

Unter speziellen Bedingungen kann die Chemie stabile Nanostrukturen bauen. K. Eric Drexler

Ich wurde gebeten auf die vorangehende Kritik zu antworten und ich habe das in einem Hypertextstil (um mich auf Simson Garfinkels Bemerkungen zu beziehen) gemacht.

1. Was ist Nanotechnologie?

Simson Garfinkel sagt, daß Howard Craighead Nanotechnologie als fortgeschrittene Mikrotechnologie definiert, während Rick L. Danheiser sie als synthetische organische Chemie definiert. Das zeigt, diese Gebiete haben bereits Namen. Soweit ich es beurteilen kann, war ich es, der den Begriff "Nanotechnologie" in den Allgemeingebrauch eingeführt hat, und wie Herr Garfinkels Paragraph über meine Verwendung andeutet, gibt es keinen allgemein anerkannten anderen Namen für die Fähigkeiten, für deren Beschreibung "Nanotechnologie" allgemein verwendet wird. Wenn diese Technologie wichtig ist, muß sie diskutiert werden und braucht einen kurzen, unzweideutigen Namen. Es wäre daher aus diesem Grund zweckmäßig, bei der ursprünglichen Bedeutung von "Nanotechnologie" zu bleiben. (Es gibt keine völlig klare Grenze zwischen synthetischer organischer Chemie und Nanotechnologie, aber es gibt auch zwischen Tag und Nacht keine völlig klare Grenze; sie sind ausgeprägt, obwohl eins zum anderen führt.)

2. Warum sind Informatiker vorherrschend unter denen, die sich für Nanotechnologie interessieren?

Chemiker und Physiker sind in der besten Position für Kritikvorschläge an der Nanotechnologie, aber ihre Orientierung ist die von Wissenschaftlern, nicht von Ingenieuren. Sie tendieren dazu, sich auf das zu konzentrieren, was heute studiert, und nicht auf das, was morgen gebaut werden kann. Informatiker oder Computer-Wissenschaftler sind, (trotz ihres Namens), in diesem Sinne Ingenieure. Weiters erkennen sie den Wert winziger, schneller, kontrollierbarer Dinge und sind an technologische Revolution gewöhnt.

4. Können sich Zahnräder auf Lagern, die aus einzelnen chemischen Verbindungen hergestellt sind, reibungslos drehen?

Alle Lager haben etwas Gleitreibung, oder Widerstand, obwohl sie dazu gebracht werden können, ein vernachlässigbares Ausmaß an statischer Reibung, oder Klebrigkeit zu besitzen. Einzelne chemische Verbindungen sind zu schwach und zu elastisch, um sie als Lager für die hier genannten Zahnräder zu verwenden, aber es gibt andere, angemessenere Zugänge, die auf gleitende Oberflächen basieren.

5. Werden Assembler-Geräte Atom für Atom bauen?

Im allgemeinen wahrscheinlich nicht, obwohl ich manchmal eine Sprache verwendet habe, die eine wörtliche Atom für Atom Konstruktion andeuten mag. Eine zutreffendere Aussage wäre etwas wie "Assembler werden reaktive chemische Elemente auf Zehntelnanometerpräzision manövrieren und damit eine Serie von elementaren chemischen Reaktionen bewirken, von denen jede ein oder mehrere Atome zum Werkstück hinzufügt, und so eine genaue Kontrolle der resultierenden molekularen Struktur ermöglicht." Und sogar das ist noch eine Vereinfachung, da ein typischer Arbeitsvorgang oft etwas ein bißchen komplexeres tun wird, wie zum Beispiel, drei Atome hinzuzufügen und gleichzeitig eines zu entfernen. Die kürzere Beschreibung gibt ein klares Bild des gesamten Effekts.

6. Werden Assembler alle diese Dinge tun?

Nicht direkt. Assembler werden Allzweck-Herstellungsmaschinen sein, die fähig sind, fast alles herzustellen, solange man ihnen die richtigen Rohmaterialien gibt, Treibstoffe,

Arbeitsbedingungen und Instruktionen. Sie werden dazu verwendet werden, jegliche Maschinen für spezielle Zwecke herzustellen und letztere werden die meiste Arbeit machen. Um ein bestimmtes Produkt in Mengen herzustellen, wird es keinen Sinn haben, Allzweck-Assembler zu verwenden; diese werden statt dessen verwendet werden, um spezielle Produktionsreihen, wie Motorenfabrikation-Fließbänder in Detroit zu bauen. Diese Produktionsreihen werden dann dazu verwendet werden, um Geräte hervorzubringen wie Simson Garfinkels hypothetische Diamantbeschichtungs-Aufträger.

Waffen sind unter jenen potentialen Produkten, über die wir besorgt sein müssen, aber angreifende Armeen Atom für Atom zu zerreißen ist doch etwas zu grob und zu dramatisch; man argwöhnt, daß der militärische Verstand andere Anwendungsmöglichkeiten für eine Herstellungstechnologie finden wird, die durch die Herstellung präziser und hochentwickelter Geräte charakterisiert ist. Generell ist die Vorstellung, daß Assembler in der Zukunft alles machen ein bißchen wie die Vorstellung, daß Drehbänke und Fräsmaschine heute alles machen.

7. Was nimmt die Nanotechnologie über die Funktionsweise von Atomen und Molekülen an? Getriebe, Motoren, mechanische Teile des Nanocomputers, und Simson Garfinkels vorgeschlagener Bohrer würden grundsätzlich mechanisch funktionieren, wie auch die Positionierungsarbeiten von Assembler-Armen (industriellen Roboterarmen ähnlich). Die tatsächlichen chemischen Transformationen, die von Assemblern bewirkt werden, haben jedoch wenig Ähnlichkeit mit bekannten mechanischen Arbeitsvorgängen.

8. Was ist mit Elastizität und Vibrationen?

Jedes physikalische Objekt ist eine Ansammlung von Atomen; Nanomaschinen werden einfach sehr kleine physikalische Objekte sein. Alles vibriert, alles krümmt sich, und Maschinen funktionieren trotzdem; die Unterschiede hier sind mehr quantitativ als qualitativ. Auf sehr kleinem Maßstab werden allein die Vibrationen, die man mit Hitze assoziiert, schon ungeheuer wichtig und sind ein entscheidendes Thema in der Planung und Arbeit von Nanomaschinen. Ich erwähne dieses Thema in Engines of Creation, und habe quantitative Analysen thermaler Vibrationen sowohl in logischen Systemen für mechanische Nanocomputer, als auch in Assembler-Armen gemacht.

9. Was ist mit den Problemen beim Aufheben und Plazieren einzelner Atome?

Siehe (5.)

10. Muß ein Arm sich mit jedem beliebigen Stück jedes beliebigen Moleküls verbinden? Assembler-Arme werden eine Vielfalt von Werkzeugen handhaben, jedes davon mit einem "Standardgriff", der einer "Standardhand" passen wird; die Werkzeuge selbst werden spezialisiert sein. Weiters würde nur eine beschränkte Auswahl von Werkzeugen benötigt, um eine weite Vielfalt von Produkten zu bauen, da sogar ein komplexes Produkt mit einer komplexen Serie einfacher Arbeitsvorgänge gebaut werden kann. All das ist bekannt von der makroskopischen Herstellungstechnologie.

11. Werden Nanomaschinen Röntgenstrahlen oder Elektronenstrahl-"Radar" verwenden, um Moleküle zu finden?

Sicherlich nicht, aus Gründen, die hier genau angegeben sind (ich habe diesen Vorschlag sonst noch nirgends gesehen). Weiters würden frei bewegende Moleküle dem Zugriff ausweichen, sogar wenn man sie sehen könnte; Assembler-Arme wären einfach zu langsam. Industrielle Roboter können vorpositionierte, vororientierte Teile von etwas wie einem Fließband aufheben, eher als in einem großen Behälter herumzuwühlen — und das trotz

größerer Leichtigkeit der Sicht auf einem makroskopischen Maßstab. Ich erwarte, daß Assembler in ähnlicher Weise arbeiten werden.

12. Werden sich Nanomaschinen auf Diffusion verlassen?

Man muß unterscheiden, ob man sich irgendwo auf Diffusion verläßt, oder überall. Assembler werden eine präzise Konstruktion von großen, komplexen molekularen Systemen ermöglichen, da sie (d.h. ihre Positionierungs-Arme) fähig sein werden, chemische Reaktionen mit einer Spezifiziertheit und Verlässlichkeit zu lenken, die nicht erreicht werden kann, wenn Moleküle frei, in allen möglichen Positionen und Richtungen, aufeinanderstoßen können. Daher vermeiden sie Diffusion, wenn sie Moleküle an die Stelle der Reaktion bewegen.

13. Wie kompliziert sind Assembler?

Assembler und Nanocomputer werden ungefähr so komplex sein wie industrielle Roboter und Mikrocomputer, da sie eine ähnliche Anzahl von Teilen beinhalten und ähnliche Funktionen durchführen werden. Alle diese Geräte werden jedoch weitaus weniger komplex (und anpassungsfähig) sein, als lebende Organismen; sie werden in manchen Hinsichten breiter gestreute Fähigkeiten haben, aber nicht in allen.

14. Können diese anti-aromatischen Strukturen existieren?

Aus quanten-mechanischen Gründen, sind manche Moleküle, die als Ringe mit wechselnden Doppel- und Einzelverbindungen gezeichnet werden können, besonders stabil (wie der sechsgliedrige Benzolring) und andere sind besonders instabil (wie der viergliedrige Cyclobutadinring). Eines meiner nanomechanischen Designs beinhaltet einen Ring, der letzterem ähnelt; er hat den Vorteil, eine nützliche Form für diesen Zweck zu haben. Ist seine "Instabilität" ein Problem?

Chemiker betrachten Chemikalien als instabil, wenn sie sich (zum Beispiel) spontan zersetzen, oder ändern, oder in hohem Ausmaß mit sich selbst reagieren, oder wenn sie bereitwillig mit einer Vielzahl anderer Moleküle reagieren. Dieser letzte Prozeß ist nicht intrinsisch in einem Molekül, sondern resultiert aus der Präsenz anderer reaktiver Moleküle. In einer anderen Umgebung ist das Molekül stabil. Chemiker arbeiten normalerweise mit Molekülen in Losung und in riesigen Mengen; diese Moleküle können frei mit anderen Molekülen derselben Art in Kontakt treten, daher sind jegliche Reaktionen, die auftreten, unvermeidbar. Dies ist eine stärkere Art der Instabilität, die man normalerweise so bekämpft, indem man Moleküle unter Bedingungen von geringer Dichte, nahe dem Vakuum, oder in festen Matrizen von Edelgasen bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt studiert.

Unter letzteren Bedingungen existiert Cyclobutadin, aber es beginnt schon bei der geringsten Erwärmung (bis 25 Grad Kelvin) mit sich selbst zu reagieren. In einer Nanomaschine bewegen sich Moleküle natürlich nicht frei; sie treffen nur auf bestimmte andere Strukturen in bestimmten Richtungen. Unter diesen Bedingungen kann der Cyclobutadinring tatsächlich stabil sein (wie er bei Raumtemperatur stabil ist, wenn er von sperrigen, verzweigten Seitenketten umgeben ist).

16. Sollte man darüber sprechen, was nicht vorgestellt worden ist?

James S. Nowick hat recht, daß auf vielen Gebieten der Wissenschaft Voraussagen nicht publizierbar sind. Nanotechnologie jedoch ist kein Zweig der Wissenschaft (wie ich mich bemüht habe in Engines of Creation aufzuzeigen); sie ist ein Zweig der Technik, der auf der etablierten Wissenschaft basiert. Technische Projekte werden oft diskutiert und schriftlich behandelt, bevor sie durchgeführt werden. Tatsächlich haben schon in den dreißiger Jahren

Mitglieder der British Interplanetary Society Durchführbarkeitsstudien gemacht, die behaupteten, daß man mit Raketen zum Mond fliegen könne. Mit Vorsicht können heute Durchführbarkeitsstudien auf dem Gebiet der Nanotechnologie gemacht werden. Die benötigte intellektuelle Disziplin schließt eine strikte Vermeidung von Gebieten von wissenschaftlicher Unsicherheit (oder die Verfolgung von Designs, die trotz einer vorgegebenen Reihe von Unsicherheiten stabil sind), ein; sie ist daher der Technik näher als der Wissenschaft. Für Wissenschaftler, die damit beschäftigt sind, neue Fakten über die Natur zu erfahren, ist das Reden über zukünftiges Wissen spekulativ und oft sinnlos. Für Ingenieure, die damit beschäftigt sind, neue Geräte zu bauen, ist das Reden über zukünftige Möglichkeiten basierend auf der etablierten Wissenschaft, nicht notwendigerweise spekulativ und oft notwendig.

17. Betreiben wir heute Nanotechnologie?

Die Entwicklungen und Ziele, die hier aufgeführt sind, sind relevant und zeigen, wie kurzfristige Ziele zu immer höher entwickelten molekularen Geräten führen. In meiner Arbeit habe ich mich auf langfristige Entwicklungen konzentriert und Geräte beschrieben, die heute niemand zu bauen versuchen würde, (weil uns die Werkzeuge fehlen) und die auch morgen wahrscheinlich niemand bauen wird, (da wir dann bessere Designs haben werden.) Dennoch hätte sogar die unausgereifte Nanotechnologie, die ich heute beschreiben und verteidigen kann, Fähigkeiten, die weit über das hinausgehen, was wir bis heute erreicht haben.

Wir sprechen über den Unterschied zwischen einer Mausefalle auf dem Boden und einem Greifer auf einem industriellen Roboterarm, der von einem Computer unterstützt wird.

Abschließend ... danke ich Simson Garfinkel für eine stimulierende Kritik meiner Arbeit; sie hat mir die Gelegenheit verschafft, einige Feststellungen zu erklären, die bis jetzt nur im Unterricht oder bei Konferenzberichten gemacht wurden.

(Die Texte von Garfinkel und Drexler sind der US Zeitschrift "Whole Earth Review" — Ausgabe Sommer 1990 — entnommen.)