

## **Perspektiven der Nanotechnologie**

Das spekulative, philosophische Element war immer ein wichtiger und notwendiger Aspekt, um in der Physik und den anderen Naturwissenschaften zu neuen Erkenntnissen zu gelangen. Im Gegensatz zur „Science-Fiction“ reicht jedoch die Phantasie sich vorzustellen was alles sein könnte und die Fähigkeit dies auf eine konsistente Weise zu beschreiben allein nicht aus, um zu neuen Erkenntnissen über die Natur zu kommen. Die Naturwissenschaften brauchen neben dem spekulativen Element zusätzliche Methoden, die es erlauben zu überprüfen, ob eine Vision einer möglichen Realität auch wirklich einen Aspekt der uns umgebenden Natur beschreibt. Die einzig bekannte Möglichkeit dies zu überprüfen liefert in der Physik das Experiment an real existierenden Objekten und eine präzise und möglichst allgemein gültige Beschreibung der experimentellen Resultate. Alle erdachten Realitäten, die diesen Prüfungen nicht stand halten, haben nichts mit neuer Erkenntnis im naturwissenschaftlichen Sinn zu tun, egal wie fantastisch und doch plausibel sie erscheinen mögen. Trotzdem sind diese nicht-wissenschaftlichen Visionen deswegen keinesfalls wertlos. Schließlich ist die Naturwissenschaft ja nur ein kleiner Bestandteil unserer Kultur. Weitaus bewegender als gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse sind für die meisten Menschen Bilder, die einen emotionalen Wert haben, wie sie die Musik, die Malerei, die Literatur und auch die Science-Fiction hervorbringen.

### **Die Faszination des besonders Großen und des besonders Kleinen:**

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 kleiner 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 der Menschen am besonders Großen und besonders Kleinen ist also vielleicht etwas ganz Natürliches, möglicherweise hängt es letztlich mit dem Bewusstsein unserer räumlichen und zeitlichen Endlichkeit zusammen.

## **Nanowissenschaften und Nanotechnologie**

Die Vorsilbe „Nano-“, kommt aus dem Griechischen (Zwerg) 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 ( $=1/1000.000.000$  Meter) 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 tiefgehenderen. Der Offensichtliche hat mit der Entwicklung der Präzisionsapparate zur Beobachtung von Materie zu tun. Alles was Strukturen besitzt, die viel kleiner als ein Millimeter sind, ist mit bloßem Auge nicht mehr auszumachen. Das Lichtmikroskop hat es erstmals ermöglicht Strukturen im Bereich eines tausendstel Millimeters, 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 ein Faktor 1000 kleiner. 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 geladenen Metallkugel von einem Meter Durchmesser und macht 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 Potential bewegen ist für große Objekte meistens eine angemessene Beschreibung, um den Transport von Elektronen zu verstehen. Bei Objekten von Nanometer-Dimensionen 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 sogenannten Nanotechnologie ist es, sich diese Phänomene zu Nutze 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 Fehlen 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 im 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.

### **Die historische Bedeutung der Miniaturisierung von Werkzeugen an sich**

Werkzeuge aus Metallen gehörten auch vor 100 Jahren 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 aber 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 Mikro-Strukturierung 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, deren ursprüngliche Bestimmung ja auch eine andere war als zum Bau eines Mikroprozessors zu dienen, einsetzen könnte, um neue Objekte mit bestimmten Funktionen zu erzeugen, die uns nützlich erscheinen? Da biologische Systeme, im Gegensatz zum Sandkorn, das ja einfach nur herumliegt, von Haus aus 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 Silizium Chip.

### **„DNS-Drähte“ und Molekulare Elektronik , Fakten und Fiktionen**

Da der Raum, beziehungsweise die Fläche für diesen kleinen Exkurs in die mögliche zukünftige Bedeutung der Nanotechnologie knapp wird, kann ich hier nicht allen interessanten Aspekten der Nanowissenschaften gerecht werden, sondern will mich auf die Illustration nur eines aktuellen Beispiels beschränken. Da es sich um ein Projekt handelt, das ein 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, wenn auch nur um dem Rahmen dieser Ausgabe des Unimagazins gerecht zu werden.

Es geht um die Möglichkeit DNS Moleküle zu anderen Zwecken zu benutzen als für die von der Natur vorgesehenen, nämlich als sogenanntes „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 dabei also darum lange und dünne elektrisch leitende Objekte zu untersuchen. Mit dem heutigen Standart der Mikrostrukturierung, wie sie auch von Computerfirmen benutzt wird um Mikroprozessoren zu bauen, ist es aber nicht möglich defektfreie Drähte im Nanometer Bereich herzustellen. Das DNS Molekül hat einen Durchmesser von nur 2 nm, 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 Nanometer Bereich 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, ist in der Figur 1 abgebildet. Die Moleküle werden über Löcher in einer dünnen Folie gespannt, mittels langsamer Elektronen abgebildet und gleichzeitig mit einer feinen Elektrode kontaktiert, um ihre Leitfähigkeit zu messen. Es hat sich, zur Überraschung vieler, herausgestellt das 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.

Eine Fiktion, mit der ich diesen Beitrag beenden möchte, bezieht sich auf die DNS als elektrisch leitender 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 2nm Durchmesser 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 Halbleiter-Transistor, an und abschalten, um so neben der Stromleitungsfunktion auch Schaltfunktionen mit DNS Strukturen zu erzeugen? Ein Sketch, der solch einen fiktiven DNS Transistor darstellen soll, ist in Abbildung 2 illustriert. Kann man mögliche elektronische Schaltfunktionen eines DNS Transistors mit mechanischen beziehungsweise strukturellen Änderungen im DNS Molekül sinnvoll verknüpfen? Wird es jemals 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?

Aus dem heutigen Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet 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 Träumen und Träume zur Realität werden zu lassen.

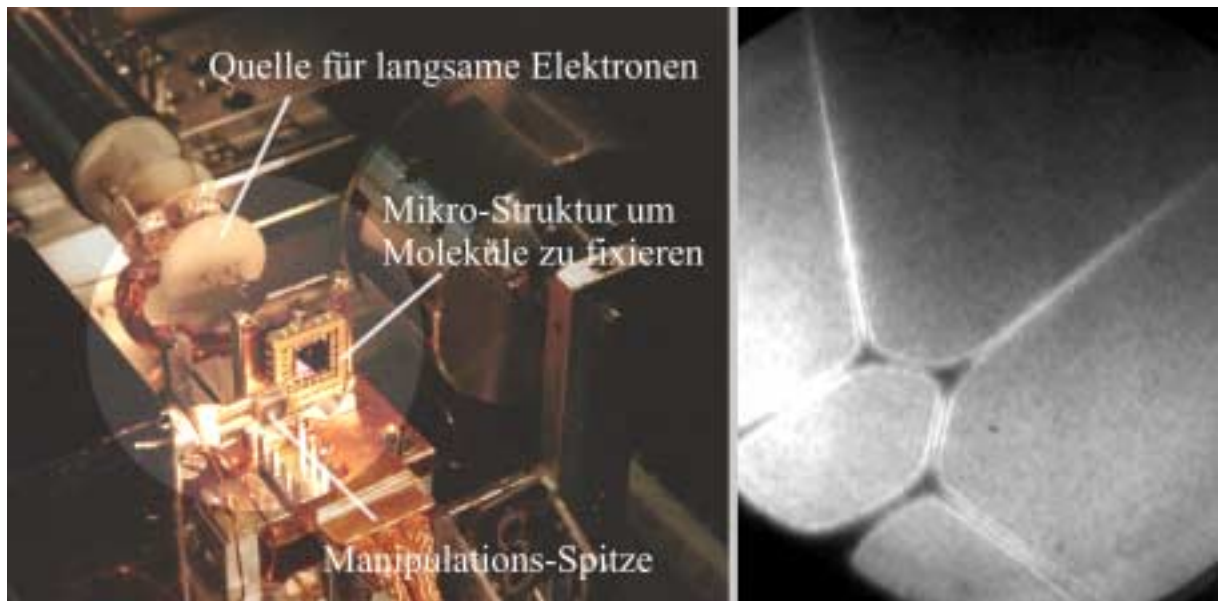


Abbildung 1: Instrument zur Erzeugung von Projektionsbildern einzelner Moleküle durch einen Strahl langsamer Elektronen. Mit Hilfe einer Manipulations-Spitze lassen sich einzelne Bio-Moleküle im Nanometer-Bereich mechanisch und elektrisch manipulieren. Rechts ist das Projektionsbild eines Netzwerks aus DNS Molekülen gezeigt.

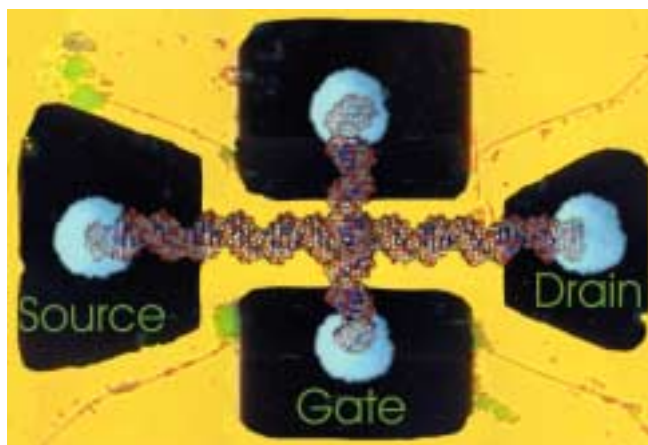


Abbildung 2: Detailansicht eines fiktiven Mikro- beziehungsweise Nano-Prozessors, bei dem Transistorfunktionen mit DNS Molekülen ausgeführt werden.