

Nanotechnologische Ansätze - mehr als Visionen?

U. Hartmann

Institut für Experimentalphysik der Universität des Saarlandes

September 2000

Die bekannten Unsicherheiten, die aus ökonomischer, naturwissenschaftlicher und technischer Sicht bezüglich der weiteren Miniaturisierung elektronischer Bauelemente ab etwa dem Jahr 2012 bestehen, geben Anlaß, nanotechnologische Ansätze kritisch bezüglich ihrer Verifizierbarkeit in Form alternativer Technologien zu analysieren. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, daß die typische Zeitspanne zwischen grundlegendem wissenschaftlichem Erkenntnisgewinn und Überführung der Erkenntnisse in eine Massentechnologie zehn bis fünfzehn Jahre beträgt. Der Beitrag diskutiert der Nanotechnologie zugrunde liegende Philosophien zur Konstruktion funktionaler Einheiten auf der Basis von Top-down- und Bottom-up-Ansätzen. Während Top-down-Ansätze am ehesten eine gewisse Komplementarität zu bisherigen Technologien aufweisen, sind bei den Bottom-up-Ansätzen grundlegende Strategien, wie Selbstorganisation, Autoreproduktion und Defekttoleranz kritisch zu beleuchten. In diesem Zusammenhang kommt den "Nanowerkzeugen", die zu einem wesentlichen Teil Wegbereiter moderner Nanotechnologien sind und sowohl die Fabrikation als auch Analyse individueller funktionaler Einheiten gestatten, eine erhebliche Bedeutung zu. Exemplarisch wird am Beispiel der Nanostrukturen aus Biomolekülen der Fortschritt im Bereich der molekularen Nanotechnologie, die wesentliche Voraussetzung für eine Molekularelektronik ist, illustriert. Schließlich wird am Beispiel nicht evolutionärer "roadmaps" einerseits verdeutlicht, welche erheblichen Erwartungen in nanotechnologische Ansätze gesteckt werden und andererseits, welche er-

heblichen Unsicherheiten es bezüglich der tatsächlichen Möglichkeiten und der vielen optionalen Wege gibt.

I. Ausgangssituation

Wie bekannt ist, führt das weitere Herunterskalieren der kritischen Dimensionen elektronischer Bauelemente entsprechend der bisherigen Miniaturisierungsrate in absehbarer Zeit in einen Bereich, der aus physikalischer, aus technischer und auch aus ökonomischer Sicht gravierende Fragen aufwirft. Dies wird nach dem aus heute verfügbaren R&D-Erkenntnissen abgeleiteten Konsens etwa im Jahre 2012 der Fall sein. Aus physikalischer Sicht ist natürlich die zunehmende Relevanz quantenmechanischer Phänomene in genügend kleinen Bauelementen Grund, die Frage aufzuwerfen, ob es sinnvoll ist, sich bei zukünftigen Bauelementekonzepten quantenmechanischer Phänomene zu bedienen anstatt zunehmend durch sie limitiert zu sein. Aus technischer Sicht bestehen natürlich insbesondere Fragen bezüglich der Limitierungen der konventionellen Lithographie, aber auch bezüglich inhärenter Materialeigenschaften, die beim Herunterskalieren unter der Bedingung z. B. konstanter Feldstärke relevant werden. Schließlich stellt sich aus ökonomischer Sicht die Frage, inwieweit die Marktbedingungen die mit der weiteren Miniaturisierung auf der Basis konventioneller Technologien zu erwartenden erheblichen Investitionen rechtfertigen.

Vor dem Hintergrund wachsender Fragen bezüglich einer weiteren evolutionären Entwicklung sind auf Seiten der Grundlagenforschung in den vergangenen fünfzehn bis zwanzig Jahren erhebliche Fortschritte in der Fabrikation, in der Analyse und im Verständnis nanotechnologisch relevanter Systeme gelungen. Bei einer Zeitspanne von typisch zehn bis fünfzehn Jahren für die Einführung eines Resultates der Nanostrukturforschung in eine industrielle Nanotechnologie ist jetzt der Zeitpunkt gekommen, um nanotechnologische Ansätze in bezug auf ihre Tauglichkeit insbesondere zur Substitution konventioneller Fertigungsverfahren in der Mikroelektronik zu evaluieren.

II. Grundlagen der Nanotechnologie

Der Grundgedanke aller nanotechnologischen Ansätze besteht darin, Zugriffsmöglichkeiten auf elementare Bausteine der Materie und ihre Selbstorganisation zu nutzen.

Damit ergibt sich eine Kontrolle des Aufbaus der Materie auf atomarer Skala. Diese Kontrolle kann dazu benutzt werden, makroskopische Eigenschaften durch Vorgaben auf atomarer Skala gezielt zu etablieren. Dabei lassen sich Baupläne und Ordnungsprinzipien der Natur sukzessive für neue Materialien, Bauelemente, Schaltkreise, Systeme und Architekturen nutzen. Die Abmessungen relevanter funktionaler Einheiten sind dabei typisch etwa tausendfach kleiner als diejenigen von Mikrosystembauelementen. Eine inhärente Basis vieler nanotechnologischer Konzepte ist das hohe Maß an Interdisziplinarität, welches eine Vereinigung der Möglichkeiten physikalischer Gesetze, chemischer Stoffeigenschaften und biologischer Prinzipien zum Gegenstand hat.

Prinzipiell lassen sich individuelle funktionale Nanostrukturen durch sukzessives Herunterskalieren von Makro- und Mikrostrukturen, d. h. mittels eines Top-down-Ansatzes, genauso erzeugen wie durch Bottom-up-Ansätze, die einzelne Atome oder Moleküle als Bausteine verwenden. Top-down-Ansätze entsprechen der klassischen Verfahrensweise in der Festkörpertechnologie, während Bottom-up-Ansätze dem Vorgehen auf Basis der supramolekularen Chemie entsprechen. Es gibt heute sowohl hinsichtlich der physikalisch-technischen Vorgehensweise als auch hinsichtlich der chemischen Vorgehensweise Beispiele für die Fabrikation funktionaler Einheiten mit kritischen Dimensionen im Nanometerbereich, also in einem Größenbereich, in dem sich auch eigenschaftsbestimmende Organisationseinheiten biologischer Systeme, wie etwa Proteine befinden.

Die größte Flexibilität bei der Herstellung von Nanobauelementen mit völlig neuen funktionalen Eigenschaften und auch das größte Potential für kostengünstige Herstellungsmethoden hat natürlich das "molecular engineering", d. h. der Aufbau der Nanostrukturen durch sukzessive Assemblage von Atomen oder Molekülen. Um hierauf basierende Produktionsmethoden zu entwickeln, ist es essentiell, Selbstorganisations- und Autoreproduktionsphänomene zu verstehen und zu beherrschen. Derartige Phänomene führen dazu, daß sich unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen biologische Moleküle und Organisationseinheiten ohne äußeres Zutun mit extrem hoher Reproduzierbarkeit und Defekttoleranz entwickeln. Ein Beispiel für einen komplexen Selbstorganisationsmechanismus in einem gut verstandenen biologischen System ist die Entstehung des Tabakmosaikvirus, eines helixförmigen Nanoteilchens mit charakteristischen Dimensionen von 300 nm x 18 nm. Das Virus setzt sich myriadenfach

aus 2130 identischen Proteineinheiten zusammen, jede mit 158 Aminosäureresten. Der RNA-Strang besteht aus 6400 Nukleotiden.

Allgemein haben nanotechnologische Ansätze die Fabrikation individueller funktionaler Nanostrukturen, wie etwa diejenige elektronischer Bauelemente, die Synthese neuartiger nanokomponierter Materialien oder die Entwicklung von Verfahren zur Herstellung und Analyse der Strukturen und Materialien zum Gegenstand.

III. Nanowerkzeuge

Abgesehen von frühen visionären Konzepten sind heute als wesentliche Wegbereiter moderner Nanotechnologien die Rastersondenverfahren anzusehen. Das Rastertunnelmikroskop wurde 1982 entwickelt und die Entwicklung wurde 1986 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Bis heute ist auf der Basis des Funktionsprinzips des Rastertunnelmikroskops eine ganze Familie von Rastersondenverfahren entstanden, die es erlauben, physikalische, chemische und biologische Eigenschaften bis hinunter zur atomaren Skala zu analysieren und manipulieren. Die Rastersondenverfahren sind wie wohl keine andere Methodenklasse zuvor unentbehrliche Werkzeuge bei der Entwicklung nanotechnologischer Ansätze. Neben ihrer erheblichen Bedeutung für die Grundlagenforschung finden Rastersondenverfahren heute bereits zunehmend Anwendung in Bereichen der industriellen Produktionskontrolle und Qualitätssicherung. Dies gilt insbesondere für die Halbleiter- und Magnetspeicherindustrie. Die wichtigsten Repräsentanten der Familie der Rastersondenverfahren sind die Rastertunnelmikroskopie, die Rasterkraftmikroskopie und optische Rasternahfeldmikroskopie.

IV. Bioinspirierte, biomimetische und biokomponierte Systeme als exemplarisches Beispiel

Das menschliche Hirn arbeitet mit etwa 10^{16} Operationen pro Sekunde bei 10^{14} "interconnects" mit ultraniedriger Leistungsaufnahme und auf der Basis defekttoleranter und selbstheilender Mechanismen. Ein Gramm DNA würde den gesamten literarischen Inhalt der größten weltweit verfügbaren Bibliotheken speichern. Es ist evident, daß sich angesichts dieser außerordentlichen Leistungsfähigkeit biologischer Systeme

langfristig ausgerichtete nanotechnologische Ansätze auf den direkten Einsatz von Biomolekülen, zum Teil in Kombination mit Festkörpertechnologie, auf die Entwicklung bioinspirierter Algorithmen, wie z. B. neuronale Netzwerke, oder auf biomimetische Vorgehensweisen, etwa bei der Materialentwicklung, konzentrieren. Aus Sicht maximaler Miniaturisierung bei maximaler Funktionalität der Organisationseinheit würden biologische Moleküle die "ultima ratio" für elektronische Bauelemente darstellen. In der Tat gibt es eine Fülle vielversprechender Resultate der Grundlagenforschung, die auf der Basis molekularelektronischer und etwa photochemischer Ansätze weitere Forschungen in diesem Bereich massiv rechtfertigen. Neben dem Erkenntnisgewinn hinsichtlich der vielfältigen funktionalen Eigenschaften von Biomolekülen ist es von außerordentlicher Wichtigkeit, biologisch inhärente Phänomene wie Selbstorganisation, Assemblage, Autoreproduktion, Fehlerredundanz und Selbstheilung zu verstehen. Besondere Bedeutung kommt hierbei denjenigen Ansätzen zu, welche auf den erstaunlichen physikochemischen Eigenschaften von DNA-Molekülen basieren, da DNA das bekanntlich evolutionär ausgewählte Molekül für die Informationsspeicherung und Prozessierung ist.

Bereits kurzfristig von erheblicher Bedeutung sind bioinspirierte Verfahren zur Lithographie, zur Deposition oder zur selbstorganisierten Synthese elektronisch funktionaler Nanostrukturen. So basieren "Post"- oder "Soft"-Lithographieverfahren mit höchster industrieller Relevanz auf Monolagenschichten sich selbst organisierender organischer Moleküle oder auf Langmuir-Blodgett-Schichten. Die direkte Synthese von Nanopartikeln und "Quantendots" erfolgt außerordentlich erfolgreich auf der Basis mizellarer "Nanoreaktoren".

Die bisherigen theoretischen und experimentellen Ansätze zur Molekularelektronik werden vielversprechend komplettiert durch die Entwicklung von Zellularautomaten-Architekturen bei kapazitiver oder Tunnelkopplung der einzelnen Elemente, durch defekttolerante Verdrahtungsarchitekturen auf der Basis von organischen oder anorganischen Nanodrähten sowie durch neuronale Netzwerkarchitekturen.

V. Prospektive Implikationen

Langfristige Technologievorhersagen waren nie sehr zuverlässig. In der Ausgabe der Zeitschrift *Popular Mechanics* vom März 1949, also ca. ein Jahr nach der Erfindung des Transistors, sagten Experten vorher, daß es nicht ausgeschlossen sei, daß es zukünftig Computer mit einer Rechenleistung von 5000 Operationen pro Sekunde, einem Gewicht von nur 3000 Pfund und einer Leistungsaufnahme von nur 10 Kilowatt geben könnte. Natürlich war es für damalige Experten nicht möglich, den wirklichen Siegeszug des Transistors und der damit verbundenen Technologien abzuschätzen. Ebenso ist es aus heutiger Sicht fraglich, welche wirklichen Erfolge nanotechnologische Ansätze über die nächsten Dekaden erzielen werden. Es gibt jedoch weitestgehenden Konsens unter führenden Experten darüber, daß nanotechnologische Ansätze einen umfassenden Einfluß auf technologische Prozesse haben werden und die Substitution konventioneller Technologien schneller als zum jetzigen Zeitpunkt absehbar erfolgen könnte. Da es sich zum größten Teil um nichtevolutionäre Entwicklungen handelt, sind Prognosen, wie wir sie aus den evolutionären "roadmaps" kennen, grundsätzlich nicht möglich. Dennoch müssen natürlich alternative Szenarien entwickelt werden, da angesichts der langen Zeit zur Überführung von Grundlagenergebnissen in die industrielle Produktion frühzeitig Technologieoptionen gewahrt werden müssen. Eine für die gegenwärtige Situation symptomatische Prognose, die in stärkstem Maße auf einer raschen Entwicklung der Nanotechnologie basiert, stellt etwa die von der NASA verfaßte "avionics roadmap" dar, die das "Deep Space Systems Technology Program" X 2000 definiert. Um die bei Raumfahrzeugen geforderte Reduktion von Volumen, Masse und Leistungsaufnahme im Vergleich zum "Mars Pathfinder" zu erreichen, bedarf es erheblicher Durchbrüche bei nanotechnologischen Materialien und Bauelementen. Diese Durchbrüche sollen in fünf Teilprojektabschnitten, die klar spezifiziert sind, erreicht werden. Ähnliche nichtevolutionäre Prognosen existieren auch im Bereich der Magnetspeicherindustrie, die natürlich in gewisser Weise als Gradmesser für die Entwicklung der Informationstechnologie gesehen werden kann. Hier könnte sich die Entwicklung über "Spinvalve"-Sensoren zum heutigen Zeitpunkt, über "advanced GMR heads" im Jahre 2005, über "patterned media" im Jahre 2010, über "3d memory"-Architekturen im Jahre 2020 bis hin zum "quantum computing" im Jahre 2030 vollziehen. Es wird deutlich, daß eine ganze Kette nichtevolutionärer Entwicklungen möglich sein könnte, deren Realisierung natürlich insbesondere auch unter ökonomischen Ge-

sichtpunkten gesehen werden muß. Prognosen über einige Dekaden können sich natürlich absolut gesehen eine größere zeitliche Unschärfe erlauben als Prognosen das nächste Jahrzehnt betreffend. In gewisser Weise sind also letztere bedeutend diffiziler.

Kurzfristig ist natürlich besonders von Bedeutung, ob es eine Technologie geben könnte, welche die CMOS-Technologie ablöst. Eine solche Technologie müßte sich - und dies ist eine triviale Feststellung - durch technische Überlegenheit bei niedrigeren Produktionskosten auszeichnen. Technologien, die aufgrund einer Nichtkomplementarität hohe Investitionen voraussetzen und bestenfalls eine mit der CMOS-Technologie vergleichbare technische Leistungsfähigkeit liefern, sind kurzfristig natürlich chancenlos. Aus physikalischer Sicht sind heute a priori drei Quantenbauelemente vielversprechend zur Substitution des MOSFET, die grundsätzlich das Potential für eine Miniaturisierung weit in den Nanobereich hinein repräsentieren: Der Einzelelektronentransistor (SET), Elektronenwellenleiter (EW) und Josephson-Kontakte (JJ). Statt einer willkürlichen Spannung an einem Kondensator nutzen die genannten Bauelemente das elementare Ladungsquantum q (SET), das elementare Widerstandsquantum h/q^2 (EW) oder das elementare magnetische Flußquantum $hc/2q$ (JJ). Die quantenmechanische Funktionsweise der Bauelemente macht es möglich, mit extrem kleinen Strömen und damit ultrakleiner Leistungsaufnahme zu arbeiten. Problematisch ist allerdings, daß die Bauelemente entweder nur bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs funktionieren (JJ) oder ihre Zuverlässigkeit bei Raumtemperatur bislang nicht ausreichend gewährleistet werden kann (SET, EW). Darüber hinaus gibt es besonders im Fall von SET-Bauelementen bislang eigentlich keine Architektur, welche sich wirklich die inhärenten Vorteile der Bauelemente zunutze macht. Dennoch gibt es besonders im Bereich von "Quantum Dot Flash Memories" nicht unerhebliche industrielle Forschungsaktivitäten, da hier am ehesten eine Komplementarität zu vorhandenen Technologien hergestellt werden könnte. Zu erwähnen sind schließlich noch die erheblichen Anstrengungen, die derzeit weltweit gemacht werden, um die MRAM-Technologie zur möglichen Substitution von Halbleiter-RAM weiter voranzutreiben. MRAM bieten den erheblichen inhärenten Vorteil, daß sie nicht flüchtig und die möglichen Zugriffszeiten sehr kurz sind. Eine hohe Integrationsdichte könnte hingegen wegen der Komplexität der benötigten Mate-

rialsysteme Probleme aufwerfen. Selbst über die kommenden fünfzehn Jahre sind präzise Prognosen hinsichtlich der genannten Ansätze problematisch.

Langfristig scheint es nicht ausgeschlossen, daß die siliciumbasierende Technologie den Weg der Stahlindustrie gehen könnte. Stahl ist heute ein universell einsetzbarer und kostengünstiger Werkstoff; während andere Technologien, basierend etwa auf Aluminium oder Kunststoffen, in einigen Bereichen der Stahlindustrie aufgrund von Kosten- oder Leistungsmerkmalen deutlich überlegen sind. Trotz dieser Alternativen koexistiert die Stahltechnologie mit diesen anderen Technologien und bildet nach wie vor in gewisser Weise den zentralen Bereich unserer "mechanischen" Technologiekultur. Eine Verdrängung der siliciumbasierenden Technologie könnte partiell entstehen durch alternative Konzepte der Informationsverarbeitung. Eine "Killer-Technologie" könnte auf Dauer z.B. durch Polymer- oder Kunststoffbauelemente entstehen, die zumindest bei Verfügbarkeit geeigneter hochauflösender Druckverfahren das Potential für extrem niedrige Fertigungskosten hätten. Gegenwärtig ist allerdings nicht erkennbar, ob jemals ein genügendes Maß an Miniaturisierung für eine breite Anwendung gegeben sein könnte.

Weiterführende Literatur:

R.W. Siegel, E. Hu and M.C. Roco (Eds.), *Nanostructure Science and Technology - a Worldwide Study*, WTEC Report, September 1999

M.C. Roco, R.S. Williams and P. Alivisatos (Eds.) *Nanotechnology Research Directions*, IWGN Workshop Report, September 1999

G. Timp (Ed.), *Nanotechnology* (Springer, New York, 1999)

G. Bachmann, *Innovationsschub aus dem Nanokosmos*, (VDI-TZ, Düsseldorf, 1998)