



PATROUILLE IN DER BLUTBAHN

DER LANGE WEG VON

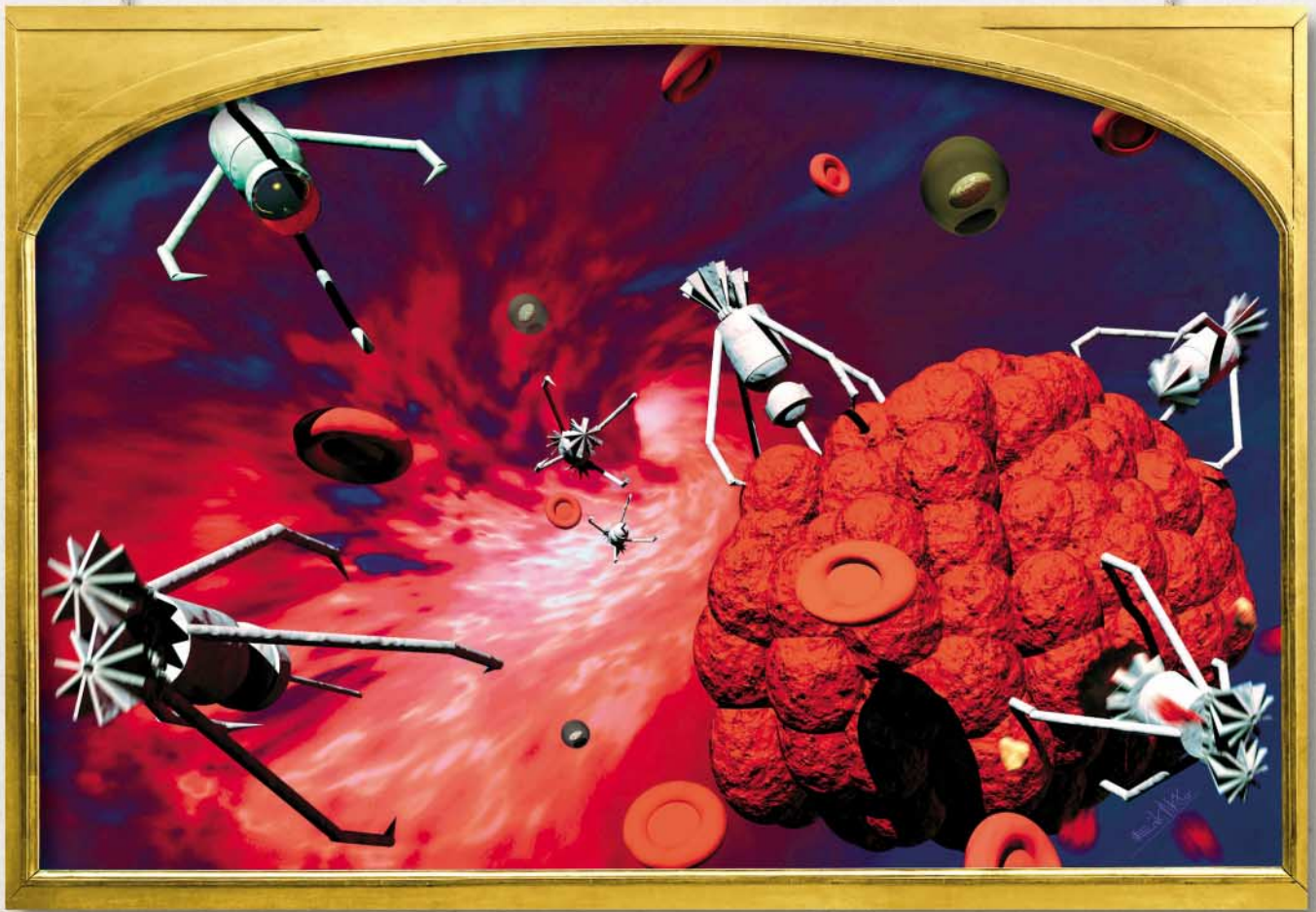
ERSTE PRODUKTE DER NANOTECHNOLOGIE SIND BEREITS AUF DEM MARKT. DOCH FORSCHER TÜFTELN NOCH DARAN, DIE WINZIGEN BAUTEILE GEORDNET IN CHIPS UND WERKSTOFFE ZU INTEGRIEREN

VON NIELS BOEING

Es war eine dieser typischen Erfolgsmeldungen, die inzwischen fast monatlich Medien und auch Börsen elektrisieren. Anfang Juli gab der US-Konzern General Electric (GE) bekannt, man habe eine Diode aus einer Kohlenstoff-Nano-

tube, einem röhrenförmigen Molekül, entwickelt. GE-Forscher hatten ein halbleitendes Nanoröhrchen mit Hilfe elektrischer Felder so manipuliert, dass sich dessen Hälften wie zwei entgegengesetzt geladene Halbleiter verhielten. Der

Effekt entsprach genau dem einer Silizium-Diode: Strom kann nur in einer Richtung hindurchfließen. Doch im Unterschied zum klassischen Halbleiterbauteil hat die Nanotube-Diode einen Durchmesser von nur wenigen Nanometern – Millionstel Millimetern –, und sie muss nicht zuvor mit zusätzlichen Atomen „dotiert“, also gezielt verunreinigt werden, um den Effekt



KÄMPFE GEGEN KREBS

NANO ZU MAKRO

zu provozieren. „So wie Siliziumtransistoren die alte Röhrentechnik verdrängt und das elektronische Zeitalter ermöglicht haben, könnten Nanotube-Bauteile eine neue Elektronik-Ära einläuten“, verkündete Margaret Blohm, Nanotechnik-Expertin bei GE, begeistert.

Ganz so einfach, wie Blohms Äußerung vermuten lässt, ist die Sache jedoch nicht. Denn bislang weiß niemand, wie man derartige Prototypen aus einzelnen Nanoröhrchen präzise zu Millionen integrierten Schaltkreisen auf einem Chip zusammenfügt. „Die Herstellung von

sehr, sehr kleinen Dingen ist für sich genommen eigentlich die unspektakulärste Seite der Nanowissenschaft. Die Natur kann das seit Milliarden von Jahren“, urteilt denn auch Charles Lieber. Der Chemiker von der Harvard University ist einer der führenden Köpfe jener Forscher, die nach dem Heiligen Gral der Nanotechnologie suchen: einer funktionierenden „Bottom-up“-Technologie, mit der man „von unten“, aus nanoskaligen Bausteinen, nützliche Dinge für den menschlichen Alltag zusammenfügen kann; mit der man die Brücke

vom Nano- zum Makrokosmos schlägt. „Ich glaube, dass man nur mit Bottom-up-Technologien die Einzigartigkeit der Nanotechnik nutzen kann“, sagt Lieber. „Wir müssen ein allgemeines und verlässliches Syntheseverfahren finden, mit dem wir die Zusammensetzung, die Größe und Struktur eines Nanobauteils auf unterschiedlichen Längen kontrollieren können.“ Und dieses Verfahren müsse bei Zimmertemperatur funktionieren, nicht bei den hohen Betriebstemperaturen, die heute in der Fertigung der Halbleiterindustrie üblich sind.

Die ist zwar inzwischen in der Sphäre der Nanotechnologie angekommen, die nach allgemeiner Konvention alles umfasst, was kleiner als 100 Nanometer ist. Aber die Halbleitertechnik setzt auf Verfahren, die kleinste Strukturen ausschließlich aus großen Materialmengen erzeugen können. Deshalb werden diese Methoden auch als „Top-down“-Technologien bezeichnet. Die Photolithographie etwa prägt mit Hilfe von Belichtungs- und Ätztechniken in zwanzig bis dreißig Arbeitsschritten die Schaltkreise heutiger Computerchips in vergleichs-

logien allein deshalb eine Sackgasse. Das ist kein Grund zur Beunruhigung: An der Kreuzung in die Zukunft stehen zwei weitere Wege zur Wahl. Der eine Weg, in den die meisten Hoffnungen gesetzt werden, besteht darin, das physikalische Prinzip der „Selbstorganisation“ auszunutzen. Der andere Weg, den viele für nicht gangbar, einige sogar für einen Pfad in den Abgrund halten, ist die „Mechano-Synthese“ einer kleinen Gruppe von Visionären.

Der Begriff „Selbstorganisation“ klingt nach Trickserei, und doch handelt

Selbstorganisation ist etwa dann am Werk, wenn sich in den Atomen eines Lasers eine Ordnung energetischer Zustände bildet, die dazu führt, dass alle Atome Licht exakt auf derselben Wellenlänge abstrahlen. Anstatt wie eine Glühbirne Lichtteilchen unterschiedlicher Energie in den gesamten umgebenden Raum abzugeben, ist ein Laserstrahl scharf gebündelt. Das wohl spektakulärste Beispiel einer Selbstorganisation von Materie ist das Leben, bei dem aus diffusen Zellklumpen komplexe Organismen entstehen.

DAS ORDNUNGSPRINZIP DER SELBSTORGANISATION GEHÖRT ZU DEN WICHTIGSTEN WISSENSCHAFTLICHEN ENTDECKUNGEN IN DER ZWEITEN HÄLFTE DES ZWANZIGSTEN JAHRHUNDERTS

weise große Siliziumblöcke ein. Das Verfahren ist seit seiner Erfindung in den späten 30er Jahren so verfeinert worden, dass auf den neuesten Prozessoren inzwischen Strukturen von 90 Nanometern Größe im industriellen Maßstab hergestellt werden können. Im Labor ist die Halbleiterindustrie sogar schon bei Prototypen von 65-Nanometer-Transistoren angekommen, und Größen bis hinab zu 30 oder 40 Nanometern sind prinzipiell möglich. Von molekularen Dimensionen ist das jedoch noch weit entfernt, und die Gesetze der Optik verhindern, dass derart feine Strukturen mittels Photolithographie erreichbar sind.

FÜR DIE GROSSEN VISIONEN von Schaltkreisen, Maschinen und Biosensoren aus Molekülen sind Top-down-Techno-

es sich dabei um eine der größten wissenschaftlichen Entdeckungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Leider ist sie bislang noch nicht recht ins öffentliche Bewusstsein vorgedrungen. Ein Schicksal, das sie übrigens mit der Nanotechnologie teilt: Eine im Juli veröffentlichte Studie fand heraus, dass 80 Prozent der US-Amerikaner von Nanotechnologie nur eine vage oder gar keine Vorstellung haben.

Dabei kann es die Selbstorganisation in ihrer historischen Bedeutung durchaus mit der epochalen Entdeckung der Quantenmechanik aufnehmen. Und so wie deren Prinzipien die Computerrevolution der vergangenen Jahrzehnte ermöglicht haben, könnten auf Selbstorganisation beruhende Verfahren die entscheidenden Werkzeuge der Nanotechnologie werden.

Bei diesen Beispielen kommt die geordnete Struktur ohne menschliches Zutun zustande. Für den Menschen sieht es daher so aus, als würde die Ordnung von selbst entstehen. Doch walten hier keine magischen Kräfte, sondern die Gesetze der Thermodynamik. Nach denen hat das Auftreten von Selbstorganisation vier Voraussetzungen: Sie tritt erstens nur in offenen Systemen fernab des thermodynamischen Gleichgewichts auf, die zweitens eine „Symmetriebrechung“ aufweisen, drittens nichtlinear und viertens „dissipativ“ sind.

WAS DAS BEDEUTET, lässt sich gut an dem historischen Experiment des Franzosen Henri Bénard veranschaulichen: Der Physiker hatte eine Flüssigkeit zwischen zwei horizontalen Metallplatten eingeschlossen. Solange beide Metallplatten dieselbe Temperatur haben, ist die Flüssigkeit überall gleich warm. Das System ist geschlossen, Flüssigkeit und Metallplatten befinden sich im thermodynamischen Gleichgewicht. Ein fiktiver Beobachter im Inneren der Flüssigkeit kann darin keine Struktur erkennen: Das System erscheint in allen Richtungen gleich, es ist symmetrisch.

Erwärmt man eine der beiden Platten, bilden sich oberhalb einer bestimmten Temperatur zwischen den Platten Strömungsrollen, die sich abwechselnd rechts- und linksherum drehen. Das System ist nun offen, weil beständig Energie hineinfließt, und hat sich vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernt. Die Flüssigkeit hat eine Struktur. Der Beobachter kann darin verschie-

TUNNELEFFKT ALS MESSINSTRUMENT

IM NANOKOSMOS MACHEN SICH EFFEKTE BEMERKBAR, die kein Gegenstück in der makroskopischen Welt haben. Der für die Nanotechnik wichtigste ist der „Tunneleffekt“. Er beruht auf der Entdeckung der Quantenmechanik, dass sich für Elementarteilchen wie Elektronen keine festen Aufenthaltsorte angeben lassen, sondern nur Aufenthaltswahrscheinlichkeiten. Weil die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Elektron auch außerhalb eines energetischen Käfigs aufhält, nicht null ist, entweichen Elektronen mitunter tatsächlich aus dem Energietopf – sie „durchtunneln“ die Energiebarriere. Praktische Anwendung findet dies im wichtigsten Analyse-Werkzeug der Nanotechnologie, dem Rastertunnelmikroskop. Bei ihm befindet sich eine dünne Metallspitze wenige Nanometer über den Oberflächenatomen einer metallischen Probe. Elektronen aus der Mikroskopspitze können die Distanz zwischen Metallspitze und Oberfläche per Tunneleffekt überwinden und in die Probe wandern – es fließt ein schwacher Strom quasi durch das Nichts hindurch. Aus der Stromstärke lässt sich der Abstand von Spitze zu Probe und daraus ein atomares Oberflächenprofil der Probe errechnen.



LEGO AUS DNA

dene Orte und Richtungen in der Flüssigkeit unterscheiden: Die Symmetrie ist gebrochen.

Am Anfang einer solchen Symmetriebrechung steht immer eine zufällige geringfügige Abweichung des Systems von seinem ungeordneten Zustand. Damit diese sich zu der neuen Struktur im gesamten System auswächst, muss sich die Störung rasant ausbreiten. „Das ist wie bei einer Lawine, die einen verschneiten Berghang hinunterjagt. Ein wenig Schnee kommt ins Rutschen und reißt dann weiteren Schnee mit“, erläutert Eckehard Schöll, Physiker an der TU Berlin und Experte auf dem Gebiet der Selbstorganisation. Dieser Lawineneffekt tritt nur bei nichtlinearem Verhalten auf – in Systemen, in denen sich eine Eigenschaft nicht gleichmäßig, sondern exponentiell verändert. Die Energie, die nun konstant durch das System strömt und dabei die neue Ordnung ermöglicht, lässt sich nicht mehr zurückgewinnen. Dieses Verhalten wird „Dissipation“ genannt, was am ehesten mit „Reibung“ übersetzbar ist.

Ordnung durch Selbstorganisation entsteht also dort, wo nicht wiedergewinnbare Energie hinzugefügt wird und sich eine Symmetriebrechung durch einen nichtlinearen Lawineneffekt ausbreitet. „Das führt zu einem neuen Bild von der Materie: Sie ist nicht mehr passiv wie im mechanischen Weltbild, sondern mit der Fähigkeit zu spontaner Aktivität ausgestattet. Dieser Wechsel ist so grundlegend, dass wir glauben, von einem neuen Dialog mit der Natur sprechen zu können“, haben die Wissenschaftler Ilya Prigogine und Grégoire Nicolis in ihrem Buch

„Die Erforschung des Komplexen“ geschrieben.

Den Enthusiasmus der beiden dürften viele Nanotechniker teilen. Denn für sie ist die Entdeckung der Selbstorganisation ein Segen. Mit Hilfe des Effekts können die Wissenschaftler in kürzester Zeit Milliarden feiner Strukturen gleichzeitig herstellen, wenn sie in ihrer technischen Anordnung nur die richtigen Parameter wählen.

AUF EINIGEN GEBIETEN der Nanotechnologie hat man damit bereits erste Erfolge erzielt. Die Chemie etwa nutzt

NANOPARTIKEL MIT EIGENHEITEN

GENERELL ZEIGEN ALLE FESTKÖRPER VERÄNDERTE EIGENSCHAFTEN, wenn sie als Nanopartikel vorliegen. Wichtigster Grund: Die Bedeutung der Oberflächenatome nimmt zu. Bei einem Durchmesser von drei Nanometern enthält ein Nanoteilchen etwa 800 Atome, von denen ein Drittel die Oberfläche bildet. Der Anteil der Oberflächenenergie an der Gesamtenergie des Teilchens ist hier größer als in Mikropartikeln. Deshalb schmilzt ein Granulat aus Nanoteilchen bei niedrigeren Temperaturen als ein herkömmliches Pulver desselben Materials; Galliumsulfid schmilzt dann zum Beispiel bei 500 Grad Celsius statt wie gewöhnlich bei 1600 Grad. Der Grund: Die Auflösung der Teilchenoberflächen trägt dazu bei, die Gesamtenergie zu minimieren, ein Energiezustand, den alle Festkörper anstreben.

die Selbstorganisation seit längerem, um neue Werkstoffe mit ganz ungewöhnlichen Eigenschaften zu erzeugen. Das gelingt, indem man in Trägermaterialien Nanopartikel einbettet, an deren Oberflächen Moleküle angelagert sind. Macht man daraus einen hauchdünnen Film, dem etwa durch Belichtung Energie hinzugefügt wird, ordnen sich die Nanopartikel zu netzartigen Strukturen an. Die zugehörigen Moleküle sammeln sich an der Oberfläche und lösen dort den beabsichtigten Effekt aus: Sie machen einen ausgehärteten Film kratzfest, nichthaftend oder schmutzabweisend. Auf Glas aufgetragen, können derart eingebettete Nanopartikel auch durch den physikalischen Effekt der Plasmonenresonanz transparente Farbschichtungen erzeugen (siehe Kasten Seite 71). In Nanosolarzellen führt ein Selbstorganisationseffekt letztlich dazu, dass sich aus einer zufälligen Bewegung von Elektronen in einem Gemisch aus Farbstoffmolekülen, Halbleiter-Nanoteilchen und einem Elektrolyt eine klare Stromrichtung herausbildet (siehe Artikel Seite 74).

AUCH HALBLEITERSPEZIALISTEN haben inzwischen die Segnungen der Selbstorganisation entdeckt. Anders als ihren Kollegen aus der Chemie geht es den Physikern jedoch nicht um neue Werkstoffe an sich. Sie interessieren sich für die Komponenten einer neuen Nanoelektronik. Das sind zum einen hauchdünne Drähte, welche die winzigen Schaltkreise in künftigen Prozessoren miteinander verbinden, ja sogar bilden könnten. Mit photolithographischen Verfahren sind solche Schaltelemente

nicht herstellbar. Zum anderen haben es den Halbleiterforschern die so genannten Quantenpunkte angetan (siehe Kasten Seite 69). Dank ihrer ungewöhnlichen Energiestruktur lassen sich aus Quantenpunkten vielleicht Ein-Elektronen-Schalter konstruieren: Nehmen sie ein Elektron „an Bord“, ist das entsprechende Energielevel belegt, und der Quantenpunkt blockiert fortan den Transport weiterer Elektronen derselben Energie.

Quantenpunkte sind aber auch zum Bau von Lasern verwendbar. Wenn Elektronen in einem Quantenpunkt – genau wie in einem Atom – von einem energiereicheren Zustand in einen energieärmeren wechseln, emittieren sie ein Lichtteilchen. Dieter Bimberg, Festkörperphysiker an der TU Berlin, fand zusammen mit dem Physik-Nobelpreisträger Zhores Alferov vom Ioffe-Institut in St. Petersburg heraus, dass sich diese Emission auch gezielt anregen lässt. Damit hatten die beiden ein neues Lasermedium entdeckt. 1994 stellten sie den ersten Quantenpunktlaser her.

„Um ein solches Gerät zu bauen, müssen Sie bis zu 200 Milliarden Quantenpunkte pro Quadratzentimeter erzeugen, und das in kürzester Zeit“, erläutert Bimberg. Hier kommt wieder die Selbstorganisation ins Spiel. Dampft man den Halbleiter Indiumarsenid auf einen Galliumarsenid-Untergrund auf, lagern sich zunächst einzelne Indiumarsenid-Inseln von der Höhe eines Atoms ab. Folgen weitere Schichten, legen diese sich nicht einfach irgendwie auf die Inseln, sondern bilden dabei abgeschrägte Seiten aus, bis schließlich winzige Pyramiden auf dem Untergrund

gewachsen sind – die Quantenpunkte. Der Grund dafür ist einfach: Pyramiden haben eine kleinere Oberfläche als Würfel und somit eine geringere Oberflächenenergie. Auch die Größe der Pyramiden bleibt nicht dem Zufall überlassen, sondern hängt unter anderem von der Temperatur, der Menge des aufgedampften Materials und dem Dampfdruck der Atome ab. Kontrolliert man diese Parameter, kann man der Selbstorganisation nachhelfen.

Eine andere mögliche Anwendung von Quantenpunkten wird an der RWTH Aachen untersucht. Dort beschließen Forscher einen Halbleiterblock mit energiereichen Ionen, in dessen Innerem sich eine magnetische Kobalt-Eisen-Schicht wie Schinken in einem Sandwich befindet. Diese Technik wird „Sputtering“ genannt. Die Selbstorganisation bewirkt dabei, dass die Ionen allmählich in der Halbleiteroberfläche ein regelmäßiges Muster herausschlagen, sodass zahlreiche nanoskopisch kleine Siliziumhügel stehen bleiben. Wenn die Vertiefungen dazwischen die magnetische Schicht erreicht haben, wird der Vorgang abgebrochen. „Das Resultat ist ein ausgedehntes Feld von vielen Nanomagnet-Inseln“, erläutert der Halbleiterphysiker Thomas Bobek. „Über die Energie der Ionen können wir Größe und Abstand dieser Inseln steuern.“

Die Abstände, die mit diesem Verfahren erreichbar sind, liegen zwischen 15 und 80 Nanometern. Der Durchmesser der Nanomagneten beträgt etwa die Hälfte des Abstandes – sehr wenig, wenn man bedenkt, dass die ovale magnetische Fläche, die in heutigen Festplatten ein Bit repräsentiert, noch ungefähr 200 Nanometer lang ist. Die Aachener Forscher wollen aus ihren Nanomustern in einem EU-Forschungsverbund hochdichte Magnetspeicher entwickeln, die etwa 125 Gigabyte pro Quadratmeter fassen. Das entspräche dem Fassungsvermögen von rund 50 DVDs auf der Fläche eines Centstücks.

ALLE BISHER GESCHILDERTEN nanotechnischen Anwendungen der Selbstorganisation nutzen die Strukturen aus, die sich während des Ordnungsprozesses herausbilden. Für eine funktionierende Nanoelektronik ist das allerdings

NANORÖHRCHEN ALS STROMLEITER

EINES DER UNGEWÖHNLICHSTEN RIESENMOLEKÜLE wurde erst 1991 von dem Japaner Sumio Iijima entdeckt: das Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder „Nanotube“. In seiner Röhrenwand sind die Kohlenstoffatome zu einem gleichmäßigen Sechseckmuster angeordnet, das vom Graphit bekannt ist. Die beiden Enden der Röhre werden jeweils von einer halbkugelförmigen Kappe geschlossen. Ein solches einwandiges Nanoröhrchen hat nur einen Nanometer Durchmesser. Häufig sind aber viele Röhren zu mehrwandigen Nanotubes ineinander verschachtelt. Die Moleküle haben ungewöhnliche Eigenschaften: Je nach Ausrichtung des Sechseckmusters sind sie elektrisch leitend oder halbleitend; ihre Steifigkeit ist zehn bis zwanzig Mal größer als die von Stahl; die metallischen Varianten leiten Strom besser als Kupfer und Wärme schneller als ein Diamant. Noch sind die Nanoröhrchen teuer: Je nach Reinheitsgrad und Menge kostet ein Gramm einwandiger Nanotubes zwischen 250 und 1000 Euro, ein Gramm verschachtelter Röhren immerhin nur zwei Euro.

noch zu wenig. Denn wie kunstvoll man Teilchenstrahlen oder Ionendämpfe in- zwischen auch handhabt: Winzige inte- grierte Schaltkreise kommen dabei nicht heraus. Genau dies ist aber eines der gro- ßen Ziele der Computerindustrie, die derzeit die treibende Kraft der Nanofor- schung ist. Denn die Branche muss, wenn sie ihre bisherigen Wachstums- raten bei fortgesetzter Miniaturisierung von Prozessoren beibehalten will, neue Verfahren finden, die in einigen Jahren Chips im Nanokosmos mit derselben Präzision erzeugen wie bislang die Pho- tolithographie.

Nanoforscher setzen hier vor allem auf zwei Ansätze: Bei einem werden mit- tels „gerichteter“ Selbstorganisation er- zeugte Strukturen mit klassischer Pho- tolithographie kombiniert. Der andere Ansatz beruht auf der so genannten Self- Assembly, der Selbstorganisation von ganzen Materiebausteinen, wie sie etwa in den Zellen von Organismen auftritt.

DER CHEMIKER Charles Lieber hat sich seit einiger Zeit sehr erfolgreich der ersten Möglichkeit verschrieben. Sein Grundbaustein sind Nanodrähte aus Si- lizium, die er in großen Mengen mittels chemischer Dampfablagerung gewinnt. Bei Breiten von nur wenigen Nano- metern entfalten diese Drähte ganz neue Eigenschaften. Anders als in ausgedehnten Kristallen können Elektronen hier auf einmal mehrere hundert Nanometer durch die Siliziumatome wandern, be- vor sie mit einem weiteren Elektron zusammenstoßen. Das hat zur Folge, dass sich solche „Quan- tendrähte“ viel weniger erwärmen als gewöhnli- che. Die Drähte werden in eine Lösung gebracht und in einem flachen Trog von zwei Seiten zusammengeschoben. Dadurch richten sie sich schließlich parallel aus wie schwimmende Baum- stämme, die auf dem Weg zum Sägewerk eine Schleuse passieren. „Wir können den Abstand der Drähte auf bis zu 30 Nanometer kontrollieren“, sagt Lieber. Die Leiterbahnen gegenwärtiger Prozes- soren von Intel oder AMD sind dagegen mindestens 90 Nanometer breit.

Um aus den Silizium-Drahtbündeln Chips zu machen, setzt Lieber dann wie-

QUANTENPUNKTE ALS LASERBAUSTEIN

WEIL HALBLEITERPARTIKEL ZWISCHEN ZWEI UND ZWANZIG NANOMETERN DURCHMESSER eine ungewöhnliche Energiestruktur aufweisen, bezeichnet man sie auch als „Quantenpunkte“. In solch einem Nanohalbleiter, der bereits aus tausenden von Atomen besteht, überlagern sich die Energiezustände der Elektronen zwar schon zu einer Art von Energiebändern wie im ausgedehnten Festkörper. Es gibt in den Punkten aber noch scharf definierte Energielevels wie in einem riesigen „künstlichen“ Atom. In einem Galliumarsenid-Quantenpunkt von zehn Nanometern Durchmesser liegen die Energielevels mit 100 Millielektronenvolt weiter auseinander, als es der normalen thermischen Energie eines Elektrons bei Zimmertemperatur – rund 26 Millielektronenvolt – entspricht. Wegen dieses ausgeprägten Abstands eignen sich Quantenpunkte als Medium für besonders reines Laserlicht.

der die bewährte Photolithographie ein. Mit ihrer Hilfe werden Elektroden über die Drahtbündel gelegt. „Ganz gleich, mit welcher Technik man Nanobau- steine herstellt: Man muss am Ende immer mikroskopische Kontakte anlegen, wenn man daraus ein elektronisches Gerät machen will“, betont er. Ist Liebers Nanochip fertig, weiß man zwar nicht, wo genau sich Elektroden und Drähte kreuzen. „Statistisch“ kämen aber genügend Kreuzungspunkte dabei heraus. Und die lassen sich mit Strom- pulsen so vermessen, dass sie schließlich als Schaltkreise eingesetzt werden kön- nen. „Ich will keine Elektronik bauen, die auf Transistoren basiert“, sagt Lieber (siehe Grafik Seite 72).

ABER KÖNNTE MAN nicht gleich Orga- nismen die ganze Arbeit machen lassen – eine Elektronik mittels biologischer Self-Assembly herstellen? Diese Frage stellte sich Angela Belcher, Chemikerin am Massachusetts Institute of Techno-

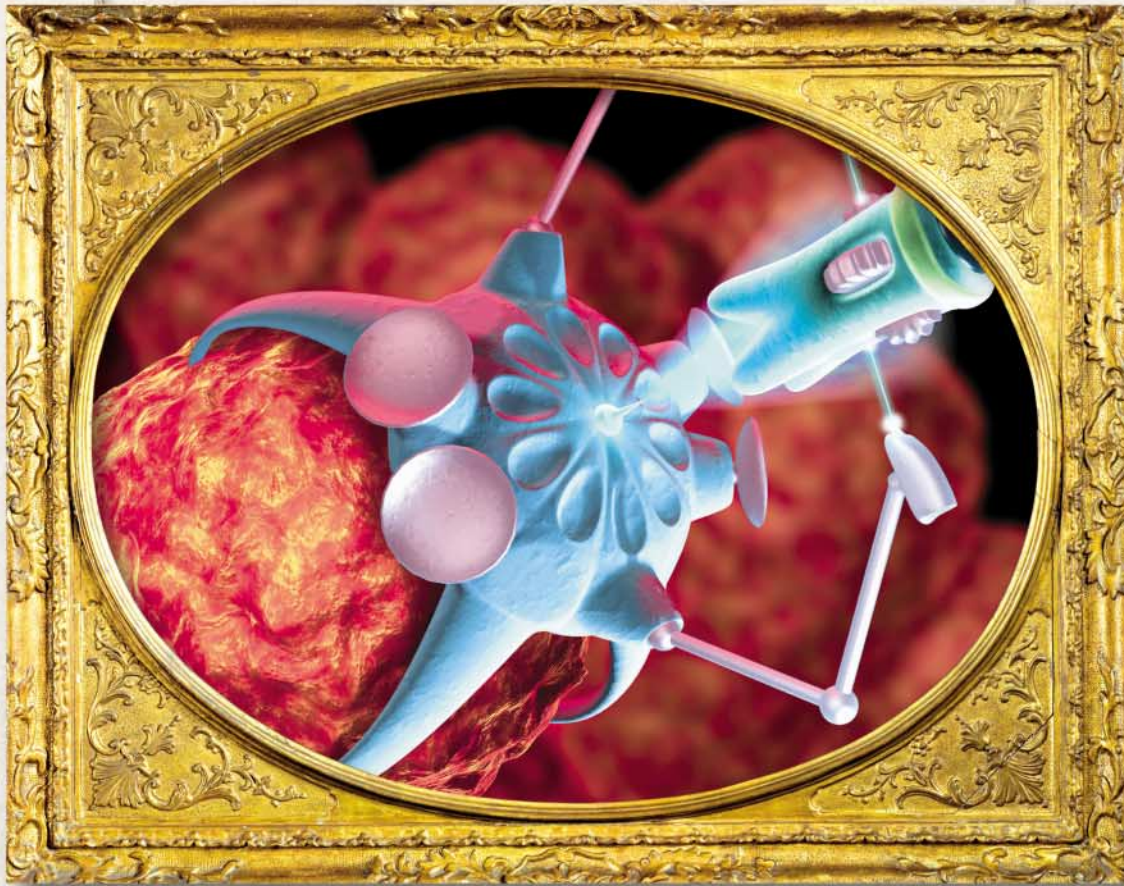
Cover gehoben wurde (siehe Porträt Seite 77). Douglas Lauffenburger, Bio- Ingenieur am MIT, sieht in der Ver- schmelzung von Biologie und Nano- technik die Zukunft: „Im letzten Jahrhundert hat die Festkörperphysik die Computerwelt und die Mikroelek- tronik revolutioniert. Die Revolution dieses Jahrhunderts wird das Ausnutzen der Molekularbiologie sein, so wie es Angela Belcher macht.“

Auch andere Nanoforscher beziehen ihre Inspiration aus der Self-Assembly- Technik der Natur. Besonders angetan sind einige vom DNA-Molekül, das in den Zellkernen aller Lebewesen steckt und deren Bauplan enthält. Es gleicht einer verdrillten Strickleiter, deren Sprossen von vier möglichen Basenpaa- ren gebildet werden: je zwei aus den Mo- lekülen Adenin (A) und Thymin (T), je zwei aus Guanin (G) und Cytosin (C). Durch Erhitzen der Enzyme lassen sich die beiden Stränge der DNA-Strickleiter voneinander lösen.

SILIZIUMDRÄHTE VON WENIGEN NANOMETERN BREITE ENTFALTEN GANZ NEUE EIGENSCHAFTEN: SIE ERWÄRMEN SICH ZUM BEISPIEL NUR WENIG, WENN ELEKTRISCHER STROM DURCH SIE HINDURCHFLIESST

logy (MIT), vor einigen Jahren und setzte ein verblüffendes Forschungspro- gramm in Gang: Sie veränderte die Gene von länglichen Viren, die normalerweise Bakterien befallen, dahingehend, dass diese eine neue Proteinhülle entwickeln. An der Hülle lagerten sich anschließend Halbleitermaterialien zu langen Nano- drähten an. Die Ergebnisse ihrer Arbeit sind so beeindruckend, dass die For- scherin vom US-Magazin „Forbes“ mit vier weiteren Nanokoryphäen aufs

Der Clou ist nun, dass sich an einer bestimmten Folge von Basen eines sol- chen Einzelstrangs immer nur ein Strang anlagern kann, dessen Basen die exakten Gegenstücke bilden. Zur Folge AGC passt nur TCG. Diese Eigen- schaft macht DNA-Einzelstränge zu einer Art molekularem Lego, aus dem sich im Prinzip auch Strukturen bauen lassen, die mit den langen Chromo- somenfäden aus DNA nichts mehr zu tun haben.



ASSEMBLER DOCKT AN

„Als chemisches Baukastensystem wird DNA ein ganz wichtiger Bestandteil für Bottom-up-Nanotechniken werden“, ist sich Nadrian Seeman, Chemiker an der New York University, sicher. Ziel ist es, aus DNA-Strängen ausgedehnte Gerüste zu bauen. Lagert man

förmig geknickte Stränge lagern sich zu einem Kreuz aneinander, wenn sich die Knicke in der Mitte treffen und sich je zwei Teilstücke exakt ergänzen.

Interessant wird die Anordnung, wenn man an den vier Enden an jeweils einem Strang eine kurze Basenfolge her-

genau weiß, warum sie funktionieren“, sagt der Physiker Friedrich Simmel von der Universität München, der ebenfalls mit dem DNA-Lego experimentiert. Die Kreuze der Holliday-Junctions kämen zum Beispiel nur zustande, wenn in der Lösung auch Magnesiumionen vorhanden sind. Es fehle auch noch an „Transport- und Kontrollmechanismen, die genau steuern, wo, wann und in welcher Reihenfolge eine Nanokomponente installiert werden soll“.

Die Vorstufe zu einem Lastenträger auf der Nanobaustelle hat Nadrian Seeman kürzlich immerhin vorgestellt: einen „DNA-Läufer“. Dabei handelt es sich um zwei Stränge, die an einem Ende miteinander verbunden sind. Die beiden freien Sticky Ends stellen die Füße dar, die sich mit komplementären Abschnitten eines als Schiene dienenden DNA-Strangs verbinden können. Mit Hilfe eines Enzyms wird ein Fuß gelöst und ein Stück weiter wieder angelagert, dann

INSPIRATION AUS DER NATUR: MANCHE NANOFORSCHER WOLLEN DNA-STRÄNGE ALS EINE ART MOLEKULARES LEGO VERWENDEN UND DARAUS WINZIGE ELEKTRONIKBAUTEILE ZUSAMMENBASTELN

nämlich an die Stränge gleichzeitig elektronische Nanobauteile an, etwa Transistoren aus Kohlenstoff-Nanoröhren, könnten diese automatisch zusammengefügt werden, wenn das „DNA-Lego“ einrastet.

1991 gelang es Seeman und Kollegen erstmals, sechs Stränge zu einem Würfel anzuordnen. Jeder Strang bildet dabei ein Quadrat und somit eine der sechs Würfelseiten. Ein anderes Beispiel für eine künstliche DNA-Struktur ist die „Holliday-Junction“: Vier einzelne L-

aushängen lässt. Dieses zunächst unverbundene „Sticky End“ kann sich dann mit einem passend erzeugten „Sticky End“ eines anderen Kreuzes verbinden. So lassen sich viele Holliday-Junctions zu einem regelmäßigen Gitter verknüpfen. Hat man einmal die dafür nötige Abfolge der Basenpaare aller Stränge ausgeknobelt und hergestellt, erledigt sich der Rest im Reagenzglas von allein.

IM PRINZIP JEDENFALLS. „Es sind viele Tricks dabei, von denen man noch nicht

ROGER HARRIS/SPL, ANG. (M) ERIC TSCHERNE

wiederholt sich der Prozess mit dem anderen Fuß. So bewegt sich der Nanoläufer seitwärts, wie die Figuren auf den Fresken der alten Ägypter. Seeman will nun erreichen, dass der Läufer dabei ein Atom transportieren kann.

Einer, der sich dem Transportproblem im Nanomaschinenbau von einer anderen Seite nähert, ist Alex Zettl von der University of California in Berkeley. Zettls Team hat kürzlich ein „Nanotube-Förderband“ hergestellt. Legt man an ein elektrisch leitendes Kohlenstoffröhrchen der Länge nach eine Spannung an, geraten Metallatome, die auf der Oberfläche des Nanotubes angelagert sind, in Bewegung. „Unser System ist wirklich ein wunderbares Werkzeug“, schwärmt Zettl. „Wir können damit beachtliche Mengen an Atomen im Bruchteil einer Sekunde über eine Distanz von ein bis zwei Mikrometern bewegen.“ Ein Geflecht aus Nanotubes, bei dem das Material zwischen verschiedenen Punkten wie über das Schienennetz einer Spielzeugisenbahn flitzt, sei im Prinzip vorstellbar.

Im vergangenen Jahr hatte Zettl bereits einen rudimentären Nano-Elektromotor vorgestellt. In der Versuchsanordnung wurde eine 300 Nanometer lange, rechteckige Siliziumplatte an einem Nanoröhrchen befestigt. Die Röhre hing wie eine Achse zwischen zwei Elektroden. Legte man an zwei weiteren Elektroden vor und hinter dem Siliziumplättchen eine Spannung von wenigen Volt an, drehte es sich aus seiner Ausgangslage. Je nach Spannung konnte Zettls Gruppe diese Auslenkung vergrößern – bis hin zu einer vollen Umdrehung um 360 Grad.

„Unsere künstlichen Geräte haben viele Vorteile gegenüber den molekularen Motoren, die man aus der Biologie kennt“, meint Zettl. Die Natur habe zwar verschiedene lineare oder rotierende Molekularmotoren – beispielsweise die Flagellen von Bakterien – „außerordentlich clever“ designt. „Doch diese Motoren benötigen wässrige Umgebungen mit einer genau ausbalancierten Chemie und sind auch ziemlich langsam. Mehr als ein Kilohertz, also tausend Operationen pro Sekunde, schaffen sie nicht“, sagt Zettl.

DAMIT DÜRFTE ER – unabsichtlich – einer der umstrittensten Figuren der

PLASMONENRESONANZ ALS FARBSTOFFERSATZ

LÖST MAN IN NANOTEILCHEN EINE SO GENANNT „PLASMONENRESONANZ“ AUS, lassen sie sich in Nanofilmen zu hauchdünnen Farbfiltern verarbeiten. Bei diesem Effekt regen einfallende Lichtteilchen bestimmter Wellenlängen Elektronen in der Oberfläche von Nanopartikeln zu kollektiven Schwingungen an. Die Photonen werden also in eine andere Energieform, in „Plasmonen“, umgewandelt. Die Folge: Nur ein Teil der Wellenlängen des Tageslichts wird wieder zurückgestrahlt. Die Nanopartikel lassen die Schicht, in der sie sich befinden, daher transparent farbig erscheinen. Glasschichten etwa, die mit solchen Nanopartikeln versetzt sind, wirken wie eingefärbt. Dieser Effekt hat zwei Vorteile. Eine hauchdünne Schicht genügt, um das Glas bunt zu machen, es muss nicht komplett gefärbt werden. Und man benötigt keine herkömmlichen Farbstoffe mehr, die teuer und nicht immer umweltverträglich zu produzieren sind.

Nano-Community, dem US-Amerikaner Eric Drexler, aus dem Herzen gesprochen haben. Drexlers Vision der Nanotechnologie stellt eine radikal andere Herangehensweise an die Nanowelt dar als übliche Denkansätze. Seine „Mechano-Synthese“ setzt weder auf Top-down-Technologien wie etwa eine modernisierte Photolithographie noch auf Varianten der Selbstorganisation, die in irgendeiner Form von der Biologie inspiriert sind.

Drexler will einen Nanomaschinenbau im wahrsten Sinne des Wortes verwirklichen. Die Grundeinheit seiner Theorie zur Nanokonstruktion ist der Assembler. Das ist eine winzige Fertigungsanlage, die nicht in wässrigen Lösungen, sondern im Vakuum arbeitet. Ihre Förderbänder und Greifarme, allesamt nanoskopische Analogien zu Maschinen in heutigen Industriefabriken, sollen eines Tages „so gut wie alles bauen können, indem sie die richtigen Atome im richtigen Muster aneinander binden“, sagt Drexler. Bislang existiert der Assembler lediglich als Konzept (siehe Artikel und Interview Seite 82).

DAS HAT ALLERDINGS nicht verhindert, dass auf diese Vision ein Gutteil der Ängste zurückgeht, die der Nanotechnologie entgegengebracht werden. Denn es war Eric Drexler selbst, der von Anfang an vor den destruktiven Kräften Amok laufender Assembler in freier Wildbahn gewarnt hat. Vor kurzem hat er zwar seine Position in einem wichtigen Punkt revidiert: Assembler seien auch möglich und sinnvoll, wenn sie nicht über die Fähigkeit verfügen, sich selbst zu vervielfältigen.

Doch ein ganz anderes Problem bleibt davon unberührt. Es ist bislang nicht einmal auf dem Radar der Nanotech-Skeptiker aufgetaucht: Welche langfristigen gesellschaftlichen Veränderungen könnte ein Siegeszug der Nanotechnologie mit sich bringen?

Ein beachtenswertes Szenario ohne marodierende Assembler hat der renommierte amerikanische Sciencefiction-Autor Neal Stephenson 1995 in seinem Roman „The Diamond Age“ entworfen. Darin hat die Nanotechnologie tatsächlich zu einer Produktion von unvorstellbarer Präzision geführt. Eine technische Revolution ändert aber nie einfach nur Produkte und Herstellungsverfahren. Sie wird auch zum Modell für eine gesellschaftliche Ordnung. Das Netzwerk als Symbol des Internetzeitalters etwa hat flachen Hierarchien zum Durchbruch verholfen.

Stephenson denkt nun die Kontrolle über Atome und Moleküle weiter und erfindet passend dazu eine neoviktorianische Klassengesellschaft, die ihre Wurzeln im radikal mechanistischen Weltbild des 19. Jahrhunderts sieht und unsere liberale Gegenwart verabscheut. Stephenson's unterchwellige Botschaft: So faszinierend die Erschaffung von Gegenständen aus dem scheinbaren Nichts für uns auch sein mag, man wird einen Preis dafür zahlen müssen – die Renaissance strikter sozialer Hierarchien, in der jeder an seinem Platz zu sein hat wie Atome und Moleküle in einer Nanomaschine. Auch wenn die Antwort bisher nur Sciencefiction ist: Die Frage, wie die Errungenschaften der künftigen Nanowelt unser Leben verändern könnten, ist höchst real. ■■