

DIE ZEIT

Abschied von der Nanovision

Atome sind keine Legosteine. Wer molekulare Maschinen bauen will, muss die besonderen Gesetze der Mikrowelt berücksichtigen

Von Niels Boeing

Vor gut 20 Jahren hatte der US-Ingenieur K. Eric Drexler eine Vision: In seinem Buch *Engines of Creation* skizzierte er eine Zukunft, in der molekulare Maschinen die industrielle Fertigung revolutionieren und Gegenstände Atom für Atom zusammenbauen. So wie die Natur die Materie auf der untersten Ebene transformiert und zum Beispiel in einer Kuh Gras in saftige Steaks verwandelt, so sollten winzige Roboter mit Elementarteilchen hantieren und fantastische neue Werkstoffe und Produkte herstellen. In der kühnsten Vision reproduzieren sich diese Winzmaschinen selbst – ein wunderbarer Stoff für Science-Fiction-Romane.

Drexler nannte diese neue Technik Nanotechnik. Ein Begriff, den er zwar nicht erfunden hatte, aber fortan für sich reklamierte. Seine Vision, irgendwo an der Grenze zwischen Wissenschaft und Fantasie angesiedelt, beflügelte einerseits eine ganze Forschergeneration. Andererseits gaukelte sie Laien vor, die Natur sei im Prinzip ein Baukasten, Atome ließen sich wie Legosteine zusammensetzen. Die Folge war ein Nanohype, der die ernsthafte Forschung fast ganz aus der öffentlichen Wahrnehmung verdrängte. Dabei haben andere Wissenschaftler längst begonnen, die wolkigen Nanovisionen auf die Erde zu holen.

Bald nachdem Drexler seine Ideen in die Welt gesetzt hatte, bemächtigten die Illustratoren sich ihrer. In bunten Farben malten sie käferartige Nanomaschinen mit Greifarmen, die Moleküle aufschichteten oder an Zellen Reparaturarbeiten vornahmen. Drexler selbst steuerte Konstruktionszeichnungen ihrer Bauteile bei. Da gab es Getriebe, Kugellager, Förderbänder und Kräne, die nur aus einigen Hunderten bis einigen Tausenden Kohlenstoffatomen bestanden und sich wie von Geisterhand bewegen sollten. Eine Miniaturausgabe unserer heutigen Maschinenwelt, für deren Realisierbarkeit Drexler auch gleich die Modellrechnungen mitlieferte.

Diese Wunderwelt ist eine Vision geblieben. Die bunten Bilder der Drexlerschen Nanomaschinen sind zwar ein populärer Mythos geworden, aber bis heute existiert nicht ein einziger Prototyp. Das liegt nicht nur daran, dass Drexler und seine Anhänger vor allem Theoretiker sind, die nicht im Labor herumtüteln. Die Entwürfe hatten auch handfeste Mängel und widersprachen manchmal den Gesetzen der Physik. Denn die sind im Nanokosmos andere als in der Makrowelt.

»Die Maschinenteile der ›molekularen Nanotechnik‹ sind im Wesentlichen Molekülhaufen mit seltsamen und sehr speziellen Formen«, urteilt der britische Physiker Richard Jones, der Drexlers ursprüngliches Konzept vor einiger Zeit einer gründlichen Analyse unterzogen hat. Doch wegen der unnatürlichen Anordnung ihrer Atome wären die Konstrukte chemisch instabil. Und selbst wenn sie zusammenhielten, hätten die Maschinenteile eher die Konsistenz von Wackelpudding als die Festigkeit eines Baukrans, weil die Atome bei Zimmertemperatur ständig in Bewegung sind. Ein weiteres Problem: »Die Drexlerschen Maschinen funktionieren nur in einem Ultrahochvakuum«, sagt Jones. Schon ein, zwei Fremdatome könnten hier den gleichen Effekt haben wie der sprichwörtliche Sand im Getriebe.

So wirklichkeitsfern Drexlers Ideen auch waren, sie haben die Wissenschaft befeuert. Nach anfänglicher Skepsis haben in den letzten Jahren einige Forschungsgruppen begonnen, sie zu erkunden. Im Unterschied zu Drexler, der sich kaum um den aktuellen Forschungsstand kümmerte, gehen sie von verfügbaren Nanomaterialien und Werkzeugen aus.

Ein deutsch-französisches Forschungsteam hat vor einigen Monaten die ersten beiden »Nanoräder« vorgestellt, die sich – noch etwas holprig – über eine Kuperoberfläche rollen lassen. Es sind Triptycenmoleküle, die Rädern mit drei Speichen ähneln. Verbunden sind sie über eine Achse aus vier

Kohlenstoffatomen. Der Antrieb kommt allerdings noch aus dem Makrokosmos: Die Spitze eines darüber befindlichen Rastertunnelmikroskops (STM) kann zu einem bestimmten Zeitpunkt eins der Räder zu einer 120-Grad-Drehung bewegen. »Um beide Räder gleichzeitig zu bewegen, ist der Energieaufwand noch zu hoch«, sagt der Physiker Christian Joachim vom Forschungszentrum Cemes in Toulouse, »dafür wäre ein neues Design nötig.« Immerhin seien die Radmoleküle so stabil, dass sie bei Zimmertemperatur nicht durch die Zufallsschwingungen der Brownschen Bewegung gestört würden – ein Phänomen, das nur im Nanokosmos auftritt. Nach demselben Prinzip haben Joachim und seine Mitarbeiter auch Nanozahnräder entwickelt, die, ebenfalls angetrieben von einer STM-Spitze, über eine gezackte Kante aus Atomen rollen.

Hundertmal so viel Leistungsdichte wie ein BMW-Sechszylindermotor

Im vergangenen Jahr bereits machte ein Nanoauto Schlagzeilen, dessen vier Räder aus Buckyballs bestehen, kugelförmigen Kohlenstoffmolekülen. Wissenschaftler um James Tour von der texanischen Rice University hatten es gebaut. Doch es war eher ein Zierstück, denn die Räder konnten sich nicht drehen. Ein molekulares Paddel in der Mitte des Nanochassis setzte das Auto in Bewegung. Es klappte unter Bestrahlung mit ultraviolettem Laserlicht um und schob das Gefährt auf diese Weise vorwärts.

Die beiden Experimente zeigen eine wesentliche Schwierigkeit, mit der Molekularmaschinenbauer konfrontiert sind, wenn sie Konzepte aus der heutigen Technik in die Nanowelt übertragen. »Die atomare Struktur von makroskopischen Maschinen wie Autos kann man ignorieren, wenn man ein Modell entwirft. Was aber passiert, wenn die Größe der Teile und ihrer Kontaktflächen auf wenige Atomdurchmesser schrumpfen?«, fragt der Physiker Mark Robbins von der Johns Hopkins University. Seine Modellrechnungen zeigen: Die herkömmliche Mechanik, die beispielsweise von glatten Oberflächen ausgeht, lässt sich nicht mehr ohne Weiteres anwenden. Einzelne Oberflächenatome wirkten wie Bodenwellen, sagt Robbins. Nanoautos rumpeln also eher über einen atomaren Acker, als dass sie fahren.

Jede Nanomaschine braucht Energie von außen, um sich zu bewegen. Die Natur hat dieses Problem elegant gelöst, indem sie die Energie im Inneren von Zellen auf chemischem Weg überträgt. ATP-Moleküle liefern sie in Form von Elektronen, die auf Motorproteine übertragen werden. Diese können dann verschiedene biologische Prozesse auslösen, vom Transport einzelner chemischer Bausteine durch die Zelle bis hin zu einer Muskelkontraktion im großen Maßstab. Manche Bakterienarten nutzen Flagellen, rotierende Fäden. Sie treiben wie winzige Schiffsschrauben die Mikroorganismen an. Da ist es kein Wunder, dass manche Wissenschaftler sich an einer Art Nanobionik versuchen und biologische Konzepte auf Nanomaschinen übertragen wollen.

Der amerikanische Chemiker Nadrian Seeman etwa untersucht seit den achtziger Jahren, welche Möglichkeiten das DNA-Molekül, der Träger der genetischen Information, als Baumaterial bietet. DNA besteht aus zwei verdrehten Strängen, an denen jeweils vier verschiedene Basenmoleküle – A, T, C und G – aufgereiht sind. Dabei bilden A und T sowie C und G die Verbindungsstücke zwischen beiden Strängen. Seeman fand heraus, dass sich mehrere DNA-Einzelstränge mit einer genau durchdachten Reihenfolge der vier Basen zu ganz neuen geometrischen Strukturen anordnen lassen. So erzeugte er wenige Nanometer große Würfel oder ausgedehnte Gitter aus DNA. Die waren allerdings noch starr und unbeweglich.

»Für die Nanorobotik ist entscheidend, steuerbare Elemente an bestimmten Stellen in ein Gitter einfügen zu können«, sagt Seeman. Zusammen mit seinem Studenten Baoquang Ding stellte er kürzlich ein Gitter her, aus dem an verschiedenen Punkten abgeknickte DNA-Doppelstränge auftraten. Sie waren jeweils an einer Stelle nicht miteinander verbunden. Gaben die Forscher kurze Einzelstränge mit einer speziellen Basenfolge in die wässrige Lösung, in der sich das Konstrukt befand, lagerten diese sich an der unverbundenen Stelle des Doppelstrangs an, woraufhin er sich um 180 Grad drehte. Folge: Das abgeknickte obere Ende schwenkte wie ein Kranausleger herum. Seeman zufolge könnten sich damit künftig »Nanofertigungsstraßen« anlegen lassen, die komplexere Konstruktionen, etwa in der Nanoelektronik, mittels chemischer Selbstorganisation erzeugen.

Doch auch der biologische Ansatz hat Grenzen. Denn biologische Nanomaschinen arbeiten in einem flüssigen Medium, an das sie genau angepasst sind. »Ein wesentlicher Nachteil ist, dass sie, will man sie außerhalb ihrer natürlichen Umwelt – ex vivo – einsetzen, instabil sind«, sagt Ben Feringa, Chemiker an der Universität Groningen. Vollständig künstliche Nanomaschinen hätten hingegen den Vorteil, dass sie unter anderen Bedingungen einsetzbar wären.

Auf Konzepte ohne biologische Vorbilder setzt der Physiker Alex Zettl von der Universität Berkeley. Zettl nennt seine Prototypen NEMS, kurz für »nanoelektromechanische Systeme«. Bereits 2003 baute er mit seinen Mitarbeitern einen Nanorotor. Ein Siliziumplättchen dreht sich auf einer Achse zwischen zwei Elektroden, wenn eine Spannung angelegt wird. Als Achse dient eine Kohlenstoffnanoröhre.

In einem weiteren Experiment hat er eine Art Nanohydraulik gebaut. Dabei wächst ein Tröpfchen aus flüssigem Metall, das zwischen zwei Nanoröhren positioniert ist, wenn eine Spannung an die Konstruktion gelegt wird – Metallatome werden aus einem Reservoir in das Tröpfchen hineingesaugt. Das schwellende Tröpfchen drückt die obere Nanoröhre nach oben. Die Kraft, die so ausgeübt wird, sei zwar für sich genommen klein, auf die Fläche bezogen jedoch riesig, so Zettl: »Die Leistungsdichte ist zehn- bis hundertmal so groß wie die eines BMW-Sechszylindermotors.« Eine konkrete Anwendung für seine Idee hat er, wie die meisten Nanomaschinenbauer, allerdings noch nicht.

Den Verwendungszweck für den Nanoresonator, den er im vergangenen Jahr vorgestellt hat, hat Zettl dagegen schon im Kopf. Das Bauteil besteht aus teleskopartig ineinandergeschobenen Nanoröhren. Je nachdem, wie weit diese sich – wiederum unter Einfluss einer Spannung – auseinanderziehen, ändert sich die Frequenz, mit der die Anordnung schwingen kann. »Unser Nanoresonator könnte sich irgendwann in Geräten für die drahtlose Kommunikationstechnik einsetzen lassen«, sagt Zettl. Denn er ermögliche es, sehr hohe Frequenzen bei geringem Stromverbrauch zu erzeugen. Je höher die Frequenz eines Signals ist, desto mehr digitale Information kann es übertragen.

Gemeinsam ist den bisher geschilderten Nanomaschinen, dass sie Bewegungen im Nanomaßstab auslösen. Langfristig wollen die Forscher jedoch ganze Ensembles von Nanomaschinen konstruieren, die auch makroskopische Auswirkungen haben. Ein erster Vorläufer könnte eine Schicht sein, die ein Team um Francesco Zerbetto von der Universität Bologna 2005 entwickelt hat. Die Forscher haben in diese Schicht Rotaxanmoleküle eingelassen, bestehend aus einem länglichen Mittelstück, das von einem Ring umgeben ist. Der Ring kann an zwei bestimmten Stellen sitzen. Bestrahlt man einen Punkt der Schicht mit Licht, lässt die einfallende Energie die Ringe der dort befindlichen Rotaxane von der einen an die andere Position wandern. Durch dieses Umschalten werden nun Moleküle freigelegt, die die Oberflächenspannung der Schicht verändern.

Der große Wurf der Nanotechnik wäre eine programmierbare Maschine

Die Folge: Ein auf der Schicht befindlicher Wassertropfen wandert zum Lichtpunkt – und kann dabei sogar eine Steigung von zwölf Grad überwinden. Solche Arbeiten seien aber nicht mehr als ein *proof of principle*, räumt Ben Feringa ein. »Die nächste Stufe ist, Pumpen und Ventile im Nanomaßstab zu bauen und molekulare Objekte entlang genau definierter Pfade zu bewegen.«

Einen großen Wurf im Nanomaschinenbau plant nun eine Gruppe von britischen Wissenschaftlern. In einem Workshop im Januar haben sie ein Forschungsprogramm ausgearbeitet, für das das Engineering and Physical Sciences Research Council in den kommenden fünf Jahren 1,5 Millionen Pfund zur Verfügung stellen wird. Die Wissenschaftler wollen eine komplexe programmierbare Nanomaschine bauen, in der Moleküle und Nanopartikel zu einem funktionsfähigen Ganzen angeordnet werden. »Unser Interesse geht dahin, die Prinzipien der Selbstorganisation und den direkten Zusammenbau mittels Rastersondenmikroskopen zu kombinieren und so Anordnungen zu schaffen, die mit natürlichen Prozessen nicht möglich sind«, sagt Philip Moriarty, Physiker an der Universität Nottingham, der eins der Projekte leiten wird.

Ein Element ist eine Art künstliches Ribosom, in dem ein DNA-Strang als Informationsträger genutzt und ausgelesen wird, um molekulare Bausteine anzuordnen. Eine Art Nanoförderband soll deren gezielten Transport ermöglichen. Moleküle sollen dabei auf einer exakt definierten Bahn bewegt werden, mittels einer schaltbaren Energiezufuhr und eines Bewegungsmechanismus, der auf der Veränderung von Molekülgeometrien beruht. Um all diese Teile zu steuern, wollen die Forscher außerdem eine »molekulare Maschinensprache« entwickeln, vergleichbar mit derjenigen für Computer: Mit Hilfe eines standardisierten Befehlssatzes soll ein Entwurf am Rechner in präzise Bewegungen der Bauteile umgesetzt werden. Langfristig könnten diese Nanomaschinen etwa als Signalwandler in einer künftigen Nanoelektronik Anwendung finden, sagt Moriarty.

Er ist auch einer der wenigen Forscher außerhalb des Drexler-Lagers, der sich am Forschungsprogramm für

eine Nanofabrik, der »Nanofactory Collaboration«, beteiligt – auch wenn er an dieser Vision »viel zu kritisieren« habe. »Wichtig ist für mich, dass der Kern von Drexlers Konzept, nämlich eine Einzelatomchemie, nachweisbar gültig ist«, betont er. Auch Alex Zettl lässt sich gerne von den Drexlerschen Nanomaschinen inspirieren. »Aber seien wir ehrlich: Maschinen Atom für Atom zu bauen ist zurzeit nicht möglich. Am Ende brauchen wir Dinge, die funktionieren.«

DIE ZEIT, 02.08.2007 Nr. 32

32/2007