

Mit dem Jahrtausendwechsel bahnt sich der Eintritt in eine technische Ära an, die einerseits durch eine schier unvorstellbare Steigerung der Effizienz neuer Materialien, elektronischer Bauelemente und mechanischer Komponenten geprägt sein wird und andererseits zu noch unüberschaubaren sozialen und wirtschaftlichen Umwälzungen der Industriegesellschaft führen wird. Treibende Kraft für den Eintritt in diese neue Ära ist das technologische Bestreben, funktionale Komponenten eines gesamten Systems immer weiter zu miniaturisieren. Dieses Bestreben ist nicht neu, sondern war schon immer Basis technologischer Fortschritte. Daß dennoch gegenwärtig ein beträchtlicher Evolutionssprung bevorsteht, hat seine Ursache darin, daß bisher verfolgte Miniaturisierungskonzepte nunmehr an physikalische Grenzen stoßen, die auch durch eine beliebige technische Raffinesse nicht mehr überwindbar sind.

Der Übergang von der Mikro- zur Nanotechnologie ist nicht durch eine stetige Reduktion der Strukturabmessungen funktionaler Elemente geprägt, sondern dadurch, daß das Unterschreiten bestimmter kritischer und systemimmanenter Grenzwerte völlig neuartige Konstruktionsprinzipien erfordert. Dieser Sachverhalt wird deutlich, wenn man zunächst einmal die historische Entwicklung der Mikrotechnologie, die ja heute eine Vielzahl von technischen Produkten insbesondere im Bereich der Informationstechnologie prägt, und das allmähliche Erreichen ihrer physikalischen Grenzen betrachtet.

Uwe Hartmann

Auf der Schwelle zur Nanotechnologie - Teil 1: Von der Mikro- zur Nanotechnologie

Die Entwicklung der Mikroelektronik

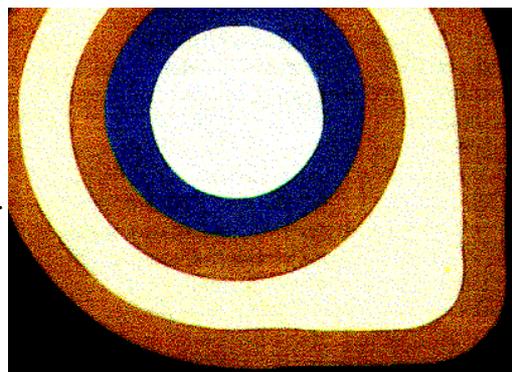
Die Mikrotechnologie umfaßt die Herstellung funktionaler Bauelemente-Komponenten mit charakteristischen Strukturabmessungen im mm-Bereich. Zu Beginn dieser technologischen Ära, die unser heutiges Leben auf vielfältige Weise bestimmt, stand eine geradezu visionäre Rede des theoretischen Physikers und Nobelpreisträgers R. Feynman zur Eröffnung der Jahrestagung des American Institute of Physics im Dezember 1959. In dieser denkwürdigen Rede setzte sich Feynman aus der Sicht eines Theoretikers mit vielen Konsequenzen der Miniaturisierung auseinander, die bezüglich heutiger experimenteller und technologischer Bemühungen hochaktuell geworden sind. Feynmans hypothetische elektrische und mechanische Bauteile sind als "Feynman-Maschinen" in die Literatur eingegangen. Um seine Überzeugung von den Möglichkeiten der Miniaturisierung zu unterstreichen, stiftete Feynman damals zwei mit jeweils 1000\$ dotierte Preise. Ein Elektromotor sollte auf ein Volumen von $1/64 \text{ Inch}^3$ reduziert werden. Dieser Preis wurde bereits im Jahre 1960 vergeben. Die Reduktion einer Buchseite auf $1/25.000$ der Standard-Fläche gelang hingegen erst 1985.

Feynmans Visionen standen am Anfang einer atemberaubenden Entwicklung, die zunächst insbesondere den Bereich der Elektronik erfaßte. Die soziale Manifestation dieser größten Umwälzung der Industriegesellschaft in den letzten 50 Jahren besteht in der Hinwendung zur "Information". Ein populäres Beispiel hierfür ist die globale Vernetzung von Computern, die ja derzeit die einzelnen Haushalte erfaßt. Derzeit beträgt der Gesamtumsatz der Halbleiterindustrie 150 Mrd. DM. Dieses enorme Marktvolumen unterstreicht, in welcher Größenordnung mikroelektronische Produkte viele Bereiche unseres Lebens bestimmen.

Abb. 1: Erster planarer Transistor als Grundlage integrierter Schaltkreise, der 1959 von Fairchild Semiconductor Corporation vorgestellt wurde. Der Durchmesser des Transistors beträgt $0,764 \text{ mm}^2$



Auslöser der Mikroelektronikrevolution war der Transistor, der Ende der 40iger Jahre entwickelt, als Silicium-Bauelement wesentlich kleiner ist als die zuvor in Schaltungen verwendeten Vakuumröhren. Der erste auf einem Chip planar angeordnete Transistor von 1959 (Abb. 1) hatte einen Durchmesser von 764 mm und war damit mit bloßem Auge zu erkennen. Ein modernes Pendant ist hingegen nur 1,3 mm breit. Seine kleinsten Strukturen messen sogar nur 0,4 µm. Das konsequente Vergrößern der Integrationsdichte (Transistoren pro Schaltkreis) hat dazu geführt, daß elektronische Chips immer komplexer, schneller und auch billiger werden. Dies läßt sich besonders anhand von Speicherchips, die sich heute in jedem PC befinden und Vorreiter bei der Miniaturisierung sind, verdeutlichen (Tabelle 1).



Seit der Erfindung der Mikrochips vor gerade einmal 25 Jahren hat sich ihr Leistungsvermögen um das 25.000fache gesteigert. Entsprechend ist natürlich auch die Leistungsfähigkeit elektronischer Systeme, basierend auf diesen Chips, gewachsen. So wies der 1946 entwickelte "Electronic Numerical Integrator and Calculator" (ENIAC) ein Gewicht von 2,73 t, eine Grundfläche von 180 m², eine Leistungsaufnahme von 0,14 MW bei einem Arbeitsspeicher von 2 kBit und eine Rechenleistung von 500 Operationen/sec, geleistet durch 18.000 Vakuumröhren auf. Aus der Sicht der Konstrukteure heutiger Supercomputer läßt sich das Etappenziel bis zum Jahre 2000 am besten durch drei große 'B' beschreiben: 1 Billion Rechenoperationen/sec, eine Billion Bytes Speicherkapazität und eine Datenübertragungsrate von 1 Billion Bytes/sec. Die Zunahme der Integrationsdichte integrierter Schaltkreise, die sich für Speicherbausteine in den letzten drei Jahrzehnten alle drei Jahre vervierfacht hat, führt auf der Basis der heute verwendeten Dünnschichttechnologien zwangsläufig zu einer entsprechenden Verkleinerung der charakteristischen Lateralabmessungen der funktionalen Einheiten. Die mit optischen Lithographieverfahren erzeugten lateralen Strukturbreiten liegen für kommerzielle Bauelemente heute bei 0,35 µm. Diese minimalen Abmessungen werden mittlerweile auch für Mikroprozessoren erreicht (beispielsweise für den Pentiumprozessor, Firma Intel). Folgt man dem Moore'schen Gesetz (benannt nach Gordon Moore, Vorstandsvorsitzender bei Intel) so ist bereits im Jahre 1998 von der Massenfertigung des 256 Mbit-Chips und im Jahre 2010 von der heute noch unvorstellbaren Fertigung des 65 Gbit-Chips auszugehen. Die minimalen Strukturabmessungen würden demzufolge auf 0,07 µm absinken.

Jahr der ersten DRAM-Auslieferung	1995	1998	2001	2004	2007	2010
minimale Strukturbreite (µm)	0,35	0,25	0,18	0,13	0,10	0,07
DRAM: Bits pro Chip	64 M	256 M	1 G	4 G	16 G	64 G
Kosten pro Bit (Milli-Cent)	0,017	0,007	0,003	0,001	0,0005	0,0002

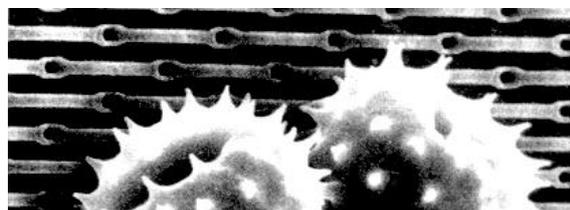
Tab. 1: Entwicklung der

Halbleiterprozeßtechnologie nach der "Semiconductor Industry Association Road Map"²

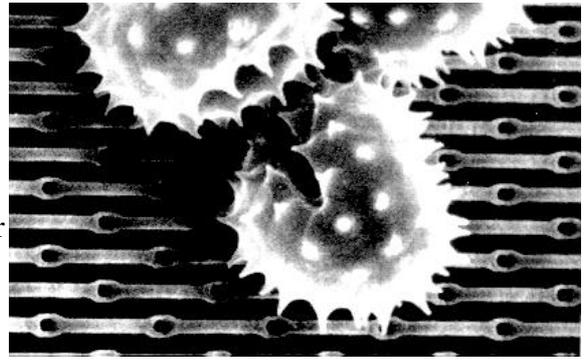
Die Funktionsweise eines integrierten Schaltkreises, und sei er auch noch so komplex, läßt sich vollständig im Rahmen der klassischen Physik beschreiben, d. h. auf der Basis der seit über 130 Jahren bekannten elektromagnetischen Grundgleichungen unter Zuhilfenahme einiger konstituierender Randbedingungen, die Geometrie- und Materialabhängigkeiten beschreiben. Hieran ändert das lineare Herunterskalieren ("Downscaling") bei zunehmender Integrationsdichte und Komplexität nichts. Allerdings gibt es technologische Probleme, deren Lösung einen zunehmend größeren Aufwand erfordert.

Abb. 2: Gänseblümchenpollen auf einem Halbleiter-Speicherchip³

Die filigranen Strukturen integrierter Schaltkreise sind während des Herstellungsprozesses anfällig gegenüber



Umgebungsbedingungen (Abb. 2). Die Herstellung erfolgt daher unter "klinischen" Bedingungen in aufwendigen Reinräumen. "Komma eins" heißt die magische Grenze von 0,1 mm in Fachkreisen, bei der die bisher eingesetzte Photolithographie zur Strukturierung des Siliciums endgültig zu versagen scheint. 0,1 mm entspricht etwa dem Durchmesser einer DNA-Helix oder einem Tausendstel der Dicke eines menschlichen Haares. Alternativen in Form der Elektronenstrahl- und Röntgenlithographie sind zwar prinzipiell denkbar, werden aber einen enormen finanziellen und technischen Aufwand mit sich bringen, der nur noch in Form globaler Allianzen zu leisten ist. Dies könnte die Halbleiterindustrie, deren Umsatz sich entsprechend der allgemeinen Prognosen in den nächsten fünf Jahren verdoppeln soll, unter einen großen Marktdruck bringen.



Mikrosystemtechnologie

Es zeigt sich aber auch zunehmend, daß für den wirklich effizienten Einsatz hochintegrierter Schaltkreise in der Informationstechnologie auch Aspekte außerhalb der Mikroelektronik betrachtet werden müssen. Soll ein Computer direkt mit der Umgebung in mechanische Wechselwirkung treten, d. h. sollen mechanische Stimuli empfangen und nach Informationsverarbeitung ausgesandt werden, so bedarf es hierzu einer Sensorik und Aktorik, die in bezug auf Ausdehnung und Komplexität an die Elektronik adäquat adaptiert sein muß. Als ein natürlicher Sensor möge etwa das Cortische Organ im menschlichen Ohr betrachtet werden, welches über ca. 28.000 Hörnerven mit dem Gehirn verbunden ist. Den Computer betreffend besteht hier ein immenser Nachholbedarf, wenn man sich einmal verdeutlicht, daß selbst der leistungsfähigste Großrechner zeitraubend und unflexibel über eine Tastatur bedient werden muß. Wir haben es also mit einem Schnittstellenproblem zwischen Mikroelektronik und Außenwelt zu tun, das Gegenstand der Mikrosystemtechnik ist. Die Kombination mikroskopisch kleiner elektrischer, mechanischer sowie evtl. optischer, thermischer, magnetischer und chemischer Bauelemente bezeichnet man als Mikrotechnologie. Als Idealvorstellung für ein Mikrosystem könnte ein Chip angesehen werden, der alle fünf Sinne besitzt und zusätzlich eine gewisse Eigenintelligenz.

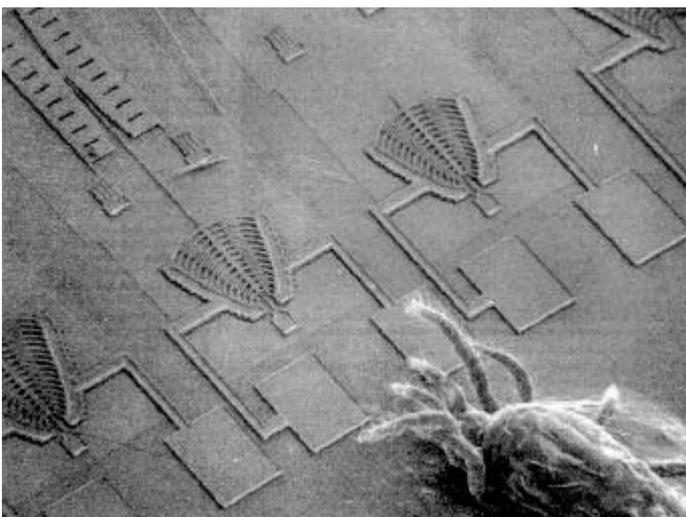


Abb. 3: Milbe auf einem Chip, der elektrostatisch betriebene Resonatoren beherbergt ⁴⁾

Auch im Bereich der Mikrosystemtechnik sind aus den vergangenen zwei Jahrzehnten bahnbrechende Erfolge zu verzeichnen. Als Beispiel möge hier die Teildisziplin der Mikromechanik dienen. Die Miniaturisierung mechanischer Komponenten weist im Vergleich zur Mikroelektronik zusätzlich die Problematik auf, daß die Strukturierung der funktionalen Elemente in drei Dimensionen erfolgen muß.

Diesen Sachverhalt verdeutlichen beispielsweise die in Abbildung 3 dargestellten miniaturisierten Ultraschall-Oszillatoren, die nur aufgrund ihrer dreidimensionalen Ausführung die geforderten Bewegungen ausführen können. Erste Durchbrüche im Bereich der Mikromechanik erfolgten in den 70iger Jahren mit der Entwicklung von geeigneten Tiefenätzverfahren.

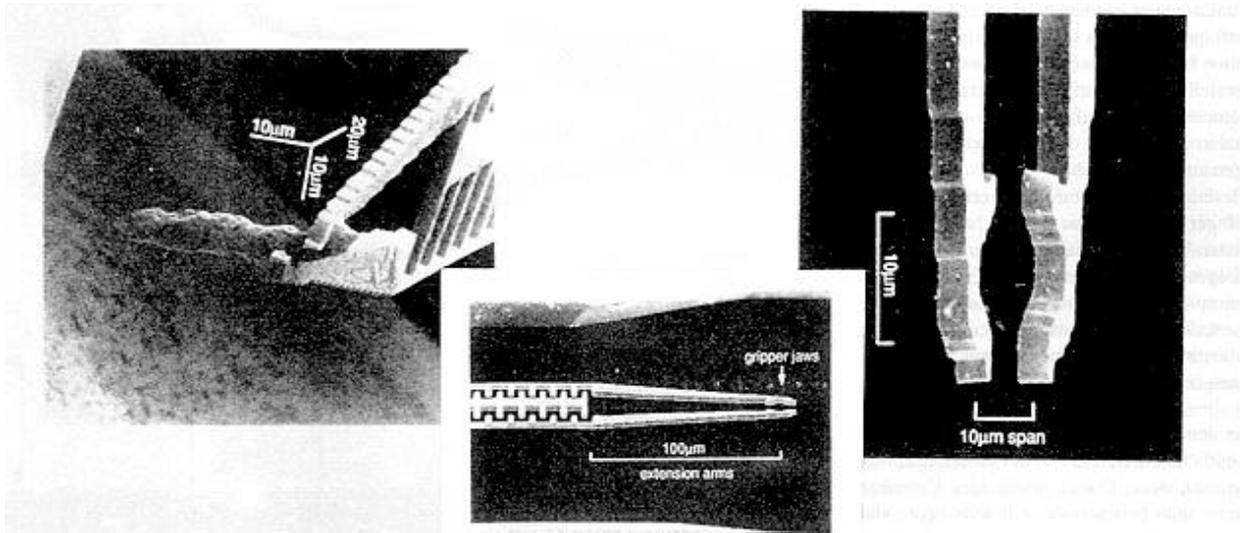


Abb. 4: Silizium-Mikropinzette mit Euglena (Gattung der Protozoa) im Greifer ⁵⁾

Die in Abbildung 4 dargestellte Mikropinzette verdeutlicht die komplexe dreidimensionale Ausführung, die wirksame Kräfte im nN-Bereich und die Handhabung von Objekten mit mm-Abmessungen gestattet.

Abb. 5: Elektrostatischer Motor in Dünnschichttechnologie im Größenvergleich zu einem menschlichen Haar ⁶⁾

In den 80iger Jahren machte man dann wesentliche Fortschritte in der Oberflächen-Mikromechanik. Durch geschicktes Unterätzen kann man beispielsweise bereits heute elektrostatische Motoren (Abb. 5) herstellen, die sich bei Anlegen geeigneter elektrischer Spannungen mit einigen 10.000 Umdrehungen pro Minute drehen. Etwas solider ist der in

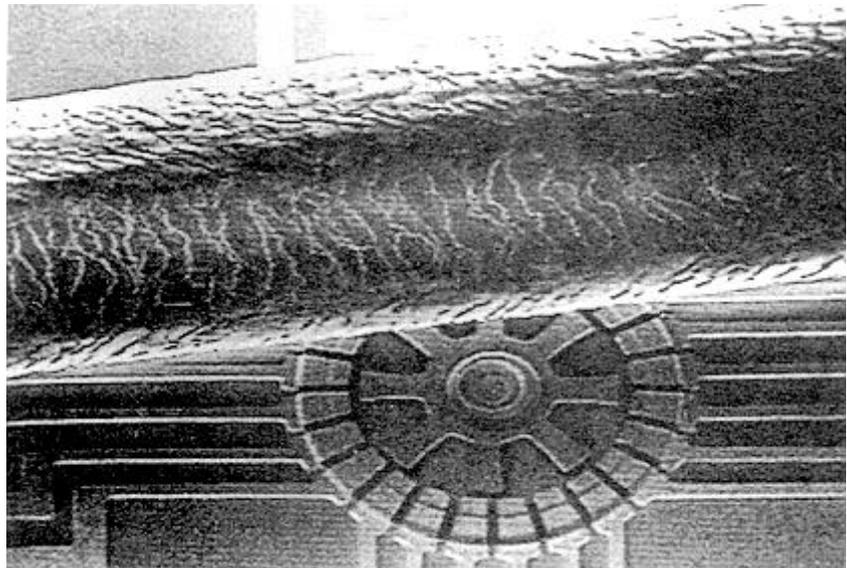
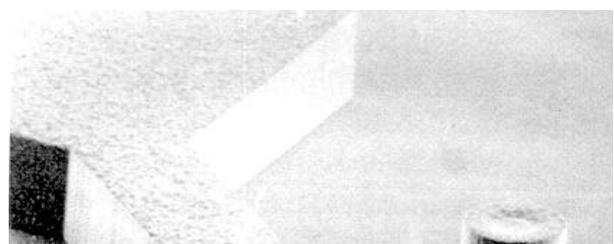


Abbildung 6 dargestellte magnetische Mikromotor, der mittels des LIGA-Verfahrens, einer geschickten Kombination aus Lithographie und Galvanik, hergestellt wurde. Der Motor ist mit einem kompletten Getriebe verbunden, alle Strukturen bestehen aus Nickel. Es ist durchaus vorstellbar, daß derartige Miniaturen als Antriebselemente in ebenfalls miniaturisierten Festplattenlaufwerken für die magnetische Datenspeicherung in Zukunft zum Einsatz kommen.

Abb. 6: Mittels der LIGA-Technik hergestellter magnetisch betriebener Motor ⁶⁾

Es gibt eine fast unüberschaubare Anzahl von Beispielen für die bisherigen Errungenschaften der Mikrosystemtechnik. Viele Entwicklungen haben



bereits heute eine große technische Relevanz, und das enorme Potential zukünftiger Entwicklungen läßt sich bereits gegenwärtig abschätzen (Abb. 7). Die hier exemplarisch gezeigten Resultate aus den Bereichen Mikroelektronik und Mikromechanik werden ergänzt durch ebenfalls beachtliche Fortschritte bei der Entwicklung miniaturisierter optischer und magnetischer Bauelementekomponenten sowie durch rasante Fortschritte bei der Entwicklung intelligenter Materialien und der Einbeziehung biotechnologischer Komponenten in komplexen Hybridsystemen. Die bisherige evolutionäre Entwicklung bei der Miniaturisierung funktionaler Einheiten könnte glauben machen, daß einer weiteren Reduktion der Abmessungen, d. h. einer weiteren Steigerung der Integrationsdichte und Komplexität, allenfalls technologische Probleme im Wege stehen, deren Lösung zwar einen ständig wachsenden Aufwand erfordert, die aber doch aufgrund heute verwendeter Verfahren lösbar sind. Dies ist aufgrund fundamentaler physikalischer Wirkungsmechanismen nicht so.

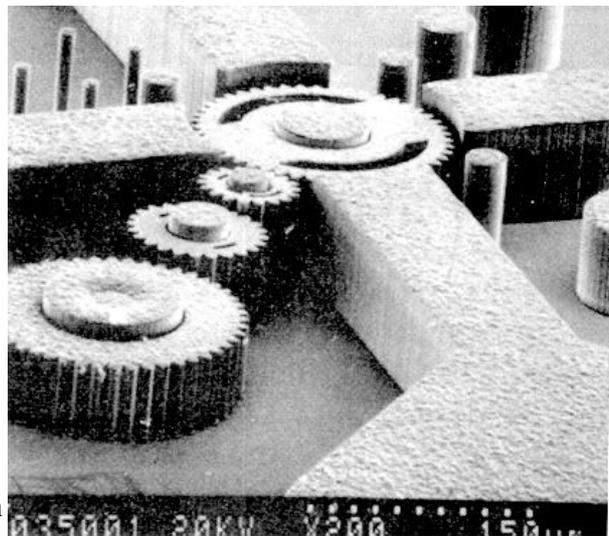
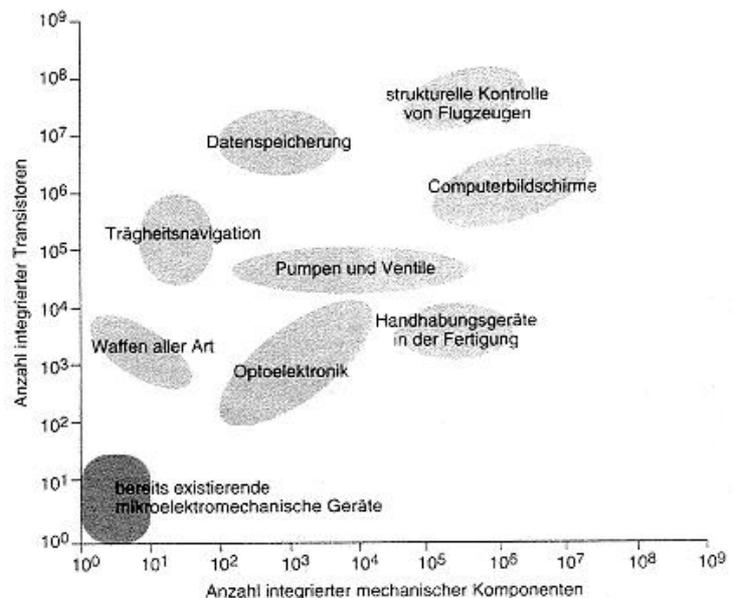


Abb. 7: Zunehmende Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik. Die Ordinate quantifiziert die Fähigkeit der Geräte zur Informationsverarbeitung und die Abszisse diejenige zum Messen und Steuern ⁷⁾

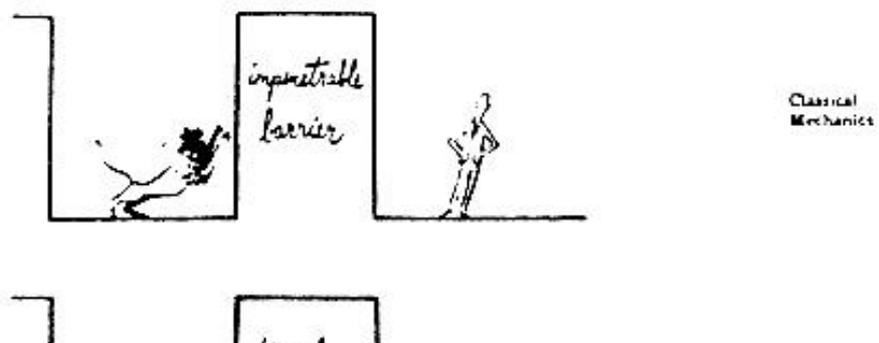


Vorboten der Nanotechnologie

Die Tatsache, daß ein lineares Herunterskalieren funktionaler Einheiten auf fundamentale physikalische Grenzen stößt, läßt sich wiederum am besten anhand der Miniaturisierung elektronischer Bauelementekomponenten verdeutlichen. Bei Strukturabmessungen, die deutlich kleiner als 0,1 mm sind, und dies ist entsprechend der allgemein akzeptierten Definition der "Nanobereich", wird es notwendig, zu völlig neuartigen Konzeptionen für die Funktionsweise der Bauelemente überzugehen. Derartig kleine Bauelemente engen die Elektronen als Träger des elektrischen Stromes in einer oder mehreren Richtungen stark ein ("Confinement"). Dadurch gewinnen die den Elektronen inhärenten Welleneigenschaften, deren Existenz durch die Quantenphysik postuliert wird, an Bedeutung. Dies hat überraschende Konsequenzen (Abb. 8).

Abb. 8: Zum Unterschied zwischen klassischer und quantenmechanischer Theorie⁸⁾

So treten "Tunneleffekte" auf, welche die Elektronen dazu befähigen, eigentlich isolierende Bereiche eines Schaltkreises zu



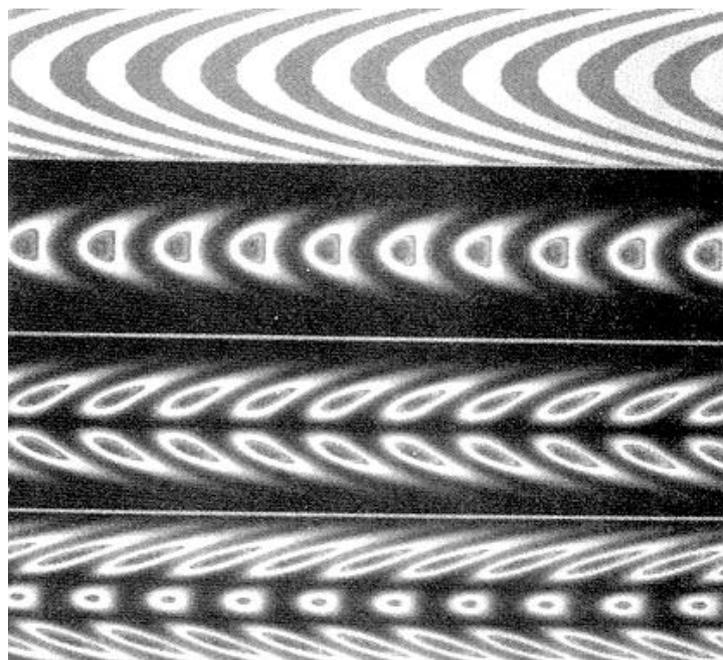
durchdringen oder zu "durchtunneln". Die Veränderung der Dimensionalität des Materials zwingt die Elektronen in veränderte,



ungewöhnliche Energiezustände, die zu räumlichen Variationen der Aufenthaltswahrscheinlichkeit für die Elektronen führen. Ein Beispiel, welches diesen Effekt visualisiert, zeigt Abbildung 9. Dargestellt ist ein sogenanntes Serpentin-Übergitter, bei dem in der oberen Teilabbildung die dunklen Bereiche aus Aluminiumarsenid bestehen, und die hellen Bereiche aus Galliumarsenid sind. Derartige Strukturen lassen sich unter Verwendung moderner Dünnschichttechnologien synthetisieren.

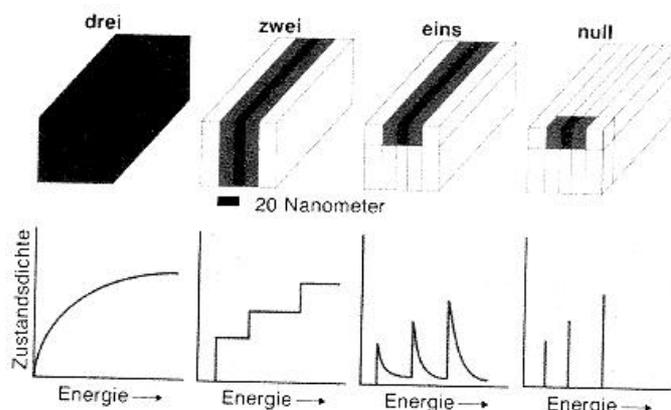
Abb. 9: Elektronenverteilung in einem Serpentin-Übergitter ⁹⁾

Die Simulationsrechnungen zeigen, daß sich im Grundzustand der dem energetisch günstigsten Zustand entspricht, die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen auf die Zentren der Galliumarsenid-Bereiche konzentriert, die jeweils durch die Aluminiumarsenid-Barrieren voneinander getrennt sind (zweites Teilbild von oben). Energetisch ungünstiger sind der erste und zweite angeregte Zustand, in denen die eindimensionale Konstriktion weniger ausgeprägt ist. Die Zahl der elektronischen Dimensionen eines Materials läßt sich aufgrund quantenmechanischer Effekte von



drei (normaler Festkörper) auf zwei ("Quantenmulde"), eine ("Quantendraht") oder sogar null ("Quantenpunkt") reduzieren, indem man es zwischen Schichten eines anderen Materials mit höherer Elektronenenergie packt. Dieser Einschluß verändert die Dichte der Elektronenzustände, d. h. die speziellen Energieniveaus, die von den eintreffenden Elektronen aufgefüllt werden (Abb.10). Auf der Basis der Confinement- und Tunneleffekte können nun schlüssige Bauelementekonzepte errichtet werden, die nicht nur die Notwendigkeit zu neuen konzeptionellen Ansätzen, sondern auch die Chance, diese zu nutzen berücksichtigen. Der Vorteil der neuen Konzepte besteht darin, daß das Miniaturisierungspotential bis hinunter zu einigen wenigen Atomen reicht.

Abb. 10: Reduzierung der elektronischen Dimensionalität eines Materials und Einfluß auf die Verteilung der Elektronen ¹⁰⁾

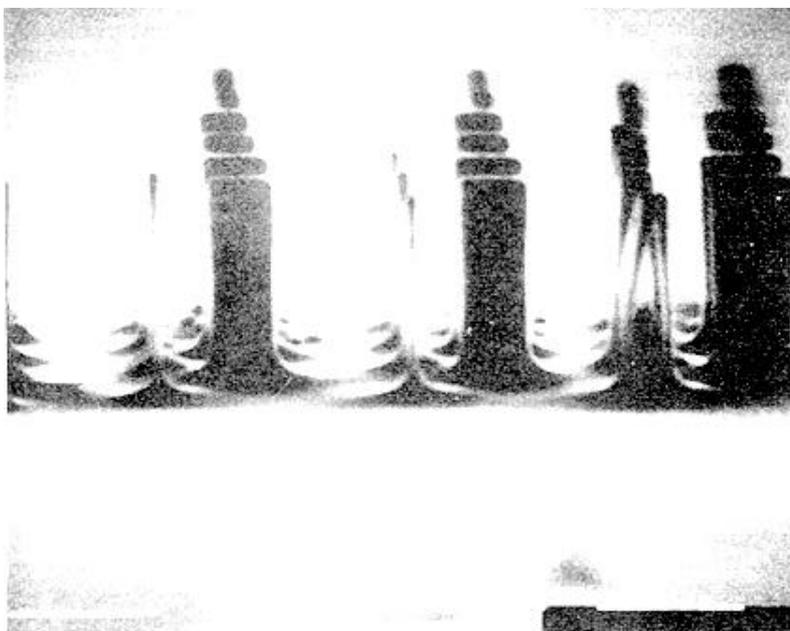


Erste elektronische Vorboten der Nanotechnologie lassen sich schon heute im Labormaßstab gezielt herstellen. Abbildung 11 zeigt eine Anordnung von Quantenpunkten, die als Transistoren dienen könnten und bei Texas Instruments hergestellt wurden.

Unterschiedliche Ansätze zur Herstellung der nanometrischen Strukturen werden derzeit in den Entwicklungslabors der führenden Halbleiterhersteller analysiert. Während die technologischen Probleme bei der Massenproduktion der Nanobauelemente derzeit noch immens erscheinen, wurden die begehrten Quanteneffekte bereits in jeder Form verifiziert. Hinsichtlich des Einsatzes von

Nanobaelementen stellt sich natürlich sofort die Frage nach ihrer Vernetzung. Wie sollen Bauelemente, die nur aus wenigen Atomen bestehen, über einzelne Leiterbahnen miteinander verbunden werden? Hier zeigt sich, daß jede logische Operation, die bei den heute üblichen komplexen Vernetzungsphilosophien durchgeführt werden kann, auch im Rahmen der "Zellularautomaten-Architektur" möglich ist. Dabei wechselwirkt jede Bauelementezelle nur mit ihren nächsten Nachbarn (Abb. 12). Dies erfordert zwar mehr Zellen als bei komplexer Vernetzung, ermöglicht aber extrem kurze Verbindungen. Die Kommunikation zwischen benachbarten Zellen könnte dabei mittels der oben erläuterten Tunneleffekte erfolgen.

Abb. 11: Halbleiter-Quantenpunkte aus Galliumarsenid und Aluminium-Galliumarsenid, hergestellt von Texas Instruments. Die Länge eines Skalenstriches entspricht 0,5 mm ¹¹⁾



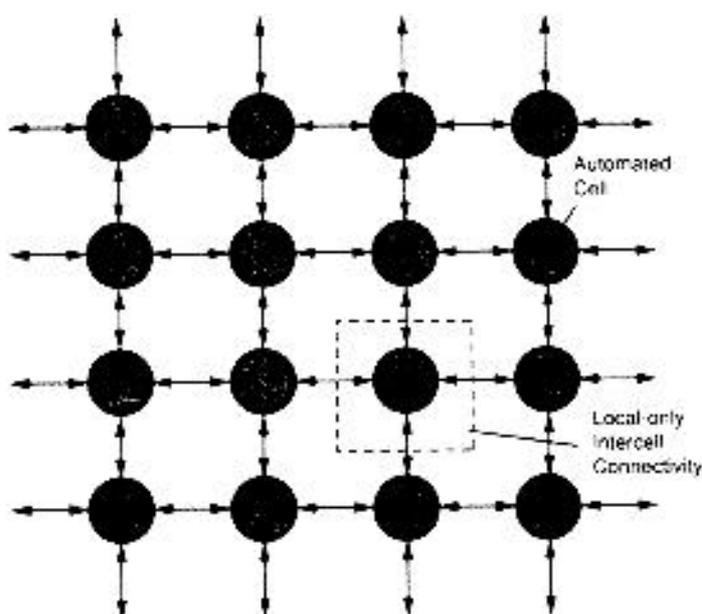
Neben den vorgestellten Beispielen gibt es weitere Ansätze, die vielversprechend für die Herstellung von Quantenstrukturen erscheinen. Sie unterscheiden sich z. T. stark in der technologischen Vorgehensweise, jedoch nicht darin, daß die durch die Quantenphysik vorgegebenen Phänomene Basis für die neuen Konzepte sind. Aber nicht nur bei den elektronischen Komponenten sondern auch in bezug auf funktionale

Einheiten, die bestimmte optische, magnetische oder mechanische Eigenschaften besitzen, deutet sich an, daß mit großer Wahrscheinlichkeit in Zukunft völlig neuartige Konzepte verfolgt werden. Allen Konzepten ist jedoch gemein, daß man für die Funktionalisierung von Systemkomponenten physikalische Phänomene nutzt, die gerade aus einer drastischen Reduzierung der geometrischen Abmessungen resultieren. Im Sinne der Miniaturisierungstendenz ist also die Reduzierung der strukturellen Abmessungen sowohl eine Notwendigkeit als auch im Sinne neuer Bauelementekonzepte eine Chance.

Abb. 12: Zellularautomaten-Architektur ¹²⁾

Ausblick

Zurück zu Feynmans visionärer Rede ¹²⁾ mit dem Titel "There's plenty of room at the bottom", in der er sich 1959, also in dem Jahr, in dem der erste ebene Transistor hergestellt wurde, mit der Miniaturisierung des Computers auseinandersetzt: "...We can use, not just circuits, but some system involving the quantized energy levels, or the interaction of quantized spins, etc." Feynman hat also in der Tat den Einsatz der Quantenelektronik im Bereich der Computerindustrie vorausgesehen. Wie aber stellen sich Feynmans übrige Visionen zur



Miniaturisierung der Informationseinheit ("How to write the Encyclopaedia Britannica on the head of a pin?") und zur Konstruktion kompletter Maschinen aus nur wenigen Atomen ("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") dar?

Sowohl hinsichtlich der Erhöhung der Informationsdichte als auch hinsichtlich der Konstruktion von "Nanomaschinen" liegen im Labormaßstab Ergebnisse vor, die vor weniger als zehn Jahren unvorstellbar gewesen wären. Ein zentraler Aspekt dabei ist, daß neben den bisher geschilderten "Top-Down-Ansätzen", bei denen Strukturen sukzessive immer kleiner gemacht werden, sich auch "Bottom-Up-Ansätze", bei denen komplexe Strukturen aus einzelnen elementaren Bausteinen sukzessive zusammengesetzt werden, zunehmend als durchaus vielversprechend erweisen. Hinzu kommen neue Vorgehensweisen, die sich an natürlichen Evolutionsprozessen orientieren und auf der Basis von Selbstorganisation und Autoreproduktion von großer Bedeutung für die Herstellung nanometrischer Systeme sein dürften.

Es zeigt sich, daß es angesichts der vielen bahnbrechenden Resultate aus jüngster Zeit immer schwieriger wird, Fakten und Fiktionen im Bereich der Nanotechnologie zu unterscheiden. Die bisherigen Resultate zeigen aber deutlich, daß wir in der Tat auf der Schwelle zur Nanotechnologie stehen. Erste ernstzunehmende Resultate zur Realisierung von "Feynman-Maschinen" im Größenbereich zwischen einem Atom und ca. 0,1 mm werden im zweiten Teil dieses Aufsatzes in der nächsten Ausgabe von magazin forschung diskutiert.

- 1) G. Stix in: Dossier Mikrosystemtechnik, Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4, S. 52 ff.
 - 2) A. Strass und A. Schüppen, Elektronik 4, 48 (1996).
 - 3) E. Demm in: Festkörperforschung für die Informationstechnik, 21. IFF-Ferienkurs, KFA-Jülich (1990).
 - 4) R.M. White, AIP Conf. Proc. 241, 443 (1992).
 - 5) C.J. Kim, A.P. Pisano, and R.S. Muller, J. Micromech. Syst. 1, 31 (1992).
 - 6) U.D. Wiese and U. Nagafi, Science 254, 1335 (1991).
 - 7) U.J. Gabriel in: Dossier Mikrosystemtechnik, Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4, S. 48 ff.
 - 8) B. Bleaney, Contemp. Phys. 25, 320 (1984).
 - 9) M. Sundram, S.A. Chalmers, P.F. Hopkins and A.C. Gossard, Science 254, 1326 (1991).
 - 10) E. Corcoran in: Ultrarechner, Spektrum der Wissenschaft, Sonderheft 11, S. 28 ff.
 - 11) R.T. Bate, Nanotechnology 1, 1 (1990).
 - 12) R. Feynman, J. Micromech. Syst. 1, 60 (1992): Transkription.
-