik, Elektronik vom Feinsten bemüht wird, die Maschinen sind entsprechend teuer. Nanotechnologie wird die heute noch schrankgroßen Zellsortierer auf das Format einer Briefmarke reduzieren und in Teilen zu Wegwerfartikeln machen. Das wird den medizinischen Fortschritt stark beschleunigen.

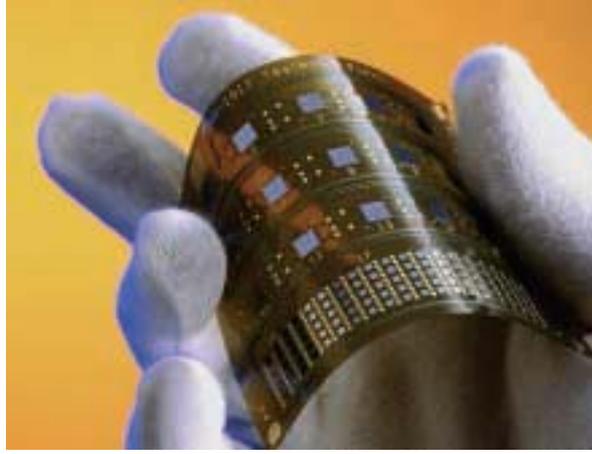
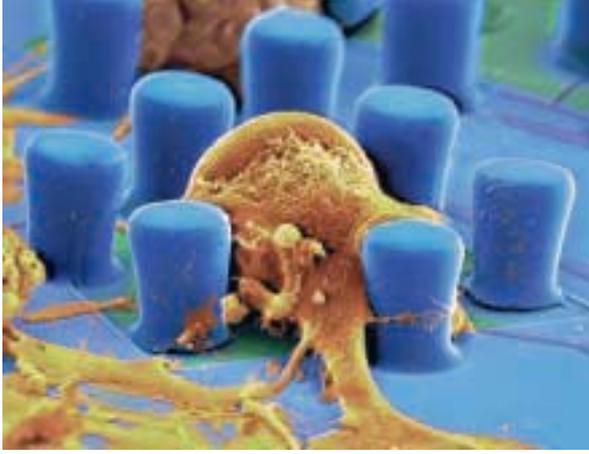
Noch anspruchsvollere Nanotechnologie ist für das Lab-on-a-Chip vorgesehen. Auf dem, schwär-



Das Retina-Implant

Neuroprothetik

Eine sehr anspruchsvolle Anwendung für Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie geht derzeit in die Erprobung, das lernfähige Retina Implant. Es soll an Retinitis pigmentosa Erkrankten und deshalb Erblindeten einen Teil ihrer Sehfähigkeit zurückgeben. Das System besteht aus einer kleinen Kamera im



*Bild rechts:
Dünne Siliziumchips
auf flexiblem Träger
z. B. für intelligente
Etiketten, die sich in
die Verpackungen
von Lebensmitteln
oder in Kleidungsstücke
integrieren
lassen.*

*Bild links:
Ankopplung von
Nervenzellen an
elektrische Kontakte*

Brillengestell, die Bilder der Umgebung an einen speziellen lernfähigen Signalprozessor leitet. Der Prozessor überträgt seine Bilddaten drahtlos ins Innere des erkrankten Auges. Dort befindet sich eine flexible Folie mit miniaturisierten Elektroden, die auf der Netzhaut aufliegen und diese entsprechend stimulieren. Wenn die Entwicklung ein Erfolg wird, liegt das weltweit erste „man-machine-interface“ für den Sehsinn vor. Vielen Ertaubten kann schon seit längerer Zeit mit einem Cochlea-Implant geholfen werden. Mit Nanotechnologie werden sich Prothesen dieser Art ständig verbessern lassen.

Homecare

Bessere Ernährung und eine immer raffiniertere Medizin lassen immer mehr Menschen ein immer höheres Alter erreichen. Diese eigentlich sehr wünschenswerte Entwicklung hat den naturgegebenen Nachteil, dass immer mehr Menschen auf Hilfe angewiesen sein werden. Die wird zum Teil von Nanoelektronik geleistet werden können, angedacht wird

etwa in die Kleidung eingewobene Sensorik und Computerleistung, die die ständige Überwachung des Gesundheitszustandes – Puls, Atmung, Stoffwechsel – der Senioren ermöglicht. Wenn Störungen eintreten, benachrichtigt die MediWeste selbständig den Hausarzt oder die Angehörigen. Den Aufenthaltsort meldet ein ebenfalls eingenähtes GPS- oder Galileo-System-Modul (Galileo ist die künftige europäische Variante von GPS).

Automatische Krankenpfleger

Das „Alte Europa“ hat zu maschinellen Helfern – noch – ein eher distanzierendes Verhältnis, in Japan stehen autonom sich bewegende Roboter vor der industriellen Massenfertigung. Gut möglich, dass sich daraus auch alltagstaugliche Krankenpfleger entwickeln lassen können, gearbeitet jedenfalls wird daran. Die Robotik wird die stetig steigende Rechenleistung der Nanoelektronik mühelos und in Mengen aufnehmen können.



Roboter mit Einfühlungsvermögen von der Oxford-University. Zum Entenhüten reicht es schon, von automatischen Krankenpflegern wird mehr erwartet.



Intelligente Kleidung: Integrierte Elektronik macht MP3- Musik, führt durch die Stadt und überwacht den Puls - auf der Haut - erlebbarer Mehrwert.



Effizienzrevolution durch LEDs

Anders als in der bisherigen Technikgeschichte kann Nanotechnologie wirtschaftliches Wachstum mit einem weniger an Materieumsatz verbinden.

Wirtschaften à la Nano: Mehr Komfort mit weniger materiellem Aufwand.

In Deutschland wird etwa 10 Prozent des erzeugten Stroms für die Beleuchtung verwendet. LEDs, lichtemittierende Dioden, leuchten mittlerweile auch weiß, können also die herkömmliche Technik ersetzen. Der Ersatz hätte erhebliche Einsparungen zur Folge, denn LEDs brauchen für die gleiche Lichtmenge nur etwa 50

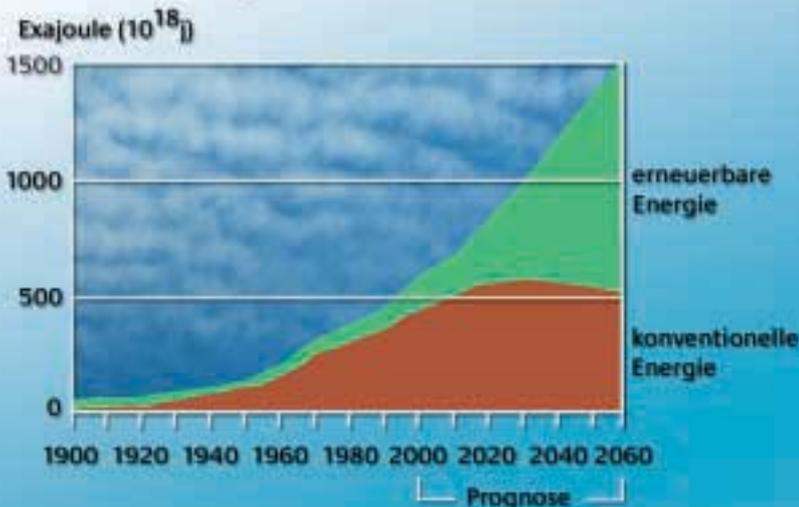
Prozent der Leistung, die eine gewöhnliche Glühbirne beansprucht. Das Umweltbundesamt hat für den Beleuchtungssektor ein Einsparpotential von 77 Prozent ermittelt.

In den bundesdeutschen Haushalten stehen Millionen von Fernsehgeräten mit Röhrentechnik vor der Ablösung durch Geräte mit LCD-Technik bzw. längerfristig auch OLED-Technik. Beide Techniken haben das Potential, den Energieverbrauch um 90 Prozent schrumpfen zu lassen. LEDs und OLEDs werden nanotechnologisch hergestellt. Wenn Millionen Haushalte Kilowatt sparen, werden Gigawatt daraus – die Kapazität mehrerer Großkraftwerke.

Die Leistung von Brennstoffzellen ist schnell regulierbar. Derzeit ziehen in die Haushalte die ersten Erdgasthermen mit Brennstoffzellen ein, die – einstellbar – sowohl Wärme als auch Strom erzeugen. Wenn Millionen Haushalte damit ausgerüstet sind, können diese Thermen über das Stromverbundnetz und das Internet zu virtuellen Großkraftwerken verbunden werden – mit einer theoretischen Maximalkapazität von

Prognose der Shell AG. Für erneuerbare Energien ist Nanotechnologie das Mittel der Wahl

Weltenergieverbrauch





Breites Spektrum: Glasfassade einer Halle des Hotels Weggis am Luzerner See die mit 84 000 LED von Osram in allen Regenbogenfarben illuminiert wird.

100Gigawatt. Langfristig könnte das Erdgas durch Wasserstoff aus regenerativen Quellen ersetzt werden. Nanotechnologie ist mit neuen Werkstoffen und Katalysatoren dabei.

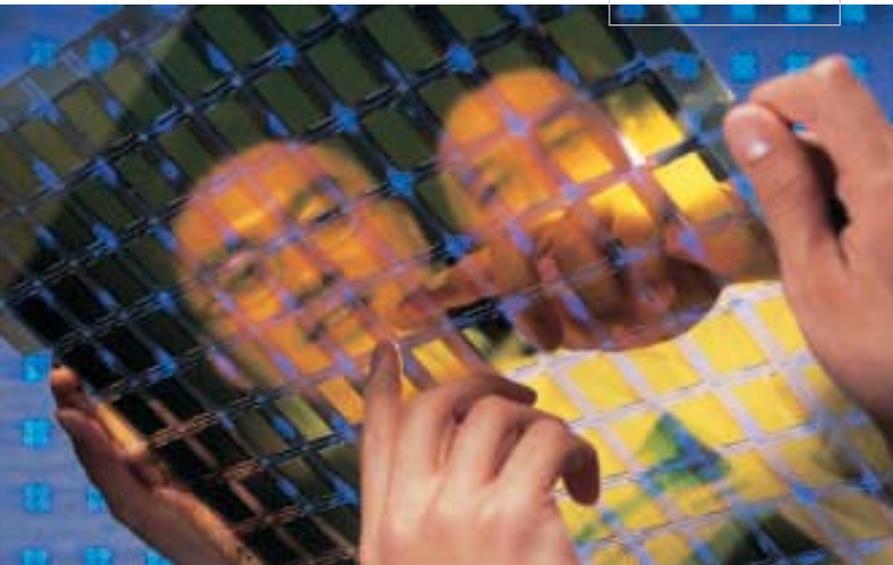
Keramische Membranen mit nanoskaligen Porositäten gewinnen mehr und mehr Bedeutung für die Aufbereitung von Flüssigkeiten, auch für die Bereitstellung von sauberem Trinkwasser. Bakterien und Viren werden mit solchen Membranen einfach herausgefiltert.

Nanotechnologie wird Solarenergie zu einer lukrativen Sache machen. Verbindungshalbleiter aus Indium, Gallium und Stickstoff haben Kenn-daten gezeigt, die Solarzellen mit über 50 Prozent Wirkungsgrad möglich erscheinen lassen. Wirkungsgrad ist aber nur ein Kriterium, Nanotechnologie wird auch für eine drastische Verbilligung der Lichtsammler sorgen, ob durch Dünnschicht- oder Partikeltechniken. Labor-muster von Solarzellenfolien, die mit Beschich-tungstechniken ähnlich denen für LEDs und OLEDs hergestellt wurden, fahren mit 30 Gramm Substanz 100 Watt elektrische Leistung ein – eine

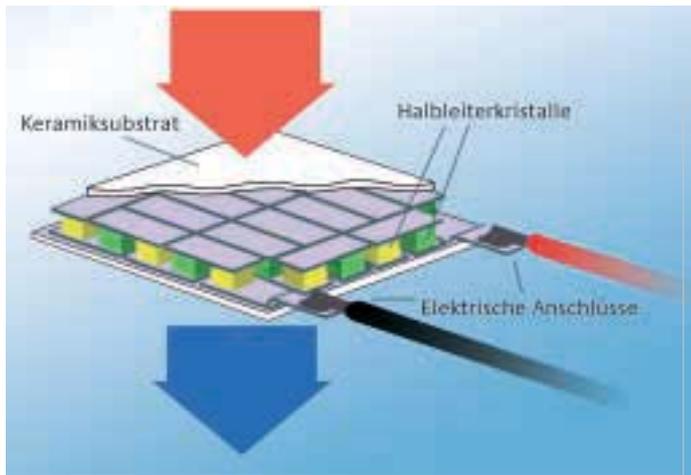
radikale Entmaterialisierung der Energie-gewinnung, in Leipzig realisiert von Solarion.

Fünf Prozent Wirkungsgrad reklamieren Sie-mens-Forscher für neueste organische Solarzel-len, die sich auf Plastikfolie drucken lassen und ausgesprochen billig werden sollen. Die photo-aktive Schicht ist nur mehr 100 Nanometer dünn, die derzeit erreichten Lebensdauern liegen bei einigen tausend Sonnenstunden. Die ersten Produkte mit dieser Technik werden für 2005 erwartet.

OLEDs, organische LEDs, werden in vielen künftigen Displays eingesetzt werden.



Energie und Umwelt



Konventionelles thermoelektrisches Modul: Ein Wärmestrom wird von Halbleiterblöcken in elektrischen Strom umgesetzt. Nanostrukturen verhelfen der Technik zu hohen Wirkungsgraden und erschließen so neue Märkte.



Nanotechnologie haucht vielen alten Ideen neues Leben ein, die an der Ineffizienz der verfügbaren Materialien gescheitert waren. Dazu gehört die Idee von der thermoelektrischen Stromerzeugung:

Strom aus Wärme, Wärme aus Strom - Thermoelektrik

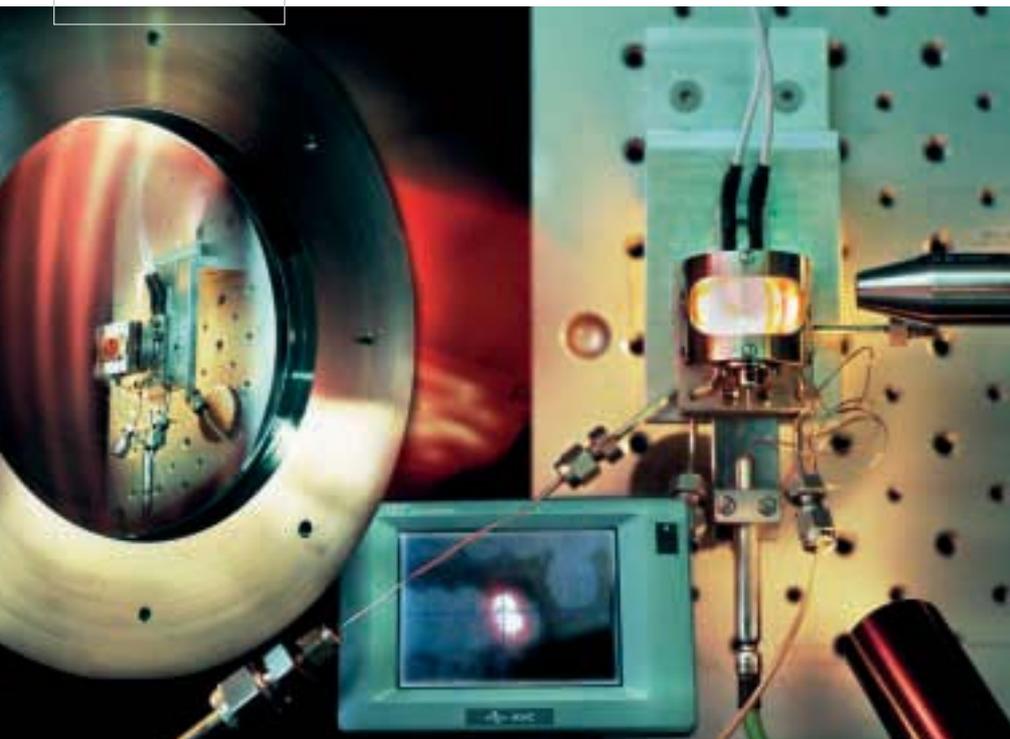
Es gibt eine ganze Reihe von lange bekannten, ehrwürdigen physikalischen Effekten, die, von der Öffentlichkeit kaum bemerkt, in Marktnischen eher Bescheidenes verrichten. Da ist die Kühltasche, die an das Bordnetz des Autos angeschlossen wird und

dann richtig kühlt. Im Inneren wirkt unsichtbar das Vermächtnis von Jean-Charles-Athanase Peltier, eines französischen Gelehrten, der 1834 den nach ihm benannten Effekt entdeckte, wonach ein Stromfluss durch den Kontaktpunkt zweier verschiedener Metalle an der einen Seite

Wärme, an der anderen Kälte produziert. Dreizehn Jahre zuvor hatte der Deutsche Thomas Johann Seebeck den umgekehrten Effekt gefunden, wonach ein Wärmefluss durch den Kontaktpunkt zweier verschiedener Metalle Strom produziert. Beide Herren werden durch Nanotechnologie neuerlich zu Ruhm kommen, denn jetzt entstehen nanotechnologisch neue Materialien, die beide Effekte mit – endlich - sehr guten Wirkungsgraden ausstatten.

An der Herstellung solcher Materialien sind wieder Maschinen wie die beteiligt, mit denen LEDs hergestellt werden. Diese Maschinen bringen etwa auf eine einen Nanometer

Chemische Mikroreaktionstechnik zur effizienten Herstellung auch exotischer Substanzen





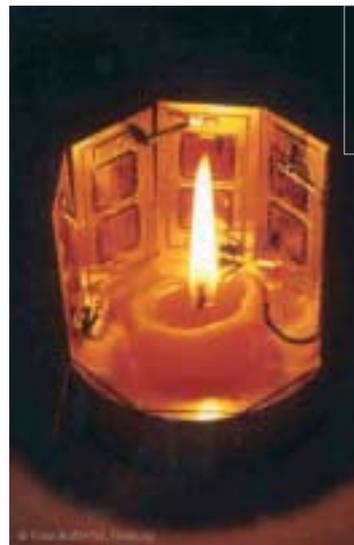
Aixtron-Reaktoren für die Forschung (links) und zur atomgenauen Herstellung dünner Schichten aus Verbindungshalbleitern (rechts)

messende Schicht von Wismut-Tellurid eine Schicht von fünf Nanometern Antimon-Tellurid auf und wiederholen diesen Prozess, bis eine Halbleiterfolie entstanden ist, die die Herren Peltier und Seebeck entzückt hätte: Von Strom durchflossen, wird die eine Seite der Schichtenfolge heiß, die andere wird kalt. Die Folie lässt sich sehr fein strukturieren, so dass sie zum punktgenauen Kühlen von Chips genutzt werden kann oder in einem Lab-on-a-Chip winzige Reaktionsgefäße betreibt, in denen durch schnelle Temperaturwechsel DNA vermehrt wird. Gut denkbar, dass die drastisch steigenden Wirkungsgrade Peltierelemente für die ganze Kälteindustrie zum Mittel der Wahl werden lassen. Wer umgekehrt über billige Wärmequellen wie Erdwärme verfügt, kann mit solchen thermoelektrischen Schichten preiswert Strom produzieren. Island könnte zum Energiekrösus werden, mit elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff.

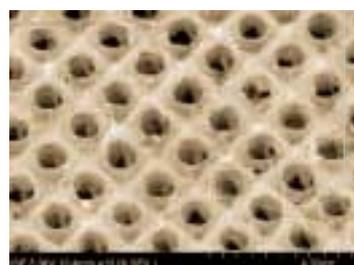
In der chemischen Industrie werden Techniken wie diese riesige Mengen Abwärme in Strom umsetzen – lautlos, kaum sichtbar, effizient. Eben nanotechnologisch.

Thermophotovoltaik

Thermoelektrik ist nicht die einzige Möglichkeit, Abwärme elegant in Strom umzumünzen. Die Thermophotovoltaik, TPV, etwa nutzt die (unsichtbare) Wärmestrahlung, Infrarot-Strahlung, heißer Objekte. Die Nanotechnologie steckt in den Strukturen der Emittier, die das Spektrum der Wärmequelle an die spektrale Empfindlichkeit der Thermophotovoltaikzellen anpassen.



Kerzenlicht reicht den Thermophotovoltaikzellen aus, ein Radio zu betreiben.



Wolfram-Emitter mit nanostrukturierter Fläche für die Anpassung des Infrarot-Spektrums.

Nanotechnologie für Sport und Freizeit

Die ständige Verfeinerung der Technologie, nun auch im Nano-Maßstab, lässt immer wieder alte Ideen aufleben, die zuvor knapp gescheitert waren. Darunter die Idee vom Fliegen mit Sonnenlicht.

Icaré II, ein Sonnensegler, der belastbar wie ein gewöhnliches Segelflugzeug ist und aus eigener Kraft starten kann. Oben: Am Ende eines inoffiziellen Rekordfluges von Stuttgart nach Jena.

Im Juni 1979 schraubte sich Bryan Allen mit dem *Gossamer Albatros* und reiner Pedalkraft durch die Luft über dem englischen Kanal und gewann den mit 100.000 Pfund dotierten Cremerpreis. Neue Materialien hatten die federleichte Konstruktion des *Gossamer Albatros* durch Paul MacCready möglich gemacht. 1981 glückte auch ein langer Flug allein mit Solarkraft, allerdings war der Solar Challenger außerordentlich zerbrechlich.

Preise beflügeln: Anfang der neunziger Jahre setzte die Stadt Ulm im Gedenken an ihren unglücklichen Flugpionier Albrecht Ludwig Berblinger („Der Schneider von Ulm“) einen Wettbewerb zur Entwicklung eines praxistauglichen Solarflugzeugs aus. Im Juli 1996 stieg der Motorsegler Icaré 2 der Stuttgarter Uni zum überlegenen Gewinner auf.

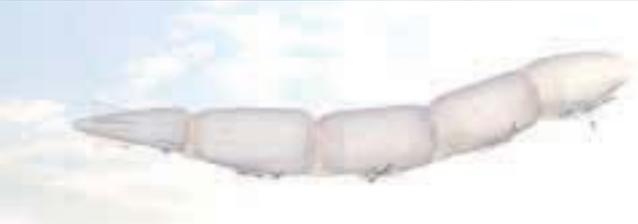
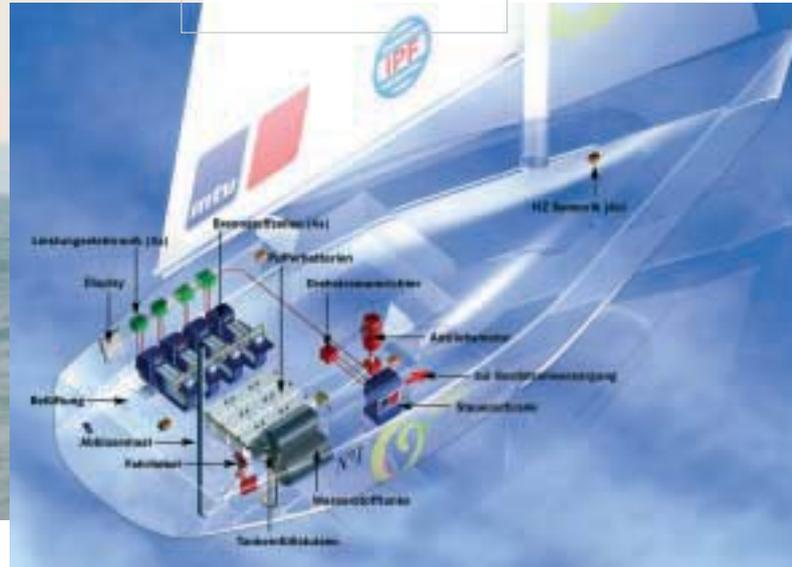
Als Satellitenersatz ist das solare Experimentalflugzeug HELIOS der NASA konzipiert, das tags solar angetrieben und nachts mit einem „wiederaufladbaren“ Brennstoffzellenaggregat in der Luft gehalten wird. Erreichte Höhe: Fast 30 Kilometer.

Im Jahr 2003 trafen in der Schweiz Experten für Thermodynamik, Aerodynamik, elektrische Systeme, Verbundmaterialien, Photovoltaik, Energiewandlung und Computersimulation zusammen – Nanotechnologie ist bei fast allen Sparten dabei – und besprachen ein Projekt, das neue Technologien für eine umweltverträgliche Zukunft beflügeln soll. Beflügelten im Wortsinn: Das ehrgeizige Projekt soll um 2009 herum Bertrand Piccard und Brian Jones, die 1999 die Welt in einem Ballon umrundet hatten, noch einmal um die Erde tragen. Dieses mal in einem Flugzeug, das allein von Sonnenenergie angetrieben wird, non-stop!





Segelyacht mit Brennstoffzellenantrieb der MTU, Friedrichshafen, Bodensee. Nanotechnologie kann solchen Gefährten zu höchster Eleganz verhelfen, denkbar sind Segel aus flexiblen Textil-Solarzellen, die dann allerdings dunkel sein müssten.



„Luftwurm“ der Universität Stuttgart. Geplant ist der Einsatz als Relaisstation für die Funktelefonie.

Designstudie der Firma Fuseproject, eine Brennstoffzelle treibt den Roller lautlos durch die City.

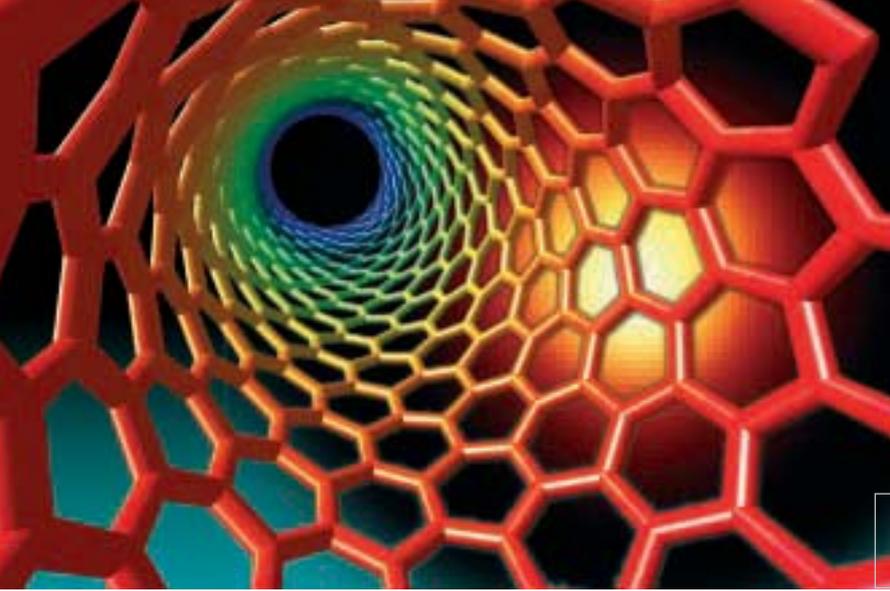
Das Projekt könnte den Neuen Technologien tatsächlich den verdienten Respekt verschaffen und unter anderem eine ganze Flotte von neuen Vehikeln im Schlepp haben, wie etwa von Computern, Sensoren und GALILEO gelenkte Solarflugzeuge, die auch Ungeübte in die Höhe heben – lautlos, abgasfrei. Über den Wolken soll die Freiheit ja grenzenlos sein. Über die Mecklenburgische Seenplatte ziehen dann vielleicht Solarkatamarane. Pedelecs, elektrisch unterstützte

Fahrräder, helfen an Land den Senioren in den Sattel, die ohne Hilfe einige Mühe hätten. Elektrische Kleinfahrzeuge werden an vielen Stellen forciert, schonum die in Abgasen versinkenden Städte der sich jetzt schwungvoll industrialisierenden Zonen zu retten.



Solarkatamaran der Kopf Solar design GmbH schippert in und um Hamburg herum.





Visionen

Nanoröhrchen mit Beteigeuze, einem Riesenstern, in dessen Atmosphäre Fullerene vorkommen.

Fingerstraße

Mit Nanotechnologie sind auch ganz und gar utopisch anmutende Transportsysteme denkbar, wie die „Fingerstraße“. Wenn – woran gearbeitet wird – praxistaugliche Kunstmuskeln verfügbar sind, könnte man sich eine mit Winkelementen, Fingern, ausgelegte Straße vorstellen, die darauf befindliche Gegenstände durch Winken transportieren.

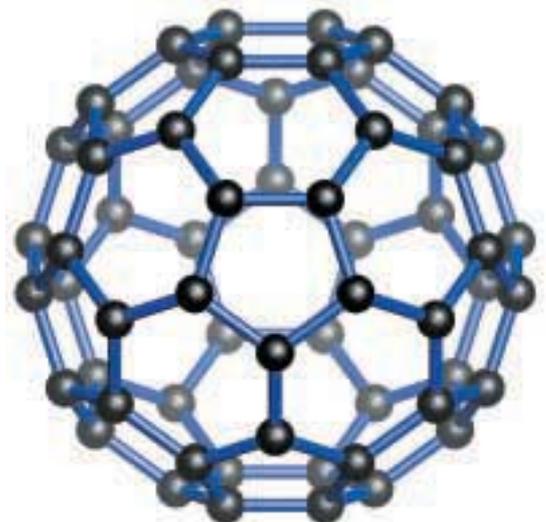
Wie jene Zellgeißeln, Cilien, die durch Fächeln Dreck aus der Lunge wedeln. Oder Pantoffeltierchen vorwärts treiben. Die Idee hat Raum für viele Ausschmückungen; winzige, nach diesem Prinzip arbeitende Linearmotoren, die mit Pflanzenmuskeln, „Forisomen“, arbeiten, werden jedenfalls ernsthaft in Erwägung gezogen. Andere Kunstmuskelkandidaten sind Gewebe aus Fullerenröhren. Und die Idee ist eigentlich nicht so phantastisch wie der Fahrstuhl zu den Planeten, der von der NASA ganz ernsthaft studiert wird. Und eigentlich von einem russischen Raumfahrtpionier, Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski, zuerst angedacht wurde.

Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski

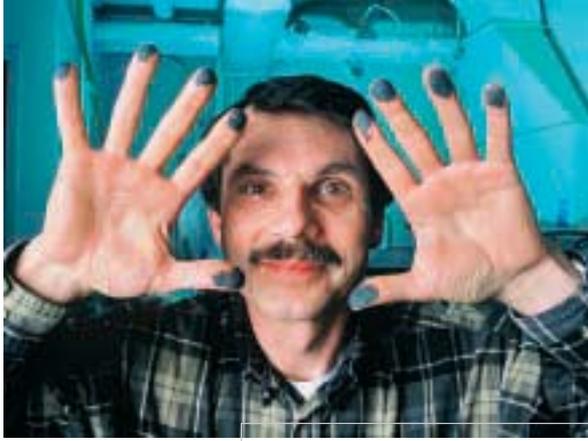


Kohlenstoff-Nanoröhrchen für den Fahrstuhl in die Umlaufbahn

Das Rezept kam aus dem All: In den Hüllen alter Sterne wie Beteigeuze, einem Roten Riesen, wirbeln viele Elemente durcheinander. Wenn diese miteinander chemisch reagieren, entstehen unter anderem Nanokristalle aus Siliziumcarbid, Siliziumoxid, Korund, sogar Diamant, was man aus der Untersuchung von Meteoriten weiß, die aus solchem Staub entstanden sind. Um mehr zu erfahren, bildeten Wissenschaftler die Verhältnisse in diesen Sternhüllen im Labor nach – und fanden 1985 Spuren einer gänzlich unbekannt Substanz. Die stellte sich als eine neuartige Verbindung des Kohlenstoffs heraus: Ein Hohlmolekül, das in seiner Form stark einem Fußball ähnelt. Ein neuerlicher Blick zum Himmel ließ erkennen, dass dieses Molekül auch in den Hüllen von Sternen entsteht.



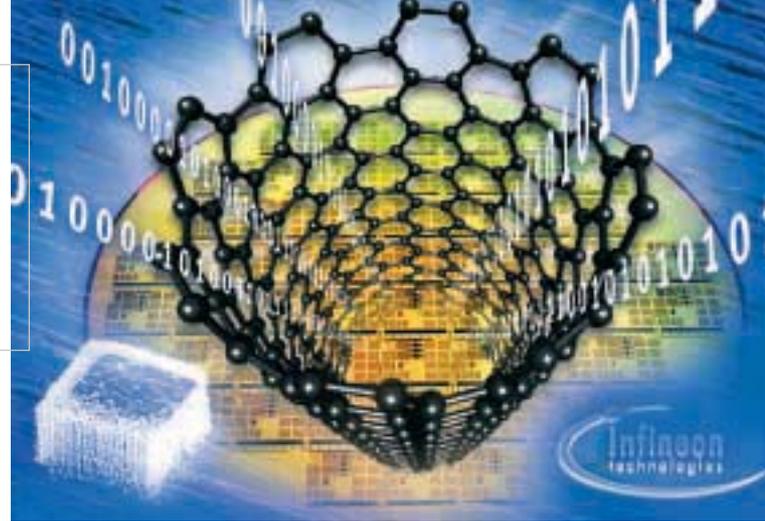
Fullerene, Hohlräume aus Kohlenstoff-Netzen, Hoffnungsträger bei der Suche nach exotischen Materialien



Robert Curl, mit Fullerenen an den Fingern, die ihm einen Nobelpreis eingebracht haben.

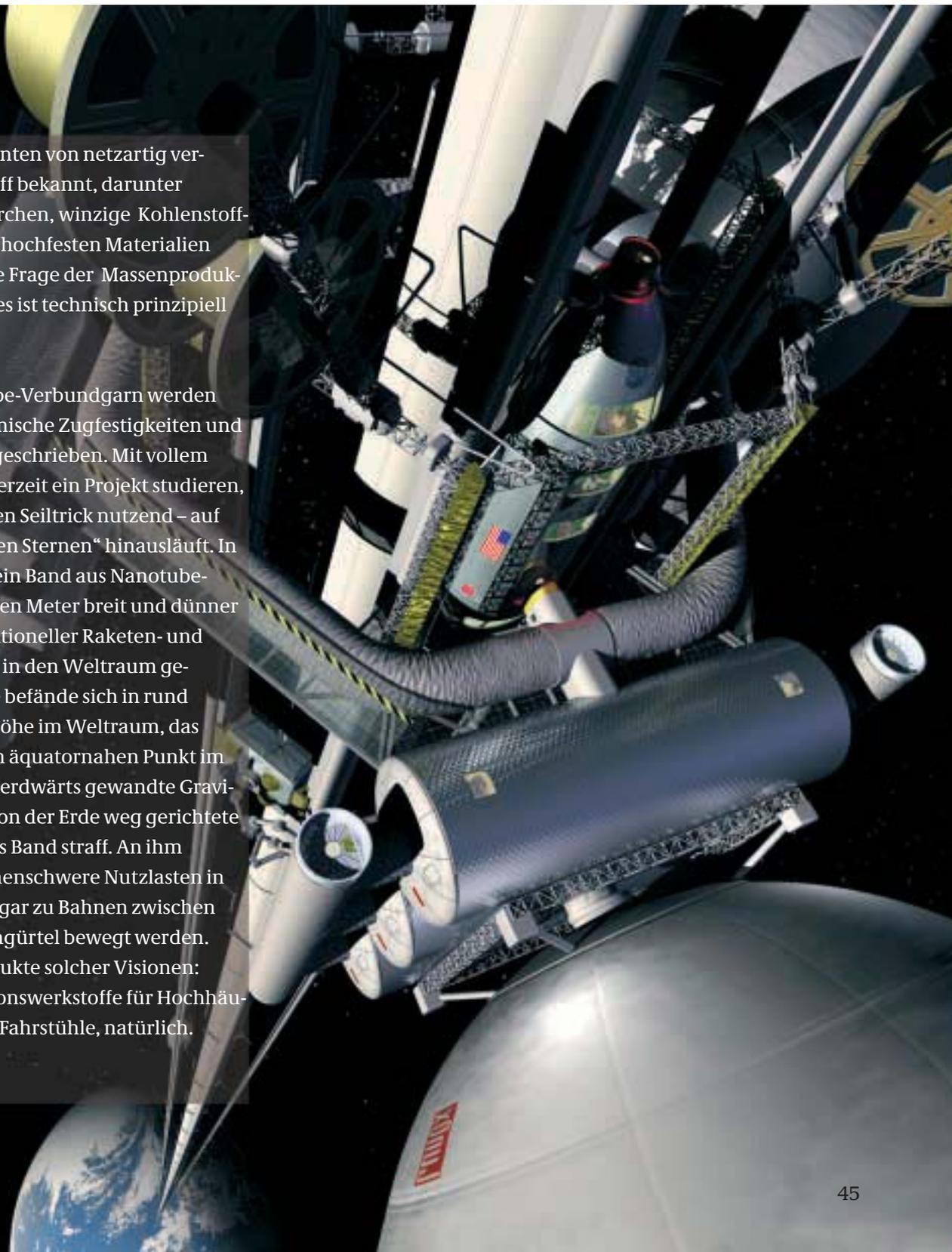
Vision:
Fahrstuhl zu
den Planeten

Riesen-
moleküle
als Rechen-
meister:
Nanoröhren
können die
Grundlage für
leistungsfähige
Chips der
Zukunft
werden.



Heute sind viele Varianten von netzartig verbundenem Kohlenstoff bekannt, darunter Kohlenstoff-Nanoröhrchen, winzige Kohlenstoffschläuche, die sich zu hochfesten Materialien verspinnen lassen. Die Frage der Massenproduktion solcher Nanotubes ist technisch prinzipiell gelöst.

Einem reifen Nanotube-Verbundgarn werden mittlerweile astronomische Zugfestigkeiten und Bruchzähigkeiten zugeschrieben. Mit vollem Ernst lässt die NASA derzeit ein Projekt studieren, das – eine Art indischen Seiltrick nutzend – auf einen „Fahrstuhl zu den Sternen“ hinausläuft. In einem Szenario wird ein Band aus Nanotube-Verbundmaterial, einen Meter breit und dünner als Papier, mit konventioneller Raketen- und Satellitentechnologie in den Weltraum gespannt. Das eine Ende befände sich in rund 100.000 Kilometern Höhe im Weltraum, das andere wäre an einem äquaturnahen Punkt im Pazifik verankert. Die erdwärts gewandte Gravitationskraft und die von der Erde weg gerichtete „Fliehkraft“ halten das Band straff. An ihm entlang könnten tonnenschwere Nutzlasten in einen Erdorbit und sogar zu Bahnen zwischen Venus und Asteroidengürtel bewegt werden. Nützliche Nebenprodukte solcher Visionen: Hochfeste Konstruktionswerkstoffe für Hochhäuser, Brücken etc., und Fahrstühle, natürlich.



Chancen und Risiken

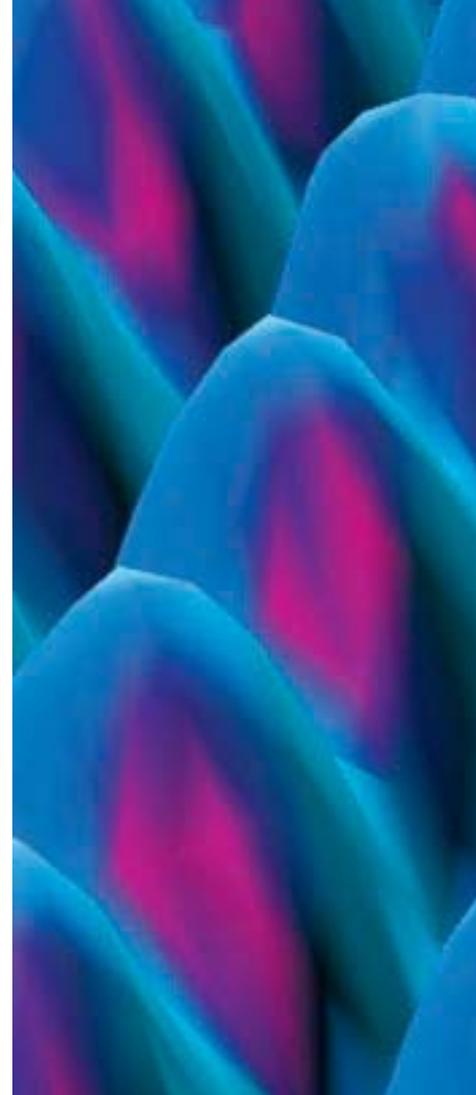
Das Potential der Nanotechnologie zum Guten, zumindest Gewinnbringenden ist offensichtlich groß. Durch Innovationen in zahlreichen Anwendungsfeldern wird der Nanotechnologie ein erhebliches wirtschaftliches Potenzial zugeschrieben. Bereits heute befassen sich in Deutschland ca. 450 Unternehmen mit kommerziellen Anwendungen der Nanotechnologie und bieten mehreren zehntausend überwiegend hochqualifizierten Menschen Brot und Arbeit. Dabei sind sich Wissenschaftler und Unternehmer einig: Nanotechnologie ist mehr als ein neuer „Hype“.

Zu gut, um wahr zu sein? Ein zumindest theoretisch möglich erscheinender Super-Gau hat bereits Einzug in die Literatur gefunden: In Michael Crichtons Bestseller „Beute“ schließen sich Schwärme smarter Nano-Partikel zu halb-

intelligenten Wesenheiten zusammen, die ihren Schöpfern auf den Leib rücken, um sich in ihnen einzunisten. Eine andere düstere Vision des amerikanischen Nano-Propheten Eric Drexler, sieht die Welt durch sogenannte Graue Schmiere, „Gray

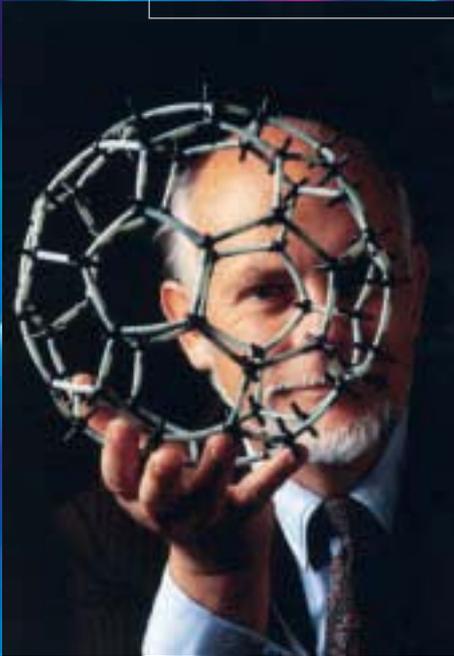
Goo“, einer grauen Wolke aus missratenen Nanorobotern, bedroht. Eric Drexler hält es in der Tat für möglich nanoskalige Roboter zu bauen, die wenige Millionstel Millimeter klein sind und aus bereitgestellten Rohstoffen programmgesteuert etwas Großes, Neuartiges zu bauen vermögen. Und wenn der Prozess außer Kontrolle geriete, entstünde anstelle etwas Großartigem eben die Graue Schmiere, die womöglich für Mensch wie Maschine ansteckend und gefährlich sein könnte.

Das Gray-Goo-Szenario Eric Drexlers ist ebenso unwahrscheinlich wie die Vorstellung, die Welt werde sich durch Nanotechnologie in Gummibärchen verwandeln. Da sind Fette Finger vor.



Das Konzept wird von den meisten Fachleuten nicht ernst genommen. Richard Smalley etwa, Chemienobelpreisträger des Jahres 1996, macht die Eigenheiten der chemischen Bindung dagegen geltend, so ließe sich eben nicht jedes Atom, jedes Molekül miteinander verbinden. Das allein mache die Vorstellung eines Nanobots, eines nanoskaligen Roboters, Assemblers, unwahrscheinlich. Dann aber, und vor allem: Wenn ein solcher Assembler Materie Atom für Atom zusammenfüge, müsse er das mit „Fingern“

Richard Smalley, Chemie-nobelpreisträger, hält – wie die meisten Wissenschaftler – die Risiken der Nanotechnologie für beherrschbar.



dringen und selbst biologische Barrieren (wie z. B. die Blut-Hirn-Schranke) zu überwinden, gesundheitsschädigende Wirkungen haben. Da Nanopartikel – wie auch andere ultrafeine Stäube – wie z. B. Dieselruß in Autoabgasen – Substanzen sind, die unbekannt Nebenwirkungen mit sich bringen könnten, müssen wissenschaftliche Untersuchungen zunächst die Unbedenklichkeit solcher Partikel klären. Bisher gibt es nur wenige Erkenntnisse zur Sicherheit von Nanopartikeln, so dass die offenen Fragen schnellstmöglich durch entsprechende Experimente der Nano-Forscher und Toxikologen beantwortet werden müssen. Doch das Risiko scheint beherrschbar zu sein, da Nanopartikel in freier Natur extrem „klebrig“ sind. Sie ballen sich daher sehr schnell zu größeren Klumpen zusammen, mit denen der Körper problemlos fertig wird. Von manchen Nanopartikeln weiß man auch schon, dass Sie nicht gesundheitsschädlich sind. Sie werden daher in der Sonnencreme als Lichtschutzfaktor eingesetzt oder sind in festgebundener Form einem Material beigemischt, so dass der Verbraucher überhaupt nicht mit einzelnen Nanopartikeln in Kontakt gerät. Außerdem versucht auch die Industrie durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen, jegliches Gesundheitsrisiko sowohl für Kunden als auch für ihre Mitarbeiter weitestgehend auszuschließen.

Während Nanobot-Visionen hypothetisch sind, sehen die Verheißungen der Materialwissenschaftler, die mit nanoskaligen Dimensionen arbeiten, sehr real aus. Die ersten Produkte sind ja auch schon da, wie hochempfindliche Festplattenleseköpfe mit zwanzig und mehr wenige Nanometer dünnen Schichten. Nanoelektronik findet sich in jedem neuen Notebook. Als potente Technologie wird natürlich auch die Nanotechnologie Nebenwirkungen haben, so wird sie viele einfache Tätigkeiten überflüssig machen. Dafür entstehen neue Tätigkeitsfelder. Lebenslanges Lernen wird immer wichtiger, aber das kann ja auch Spaß machen – mit Nanotechnologie.

machen, die ihrerseits aus Atomen bestehen und notwendigerweise eine gewisse Mindestdicke haben müssten. Und es wäre nicht nur das erwähnte Atom zu greifen, beim Assemblieren wären alle Atome eines Kubiknanometers zu kontrollieren, und da kämen sich die Finger zwangsläufig ins Gehege. Soweit das Fette-Finger-Problem. Hinzu käme das Klebrige-Finger-Problem, die gegriffenen Atome würden sich, sortenabhängig, nicht beliebig greifen und wieder abstreifen lassen, sie würden eben Bindungen eingehen – ein aus dem Alltag bekanntes Phänomen: Es ist nicht so einfach, ein klebriges Kügelchen wieder vom Finger zu bekommen. Und das seien prinzipielle Einwände, an denen kein Weg vorbeiführt. Mit mechanischen

Nanobots also könne es nichts werden. Richard Smalley wird Recht haben, die Furcht, dass sich Heere von missratenen Nanomaschinen über die Welt hermachen könnten, sie in graue Schmiere zu verwandeln, ist unbegründet.

Begründeter ist schon eher die Furcht, Nanopartikel könnten auch unerwünschte Wirkungen auf Mensch und Umwelt haben. Nanopartikel könnten z. B. aufgrund ihrer Kleinheit, die es ihnen sogar erlaubt in Körperzellen einzu-

Weiterführende Informationen

Wie werde ich Nano-Ingenieur?

Wer eine Forschungsstelle besucht, an der intensiv Nanotechnologie betrieben wird, sieht eigentlich alle naturwissenschaftlichen Disziplinen beieinander: Biologen, Chemiker, Ingenieure der verschiedensten Fachrichtungen, Kristallographen, Mineralogen, Physiker – der gemeinsame Nenner ist die Ebene des Atoms, und ein Teil der gemeinsamen Sprache die Mathematik. Die klassischen naturwissenschaftlichen Studiengänge können also alle in die Nanotechnologie führen, mittlerweile aber beginnt sich die Nanotechnologie als eigenständige Disziplin zu etablieren, so etwa an der Universität Würzburg. Wer das Fach Nanotechnologie betreibe, sagt Alfred Forchel vom Lehrstuhl für Physik der Uni Würzburg, müsse nicht fürchten, einem kurzfristigen Trend hinterher zu laufen, (Auszug abi 10/2003 der Uni Würzburg)

Weil der Trend zur Miniaturisierung keine Eintagsfliege ist, sondern schon eine lange Entwicklung hinter sich hat. Es ist absehbar, dass in vielen Bereichen die Anwendungen auf immer kleinere Skalen gehen werden, sozusagen von Mikro auf Nano, ob in der Informationstechnologie oder Chemie. Man muss kein Hellseher sein, um zu behaupten, dass alles weiter schrumpfen wird – ein Beispiel sind hier Bauelemente – und zwar so klein wie möglich.

Physiker, Chemiker und andere Naturwissenschaftler können mit einigem Recht behaupten, schon immer Nanotechnologie betrieben zu haben. Die Gegenstände der klassischen Atomphysik, die Moleküle der Chemiker sind ja im Nanokosmos angesiedelt. Durch die heute vorhandenen experimentellen Möglichkeiten – etwa atomgenaue Strukturierung von Clustern, Schichten, Chips; die Verfügbarkeit von Substan-

zen höchster Reinheit, die Aufklärung feinsten biologischer Strukturen – hat sich ein Füllhorn ganz neuer Möglichkeiten geöffnet, aus dem sich auch das anwendungsnahe Ingenieurwesen bedienen kann. Die Berufsaussichten für Nanoingenieure schätzt Alfred Forchel ziemlich gut ein:

Natürlich hängen die Chancen, eine Stelle zu finden, auch in unserer Branche von der Konjunktur ab. Aber häufig machen relativ kleine Sachen den Unterschied: Wenn stapelweise Bewerbungen bei Firmen eingehen, ist es schwer, sich herauszustellen. Durch unser Praktikum in der Industrie gibt es wenigstens eine Firma, die den Studenten schon näher kennt. Auch können unsere Studierende ihre Diplomarbeit in der Industrie schreiben, ein weiterer Schritt näher zu einer Stelle. Zudem absolvieren sie mindestens ein nichttechnisches Wahlfach wie BWL, so dass sie auch hier über für das Berufsleben wichtige Grundkenntnisse verfügen.

Um eine solide naturwissenschaftliche Ausbildung, die Mathematik eingeschlossen, kommen Nanoingenieure aber nicht herum, in Würzburg nicht noch anderswo:

Es genügt nicht davon zu träumen, ein U-Boot zu entwickeln, das durch Venen fahren kann. Bevor es so weit ist, wird eine Menge Zeit und Arbeit investiert. Man muss mathematisch beschreiben lernen, Physik und Chemie beherrschen, die schwierigen und harten Grundlagen also. Kein Grund, sich abschrecken zu lassen: Da helfen vielleicht die Nano-Phantasien, um sich durchzubeißen.

Die Sache mit dem U-Boot in der Ader – das war nur ein Film. Nanotechnologie sieht anders aus, dafür gibt es aber auch echtes Geld.

Ansprechpartner, Links, Literaturhinweise

Studienmöglichkeiten zur Nanotechnologie:

Studiengang Nanostrukturtechnik in Würzburg
Universität Würzburg
Website: <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/nano/>
Contact: ossau@physik.uni-wuerzburg.de

Bio- und Nanotechnologien in Iserlohn
Fachhochschule Südwestfalen
Website: <http://www2.fh-swf.de/fb-in/studium.bnt/bnt.htm>
Contact: Werner@fh-swf.de

Molecular Science in Erlangen
Universität Erlangen-Nürnberg
Website: <http://www.chemie.uni-erlangen.de/Molecular-Science>
Contact: hirsch@chemie.uni-erlangen.de

Masterstudiengang Mikro- und Nanotechnik in München
Fachhochschule München
Website: http://www.fh-muenchen.de/home/fb/fb06/studiengaenge/mikro_nano/home.htm
Contact: sotier@physik.fh-muenchen.de

Nanomolecular Science in Bremen
International University Bremen
Website: <http://www.faculty.iu-bremen.de/plathe/nanomol>
Contact: f.mueller-plathe@iu-bremen.de

Nanostrukturwissenschaft - Nanostructure and Molecular Sciences in Kassel
Universität Kassel
Website: <http://www.cinsat.uni-kassel.de/studiengang/studiengang.html>
Contact: masseli@physik.uni-kassel.de

Experimenteller Bachelor-Studiengang mit dem Abschluss Bachelor of Science in Biophysik oder Nanowissenschaften in Bielefeld
Universität Bielefeld
Website: <http://www.physik.uni-bielefeld.de/nano.html>
Contact: dario.anselmotti@Physik.Uni-Bielefeld.de

Diplom-Studiengang „Mikro- und Nanostrukturen“ in Saarbrücken
Universität des Saarlandes
Website: <http://www.uni-saarland.de/fak7/physik/NanoMikro/InfoMikroNano.htm>
Contact: wz@lusi.uni-sb.de

Literaturhinweise:

BMBF-Programm IT-Forschung 2006 - Förderkonzept Nanoelektronik
Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung;
Bonn, März, 2002.

Vom Transistor zum Maskenzentrum Dresden, Nanoelektronik für den Menschen
Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung;
Bonn, Oktober, 2002.

Nanotechnologie erobert Märkte- Deutsche Zukunfts-offensive für Nanotechnologie
Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung;
Bonn, März 2004.

Bachmann, G.
Innovationsschub aus dem Nanokosmos: Analyse & Bewertung Zukünftiger Technologien (Band 28)
Hrsg.: VDI-Technologiezentrum im Auftrag des BMBF; 1998.

Luther, W.:
Anwendungen der Nanotechnologie in Raumfahrtentwicklungen und -systemen
Technologieanalyse (Band 43)
Hrsg.: VDI-Technologiezentrum im Auftrag des DLR; 2003

Wagner, V; Wechsler, D.:
Nanobiotechnologie II: Anwendungen in der Medizin und Pharmazie
Technologiefrüherkennung (Band 38)
Hrsg.: VDI-Technologiezentrum im Auftrag des BMBF; 2004.

Hartmann, U.:
Nanobiotechnologie – Eine Basistechnologie des 21. Jahrhunderts
ZPT, Saarbrücken, 2001.

Rubahn, H.-G.:
Nanophysik und Nanotechnologie
Teubner Verlag 2002

Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft-WING
Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung;
Bonn, Oktober 2003.

Internetlinks:

Nanotruck- Reise in den Nanokosmos
www.nanotruck.net

Internetreise-Abenteuer hinterm Komma
www.nanoreisen.de

Europäisches Nanotechnologie-Portal
www.nanoforum.org

Nanotechnologieportal des VDI-TZ
www.nanonet.de

Nanotechnologieförderung des BMBF
<http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>

News und Diskussionsforen zur Nanotechnologie
www.nano-invests.de

Nanotechnologieförderung der EU
www.cordis.lu/nanotechnology

Glossar

Brennstoffzelle: Gerät, in dem Wasserstoff und Sauerstoff (meist Luftsauerstoff) ohne Flamme zu Wasser reagiert, wobei sich mit hohem Wirkungsgrad elektrische Energie entnehmen lässt.

Byssusfäden: Im Volksmund auch „Muschelseide“ oder „Muschelbart“ genannt. Material-technisch sehr raffinierte Fäden, mit denen sich Muscheln an Unterlagen anheften. Sie sind am einen Ende elastisch wie Gummi, am anderen starr wie Nylon.

CNTs: Carbon Nano-Tubes, Kohlenstoff-Nanoröhrchen

Cluster: Kleine Häufchen von kleinen Teilchen, hier von Atomen. Cluster haben meist andere Eigenschaften als der ausgedehnte Festkörper des gleichen Materials, u. a. weil Cluster viele Oberflächenatome enthalten.

Diatomeen: Kieselalgen, kleine, in Süß- wie Salzwasser siedelnde Einzeller mit einem sehr kunstvollen Panzer aus Kieselsäure, Siliziumdioxid plus Wasser. D. betreiben Photosynthese und besitzen deshalb auch Lichtleitstrukturen.

DNA: Desoxyribo-Nuklein-Säure, DNS, im Englischen steht statt „Säure“ „Acid“, also DNA. Riesemolekül in der Gestalt einer Doppelhelix, das die Information für den Bau eines Organismus und Rezepte für eine Unzahl von Proteinen enthält.

ESEM: Environmental Scanning Electron Microscope - spezielles Rasterelektronenmikroskop, das an seinem Probenhalter noch Restluft und Feuchtigkeit zulässt. Die Objekte müssen nicht mehr präpariert, etwa mit Gold bedampft werden.

Forisomen: Nach dem lateinischen Wort für „Türflügel“ so genannte Pflanzenproteine, die als Kandidaten für nanoskopische Kunstmuskeln erforscht werden.

Freier-Elektronen-Laser: Erzeugt Laser-Licht mit einem beschleunigten Strahl von Elektronen, die sich in einer Vakuumröhre bewegen.

Frequenzverdoppler: Hier: Material, das die Frequenz von Licht verdoppelt. Dann wird etwa aus infrarotem Licht grünes Licht.

Halbleiter: Material, dessen elektrische Eigenschaften sich gezielt zwischen Isolator und Leiter einstellen lassen. Halbleiter sind zu den wichtigsten Bestandteilen moderner Industrieprodukte wie Computer, Handys etc. geworden.

Lab-on-a-Chip: Im Endstadium der Entwicklung hoch komplexe Chips, die mit Mikromechanik, Mikrofluidik, Nanosensorik und -elektronik komplexe Untersuchungen an Zellen vornehmen können, für die man heute noch ein Institut braucht. Der Name wird auch schon für vergleichsweise einfache mikroskopisch geprägte Objektträger verwendet.

Leukozyten: Weiße Blutkörperchen, verteidigen den Körper, indem sie im Blut Fremdkörper wie Viren und Bakterien, aber auch Zelltrümmer oder Krebszellen in sich aufnehmen oder, als Lymphozyten, Antikörper produzieren. Antikörper sind sehr zielgerichtete Klebemoleküle.

Lichtleitfaser: Leitet Licht mit extrem durchsichtigem Material über weite Strecken, meist für den Daten-, aber auch den Energietransport.

Lithographie: Hier: Die Kunst, im Mikrokosmos Strukturen zu produzieren, was meist mit Photoack geschieht, der mit Licht- oder Elektronenstrahlen beschriftet, schließlich entwickelt wird

und dann, wie gewünscht, Teile seiner Unterlage verdeckt oder für Ätz- und andere Prozesse freigibt.

Maske: Eine Art Dia, das die Strukturen für einen Computerchip enthält, die dann lithographisch auf Wafer übertragen werden.

Mikrolinsfelder: Mikrooptische Elemente, die u. a. für die Informationsübertragung mit Licht wichtig sind.

Mizellen: Kleine, kugelige Gebilde, die von der Natur – hier: der Muschel – auch als Transportbehälter eingesetzt werden.

Phase: Hier: Zustand, etwa: geordnet/ungeordnet, kristallin/amorph

Photosynthese: Grüne Pflanzen, Algen und Cyanobakterien (Blualgen) gewinnen ihre Energie durch die Photosynthese. Mit Hilfe des Sonnenlichtes wandeln sie Kohlendioxid und Wasser in Zucker sowie Sauerstoff um. Die Photosynthese arbeitet mit einer erstaunlichen primären Energieausbeute von mehr als 80 Prozent.

Piezokristalle: Piezoelemente erzeugen Elektrizität, wenn sie gestreckt oder gestaucht werden, so auch den Zündfunken in „elektronischen“ Feuerzeugen. Umgekehrt kann ein piezoelektrischer Kristall mit elektrischen Spannungen hauchfein, auf Bruchteile eines Atomdurchmessers, verformt werden.

Proteine: Große, von Ribosomen aus Aminosäuren zusammengesetzte Moleküle, die in einer Zelle teils als nanoskopische Werkzeuge, teils als Gerüststoffe dienen, für Augenlinsen wie Fingernägel. Die Entschlüsselung des Proteoms, der Summe aller Proteine und ihrer Wechselwirkungen in einer Zelle, steht erst am Anfang.

Quantencomputer: Nutzt die eigentümlichen Regeln der Quantenmechanik, um Probleme etwa der Informationsverschlüsselung zu knacken, die mit konventionellen Computern praktisch nicht zu lösen sind. Noch nicht realisiert.

Reflectine: Spezielle Proteine, die von Organismen zum Aufbau Licht reflektierender Strukturen genutzt werden.

Ribosomen: Nanomaschinen, die – von einem molekularen Band mit Informationen der Erbsubstanz DNA gesteuert – eine Unzahl von Proteinen produzieren können.

Röntgenstrahlung: Kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die u. a. in der Kristallstrukturanalyse zur Bestimmung der nanoskopischen Gestalt von Molekülen dient.

Tunnelstrom: Strom, der eigentlich nicht fließen dürfte, weil er eine isolierende Lücke passiert, der das im Nanokosmos aber doch darf, dann aber extrem von der Größe der Isolierlücke abhängt. Dieser Effekt hat das Rastertunnelmikroskop möglich gemacht.

UV-Strahlung: Kurzwellige Strahlung, die die Erzeugung sehr feiner Chipstrukturen ermöglicht.

Van-der-Waals-Bindung: Schwache chemische Bindung zwischen Molekülen, deren tiefe Ursache Eigenschaften des leeren Raumes sind. Van-der-Waals-Bindungen bestimmen auch die Eigenschaften des Wassers und damit alle Lebensprozesse.

Bildnachweis

- S.4 oben: Kompetenzzentrum Nanoanalytik, Universität Hamburg
S.4 unten: Lambda Physik AG, Göttingen
S.5 oben: Infineon Technologies AG, München
S.5 unten: BergerhofStudios, Köln
S.6 oben links: Chemical Heritage Foundation
S.6 oben+unten rechts, unten links: BergerhofStudios, Köln
S.7 oben links: NASA/ESA
S.7 oben rechts: DESY, Hamburg
S.7 Mitte links: BergerhofStudios, Köln
S.7 unten rechts: Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Kiel
S.8 oben links: REM-Labor, Universität Basel
S.8 Bildstreifen, von oben BergerhofStudios, Köln; dto.; dto.; REM-Labor, Universität Basel; Nobelkomitee Stockholm (bearbeitet); DESY, Hamburg
S.9 oben links: Botanisches Institut Universität Bonn
S.9 oben rechts: REM-Labor, Universität Basel
S.9 Bildstreifen, von oben: BergerhofStudios, Köln; dto.; Fraunhofer Gesellschaft; Botanisches Institut Universität Bonn; dto.; TU Berlin, FU Berlin
S.9 Hintergrundbild: BASF AG
S.10, oben links + rechts: MPI für Metallforschung, Stuttgart
S.10, Mitte rechts: ESA
S.10, unten links: MPI für Metallforschung, Stuttgart
S.11, oben links: Ostseelabor Flensburg, daneben: BergerhofStudios, Köln
S.11, oben rechts: Universität Florenz, Italien
S.11, Mitte rechts: Paläontologisches Institut, Uni Bonn
S.11, unten links: BergerhofStudios, Köln
S.11, unten rechts: SusTech, Darmstadt
S.12, o., M., u. rechts: Bell Laboratories, USA
S.12 links: Lehrstuhl für Biochemie, Uni Regensburg
S.13, oben: Institut für Neue Materialien, Saarbrücken
S.13, Mitte rechts: Degussa AG Advanced Nanomaterials
S.13, unten rechts: Institut für Geophysik, Uni München
S.13, unten: Institut für Physikalische Chemie, Uni Hamburg
S.14, oben + unten links: ESA
S.14, unten rechts: IBM Corporation
S.15, oben + Mitte links: Physik IV, Uni Augsburg
S.15, Mitte rechts+Mitte: Kompetenzzentrum Nanoanalytik, Universität Hamburg
S.15, Grafik unten rechts: BergerhofStudios, Köln
S.15, unten: University of Hawaii, Honolulu
S.16, links: Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen
S.17, oben rechts: Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen
S.17, unten links: IHT RWTH Aachen
S.17, unten rechts: Schott AG, Mainz
S.18, oben links: Bayer AG, Leverkusen
S.18, unten links: MPI für Quantenoptik, Garching
S.19, alle Bilder: DESY, Hamburg
S.20, oben links: BergerhofStudios, Köln
S.20, unten rechts: Institut für Neue Materialien, Saarbrücken
S.21, oben links: HILIT, EU Joule III-Programm
S.21, oben rechts: NASA/ESA
S.21, unten rechts: Universität Stuttgart
S.22, alle Bilder: BergerhofStudios, Köln
S.23, oben links: National Semiconductor, Feldafing
S.23, unten rechts: Advanced Micro Devices, Dresden
S.24, oben rechts: Grafik: BergerhofStudios, Köln
S.24, Mitte links: Experimentalphysik IV RUB, Bochum
S.24, unten: Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Kiel
S.25, oben rechts: Grafik: BergerhofStudios, Köln
S.25, unten: IHT RWTH Aachen
S.26, oben rechts: IBM Corporation
S.26, unten links: Infineon Technologies AG, München
S.26, unten rechts: IBM/Infineon, MRAM Development Alliance
S.27, oben: Experimentalphysik IV RUB Bochum
S.27, Mitte: Kompetenzzentrum Nanoanalytik, Universität Hamburg
S.27, rechts: Lehrstuhl für Nanoelektronik, RUB Bochum
S.27, unten: IBM Speichersysteme Deutschland GmbH, Mainz
S.28: Siemens AG, München
S.29, oben rechts: Nanosolutions GmbH, Hamburg
S.29, Mitte: Institut für Neue Materialien, Saarbrücken
S.30, unten: Siemens AG, München
S.30, oben: DaimlerChrysler AG
S.30, unten links: Fraunhofer Allianz Optisch-funktionale Oberflächen
S.30, unten rechts: Unikversity of Wisconsin-Madison
S.31, oben: Robert-Bosch GmbH, Stuttgart
S.31, Mitte: Audi/Volkswagen AG
S.31, unten links: VW Pressarchiv
S.31, unten rechts: Robert-Bosch GmbH, Stuttgart
S.32, oben links: Bayer AG, Leverkusen
S.32, oben rechts: Institut für Neue Materialien, Saarbrücken
S.32, unten links: Keramag AG, Ratingen
S.33, oben: BASF AG, Ludwigshafen
S.33, Mitte: MTU Friedrichshafen
S.33, unten rechts: Siemens AG, München
S.34, oben links: Bayer AG, Leverkusen
S.34, oben rechts: Siemens AG, München
S.34, unten: Infineon Technologies AG, München
S.35, oben links: Siemens AG, München
S.35, oben rechts: Siemens AG, München
S.35 Mitte: Charité Berlin / Institut für Neue Materialien, Saarbrücken
S.36, oben rechts: BergerhofStudios, Köln
S.36, links: Infineon Technologies AG, München
S.36, rechts: IIP Technologies, Bonn
S.37, oben links: Siemens AG, München
S.37, oben rechts: Fraunhofer ISIT
S.37, Mitte rechts: Oxford University
S.37, unten links, rechts: Infineon Technologies AG, München
S.38, oben links: OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg
S.38, unten: Grafik: BergerhofStudios, Köln
S.39, oben: Park Hotel Weggis, Schweiz
S.39, unten: Siemens AG, München
S.40, oben links: BergerhofStudios, Köln
S.40, unten links: Bayer AG, Leverkusen
S.41, oben: AIXTRON GmbH, Aachen
S.41, rechts: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg
S.42: Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart
S.43, oben links, rechts: MTU Friedrichshafen
S.43, Mitte links: Institut für Luft- und Raumfahrt-Konstruktionen an der Universität Stuttgart
S.43, Mitte rechts: Fuseproject
S.43, unten: Kopf Solardesign GmbH, Hamburg
S.44, oben links: Kollage: BergerhofStudios, Köln
S.44, unten rechts: RWTH Aachen
S.45, oben links: Siemens AG, München
S.45, oben rechts: Infineon Technologies AG, München
S.45, unten: NASA
S.46, Mitte: BergerhofStudios, Köln
S.47: IBM Corporation, Insert: Siemens AG, München



Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.