

Der tägliche Umgang mit einer Vielzahl von relativ komplizierten technischen Geräten ist für uns weitestgehend vertraut, wenn nicht geradezu selbstverständlich geworden. Dies trifft insbesondere für elektronische Systeme im Bereich der Telekommunikation oder Datenverarbeitung zu. Derartige Systeme sind aus einer Vielzahl funktionaler Komponenten aufgebaut, die aufgrund ihrer konsequenten Miniaturisierung für die ständig wachsende Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems verantwortlich sind. Aus dem Wunsch nach der Verfügbarkeit immer komplexerer elektronischer Systeme resultiert also ein natürliches technologisches Bestreben, funktionale Einheiten maximal zu miniaturisieren, um immer mehr dieser Einheiten zu immer komplexeren und damit auch energiesparenderen und kostengünstigeren Systemen zu integrieren. Sind bislang elektronische Anwendungen im wesentlichen treibende Kraft und Vorreiter bei dieser Entwicklung, so erfaßt das Bestreben nach maximaler Miniaturisierung heute zunehmend auch etwa mechanische und optische Komponenten, um diese in möglichst optimaler Weise mit elektronischen Komponenten kombinieren zu können.

Uwe Hartmann

Auf der Schwelle zur Nanotechnologie

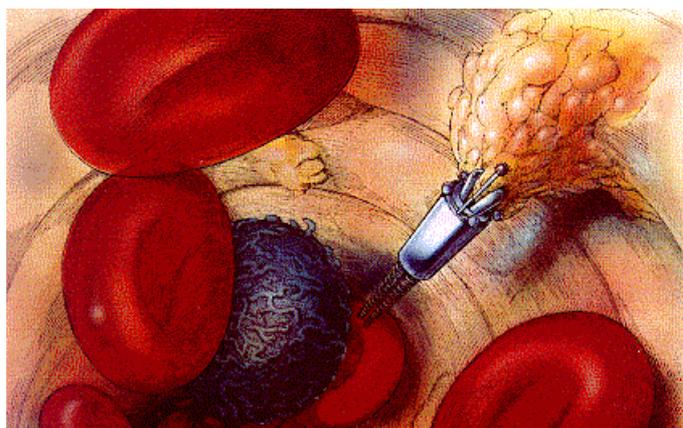
Teil 2: Feynman-Maschinen und Machbarkeitsforschung

Was heißt maximale Miniaturisierung? Welches sind die ultimativen Grenzen für die Minimalgröße einer funktionalen Einheit? Eine Antwort auf diese Frage ist sicherlich vielschichtig, da zumindest grundlegende naturwissenschaftliche Prinzipien, die technische Machbarkeit, aber auch sozio-ökonomische Aspekte (Technikfolgenabschätzung) zu berücksichtigen sind. In jedem Fall sollte jedoch eine Diskussion der Thematik mit den naturwissenschaftlichen Aspekten beginnen, um überhaupt das theoretisch Machbare identifizieren zu können. Dabei ist von grundlegender Bedeutung, dass fortschreitende Miniaturisierung in Zukunft nicht mehr - wie bislang - nur das 'Herunterskalieren' der strukturellen Abmessungen bedeutet, sondern dass die bisherigen Miniaturisierungskonzepte nunmehr an grundlegende physikalische Grenzen stoßen, welche nicht nur die Notwendigkeit, sondern auch die Chance mit sich bringen, in der technischen Applikation bislang nicht genutzte Wirkmechanismen einzusetzen. Die physikalischen Grenzen bisheriger Miniaturisierungskonzepte wurden im ersten Teil dieses Aufsatzes (Magazin Forschung 2/1996, S. 45 ff.) eingehend diskutiert.

Gegenstand der folgenden Betrachtung ist die Diskussion von Machbarkeitsexperimenten, welche die Suche nach neuen Miniaturisierungsansätzen und die Erforschung naturwissenschaftlich inhärenter Grenzen zum Gegenstand haben.

Fakten und Fiktionen

Abb. 1: "Nanoroboter" in Blutgefäß¹.Abbildung 1 zeigt zwei nur wenige 100 nm (1 nm = 1 milliardstel m) große 'Nanoroboter', die sich durch ein Blutgefäß bewegen und - ausgestattet mit einer gewissen Sensorik, Aktorik und Eigenintelligenz - Ablagerungen detektieren und gegebenenfalls beseitigen¹). Das dargestellte Szenarium ist sicherlich aus Sicht des heute Machbaren als reine Fiktion anzusehen. Abbildung 2 hingegen beinhaltet keine Fiktion und zeigt die bislang kleinste Firmeninschrift, geschrieben durch gezielte



Positionierung von 35 Xenon-Atomen auf einer atomar glatten Nickel-Oberfläche¹⁾. Hätte man nicht angesichts der Tatsache, dass die Existenz der atomistischen Struktur der Materie zwischen Leukipp (Atomismus, 5. JH v. Chr.) und Einstein (Theorie der Brown'schen Bewegung als endgültiger



Beweis für die atomistische Struktur der Materie, 1905) mehr als 2000 Jahre umstritten blieb, vor wenigen Jahren die Möglichkeit, einzelne Atome systematisch zu manipulieren, noch als reine Fiktion abgetan? Fakten und Fiktionen liegen also eng beieinander in der Nanotechnologie. Dementsprechend ist die folgende Diskussion sicherlich als eine Gratwanderung zwischen Fakten und Fiktionen zu verstehen, insbesondere, da im Bereich des Kleinen bislang noch die Imaginationen gegenüber den Realisationen überwiegen. Dennoch hat das technologische Bestreben, funktionale Einheiten soweit wie möglich zu verkleinern, im Rahmen der diesbezüglichen Machbarkeitsforschung bereits erstaunlich konkrete Resultate und Denkanstöße geliefert. Dies verdeutlicht wohl am besten eine schlaglichtartige Darstellung einiger Fakten aus den Bereichen der Elektronik und Mechanik, die sicherlich in entscheidendem Maße den technologischen Fortschritt in naher Zukunft prägen werden²⁾. Hinsichtlich der Fiktionen ist es sicherlich instruktiv, jene zu diskutieren, die nur knapp jenseits des derzeitigen Technologehorizonts liegen, manchmal vielleicht aber auch nur einen Schritt weit von der reinen Phantasie entfernt sind. Im Zweifelsfall wird es dem Leser nicht erspart bleiben, hierüber selbst zu entscheiden. **Abb. 2: Firmenlogo aus 35 Xenon-Atomen auf einer (100)-Nickel-Oberfläche¹⁾.**

Für die Grundlagenforschung im Bereich der Nanotechnologie gehört heute die seinerzeit visionäre Sichtweise des theoretischen Physikers und Nobelpreisträgers R. Feynman (1918-1988, Nobelpreis 1965 für Arbeiten im Bereich der Quantenelektrodynamik), nachdem sie lange ignoriert wurde, zu einem der wichtigsten Leitfäden^{2),3)}. Feynmans in Gedankenexperimenten entworfene, hypothetische elektrische und mechanische Bauteile sind als 'Feynman-Maschinen' in die Literatur eingegangen. In der heutigen experimentellen Machbarkeitsforschung steht dabei in der Tradition der Feynman'schen Gedankenexperimente zunächst keineswegs die Frage der technischen Realisierbarkeit im Mittelpunkt sondern vielmehr die Erforschung der grundlegenden physikalischen Grenzen für die Applikation eines Wirkmechanismus und für ein daraus abzuleitendes hypothetisches Bauelement. Diese Vorgehensweise erweist sich insbesondere in Bezug auf unsere gänzliche Unkenntnis des theoretisch Machbaren als notwendig (Abb. 3).

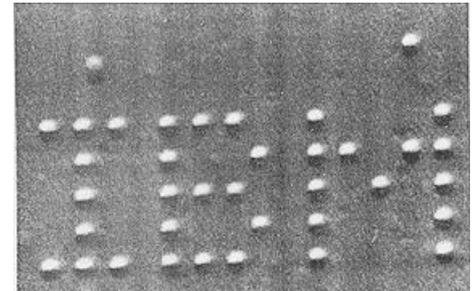
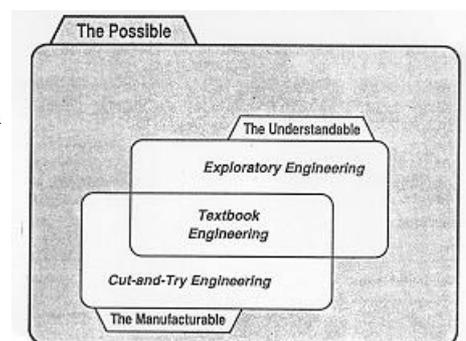


Abb. 3: "Exploratory Engineering" zur Erarbeitung zukünftiger Nanotechnologien. Der äußere Rahmen repräsentiert die Gesamtmenge der aufgrund der Naturgesetze erlaubten Technologien, unabhängig davon ob sie existieren, existieren werden oder vorstellbar sind. Innerhalb dieser Gesamtmenge bewegen sich die heute verwendeten Technologien. Beide Bereiche gemeinsam gehören zum "Textbook Engineering", da lehr- und darstellbar ist, was entweder schon praktiziert wird oder zumindest vorstellbar ist. Die heutige Ingenieur Tätigkeit basiert wesentlich auf einer empirischen Vorgehensweise ("Cut- and Try-Engineering"), während das Vorgehen der Ingenieure in der Nanotechnologie Produktionsszenarien frühzeitig und prospektiv aus der Grundlagenforschung ableitet.¹⁾



Grundlagenforschung ableitet.¹⁾ Bezüglich der experimentellen Vorgehensweise bei der Miniaturisierung funktionaler Einheiten bieten sich grundsätzlich zwei Wege an (Abb. 4). Bei der 'Top-down-Vorgehensweise' entsteht zunehmende Miniaturisierung durch die sukzessive Verkleinerung struktureller Abmessungen mit Hilfe geeigneter Werkzeuge. Dies ist die Vorgehensweise bei der Herstellung heutiger elektronischer, mechanischer oder optischer Bauelemente, wobei sich im Labormaßstab durchaus Abmessungen von nur noch einigen 10 nm oder weniger realisieren lassen²⁾, was bereits das Studium technisch bisher nicht applizierter Wirkmechanismen ermöglicht. Die zweite Möglichkeit zur Herstellung kleinster funktionaler Einheiten

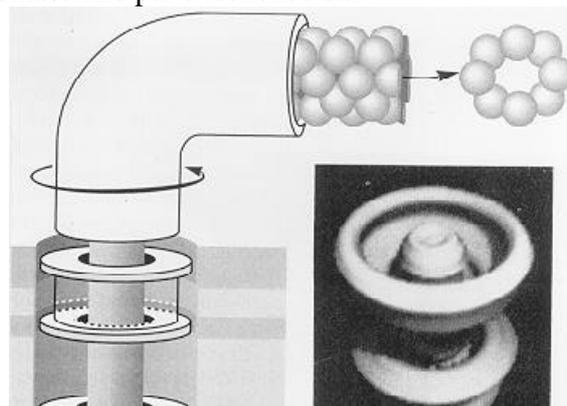
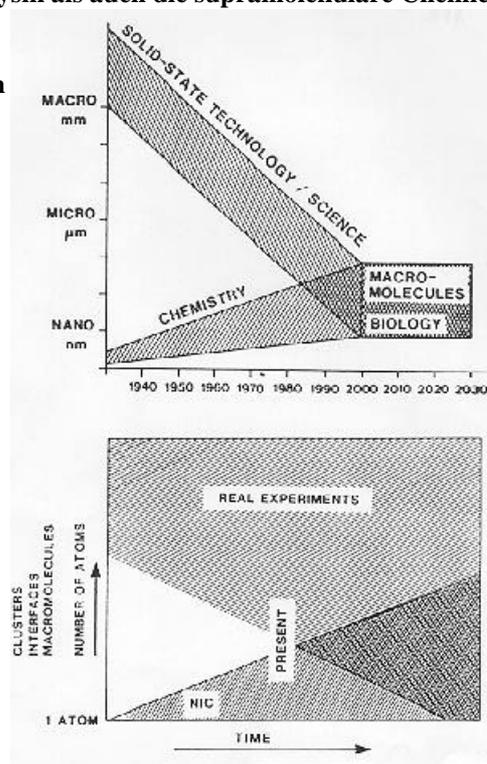
besteht darin, dass man im Sinne eines 'Bottom-up-Ansatzes' die Strukturen sukzessive aus Grundbausteinen, etwa Atomen oder Molekülen, aufbaut. Diesbezüglich sind insbesondere die enormen Fortschritte im Bereich der supramolekularen Chemie vielversprechend, die dazu führen, dass es bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt Schnittbereiche zwischen Top-down- und Bottom-up-Ansätzen gibt, die eine Kombination beider Vorgehensweisen erlauben⁴⁾. Die zunehmende Überschneidung der beiden komplementären Ansätze definiert einen Größenbereich der individuellen Objekte, der typisch für biologische Objekte wie etwa Proteine oder Zellen ist, was es vielversprechend erscheinen läßt, zunehmend auch biochemische Aspekte in die Bauelementekonzepte mit einzubeziehen. Ein anderer wichtiger Gesichtspunkt für die Forschung an nanometrischen Objekten besteht darin, dass es bereits auf der Basis der heute zur Verfügung stehenden Rechenleistung von Höchstleistungscomputern und natürlich zunehmend in absehbarer Zukunft möglich ist, ab initio-Berechnungen physikalischer oder chemischer Eigenschaften funktionaler Einheiten auf Nanometerskala durchzuführen. Derartige Ansätze waren vor einigen Jahren noch nicht denkbar, da die Rechenleistung nur ausreichte, um relativ wenig Atome in eine Berechnung mit einzubeziehen. Es spielt damit zunehmend eine Rolle, Computereperimente ergänzend zu den realen Experimenten durchzuführen. **Abb. 4: Sowohl typische Ansätze der Festkörperphysik als auch die supramolekulare Chemie werden etwa ab dem Jahrtausendwechsel reproduzierbare Möglichkeiten zur Herstellung funktionaler Nanostrukturen bieten. Top-down- und Bottom-up-Ansätze schneiden sich damit in einem Größenbereich, der typisch für biochemische Fragestellungen ist (Obere Abbildung). Zusätzlich wird es dann aufgrund der Verfügbarkeit ausreichender Rechenleistung zunehmend möglich sein, numerisch so umfangreiche ab initio-Rechnungen (NIC: Numerically Intensive Calculations) durchzuführen, dass reale Experimente und Computersimulationen auf Nanometerskala direkt vergleichbar werden⁴⁾.**

Nanomaschinen und Werkzeuge zu ihrer Herstellung

Betrachtet man die in Abb. 1 dargestellten Nanoroboter, so zeigt sich sofort, dass trotz beachtlicher Erfolge die bis heute erreichte Filigranität elektronischer und mechanischer Bauelemente bei weitem nicht ausreicht, um auch nur annähernd den erforderlichen Größenbereich zu realisieren²⁾. Zur Realisierung von Nanorobotern muß man sich vielmehr in den Maßstabsbereich wirklicher Feynman-Maschinen begeben. Was hat man sich aber unter einer solchen

Nanomaschine vorzustellen? Als Beispiel sei der in Abb. 5 dargestellte molekulare Propellermotor, aufgebaut aus kunstvoll angeordneten Proteinen und nur wenige nm groß, betrachtet. Dabei handelt es sich keineswegs um eine abenteuerliche Fiktion, sondern der Motor sitzt in der Zellwand vieler Bakterien und treibt mit ca. 18.000 Umdrehungen pro Minute das Flagellum an, um eine durchschnittlich große Zelle (2 µm) pro Sekunde um 15 Körperlängen weiter zu katapultieren. Bei einer Länge von 25 nm stellt der Motor quasi eine Nanomaschine par excellence dar.

Abb. 5: Molekulare Antriebseinheit für das Flagellum von Bakterien (Schematische Darstellung und elektronenmikroskopische Abbildung) Will man auch nur im Entferntesten daran denken, mittels einer Nanolithographiemethode oder mittels eines Zusammensetzens aus elementaren Bausteinen ein komplexes nanometrisches Objekt herzustellen, so benötigt man zumindest Werkzeuge für einen solchen Vorstoß in die Nanowelt, die es einem nicht nur erlauben, in dieser Welt zu sehen, sondern auch in ihr zu tasten und zu manipulieren. Derartige Werkzeuge mit bis zu atomarer Präzision werden heute durch die



Rastersondentechnologie bereitgestellt. Ein Rastersondeninstrument funktioniert prinzipiell denkbar einfach⁵⁾. Mittels einer scharfen Spitze wird eine Oberfläche abgetastet, wobei die Positioniergenauigkeit der Spitze, die als Sonde fungiert, durchaus subatomar sein kann. Mit der Sonde können nun morphologische oder elektronische Eigenschaften der Oberfläche lokal erfaßt werden. So wird im Rastertunnelmikroskop, für dessen Entwicklung G. Binnig und H. Rohrer vom IBM-Forschungszentrum Rüschlikon 1986 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurden, ein elektrischer Strom zwischen jeweils einem Atom der Probe und der Sonde gemessen, wodurch sich ein elektronisches und strukturelles Abbild der atomaren Anordnung in der Probe erhalten läßt (Abb. 6).

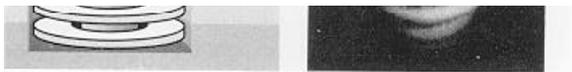


Abb. 6: Funktionsprinzip eines Rastertunnelmikroskops

Im Rasterkraftmikroskop hingegen, welches sich aus dem apparativen Grundprinzip des Tunnelmikroskops ableitet, ist die Sonde an einem mikrofabrizierten Biegeelement befestigt, dessen Auslenkungen die zwischen Sonde und Probe wirkende Kraft meßbar machen (Abb. 7). Damit setzt das Rasterkraftmikroskop keine elektrisch leitfähigen Proben voraus, was den Anwendungsbereich der Rastersondentechnologie hinsichtlich der möglichen Umgebungsbedingungen beträchtlich erweitert⁵⁾. Mit den Rastersondenmikroskopen stehen damit leistungsfähige Instrumente für die Analyse und Visualisierung nanometrischer Objekte zur Verfügung, wobei die Stärke im Vergleich zu hochauflösenden Streu- oder Beugungsverfahren darin liegt, dass wirklich individuelle Objekte adressiert werden können.

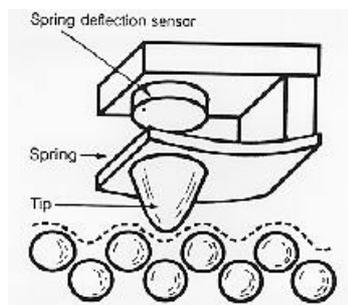
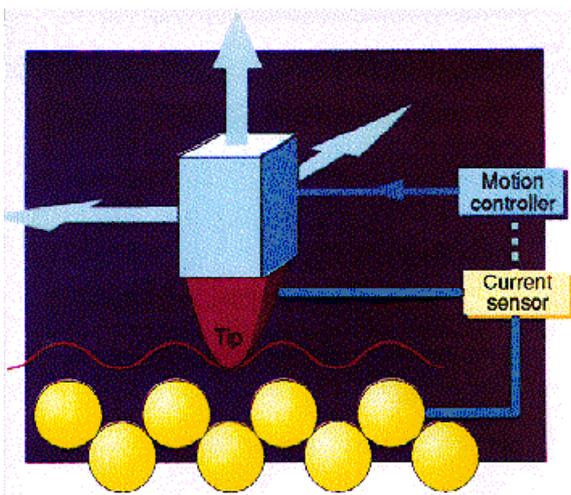
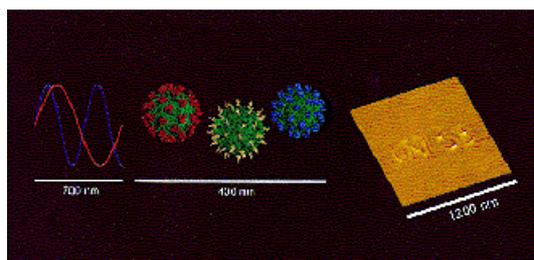


Abb. 7: Funktionsprinzip eines Rasterkraftmikroskops

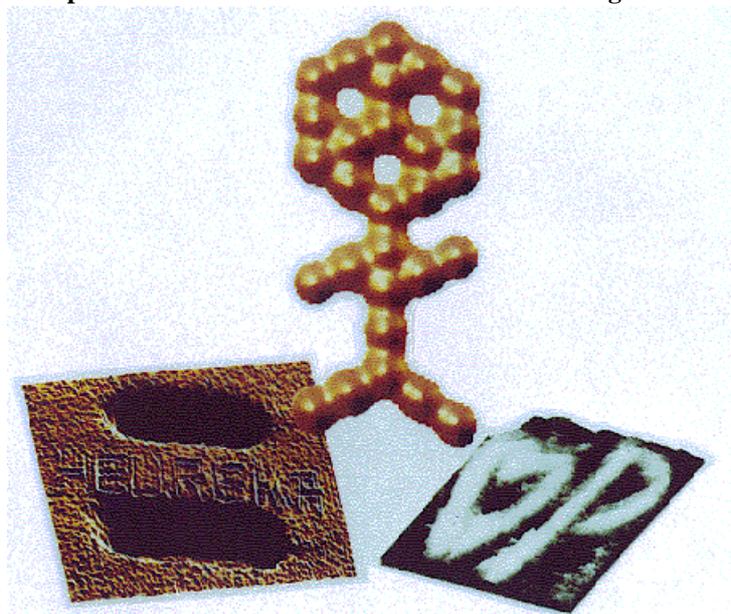
In den vergangenen Jahren wurde in einer Vielzahl von Arbeiten gezeigt, dass die Rastersondenverfahren nicht nur Werkzeuge zur Visualisierung sind, sondern dass sie sich ebenfalls für die unterschiedlichsten Nanomanipulationen mit unglaublicher Präzision einsetzen lassen. So kann beispielsweise mit der scharfen Sonde eines Kraftmikroskops eine Oberfläche auf Nanometerskala graviert werden (Abb. 8).

Abb. 8: Mittels eines Rasterkraftmikroskops erzeugte "Nanogravur" in einem Goldfilm im Größenvergleich zu einem Virus und zu Wellenlängen des sichtbaren Lichts⁶⁾. Kombiniert mit herkömmlichen lithographischen Verfahren lassen sich so, zumindest im Labormaßstab, elektronische Bauelemente herstellen, die um ein Vielfaches kleiner sind als herkömmliche Bauelemente der Mikroelektronik. Auch Anwendungen im biologischen Bereich, wie etwa die Extraktion kleiner Bestandteile von Chromosomen, wurden bereits verifiziert. Auch das Rastertunnelmikroskop läßt sich für mechanische Manipulationen und darüber hinaus für lokale elektronische Manipulationen und Funktionalisierungen einer Oberfläche einsetzen. So entstand beispielsweise das in Abb. 2 dargestellte Arrangement individueller Atome durch sequentielle Positionierung mit der Sonde eines Rastertunnelmikroskops. Die Collage in Abb. 9 gibt einen



instruktiven Überblick über die rastersondentchnologischen Möglichkeiten, nanometrische Objekte gezielt mittels Top-down- oder Bottom-up-Ansätzen herzustellen. So wurden mit der Sonde eines Rasterkraftmikroskops Buchstaben zwischen die Informationseinheiten (bits) einer Compact Disc (CD) graviert (linkes Teilbild). Vergegenwärtigt man sich, dass CDs derzeit zu den Datenträgern höchster Informationsdichte gehören, so wird deutlich, dass sich Informationen auf wesentlich kleinerem Raum speichern lassen als es heute üblich ist. Ordnet man beispielsweise jedem Buchstaben des Alphabets wie üblich 8 bit zu, so sind im gezeigten Beispiel 56 'Nanobits' zwischen zwei 'Mikrobits' der CD untergebracht. Ein völlig anderer Ansatz zur Herstellung nanometrischer Strukturen besteht darin, unter der Spitze eines Rastertunnelmikroskops lokal chemische Reaktionen zu stimulieren. Ein Faible für diese Art der modernen Physik wurde in der ebenfalls in Abb. 9 dargestellten Struktur (rechtes Teilbild) durch lokale Zersetzung des Metallorganikums Trimethylaluminium unter der geführten Tunnelspitze bei gleichzeitiger Applikation eines Laserstrahls zum Ausdruck gebracht. Die Kantenlänge des Bildes beträgt $0,5 \mu\text{m}$. Das ebenfalls in Abb. 9 gezeigte 'molekulare Strichmännchen' schließlich besitzt nur noch eine Höhe von 5 nm und wurde durch sequentielle Positionierung von 28 CO-Molekülen mit der Sonde eines Rastertunnelmikroskops auf einer Nickel-Oberfläche arrangiert. **Abb. 9: Beispiele für mittels Rastersondenverfahren durchgeführte Nanomanipulationen. Die einzelnen Abbildungen sind stark unterschiedlich skaliert⁷⁾.**

Anhand der dargestellten Beispiele wird deutlich, dass es prinzipiell möglich ist, funktionale nanometrische Einheiten durch sukzessives Verkleinern größerer Einheiten oder durch Zusammensetzen elementarer Bausteine (Atome oder Moleküle) auf der Basis von Rastersondenverfahren herzustellen. Dennoch ist natürlich die Möglichkeit der Herstellung einer molekularen Maschine, wie sie etwa in Abb. 5 dargestellt ist, derzeit als reine Fiktion anzusehen. Angesichts der Tatsache jedoch, dass, wie erwähnt, die Existenz der Atome mehr als 2.000 Jahre umstritten war, ihre Existenz erst vor weniger als 100 Jahren definitiv bewiesen wurde und man sie heute abbilden und manipulieren kann, haben wir aufgeschlossen gegenüber Fiktionen zu sein¹⁾. Die Frage ist also weniger, ob man komplexe funktionale Nanomaschinen in Zukunft herstellen können wird, sondern vielmehr ob unsere ersten Gehversuche in diese Richtung dem vielversprechendsten Ansatz entsprechen oder andere Ansätze zukünftig effizienter erscheinen.



Die Miniaturisierung der Informationseinheit

Folgen wir weiter Feynmans Visionen³⁾, so besteht eine essentielle Frage darin, wie sich eine Fülle von Informationen auf engstem Raum speichern läßt. Schließlich muß der in Abb. 1 dargestellte Nanoroboter neben Aufgaben der Aktorik und Sensorik auch über eine Einheit zur Informationsverarbeitung verfügen¹⁾. In der Tat ist heute in der gesamten Informationstechnologie das Bestreben, immer mehr Information auf immer kleinerem Raum zu speichern, die treibende Kraft für die Miniaturisierung, und Möglichkeiten zur Miniaturisierung in anderen Bereichen (z. B. Mechanik, Optik) werden in der Regel stimuliert durch die bereits erworbenen Erkenntnisse aus der Mikroelektronik. Wie also stellen sich Feynmans Visionen zur Miniaturisierung der Informationseinheit ('How to write the Encyclopaedia Britannica on the head of a pin?') im Rahmen der Machbarkeitsforschung heute dar? Zunächst einmal ist zu berücksichtigen, dass generell die Anforderungen an die Verfügbarkeit von Informationen vielschichtig sind. Dies läßt sich bereits am

Beispiel eines PCs erkennen. Bestimmte Informationen, die im Arbeitsspeicher des Rechners abgelegt werden, müssen innerhalb kürzester Zeit, d. h. in Bruchteilen einer Sekunde verfügbar sein, wobei der Datenumfang moderat gehalten werden kann. Andere Informationen werden nur sporadisch benötigt, haben aber häufig einen erheblichen Datenumfang. Diese Informationen, auf die nur in längeren Zeitabschnitten von einigen Minuten, oder im Falle der einfachen Archivierung, von einigen Jahren zurückgegriffen wird, werden in der Regel auf magnetischen Datenträgern (Disketten, Festplatten, Bändern, magneto-optischen Platten etc.) oder in anderen Massenspeichern (z. B. CDs) abgelegt. Dabei wird zugunsten der Langzeitstabilität auf eine schnelle Zugriffszeit verzichtet und die Kosten pro Informationseinheit (bit) sind deutlich geringer als bei den temporären Halbleiterspeichern mit kurzer Zugriffszeit. Betrachtet man jedoch die Gesamtheit der von der Menschheit in irgendeiner Form gespeicherten Informationen, so hat nach wie vor Papier den weitaus größten Stellenwert (mehr als 80 %). Da aber auf Papier relativ viele Informationen gespeichert sind, auf die häufig zugegriffen wird sowie aufgrund der umweltschädlichen Einflüsse und des hohen Kostenfaktors, wirkt die rasche Entwicklung der Informationsgesellschaft als starke Triebfeder für die Entwicklung hochdichter Massenspeicher, die Papier überall dort ersetzen, wo es sinnvoll erscheint. **Abb. 10: "Nanolandkarte"**

im Maßstab 1:10¹³⁷⁾. Zur Quantifizierung von Speicherflächendichten für Massenspeicher beziffert man die Anzahl von bits (Informationseinheiten), die auf einer Fläche von 1 inch² (6,45 cm²) untergebracht werden können. Bei Festplattenlaufwerken, wie sie in PCs vorhanden sind, wird heute 1 Gbit (1 Milliarde bits)/inch² erreicht. Für die nächsten fünf Jahre wird auf der Basis heutiger Technologien eine Steigerung auf 10 Gbit/inch² erreicht werden. Derartige Werte machen die Verwendung umfangreicher Datenmengen und komplexer Programme, wie wir sie heute gewohnt sind, möglich, würden aber bei weitem nicht ausreichen, um eine Feynman-Maschine zu steuern, deren Gesamtabmessung sich auf der Nanometerskala bewegt (vgl. Abb. 1). In Bezug auf die drastische Erhöhung der Flächenspeicherdichte haben Machbarkeitsstudien im Labor bereits erstaunliche Resultate hervorgebracht, die vor wenigen Jahren noch als reine Fiktion abgetan worden wären. So generierten J. Mamin und D. Rugar vom IBM Almaden Research Center die in Abb. 10 gezeigte Karte des amerikanischen Kontinents mit einem Durchmesser von 1 µm bei einem Maßstab von 1:10¹³ (10 Billionen). Jeder Bildpunkt besteht aus einigen 1000 Goldatomen, die aus der Sonde eines Rastertunnelmikroskops durch Applikation von Spannungspulsen auf der Substratoberfläche deponiert wurden. Die Einzelpulsdauer kann dabei nur ca. 1 Nanosekunde (1 milliardstel Sekunde) betragen. Identifiziert man jeden Bildpunkt mit einer Informationseinheit, so entspricht die nominelle Speicherdichte 1 Tbit (1 Billion bits)/inch², was etwa tausendmal größer als derzeit erreichte Werte ist. Unter Verwendung dieser Speichertechnik ließen sich Shakespeares gesammelte Werke problemlos auf einer Fläche von 200 µm x 200 µm (0,04 mm²) unterbringen. Die Machbarkeitsstudien von D. Eigler, ebenfalls vom IBM Almaden Research Center gehen noch einen Schritt weiter und erreichen eine grundsätzliche physikalische Grenze. Wie bereits in Abb. 2 gezeigt, gelang es Eigler, mit der Sonde eines Rastertunnelmikroskops individuelle Atome gezielt zu positionieren. Ein weiteres diesbezügliches Resultat ist in Abb. 11 gezeigt. Hier wurden sieben Xenon-Atome auf einer Nickel-Oberfläche mit der Sonde eines Rastertunnelmikroskops sukzessive arrangiert. Ein achttes Atom befindet sich neben der Kette. Die Abbildung zeigt neben den deutlich sichtbaren Xenon-Atomen auch die schwach ausgeprägte atomare Strukturierung des Substrates.

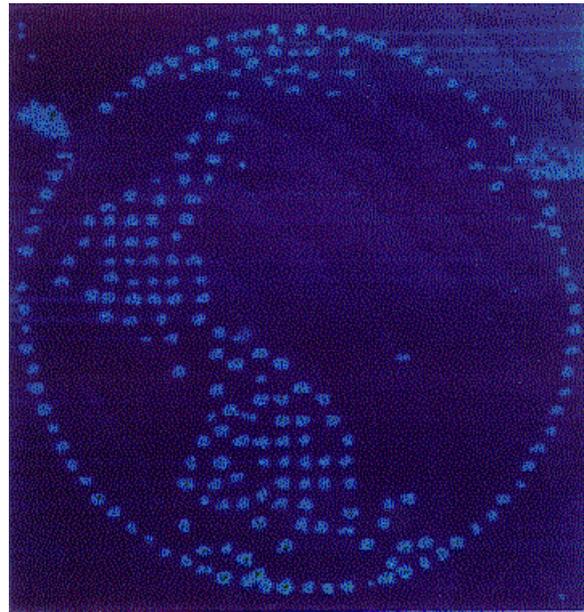
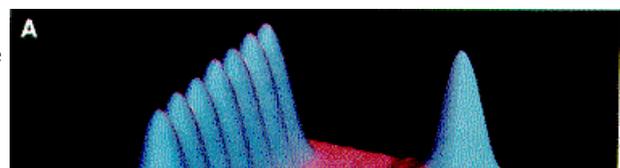


Abb. 11: Acht Xenon-Atome auf der Oberfläche eines Nickel-Filmes, arrangiert und abgebildet mit der Sonde eines Rastertunnelmikroskops⁸⁾.
Eine grundsätzliche naturwissenschaftliche Grenze hinsichtlich der ultimativen Minimierung der



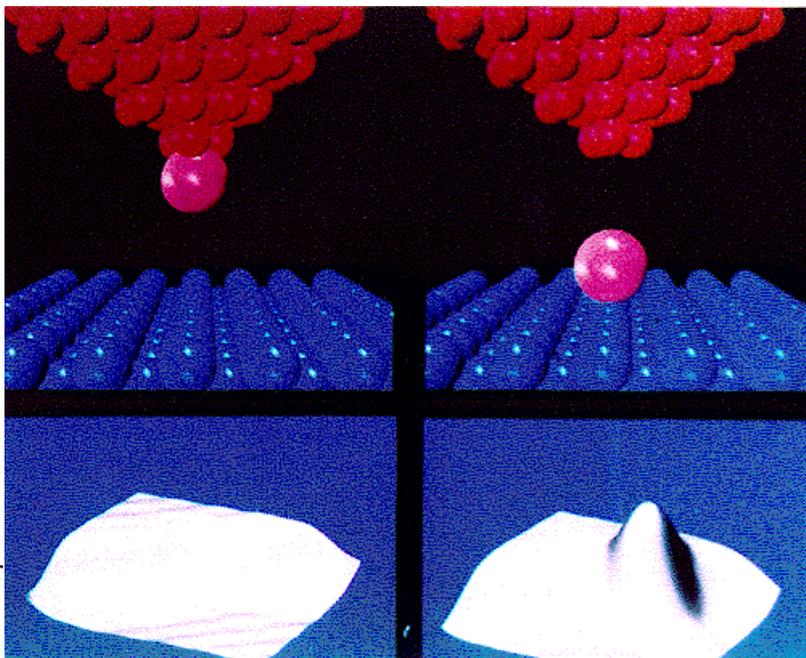
Informationseinheit stellt nun sicherlich das einzelne Atom dar. Dementsprechend würde die atomare Kette in Abb. 11 sieben Informationseinheiten enthalten und könnte als atomarer Abakus fungieren. Würde man in Massenspeichern einzelne Atome als Speicherelemente nutzen, so ließe sich nach Eiglers



Abschätzungen das in einem Jahr produzierte Datenspeichervolumen der Firma IBM auf einer Scheibe von 1 inch Durchmesser anbieten. Allerdings wird an diesem Beispiel auch sehr deutlich, welche Fiktion mit den dargestellten Fakten verbunden ist: Das Alter des Universums würde nicht ausreichen, um die 1 inch große Scheibe mit der Sonde eines Rastertunnelmikroskops sequentiell zu beschreiben. Die Fiktion besteht also darin, dass das wissenschaftlich Machbare in absehbarer Zeit bei hinreichend großem technischem und finanziellem Aufwand auch in jedem Fall nutzbar sein wird. Dies sei an einem weiteren Beispiel illustriert. Eigler gelang es ebenfalls, durch Anlegen geeigneter Spannungspulse zwischen der Sonde des Rastertunnelmikroskops und einem Nickel-Substrat ein Xenon-Atom gezielt und beliebig oft hin und her springen zu lassen (Abb. 12).

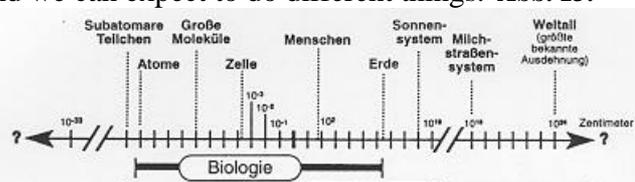
Abb. 12: Atomar kleiner elektrischer Schalter, realisiert durch das reproduzierbare Hin- und Herspringen eines Xenon-Atoms zwischen der Sonde eines Rastertunnelmikroskops und dem Substrat (oben). Die Schaltzustände manifestieren sich in einer Abhängigkeit des Tunnelstroms zwischen Sonde und Substrat¹.

Dabei zeigte sich, dass der Strom zwischen Sonde und Substrat signifikant von der jeweiligen Position des Xenon-Atoms abhängt. Die Anordnung kann damit als ein 'atomarer Schalter' betrachtet werden, der über zwei Schaltzustände verfügt. Der Schalter wäre damit in jedem Fall hinreichend klein, um in eine Feynman-Maschine eingebaut werden zu

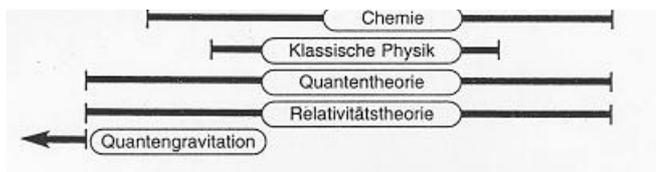


können (vgl. Abb. 1). Das fundamentale Problem in Bezug auf den Einsatz solcher Schalter besteht nun allerdings darin, dass es natürlich grundsätzlich schwierig ist, ein atomares Bauelement an den Makrokosmos anzukoppeln. So erreicht zwar Eiglers Schalter die ultimative Miniaturisierungsgrenze, ist aber mit einem experimentellen Aufbau verbunden, der einen ganzen Laborraum füllt. Es ist also evident, dass die diskutierten Top-down- und Bottom-up-Ansätze in Bezug auf eine baldige technische Anwendung eine reine Fiktion darstellen. Die wesentliche Bedeutung der Feynman-Maschinen liegt vielmehr darin, dass sie es uns erlauben, die Wirkmechanismen im Nanokosmos detailliert zu studieren und in Bezug auf ihre potentielle technische Applikation zu beurteilen. Dabei ist zu beachten, dass zwar prinzipiell die adäquaten physikalischen Beschreibungsweisen von Phänomenen im Nanokosmos durch die heutige Physik, etwa in Form der Quantentheorie, zur Verfügung gestellt werden (Abb. 13), dass aber das Zusammenwirken vieler an sich bekannter Phänomene in der Gesamtheit zu überraschenden und neuartigen Wirkmechanismen führen kann. Feynman hat genau diesen Gesichtspunkt bereits vor fast 40 Jahren als den wesentlichen Ansatzpunkt für nanotechnologische Entwicklungen erkannt: "So as we go down and fiddle around with the atoms downthere, we are working with different laws, and we can expect to do different things." **Abb. 13:**

Größenverhältnisse in der Natur und ihre Zuordnung zu klassischen Disziplinen. Grundsätzlich lassen sich die in der Nanotechnologie zu erwartenden und damit zu nutzenden Wirkmechanismen vollständig auf der Basis der heute bekannten Physik beschreiben. Die

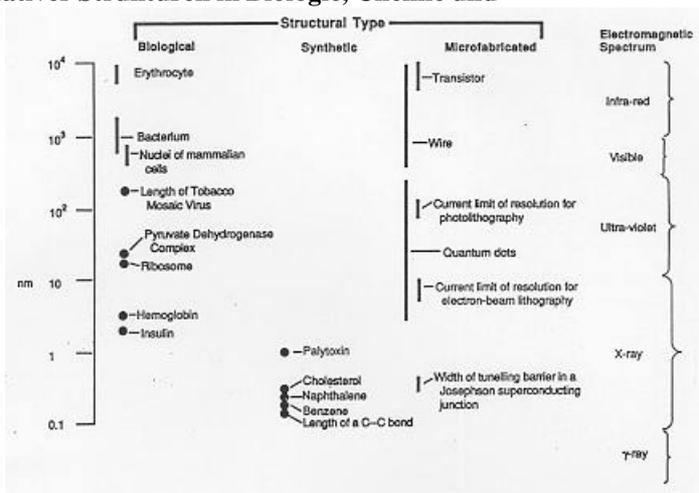


Komplexität kooperativer Phänomene in Nanostrukturen resultiert vielmehr aus den vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten einzelner Wirkmechanismen⁹⁾.



Selbstorganisation und Autoreproduktion

Wenn nicht durch explizite Anordnung einzelner Atome oder Moleküle, wie ist es dann möglich, komplexe Bauelemente im Nanometerbereich herzustellen? Auch diesbezüglich sind Feynman-Überlegungen heute von außerordentlich großer Relevanz: "I am inspired by the biological phenomena in which chemical forces are used in a repetitious fashion to produce all kinds of weird effects...one of which is the author." In Feynmans Sichtweise hängt die Beurteilung der Größe eines Nanobauelementes entscheidend vom disziplinären Standpunkt und von den zur Verfügung stehenden Techniken zu seiner Synthese ab. Nanostrukturen mit geometrischen Abmessungen im Bereich der Wellenlänge des ultravioletten Lichtes oder von Röntgenstrahlung sind mit den Methoden der heute üblichen Mikrostrukturtechnologie nur in Ausnahmefällen und nur im Labormaßstab herzustellen (Abb. 14). Mittels chemischer Synthesemethoden andererseits sind molekulare Einheiten in der Größe von einigen bis hin zu vielen nm unter der Randbedingung genau vorgegebener Funktionalität und Geometrie derzeit - trotz erheblicher Fortschritte der supramolekularen Chemie in den vergangenen Jahren - nicht herstellbar. In Bezug auf chemische Methoden sind also Nanobauelemente gleichsam unvorstellbar groß. Für einen Biologen schließlich sind funktionale nanometergroße Strukturen nichts Besonderes; sie sind vielmehr gewöhnlich in der Welt der Proteine, Viren und zellulären Organismen. **Abb. 14: Typische Größe repräsentativer Strukturen in Biologie, Chemie und Physik/Mikrotechnologie. Der metrischen Größenskala (links) sind die Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums (rechts) gegenübergestellt¹⁰⁾.**



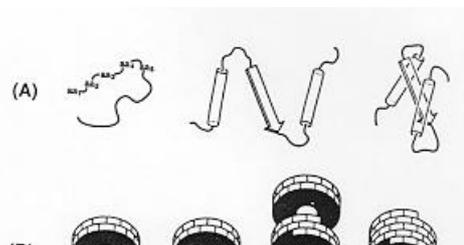
Unter dem Einfluß der molekularen Selbstorganisation, also der spontanen Verbindung von Molekülen unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen entstehen strukturell und funktionell wohldefinierte Aggregate, wie beispielsweise ein Protein oder ein komplettes Virus (Abb. 15).

Molekulare Selbstorganisation ist also das zentrale Phänomen, auf das man bezüglich

der Herstellung von Nanomaschinen große Hoffnungen setzt. Eines der bislang am besten untersuchten und charakterisierten Selbstorganisationssysteme ist das in Abbildung 15b schematisch dargestellte Tabakmosaik-Virus. Das fertige Gebilde ist 300 nm hoch und hat einen Durchmesser von 18 nm. Es besteht aus 2.130 identischen Proteineinheiten, jede wiederum aus 180 Aminosäureresten. Zunächst formen sich hieraus durch Selbstorganisation scheibenförmige Untereinheiten, die zwei Umdrehungen der Virushelix entsprechen. Die Scheibenstrukturen verbinden sich dann mit dem RNS-Strang aus 6400 Nukleotiden, um das vollständige Virus zu formen. Die Proteinfaltung (Abb. 15a) verläuft exakt nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten: Parallele Bildung vieler kleiner Untereinheiten (20 Aminosäuren), Assoziation zu wohlstrukturierten Gebilden und schließlich funktionelle Faltung der gesamten Proteinstruktur.

Abb. 15: Selbstorganisation am Beispiel der Proteinfaltung (A) sowie der Entwicklung des Tabakmosaik-Virus (B)¹⁰⁾.

Die molekulare Selbstorganisation und Autoreproduktion führt also zur Bildung stabiler, strukturell wohldefinierter Aggregate, die ihrerseits durch nicht-kovalente Bindungen miteinander vernetzt sind. Die Analyse der intermolekularen



Paar-Potentiale, die zur Ausbildung der nicht-kovalenten Wechselwirkungen molekularer Oberflächen in biologischen Aggregaten führen, ist heute ein zentrales Betätigungsfeld der Biochemie. Die Ausnutzung von Selbstorganisationsprozessen gewinnt aber auch zunehmend an Bedeutung als geeignete Strategie zur synthetischen Generierung nicht-biologischer Strukturen mit Dimensionen im Bereich



von 1 bis 100 nm und entsprechenden Molekulargewichten von 10⁴ bis 10¹⁰ Dalton¹⁰⁾. Dies eröffnet potentiell die Möglichkeit, mit Hilfe chemischer Methoden Nanostrukturen zu synthetisieren, die in Bezug auf ihre typischen Abmessungen vergleichbar werden mit solchen, die mittels lithographischer Methoden, also eines Top-down-Ansatzes herstellbar sind (vgl. Abb. 4). Es ist vielleicht nicht so überraschend, dass man durch das Sammeln von Erfahrungen an Feynman-Maschinen und bei der zukünftigen Konzeption von Nanobau-elementen und kompletten Nanomaschinen letztlich bei dem Verfahren anlangt, das die Natur nach einigen Milliarden Jahren als das geeignetste gewählt hat. Wir sind erst dabei zu beginnen, die Grundlagen der molekularen Selbstorganisation zu verstehen. Dieses Verständnis setzt voraus, dass wir unsere makroskopische Welt, die bezüglich der Wirkmechanismen auch unsere heutigen Mikrobau-elemente umfaßt²⁾ und die aus Sicht des Physikers geprägt ist durch thermodynamische Mittelwerte über mindestens einige tausend Atome, komplett verlassen. Für eine Nanomaschine spielt gleichsam die Position und Eigenschaft eines jeden einzelnen individuellen Atoms eine maßgebliche Rolle.

Der Schritt über die Schwelle

Angesichts der sozio-ökonomischen Relevanz, aber auch im Sinne optimaler flankierender Maßnahmen sind Prognosen zur Entwicklung der Nanotechnologie von erheblicher Bedeutung¹⁾. Technologie-Entwicklungsprognosen sind generell schwierig und wir haben gelernt, vorsichtig mit ihnen umzugehen. Dennoch gibt es natürlich bis in die jüngste Zeit grobe Fehleinschätzungen mit erheblichen wirtschaftlichen Auswirkungen. Im Falle der Nanotechnologie ist eine Entwicklungsprognose aus drei wesentlichen Gründen besonders problematisch.

Forschung ist mehr denn je eine Angelegenheit der Öffentlichkeit geworden. Dies ist ein äußerst vernünftiger Prozeß, da experimentelle Forschung besonders im Bereich der Nanotechnologie erhebliche Steuermittel verschlingt und die Technologiefolgeneinschätzung nicht nur eine Sache der Wissenschaftler sein kann. Im Rahmen dieser Entwicklung hat die Wissenschaft es gelernt, sich selbst darzustellen. Der gewachsene Stellenwert der Selbstdarstellung birgt aber auch Probleme in sich. Angesichts der Möglichkeit, mittels einer technisch perfektionierten Öffentlichkeitsarbeit für die eigene Forschung zu werben, wird es für Öffentlichkeit und Forschungspolitiker immer schwieriger, zwischen wichtigen Forschungsbeiträgen und pseudospektakulären Resultaten zu unterscheiden. Dies erschwert wiederum Profilbildung und kohärente Forschung im Sinne des Erkenntnisgewinns und der Möglichkeit der technischen Umsetzung im Dienste der Gesellschaft.

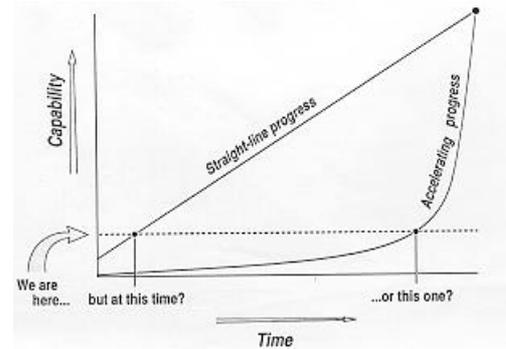
Die Entwicklung von Nanoprodukten ist ein stark rückgekoppelter Prozeß zwischen Wissenschaft und industrieller Produktion. Dies ist darauf zurückzuführen, dass unabhängig von allen Unsicherheiten in Technologie-Entwicklungsprognosen eindeutig festzustellen ist, dass der zeitliche Abstand zwischen wissenschaftlichem Erkenntnisgewinn und der Umsetzung in ein hieraus abgeleitetes technisches Produkt dramatisch kleiner wird. So benötigt die Nanowissenschaft in erheblichem Maße heutige Hochtechnologieprodukte, wie etwa Höchstleistungscomputer, die gerade aufgrund der mit ihnen betriebenen Forschung in kurzer Zeit überholt sein werden. Wir haben bislang wenig Erfahrung mit der Abschätzung der Eigendynamik eines derartig stark rückgekoppelten Evolutionsprozesses zwischen Wissenschaft und industrieller Anwendung.

Nanotechnologie ist par excellence ein multidisziplinäres Arbeitsgebiet. Wichtige Meilensteine wie die Synthese von Proteinen oder die mechanische Positionierung einzelner Atome wurden bereits passiert. Der Fortschritt in den wissenschaftlichen Einzeldisziplinen wie etwa in der Physik der mesoskopischen Systeme oder in der supramolekularen Chemie mag vielleicht aus der Vergangenheit heraus für die nächsten Jahre noch einigermaßen extrapolierbar sein. Die Nanotechnologie wird jedoch ihre wesentlichen Teilerfolge aus Synergismen auf interdisziplinärem Felde erzielen. Dabei

liefert eben nicht die Summe der Fortschritte in den einzelnen Disziplinen den Gesamtfortschritt sondern erheblich weniger. Vieles spricht zudem dafür, dass es in der Nanotechnologie stets mehrere technisch weitgehend gleich relevante, aber wissenschaftlich sehr unterschiedliche Approximationen an das gesteckte Ziel gibt.

Abb. 16: Zum Problem von Entwicklungsprognosen in der Nanotechnologie¹⁾.

Die genannten Unwegbarkeiten erschweren es, die Entwicklungskurve der Nanotechnologie in eine für uns überschaubare mathematische Form (wie etwa Halbierung der Strukturabmessungen alle zwei Jahre) zu bringen (Abb. 16). Speziell die multidisziplinären Synergismen führen zu einer stark nichtlinearen Entwicklungskurve, deren Charakterisierung zur weiteren Extrapolation zumindest ein ausreichendes zeitliches Intervall zur Beurteilung der bisherigen Entwicklungen voraussetzen würde. Dieser Beobachtungszeitraum steht uns aber bislang nicht zur Verfügung, da es sich bei dem Eintritt ins Nanozeitalter gegenüber der heute verfügbaren Mikrotechnologie um einen Evolutionssprung handelt²⁾. Ein gewisser intuitiver Konsens vieler Experten besteht allerdings darin, dass bereits in den ersten zehn Jahren des kommenden Jahrhunderts gewisse Standardkomponenten zur Nanobauelementherstellung industriell zur Verfügung stehen werden, wie z. B. 'Molekularfabriken' ('General Purpose Molecular Assemblers')¹⁾



Wir sind in Deutschland im Wettlauf um die ersten Errungenschaften der Nanotechnologie sicherlich nicht aus der ersten Reihe gestartet. Japan hat sich bereits vor einigen Jahren konsequent der Machbarkeitsforschung in Form gewaltiger Verbundprojekte, die teilweise über zehn Jahre laufen und bei ernsthafter Beteiligung der Industrie kompromißlos gefördert werden, zugewandt. Beispiele für laufende oder bereits abgeschlossene Projekte sind:

- Yoshida Nanomechanism Project,
- Hotani Molecular Dynamic Assembly Project,
- Kunitake Molecular Architecture Project,
- Nagayama Protein Array Project,
- Aono Atomcraft Project,

wobei die ehrgeizigen Forschungsziele durch die Projekttitel prägnant umschrieben werden. Die USA und in Europa vor allem die Schweiz und Großbritannien haben sich in Form flankierender forschungspolitischer Maßnahmen ebenfalls intensiv der Nanoforschung zugewandt. Auch in Deutschland hat man die außerordentliche Relevanz der Nanotechnologie erkannt. Derzeit wird das Feld mittels zahlreicher Expertendiskussionen und erster punktueller Forschungsförderungen definiert. Von größter Bedeutung wird gerade für Deutschland sein, dass sich fruchtbare multidisziplinäre Ansätze entwickeln können. Da bei uns über die vergangenen Jahrzehnte Humboldt'sche Ideale weitestgehend verloren gegangen sind, besteht in Bezug auf die Nanotechnologie Nachholbedarf. Eine gewisse Hoffnung wird allgemein in den derzeitigen Umbruch der bundesdeutschen Lehr- und Forschungslandschaft gesetzt. Diese Hoffnung kann sich allerdings nur erfüllen, wenn es uns gelingt, die Profilbildung in Universitäten und Großforschungseinrichtungen konsequent an das spezifische Forschungs- und Ausbildungsbedürfnis des 21. Jahrhunderts anzupassen. Dies bedeutet vorrangig das konsequente Aufgeben eines anachronistischen Selbstverständnisses der einzelnen naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen, was uns bislang häufig genug daran hindert, über die interdisziplinären Grenzen und damit über die Schwelle zur Nanotechnologie zu schauen. Das American Institute of Physics (AIP) hat jedenfalls bereits vorsorglich die Tradition der Feynman-Preise²⁾ fortgesetzt. So wurden jeweils \$ 1.000,- ausgesetzt für die mechanische Synthese • von 10 C₆₀-Molekülen oder wahlweise 3 C₁₈₀-Molekülen • von mindestens 10 nm x 10 nm Graphit unter Verwendung von Tunnel- oder Kraftmikroskopen. Literaturhinweise 1) K.E. Drexler and C. Peterson, Unbounding the Future (Morrow, New York, 1991)

- 2) U. Hartmann, Magazin Forschung 2/96, S. 45 ff
 - 3) R. Feynman, J. Micromech. Syst. 1, 60 (1992): Transkription
 - 4) H. Rohrer, Ultramicroscopy 42-44,1 (1992)
 - 5) U. Hartmann, Magazin Forschung 1/95, S. 26 ff
 - 6) FR. 10.2 - UdS (unveröffentlicht)
 - 7) D. Clery, New Scientist 7, 42 (1992)
 - 8) J.A. Stroscio and D.M. Eigler, Science 254, 1319 (1991)
 - 9) G.M. Edelman, in: Denkanstöße '97 (Piper, München, 1996) S. 10 ff.
 - 10) G.M. Whitesides, J.P. Mathias, and C.T. Seto, Science 254, 1312 (1991)
-