

Perspektiven der Nanotechnologie

Bei der Erforschung von Objekten und Strukturen im Bereich von einigen milliardstel Metern zeigen sich quantenmechanische Effekte, die sich technologisch nutzen lassen. Vorstellbar ist beispielsweise ein Kleinstprozessor, der mit DNS-Molekülen verdrahtet ist, wie die Forschung am Physik-Institut der Universität Zürich zeigt. Seine Realisierung gehört aber nach wie vor ins Reich der Fiktion.

VON HANS-WERNER FINK

Die Ergründung und Beschreibung der Weite des Weltalls und der mikroskopischen Welt waren und sind aktuelle Themen der Wissenschaft; gleichzeitig aber auch immer wieder Gegenstand von Science-Fiction-Geschichten. Die realen Beobachtungsmöglichkeiten mittels optischer Geräte, beginnend mit Fernrohr und Lichtmikroskop, haben immer auch die menschliche Vorstellungskraft beflügelt und dazu inspiriert, sich fiktive Szenarien auszumalen, die teilweise sogar durch spätere Forschungsergebnisse ganz oder zum Teil bestätigt worden sind.

Wahrscheinlich liegt die Faszination des besonders Grossen und des besonders Kleinen darin, dass es sich um Systeme handelt, die sich der unmittelbaren Beobachtung mit Hilfe unserer natürlichen Wahrnehmungsmöglichkeiten entziehen. Allein die Dimension im Vergleich zu alltäglichen Objekten fordert die Phantasie heraus und schafft Raum für Spekulationen darüber, wie wohl diese scheinbar beliebig

grossen oder kleinen Welten strukturiert sein mögen und was dort für Gesetze gelten könnten.

Dabei geht es nicht nur um die Dimension Länge, sondern auch um die Zeiten, die notwendig sind, diese Dimensionen zu begreifen. Das gedankliche Vordringen in die Weite des Weltalls ist, selbst bei Höchstgeschwindigkeitsreisen, mit Zeiträumen verbunden, die mehrere Grössenordnungen über der unserer eigenen Lebenserwartung liegen. In der mikroskopischen Welt der Atome und Moleküle hingegen gibt es Prozesse, die innerhalb unvorstellbar kurzer Zeiten ablaufen. In der Zeit, die wir benötigen, um auch nur einen ganz kurzen Gedanken zu fassen, sind bereits mehrere Milliarden solcher Prozesse, die sich auf molekularer Ebene abspielen, erfolgreich zu Ende geführt worden. Das Interesse des Menschen am besonders Grossen und besonders Kleinen ist letztlich vielleicht mit dem Bewusstsein unserer räumlichen und zeitlichen Endlichkeit verknüpft.

Nanowissenschaft und Nanotechnologie

Die Vorsilbe «Nano» («Zwerg») kommt aus dem Griechischen und wird in den Naturwissenschaften benutzt, um das Milliardstel einer Einheit, wie etwa des Meters oder der Sekunde, zu bezeichnen. Die Begriffe Nanowissenschaft und Nanotechnologie, die sich mittlerweile etabliert haben, sind leider nicht besonders präzise gewählt: «Zwergwissenschaft» ist damit jedenfalls nicht gemeint, sondern Wissenschaft, die sich mit Objekten beschäftigt, deren Dimensionen sich im Bereich einiger Nanometer befinden.

Warum kommt der Längenskala «Nanometer» überhaupt eine besondere Bedeutung zu? Schliesslich gibt es ja auch keine

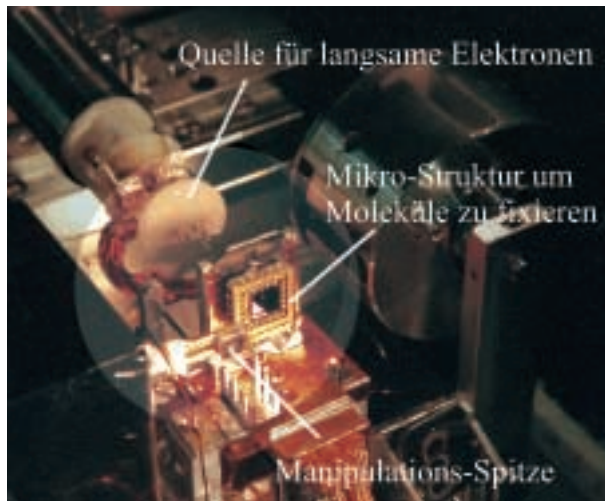
Zentimeter- oder Kilometerwissenschaft. Dies hat zwei Gründe, einen offensichtlichen und einen tiefer gehenden. Der offensichtliche hat mit der Entwicklung der Präzisionsapparate zur Beobachtung von Materie zu tun. Alles, was Strukturen besitzt, die viel kleiner sind als ein Millimeter, ist mit blossen Auge nicht mehr auszumachen. Das Lichtmikroskop hat es erstmals ermöglicht, Strukturen im Bereich eines Tausendstelmillimeters, also eines Mikrometers, aufzulösen.

Der Mikrometer ist die wichtige historische Markierung im Hinblick auf Strukturforschung und Herstellung künstlicher Strukturen, die mit dem Lichtmikroskop und davon abgeleiteten Instrumenten direkt verbunden ist. Der Nanometer ist quasi der natürliche nächste Meilenstein im Hinblick auf das «Sehen» und Herstellen von Strukturen auf noch feinerer Skala. Das ist aber nicht alles, was man mit Wissenschaft auf der Nanometer-Skala verbinden sollte. Während die Schritte vom Meter über den Millimeter zum Mikrometer nicht viel mehr als das Herunterskalieren der Beobachtungsmöglichkeiten um jeweils einen Faktor 1000 bedeuten, ist der Schritt vom Mikrometer zum Nanometer weit mehr als nur noch einmal wieder einen Faktor 1000 kleiner.

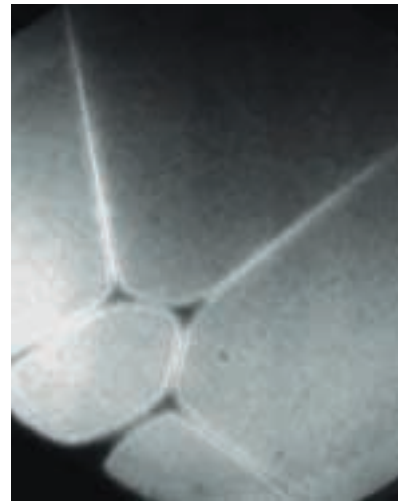
Quantenmechanische Effekte

Der Nanometer ist diejenige Längenskala, bei der intrinsisch quantenmechanische Effekte eine Rolle spielen. Das manifestiert sich dadurch, dass Eigenschaften der Materie, die in der makroskopischen Welt der direkten Beobachtung verborgen bleiben, auf dieser Skala deutlich werden. Nimmt man beispielsweise eine elektrisch geladene Metallkugel von einem Meter Durchmesser und macht

Dr. Hans-Werner Fink ist ausserordentlicher Professor für Experimentalphysik an der Universität Zürich.



Instrument zur Erzeugung von Projektionsbildern einzelner Moleküle durch einen Strahl langsamer Elektronen: Mit Hilfe einer Manipulationsspitze lassen sich einzelne Bio-Moleküle im Nanometerbereich mechanisch und elektrisch manipulieren. Rechts ist das Projektionsbild eines Netzwerks aus DNS-Molekülen gezeigt.



sie allmählich immer kleiner bis zu einem Mikrometer Durchmesser, so passiert nichts Wesentliches, ausser dass die Ladung scheinbar kontinuierlich abnimmt.

Bei einem Durchmesser der Kugel von nur einem Nanometer macht sich jedoch die diskrete Natur der Elementarladung bemerkbar, was dazu führt, dass man durch das Hinzufügen oder Wegnehmen nur eines einzelnen Elektrons messbare Effekte erzielen kann. Diese können zu Funktionen führen, die mit dem Schalten eines Transistors vergleichbar sind; sie haben also auch eine mögliche technologische Bedeutung. Auch die Wellennatur der Elektronen macht sich im Nanometerbereich bemerkbar. Das Bild von Punktladungen, die sich in einem Potenzial bewegen, ist für grosse Objekte meistens

eine angemessene Beschreibung, um den Transport von Elektronen zu verstehen. Bei Objekten von Nanometerdimensionen versagt das Bild jedoch; die Elektronen müssen jetzt durch Materiewellen beschrieben werden.

Der Gegenstand der Nanometer-Wissenschaft ist es, diese Phänomene zu erforschen, und das Ziel der so genannten Nanotechnologie ist es, sich diese Phänomene zunutze zu machen, um technologisch relevante Objekte herzustellen, welche bisherigen Mikrostrukturen, beispielsweise im Bereich der elektronischen Schalt- und Speicherelemente oder in der Sensorik, überlegen sein sollten. Die Forschung auf der Nanometer-Skala ist keineswegs beschränkt auf klassische Objekte der Festkörperphysik, die aus Metallen oder Halbleitern bestehen können. Die Dimension an sich legt es nahe, auch Objekte der Biologie mit einzubeziehen. Schliesslich ist auch die Struktur und die damit verbundene Funktion bei biologischen Molekülen durch Kräfte und Ladungstransport geprägt, die den Gesetzen der Physik gehorchen.

Die Komplexität biologischer Moleküle, beispielsweise das Feh-

len der Symmetrie im Vergleich zu unbelebter kristalliner Materie, ist eine besondere Herausforderung beim Experimentieren mit biologischen Systemen auf der Nanometer-Skala. Auch im Bereich der Nanowissenschaft in Bezug auf biologische Systeme geht es wieder um die zwei Aspekte, einmal den der reinen Forschung, also das Verstehen des biologischen Objekts an sich, und den der Nutzung biologischer Systeme, um neue Strukturen mit einem ausgedachten sinnvollen Zweck herzustellen. Das Neue daran ist eigentlich nur wieder die Dimension der einzelnen Objekte.

Miniaturisierung von Werkzeugen

Werkzeuge aus Metallen gehörten auch vor 100 Jahren schon zum Alltag. Damals wäre ein Werkzeug, das Rechenaufgaben schnell lösen kann, ein gutes Objekt für eine Science-Fiction-Geschichte gewesen. Seit einiger Zeit gibt es diese Objekte tatsächlich. Das wichtigste Ausgangsmaterial dazu liegt an jedem Strand tonnenweise herum, nämlich der Sand, aus dem das Silizium gewonnen wird. Als weiteres waren ein Haufen guter Ideen und viel

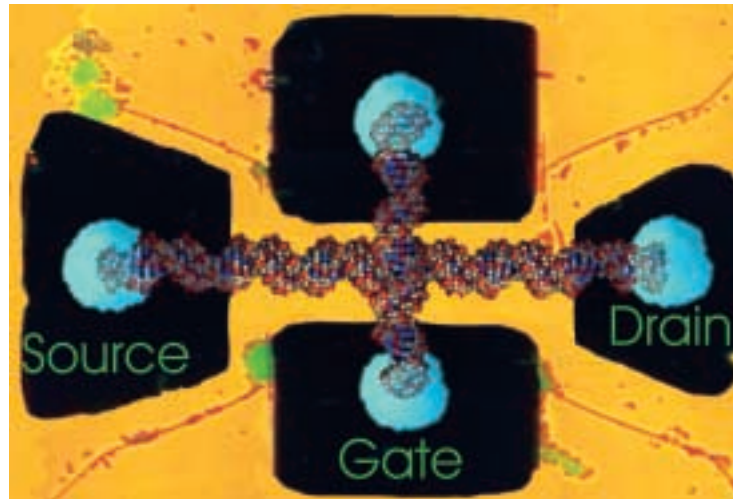
Arbeit im Bereich der Materialforschung und der Mikrostrukturierung mit optischen Geräten notwendig, um aus einem Haufen Sand und ein paar Metallen Computer zu bauen.

Mittlerweile ist eine der grössten Industrien aus diesen Anstrengungen entstanden. Eine ähnliche Entwicklung könnte sich ein heutiger Science-Fiction-Autor auch für biologische Materialien ausmalen. Gibt es auch biologische Objekte, die man genau wie ein paar Sandkörner einsetzen könnte, um neue Objekte mit Funktionen zu erzeugen, die uns nützlich erscheinen? Auch deren ursprüngliche Bestimmung war ja eine andere, als zum Bau eines Mikroprozessors zu dienen. Da biologische Systeme, im Gegensatz zum Sandkorn, das ja einfach nur herumliegt, ihrer Natur nach mit Funktionen versehen sind, besteht sogar die Hoffnung, dass die Nutzung von biologischen Materialien zu Maschinen führen könnte, die zu weitaus komplexeren Aufgaben taugen als ein anorganischer Siliziumchip.

«DNS-Drähte» und molekulare Elektronik

Aufgrund der gebotenen Kürze dieses Artikels über die mögliche zukünftige Bedeutung der Nanotechnologie kann ich hier nicht allen interessanten Aspekten der Nanowissenschaften gerecht werden, sondern will mich auf die Illustration eines aktuellen Beispiels beschränken. Da es sich um ein Projekt handelt, das einen Teil unserer eigenen Forschung an der Universität Zürich betrifft, sollte es mir auch nicht schwer fallen, am Schluss hier die Rolle des Science-Fiction-Autors zu spielen.

Es geht in unserem Projekt um die Möglichkeit, DNS-Moleküle



Detailansicht eines fiktiven Mikro-beziehungswise Nanoprocessors, bei dem Transistorfunktionen mit DNS-Molekülen ausgeführt werden.

zu anderen Zwecken zu benutzen als für die von der Natur vorgesehenen, nämlich als so genanntes «Molekül des Lebens» den genetischen Code zu speichern und zur Verfügung zu stellen. Wie bereits erwähnt, erwartet man von Objekten mit Nanometer-Dimensionen, dass sie Quantenphänomene zeigen, die bei ähnlichen, aber grösseren Objekten nicht beobachtbar sind. Neben der geladenen Kugel, die als Einzel-Elektron-Transistor fungieren kann, sind auch Quantendrähte für zukünftige Elektronikbauteile von Interesse.

Es geht also darum, lange und dünne elektrisch leitende Objekte zu untersuchen. Mit dem heutigen Standard der Mikrostrukturierung, wie sie auch von Computerfirmen benutzt wird, um Prozessoren zu bauen, ist es aber nicht möglich, defektfreie Drähte im Nanometerbereich herzustellen. Das DNS-Molekül hat einen Durchmesser von nur zwei Nanometer, es lässt sich mit Hilfe molekularbiologischer Methoden in beliebig viele, aber kontrollierbar lange Stücke schneiden und einfach vervielfachen. Aus der Sicht des Physikers bietet es sich als natürliches Objekt für einen

Quantendraht geradezu an. Die offene Frage war nur, ob es denn auch in der Lage sein könnte, elektrischen Strom zu leiten.

Um diese Frage zu beantworten, braucht es zunächst einmal ein Instrument, das solche dünnen und fragilen Objekte sichtbar machen kann. Um die Frage der Stromleitung zu beantworten, muss man gleichzeitig mit einer mechanischen Präzision im Nanometerbereich diese Objekte kontaktieren können, um die Möglichkeit zu haben, eine elektrische Spannung anzulegen und den Strom zu messen, der durch das Molekül fliesst. Es gibt heute eine Reihe von Instrumenten, die Abbildungen von Objekten im Nanometerbereich erlauben. Das Instrument, mit dem die DNS-Leitfähigkeit gemessen wurde, zeigt die Abbildung auf Seite 32. Die Moleküle werden über Löcher in einer dünnen Folie gespannt, mittels langsamer Elektronen abgebildet und gleichzeitig mit einer feinen Elektrode kon-

taktiert, um ihre Leitfähigkeit zu messen.

Es hat sich, zur Überraschung vieler, herausgestellt, dass die DNS elektrischen Strom leitet. Die DNS ist also, neben ihren vielen anderen «offiziellen» Aufgaben, auch ein Quantendraht. Warum hat die Natur das so eingerichtet? Hat das etwas mit der biologischen Funktion des DNS-Moleküls zu tun? Es gibt Spekulationen darüber, dass die Leitfähigkeit der DNS im Zusammenhang mit Reparaturaufgaben bei der Strahlenschädigung des Erbmoleküls im Zellkern steht. Dies sind Fragen, die Biologen, Biochemiker und Mediziner interessieren. Physiker fragen nach dem Mechanismus der Leitfähigkeit, der sich wahrscheinlich von dem in Metallen und Halbleitern unterscheidet. Dies alles sind wissenschaftliche Fragen, die jedoch bisher noch unbeantwortet sind.

Neue Prozessoren notwendig

Eine Fiktion, mit der ich diesen Beitrag beenden möchte, bezieht sich auf die DNS als elektrisch leitenden Draht, ungeachtet der Fragen nach dem Warum und Wie. Die Integration von elektronischen Bauteilen auf einem Siliziumchip ist technologisch sehr

hoch entwickelt. Die Materialien sind mittlerweile extrem sauber, und die gängigen Strukturierungstechnologien sind perfektioniert und haben die Grenze des Machbaren erreicht. Es ist daher vielen klar, dass die Entwicklung der Mikroprozessoren in absehbarer Zukunft neue Innovationen braucht.

Mögliche, wenn auch spekulative Fragen im Zusammenhang mit leitfähigen Bio-Molekülen wären: Kann man DNS-Moleküle dazu benutzen, um einen Prozessorchip mit nur zwei Nanometer dicken Leiterbahnen zu verdrahten? Kann man die Fähigkeit der DNS zur Erkennung von bestimmten Plätzen auf einem Chip dazu benutzen, dass sich das elektronische Bauteil, nach nur groben Strukturvorgaben, sogar selbstständig, ohne weitergehende Anweisungen von aussen, verdrahtet? Kann man den Strom durch ein DNS-Molekül durch eine Gate-Spannung, wie bei einem Halbleitertransistor, an- und abschalten, um so neben der Stromleitungsfunktion auch Schaltfunktionen mit DNS-Strukturen zu erzeugen? (Eine Skizze, die solch einen fiktiven DNS-Transistor darstellt, zeigt die Abbildung auf Seite 33.)

Kann man des weiteren mögliche elektronische Schaltfunktionen eines DNS-Transistors mit mechanischen beziehungsweise strukturellen Änderungen im DNS-Molekül sinnvoll verknüpfen? Wird es durch all das eine molekulare Elektronik, basierend auf DNS-Molekülen, geben, die den heutigen Silizium-Prozessoren im Hinblick auf Geschwindigkeit, Anzahl der Transistorfunktionen pro Fläche oder Volumen, Verlustleistung, Herstellungskosten, Umweltfreundlichkeit und anderer wichtiger Parameter weit überlegen ist?

Traum und Realität

Vom heutigen Stand der Wissenschaft aus betrachtet, kann ich eine «korrekte» Antwort auf all diese Fragen geben: vielleicht ja oder vielleicht nein. Momentan haben wir noch nicht einmal die Kontaktwiderstände zwischen den Elektroden und Molekülen, ein scheinbar kleines, aber wichtiges Detail, im Griff.

Das ist eben der Unterschied zwischen Science Fiction und Science Facts – zwischen dem Träumen und dem Versuch, diese Träume Realität werden zu lassen.

