

Grenzen der Mikrotechnik

Autor: Clemens Baschong (clemens.baschong@students.fhnw.ch)

Dozent: Dr. Marc R. Dusseiller

Modul: Medizinische Mikrosysteme MMS

Studiengang: Life Science Technologies

Ausbildungsort: Hochschule für Life Sciences HLS, Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz

© 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Geschichte erweitert die Grenzen	1
3	Wo befinden sich die heutigen Grenzen?	2
3.1	Photolithographische Grenzen	2
3.2	Grenzen der Elektronik	3
3.3	Grenzen durch Verkleinerung bewährter Konstruktionselemente	4
3.4	Der Wald vor lauter Bäume	5
4	Zukunft	5
5	Verschmelzung von Physik und Chemie	6
6	Money rules the world	7
7	Ausklang	7
8	Bildverzeichnis	7
9	Literaturverzeichnis	8

1 Einleitung

Ein Fundament für die Geschichte der Mikrotechnik war ein höchst erfrischendes Referat von Richard P. Feynman, welches er 1959 unter dem Titel „There’s Plenty of Room at the Bottom“ vorstellte. Seiner Zeit weit voraus öffnete er in diesem Meilenstein dem Bewusstsein den Zugang zur Welt des Allerkleinsten. Er zeigte auf, dass z.B. in einem Materiewürfel von einem Zehntelmillimeter Kantenlänge, sämtliche Informationen, die die Menschheit niedergeschrieben hat, untergebracht werden könnte. Da es sich um einen skurrilen und witzigen Physiker handelte, glaubten damals manche, er scherze. Die Rede blieb lange unbeachtet.

Heute sind wir dieser Vorhersage um ein grosses Stück näher gerückt. Mit den Fertigungsverfahren der Mikroelektronik sind sie möglich geworden: Winzige Mikrosysteme, die mechanische, elektrische, optische oder sogar chemische Aufgaben übernehmen. Und das bei Bedarf auf der Fläche eines i-Punktes. Rasch wurden sie uns selbstverständlich: Düsen für Tintenstrahldrucker, Mikroventile, Mikroschalter, Strahlungssensoren, implantierbare Mikropumpen zur Medikamentendosierung oder optoelektronische Baugruppen. Anwendungen von Mikrosystemen finden sich in nahezu allen technischen

Bereichen, ob für die Medizintechnik, den Automobilbau, die Luft- und Raumfahrt oder auch die Verfahrenstechnik, weil selbst Chemie in kleinsten Reaktionskammern wirkungsvoller sein kann als im grossen Massstab.¹

Die Grenzen der Verkleinerung scheinen schier unbegrenzt. Doch wo liegen die Grenzen? Gibt es sie tatsächlich? Oder ist es nur eine Frage der Zeit bis sich Horizonte erweitern? Diese Fallstudie geht auf die Suche nach den Grenzen. In diesem speziellen Fall auf die Suche der Grenzen der Mikrotechnik. Da sich die Grenzen oft nicht klar ziehen lassen und Grenzen auch jeweils Zugang zu einem neuen Gebiet (zu einer neuen Chance?) bedeuten könnten, habe ich auf eine Aufzählform weitgehend verzichtet und werde mich auf die Beschreibung der Grenzgebiete beschränken.

2 Die Geschichte erweitert die Grenzen

Die Vorhersage der Zukunft scheint den Menschen ein sehr wichtiges Grundbedürfnis zu sein. Waren es früher die Orakel oder die Hellseher, so sind heute vielleicht am ehesten die zahlreichen Analysten die würdigen Nachfolger,

auch wenn ihre Trefferquote oft zu wünschen übrig lässt. Sind nun Vorhersagen im Allgemeinen schon schwierig genug, so scheint es in der schnelllebigen Mikrotechnik-Branche geradezu ausgeschlossen, auch nur halbwegs treffende Prognosen für die Zukunft abzugeben.

Bereits im Jahr 1965 hat Gordon Moore zwei mutige und damals ganz unglaublich klingende Paradigmen für die Halbleiterindustrie formuliert, die wegen ihrer Konsequenzen zunächst auf starke Ablehnung stiessen. Die eine Behauptung war, dass sich die Transistordichte in einer Schaltung in regelmässigen Abständen (ca. 2 Jahre) verdoppeln. Seine zweite Behauptung war, dass sich auch die Rechenleistung der Schaltungen im gleichen Zeitraum verdoppelt. Dieses als „Moore's Gesetz“ benannte Behauptung gilt nun schon viele Jahrzehnte und war das gesamte 20. Jahrhundert in Kraft. Und es wird von der Branche nicht bezweifelt, dass es auch noch zahlreiche weitere Jahre gültig bleibt.

Daraus lässt sich nun folgern: Für die heutige Halbleitertechnik stellt das Jahr 2085 eine natürliche, harte Grenze für Moore's Gesetz dar. Zu diesem Zeitpunkt würde nämlich, wie man einfach kalkulieren kann, ein Bauelement nur noch aus einem halben Atom bestehen, eine Vorstellung die selbst den mutigsten Zukunftsspekulanten ein wenig weit gehen wird. Wo liegen aber die wirklichen Grenzen? Wahrscheinlich schon deutlich vorher.

Unüberwindbare Barrieren wurden überall heraufbeschworen: Bei den Materialien, der Prozesstechnologie, der Design-Komplexität, der Wirtschaftlichkeit und nicht zuletzt bei den physikalischen Grenzen selbst. Und trotzdem haben Wissenschaftler, Entwickler und Designer immer wieder neue Wege gefunden, diese Hürden mit Erfindungsreichtum zu überwinden. Lochkarten wurden zu Relais, diese entwickelten sich zu Röhrenverstärkern, diese wiederum wurden durch Transistoren abgelöst und heute arbeitet man mit Integrierten Schaltungen. Neue Paradigmen führten zu Weiterentwicklungen und beschleunigten so den technologischen Fortschritt.

Eine magische Schwelle erreichte die Industrie Mitte der 1980er Jahre, als Bauteile kleiner als einen Mikrometer wurden. Dies entspricht ungefähr der Wellenlänge des Lichts und definiert auch die Grenze der optischen Auflösung, die ein sehr gutes Lichtmikroskop erreichen kann. Die optische Abbildung ist aber sowohl bei der Herstellung wie auch bei der Überprüfung der Bauteile ein unabdingbares Werkzeug. Der einfache (aber schwer zu realisierende) Trick war damals der Schritt vom sichtbaren Licht zum ultravioletten Licht. 2002 verwendete man Licht der Wellenlänge 193nm, und strebte 153nm an. Das ist nur noch ein Fünftel der Wellenlänge des sichtbaren Lichts! Bei diesen extremen Wellenlängen ist allerdings Glas bei Weitem nicht mehr durchsichtig und muss durch ganz neue Materialien ersetzt werden, und auch die Erzeugung von solchem Licht ist eine wahre Kunst für sich. Die 100nm waren eine weitere „Schallmauer“, denn dann kamen erstmals tatsächlich einzelne Atome ins Blickfeld der Entwicklungsingenieure, die das Funktionsprinzip des

Transistors auf die Ebene von wenigen Atomen und Elektronen übertrugen. Die Grenzen wurden immer wieder neu definiert. Und auch bei 10nm scheint noch keine unüberwindliche physikalische Grenze zu bestehen.²

3 Wo befinden sich die heutigen Grenzen?

Die Grenzen befinden sich auf mehreren Ebenen. Diese alle aufzuzählen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Nur schon für die „Belichtung eines Wafers“³ gibt es eine Vielzahl von Begrenzungsfaktoren: Wellenlänge, Homogenität der Belichtung und Strukturen, Genauigkeit der Belichtungsdosis, Justier- und Overlaygenauigkeit, Belichtungsdauer, Fokustiefe, Auflösung, Verzerrungen, korrekte Fokussierung auf allen Schichten bei allen Lacken, Prozesssicherheit, Waferdefekte, Zwischenmaskendefekte, thermischer Drift, etc. Alle für die Mikrotechnik möglichen Grenzen zu beurteilen ist schier unmöglich. Deshalb beschränke ich mich in dieser Arbeit auf die Skizzierung der Grenzgebiete.

3.1 Photolithographische Grenzen

Um die feinen, von blossem Auge nicht mehr erkennbaren Strukturen der Mikrotechnik herzustellen, verwendet man hauptsächlich photolithographische Prozesse. Aber auch bei der Verkleinerung der Strukturelemente ist man an den Grenzen der Maskentechnik angelangt, die durch Beugung der verwendeten Strahlen gegeben ist. Die kleinste Struktur- oder Streifenbreite verringerte sich in den letzten Jahren ständig. Mit Lichtoptik erreicht man Strichbreiten $< 0.2\mu\text{m}$, mit Röntgenstrahlbelichtung $< 0.1\mu\text{m}$ und mit Elektronenstrahlbelichtung 10-20nm. Laborergebnisse liegen noch niedriger. Zum Vergleich: Der Durchmesser eines menschlichen Haares beträgt etwa $50\mu\text{m}$.

Strukturen auf Chips werden also immer weiter verkleinert. Heute übliche (industriell genutzte) Strukturgrössen sind 95nm oder 65nm. Der derzeit kleinste Transistor verwendet Strukturgrössen von 6nm ⁴. Das Ende ist absehbar. Elektronik kann nicht beliebig verkleinert werden. Möglicherweise ist die Grenze der Handhabbarkeit und Wirtschaftlichkeit mit einer 22nm Technologie erreicht. 32nm Technologie wird etwa im Jahr 2009 oder 2010 im Markt erwartet.⁵

Wird mit Fotomasken und Licht (heutzutage sogar bis hin zu UV-Licht) gearbeitet, spielen die Fotomasken und deren Qualität in der Überlagerung die entscheidende Rolle. Sie begrenzen die Struktur der einzelnen Zonen des späteren Bauelementes. Die gegenwärtige Produktivität und Genauigkeit wäre durch mechanische Bearbeitungsverfahren nicht zu erreichen. Die Grundlage bildet die Planartechnologie.

Da bei der Herstellung von Schaltkreisen mehrere unterschiedliche fotolithographische Arbeitsschritte aufeinander folgen, sind dafür auch eine entsprechende Zahl von masslich zusammenhängenden Fotoschablonen (bei komplizierten Schaltkreisen bis zu 10) nötig. Ihre Strukturssysteme müssen detailliert zusammenpassen. Daher liegen die Anforderungen an ihre Genauigkeit weitaus höher. Das war nach der Herstellung von Reinststoffen ein weiteres Problem in der Halbleitertechnologie. Für ein gutes Auflösungsvermögen benötigt man aber auch eine ausserordentlich hohe Oberflächenebenheit sowohl bei der Scheibe (Schnitt in der atomaren Ebene) als auch bei der Fotoschablone. Jedes Staubteilchen, das sich auf der Fotoschicht absetzt, wird mitkopierte und führt zu Fehlern in der hergestellten Struktur. Die normale Luft enthält etwa 5000 Teilchen pro Liter, aber in der Grossstadtluft kann die Zahl bis auf eine Million steigen. Die Fotolithographie muss deshalb in einem Sonderklima (Cleanrooms) mit einer Luftverunreinigung von weniger als 1 bis 10 Staubteilchen pro Liter und in spezieller Arbeitskleidung stattfinden.

3.2 Grenzen der Elektronik

Durch die Mikrominiaturisierung elektronischer Schaltkreise erzielte Vorteile liegen in der Verkürzung der Schaltzeiten und Erhöhung der Grenzfrequenz infolge kürzerer Verbindungen auf dem Chip sowie in der Reduzierung des Leistungsverbrauchs und der Erhöhung der Zuverlässigkeit. Leistungssteigerung kennt man deshalb vor allem durch Anhebung der Taktfrequenz, doch dabei steigt der Strombedarf und der Aufwand für die Kühlung. Man könnte die Rechenleistung auch durch mehrere parallele oder optimierte Rechenwerke steigern. Weil dazu aber mehr Transistoren nötig sind, führt auch dieser Weg zu höherem elektrischem Leistungsbedarf und ausserdem zu grösserer Chip-Fläche und höheren Kosten. Abhilfe verspricht die Verkleinerung der Halbleiterstrukturen, was gleichzeitig niedrigere Betriebsspannungen und höhere Taktfrequenzen ermöglicht, aber mittlerweile zu extrem hohen Leckströmen führt.

Doch wie kann man dieses Leistungsproblem lösen? Die ITRS⁶ sieht im Jahr 2016 den Einsatz von EUV-Licht (Extremes Ultraviolett) zur Erzeugung von 22-Nanometer-Strukturen voraus. Die effektive Gatelänge der Transistoren beträgt dann nur noch 9nm. (So exotisch, wie es aus heutiger Sicht scheinen mag, ist das nicht. Mit dreidimensionalen Experimentaltransistoren hat AMD bereits 2002 10nm Gatelänge erzielt (FinFET), ähnliche Entwicklungen betreiben IBM, Intel, Motorola und NEC.)

Doch wo liegen die Grenzen der Verkleinerung? Intel-Forscher haben dazu ein „Gedanken Model“ veröffentlicht, wonach bei ziemlich genau fünf Nanometern endgültig Schluss ist mit der sicheren Verarbeitung elektronischer Signale durch bisher bekannte Halbleiter-Bauteile. Neben dem Problem, dass die Energiedichte der Abwärme von Halbleiterchips mit 5nm-Strukturen kaum noch beherrsch-

bar wäre, schlägt dann die Heisenberg'sche Unschärferelation zu: Weil Elektronen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die isolierenden Potenzialwälle durchtunneln, liesse sich irgendwann nicht mehr mit Bestimmung sagen, ob ein Elektron vorhanden ist oder nicht.⁷

Die physikalische Grenzen in integrierten Schaltkreisen setzen sich aus einer Kombination mehrerer Ebenen zusammen. Allein durch die Verkleinerung der Grösse der Komponenten hat es die Halbleiterindustrie geschafft, ihre Integrationsdichte zu erhöhen, was eine wachsende Rechenleistung zur Folge hat. Will man noch höhere Integrationsdichten erreichen, wird die Verringerung der Grössenordnung die Komponenten in den Bereich der Mesophysik bringen, wo ihr Verhalten direkt durch die Quantenphysik bestimmt wird. Es ist wahrscheinlich, dass zukünftige Mikroprozessoren eine Fläche von wenigen cm^2 haben werden. Grössere Schaltkreise wären nicht praktisch genug und bei zu kleinen Grössen schlagen die Kondensatoren durch. Es ist somit interessant, die Rechenleistung zu untersuchen, die pro cm^2 integriert werden kann. Zur Erhöhung der Rechenleistung eines integrierten Schaltkreises existieren wie erwähnt zwei Möglichkeiten: Entweder man erhöht die Dichte der Komponenten oder man verkürzt die pro Operation nötige Zeit. In Abbildung 1 sind die verschiedenen physikalischen Grenzen in Abhängigkeit der Komponentendichte und mittleren Operationszeit pro Komponente dargestellt. Eine grenzenlose Erhöhung der Komponentendichte oder Verkürzung ihrer Operationszeit ist nicht möglich! Gründe liegen in der Energiedissipation (Kapazität, um die erzeugte Energie abzutransportieren), in der Heisenbergschen Unschärferelation (Quantenlimit), im relativistischen Limit der Informationsausbreitung (es kann keine „sinnvolle“ Information mit einer Geschwindigkeit grösser als die Lichtgeschwindigkeit übertragen werden) und der RC-Verzögerung (Zeit, die benötigt wird, um eine Ladung durch einen Schaltkreis zu „entladen“).⁸

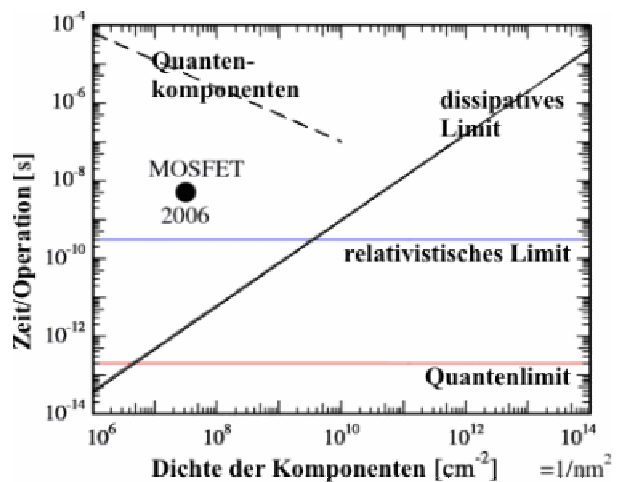


Abbildung 1: Physikalische Grenzen in integrierten Schaltkreisen (Quelle: C’Nano Rhône-Alpes)

Man erkennt in der Abbildung, selbst wenn noch ein Spielraum im Fortschritt im Bereich der Dichte und der Operationszeit der Komponenten existiert, so nähern sich doch die absoluten physikalischen Grenzen. Dies sogar noch umso mehr, als dass es noch weitere Begrenzungen gibt. Zu diesen Einflüssen zählen die Coulombeffekte in den MOSFETS, welche zumindest eine Veränderung der Konzeption nötig machen: Wenn man die Grösse eines MOSFET-Kanals verringert, so enthält er eine immer kleinere Anzahl an Elektronen. Ihre Wellenfunktionen verbreiten weit über den Kanal hinaus und es ist erforderlich, diesen zu ummanteln, um einen ausreichenden Transistoreffekt zu erreichen.⁹

Die prinzipiellen Grenzen, mit denen die aktuelle Bauteile zurechtkommen müssen, sind somit die Dissipation und die Lokalisierungseffekte (Coulomb- und/oder Quanteneffekte) in den MOSFETS. Um diesen Begrenzungen begegnen zu können werden neue Technologien basierend auf einer Quantenkonzeption der Komponenten erforscht.

Wenn die Silizium-Mikroelektronik die ultimativen Grenzen weiterer Miniaturisierung erreicht, wird der kleinste Transistor jedenfalls noch immer mehr als eine Million Atome beinhalten.¹⁰

Eine weitere Grenze liegt in der physikalischen Architektur. Auch wenn man Anordnung der Komponenten, Höhe der Leitungen und Frequenzen, etc. noch so optimiert, ist man so oder so (immer noch) an die ebene Fläche, also die Grenzen von zwei Dimensionen gebunden. Eine 3D-Anordnung ist heute noch nicht möglich.

3.3 Grenzen durch Verkleinerung bewährter Konstruktionselemente

Die naheliegendste Variante der Verkleinerung lag in der stetigen Miniaturisierung bekannter Elemente. Wohl nicht nur die Fachleute beeindruckten die Bilder vom elektrostatischen Motor mit einem Rotor von einem zehntel Millimeter Durchmesser. Das Hauptproblem jedoch offenbarte der Film nicht: Das Nabenlager war binnen kurzer Zeit verschlissen und der Mikromotor zerstört. Die Reibung wächst wie alle oberflächengebundenen Effekte mit zunehmender Mikrominiaturisierung exponentiell an und wirft damit die prinzipielle Frage auf, inwieweit es sinnvoll ist, bewährte Konstruktionselemente in diese Dimensionen einfach zu übertragen.

Es gilt also, in der Mikromechanik andere Prinzipien von Getrieben und Kraftauskopplung zu finden. Die Körperkräfte an die Umgebung abzuleiten, gelingt jedoch auch dem kleinsten Tier, sonst wäre es bewegungsunfähig. Es liegt daher nahe, die Bewegungsorgane von kleinen Organismen zu studieren.

Wenn man Geräte immer mehr verkleinert, dann spricht man irgendwann nicht mehr von Geräten sondern von Mikroaktoren. Darunter versteht man miniaturisierte

Wandlerelemente, welche elektrische oder thermische Energie in eine Bewegung umwandelt, hergestellt mit Methoden der Mikrotechnik. Diese werden angewendet, wenn sich z.B. die Vollrotation von Rotor oder Zahnrad als so ungünstig erweist, dass es besser ist auf biegeelastische Verbindungen zurückzugreifen. Andererseits steht uns in der Mikrodimension eine Palette von Energiewandlungseffekten zur Verfügung, die auf Deformation, also Kontraktion oder Extension beruhen und als Mikroantrieb eingesetzt werden. Mikroaktoren nutzen elektrostatische oder elektromagnetische Kräfte, Volumenänderungen durch Temperaturänderungen, den Piezo- oder den Formgedächtniseffekt bestimmter Materialien.

Ein weiteres Beispiel: Bisher werden in der Mikroneurochirurgie im Prinzip verkleinerte Standardinstrumente eingesetzt. Auch hier sind der angestrebten Verkleinerung Grenzen in Bezug auf Fertigung und Festigkeit der Gelenkeinteile gesetzt. Neue Akteurprinzipien unter Berücksichtigung neuer Materialien wurden untersucht. In diesem Beispiel zeigte sich, dass unter Ausnutzung der superelastischen Materialeigenschaften von Nickel-Titan Legierungen und Kunststoffen mittels Mikroerodierverfahren deflektierbare Instrumente in sehr kleinen Dimensionen ohne aufwendige Gelenkmechanismen herstellbar sind.¹¹ Die immer kleiner werdenden Endoskope und die damit verbundene Minimierung der integrierten Arbeitskanäle führen speziell im Hinblick auf effizientes Arbeiten an die Grenzen normaler mechanischer Instrumente heran. Andere Mechanismen zum Tumorabtrag oder zur Blutstillung werden hier immer interessanter. In der Vergangenheit wurden daher verschiedene Lasersysteme untersucht, wobei sich herausstellte, dass einerseits der Nd:YAG Laser sich sehr gut zur Koagulation und der Ho:YAG Laser zur mechanischen Gewebeabtragung eignen könnte.¹²

Auch bei der Mikrofluidik stösst man an Grenzen der Physik: Wenn man es mit Flüssigkeiten zu tun hat (z.B. mit teuren und daher sehr sparsam verwendeten Diagnostika) und den Arbeitsbereich immer mehr verkleinert, kommt man relativ bald in Bereiche, wo sich die Flüssigkeit aufgrund der Oberflächenspannung und der Kapillarkräfte nicht mehr mischen und bewegen lassen. Die Grenze könnte man hier durchbrechen, indem man die Flüssigkeit in ein Bläschen (in sogenannte Vesikel) packen und als Fracht mit molekularen Motoren an die Zielstelle bringen würde. Dadurch könnte man kleine „Laboratorien“ bauen, die beispielsweise für die medizinische Diagnostik interessant wären. Mit einem kleinen Tropfen Blut könnte man dann an Ort und Stelle (beispielsweise bei einem Unfallopfer) schnell prüfen, ob es Allergien, Medikamentenunverträglichkeiten usw. gibt, die man beachten muss. Solche „Lab-on-a-Chip“ Anwendungen werden in den nächsten Jahren immer wichtiger werden, können aber momentan bedingt durch die Grenzen der Mikrofluidik bestimmte Grössengrenzen nicht unterschreiten.¹³

3.4 Der Wald vor lauter Bäume

Die bis jetzt beschriebenen Grenzen waren sehr weit „unten“. Doch auch in der Mikrotechnik ist es ratsam, von Zeit zu Zeit ein paar Schritte zurück zu treten und die Thematik von „ausen“ zu betrachten. Denn es ist nicht Neues, dass die Grenzen oft an einem ganz anderen Ort liegen als vermutet. Abgesehen von den Grenzen, die nur mit dem Elektronenmikroskop betrachtet werden können, gibt es noch Grenzen, die viel nahe liegender sind, aber infolge zu naher Distanz oft in Vergessenheit geraten.

Oft ist die Grösse und das Gewicht ein entscheidender Faktor für den Verwender. Anhand des Beispiels eines Mobiltelefons werden diese Grenzen deutlicher. Es heisst, je kleiner und leichter ein Gerät, desto bequemer kann es jederzeit verfügbar von dem Verwender mit sich geführt werden. Dies stimmt nicht wirklich, denn indessen sind die Mobiltelefone an eine Grenze gestossen, die kaum mehr überwindbar scheint. Die Länge eines Mobiltelefons wird im Betriebszustand durch den Abstand zwischen einem Ohr und dem Mund des Verwenders definiert. Ein entscheidender Faktor ist auch die Breitenabmessung eines Tastenfeldes. Technisch ist es zwar möglich, die Tasten eines Tastenfeldes zur Verringerung der Grösse (des Mobiltelefons) insgesamt noch weiter zu verkleinern. Indessen sind der Verkleinerung natürliche Grenzen dadurch gesetzt, dass eine Taste sicher und eindeutig durch einen Finger einer Hand eines Erwachsenen betätigbar sein muss.

Oder ein weiteres Beispiel aus der minimal invasiven Chirurgie: Die Chirurgen arbeiten u.a. mit ferngesteuerten Instrumenten. Bisher können sie sich aber nur optisch orientieren, wobei ihnen der Bildschirm lediglich den unmittelbar vor dem Endoskop liegende Bereich zeigt. Die Grenzen hier liegen gar nicht in der Grösse (Kleine), sondern an Verfahren, mit denen diese Endoskope geheizt und gespült werden können, damit sie sich weder beschlagen noch verschmutzen. Bisher müssen die Endoskope herausgezogen und von Hand gereinigt werden.

Auch stossen viele andere Fertigungsprozesse an ihre physikalischen Grenzen. Es müssen daher neue Ansätze in der Prozessentwicklung gefunden werden. Eine dieser Herausforderungen ist die nasschemische Reinigung kleinster Strukturen nach dem Ätzprozess. Ein grundlegendes Problem dabei ist die Penetration der Flüssigkeit in die Strukturen, welche nicht direkt beobachtet oder analytisch erfasst werden kann. Ein Ansatz zur Sichtbarmachung der Penetration der Reinigungsflüssigkeit ist die Verwendung von Marker- oder Tracersubstanzen in der Flüssigkeit, deren Anwesenheit durch geeignete Analytikverfahren erfasst werden kann.

Auch stellt sich die Frage, wie viel (mikroelektronische) Implantate der Mensch eigentlich „verträgt“. Diese grundsätzliche anthropologische Reflexion über die Grenzen der Technisierung des Menschen verlangen eine Untersuchung hinsichtlich ihrer legitimen Grenzen. Lassen sich solche Grenzen jenseits von Selbstbestimmung und einem akzep-

tablen Nutzen-Risiko-Verhältnis unter Rekurs auf die „Natur des Menschen“ überhaupt ermitteln?¹⁴

4 Zukunft

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass Probleme bewältigt wurden, die vorher für unlösbar galten. Das ist nichts Neues. Lord Kelvin hat im Jahr 1895 prophezeit: „Flugmaschinen schwerer als Luft wird es nie geben.“ Noch zu Lebzeiten haben sich seine Worte als falsch erwiesen. Und auch in der Lithographie war das nicht anders: In den Achtzigerjahren dachte man noch, dass dieses Verfahren dann am Ende ist, wenn die Strukturgrössen kleiner als die Wellenlänge des (sichtbaren) Lichtes sind. Bei den heutigen Strukturgrössen sind wir weit unter dieser Grenze angelangt. Auch hätte sich bis vor ein paar Jahre kaum jemand vorstellen können, dass es einmal druckbare elektronische Bauelemente (für Kunststofffolien oder Textilien) geben wird.¹⁵ So gesehen stimmt das ganz optimistisch, dass Dinge, für die es heute keinen Ausweg zu geben scheint, später gelöst werden.

In der Zeit vor der genialen Idee des Rasterkraftmikroskops hat sich kaum jemand vorstellen können, dass ein mikrofabriziertes Siliziumbälkchen mit integrierter Spitze die Möglichkeit eröffnet, einzelne Atome oder atomare Defekte sichtbar zu machen. Die rasante Innovationsdynamik ist kaum zu stoppen und wird die Grenzen der Mikrotechnik durch kontinuierliche Fokussierung und Verbesserung der Produktionsprozesse immer wieder neu zu definieren. Grenzen müssen hier als dynamische Grenzen betrachtet werden. So wurde das Gebiet der Mechanik durch das Zeitalter der Mikroelektronik in den Hintergrund verdrängt. Heute erlebt es in der Nanomechanik eine neue Blüte.

So wie sich der Transistor nicht einfach aus der Elektronenröhre und der Laser nicht aus der bewährten Glühlampe entwickelt haben, so könnte die Nanotechnologie eine weitere Ausdehnung der Mikrotechnologien in kleinere Dimensionen sein. Die Nanodimension bedeutet neben der Kleinheit zudem auch eine neue Qualität, das heisst Funktionieren auf einem höheren Niveau, entsprechend dem Vorbild der Natur.

Mit dem Jahr 2012 wird das Erreichen der Barrieren und damit ein Ende der Silicium-basierten Halbleitertechnologie erwartet.¹⁶ Deswegen hat vor allem auf dem Gebiet der molekularen Elektronik ein intensives Forschungsbegehren eingesetzt mit dem Ziel, Moleküle als kleinstmögliche logische Operatoren in elektronischen Einheiten zu verwenden. Der Vorteil der Elektronik auf Molekülebene gegenüber der Halbleitertechnologie ist in der Grösse der Funktionselemente, der daraus resultierenden erhöhten Speicherdichte und der höheren Geschwindigkeit zu sehen. Allerdings erscheint die eindeutige Adressierbarkeit von Einzelmolekülen nach heutigem Stand als äusserst schwieriges Unterfangen. Im Gegensatz zur Halbleitertechnik, in der Eingabe- und Ausgabegrössen lediglich

elektrischer Natur sind, können unter anderem Elektronen, Photonen, Protonen oder Ionen als Stimulus eingesetzt werden. Als Ausgabesignal eignen sich zum Beispiel Emission, Absorption, Redoxpotential, Circulardichronismus oder Spinzustand.¹⁷

Die Grenzen zwischen Mikro- und Nanotechnik sind dabei fließend. So ist beispielsweise die Mikroelektronik längst auf der Nanometer Skala angekommen. Mikro- und Nanotechnik ist jedoch heute nicht mehr auf die Herstellung von Kleinststrukturen für elektronische Bauelemente beschränkt. Innovative Produkte wie Sensoren werden zusammen mit mikroelektronischen Steuer- und Aktorsystemen gemeinsam in miniaturisierte Bauteile integriert. Intelligente mikromechanische Beschleunigungssensoren zur Auslösung von Airbags in PKWs sind nur ein Beispiel dafür. Der Bedarf an solchen Bauelementen mit einem Minimum an Gewicht, geringstem Platzbedarf und reduziertem Energieverbrauch ist gross. Auch in den Life Sciences gehören hochintegrierte Biochips, mikrofluidische Systeme und mechatronische Bauelemente längst zu den Standardwerkzeugen in der medizinischen Diagnostik und der pharmazeutischen Wirkstoffforschung. Auch hier schreitet die Integration von miniaturisierten biologischen, mechanischen, elektronischen und optischen Bauteilen unter dem Schlagwort „Lab-on-a-Chip“ unaufhaltsam voran. Gleichzeitig wird in der Mikroelektronik am Aufbau integrierter Schaltungen mit Hilfe intelligenter biologischer Moleküle gearbeitet. Auch Nanowerkstoffe, wie z.B. kratzfesten Beschichtungen oder schmutzabweisende nanostrukturierte Oberflächen von Farben und Keramiken sind aus unserem täglichen Leben heute kaum noch weg zu denken.

Was ist also der kleinstmögliche Apparat, der gebaut werden kann, resp. auf dem z.B. Rechenvorgänge ablaufen können? Welche Rolle spielen dabei die Thermodynamik und Quanteneffekte? Gibt es ein Mindestmass an Energie für Rechenoperationen? Bis jetzt ist es einfacher, diese Fragen zu stellen, als sie zu beantworten. Während die einen in DNA, Enzymen und anderen Biomolekülen die Hardware der Zukunft sehen, wollen andere die Quanteneffekte, die die Siliziumtechnologie begrenzt, zähmen und zu Rechenoperationen nutzen.¹⁸

5 Verschmelzung von Physik und Chemie

Nanotechnologie umfasst neue Gebiete wie molekulare Nanotechnologie, mesoskopische Systeme, Nanochemie mit Selbstorganisation, den Aufbau von grösseren Gebilden aus kleineren Einheiten, Nanowerkzeuge zur Synthese und Herstellung von Nanostrukturen mit Anwendung für neue Bauelemente, Nanoelektronik, Nanomechanik, Materialwissenschaften, biomedizinische Gebiete, für neue Wege des Computers, der Datenspeicherung, Kommunikation, Energie und Umwelt.

Der Weg der Zukunft wird wohl immer mehr weg von Reparatur in Richtung Regeneration gehen. Es stellt sich die Definition, ob man hier noch von Mikrotechnik, oder nicht besser von einem undeutlich definierten Gemisch aus Physik und Chemie sprechen sollte.

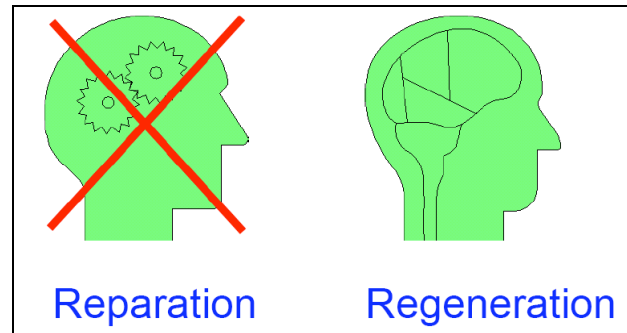


Abbildung 2: **Reparation vs. Regeneration** (Quelle: F. Schlottig¹⁹)

Diese auf die Halbleiterindustrie bezogenen Grenzen gelten im übertragenen Sinne auch auf das ganze Gebiet der Miniaturisierung, denn mechanisch-technische Strukturen sind im allgemeinen statisch. Sofort nach Inbetriebnahme sind sie dem Verschleiss ausgesetzt. Biologische Strukturen reagieren dagegen bei Beanspruchung (in funktionsrelevanten Grenzen) mit ihrer Perfektionierung. Vielzitiertes Beispiel sind die trajektorieell ausgerichteten Knochenbälkchen in den Röhrenknochen. Mikrosysteme, wie hier die Knochenbildner-Zellen, reagieren auf spezifische Belastungsreize, werden darauf zu einem grösseren Mineralstoffwechsel aktiviert und verstärken hochbeanspruchte Stellen.²⁰

Wahrscheinlich wird dieser Umbruch unsere bisherige Denkart radikal verändern. Die Natur ist uns auch hier weit voraus und das beste Beispiel eines Systems, das auf der Nanometerskala funktioniert. Sie wird daher immer der Massstab unserer Forschungsergebnisse sein.

Zu den Schlagwörtern der nächsten Zukunft werde wohl Wörter wie nanoskalige Logik-Bauelemente, Quantenelektronik, Magnetoelektronik, Spintronik, Terahertz-Elektronik, hysteretische oxid-basierte Speicherkonzepte, molekulare Selbstorganisation, atomar-molekulare Fertigung (Eiweissmoleküle können als pure molekulare Fertigungsmaschinen betrachtet werden), Molekular- und bioelektronische Hybrid-Systeme (Achsen mit dreiatomigem Querschnitt, die sich in Benzolring-Lagern drehen) gehören. Die Kandidaten als Alternativen zu den herkömmlichen Halbleiterchips könnten Nanoröhren, Polymertransistoren, Atomlithographie²¹ oder Quantenrechner sein.

Wir nähern uns hier also von den Mikrorobotern zu den biologischen Bauelementen wie Aminosäuren und Peptide. Wenn man auf eine Ebene verkleinert, in der man sogenannte Kinesinmotoren entlang von Mikrotubuli-„Strassen“ fahren lässt, ist es verständlich dass diese Verfahren nicht mehr als „Roboter“ betrachtet, sondern als

Betreiben von „Chemie“, „Molekularphysik“ oder „Biologie“ bezeichnet werden. Hier haben wir also wieder eine (diffuse) Grenze. Und dies ist wohl die untere Grenze der „Mikrotechnik“. Zwar wird man immer weiter verkleinern können, aber spätestens hier fängt ein neues Gebiet an.

6 Money rules the world

Es ist zur Zeit u.a. zu beobachten, dass die Schaltzeiten durch die Verdrahtung begrenzt sind. Dazu wird mittlerweile schon Kupfer verwendet. Man könnte theoretisch noch auf Silber umsteigen, um ein paar Prozent mehr rauszuholen, aber das ist kein praktikabler Weg. So etwas erfordert auch neue Produktionsgeräte, eine neue Fabrik und Milliardeninvestitionen. Nutzen und Aufwand sind da zu weit auseinander.

Hier macht sich eine weitere Grenze bemerkbar: Die Kosten für Entwicklung und Produktion. Die Preise für elektronische Produkte sind zu billig. Die Mikroelektronik wird überall auf der Welt subventioniert (!). Sei es durch Unterstützung der Forschung oder durch günstige Steuern. Universitäten und innovative Unternehmen sind im Wettlauf um die kleinsten und zuverlässigsten Mikrosysteme. Auf Grund des Konkurrenzdrucks versucht jede Firma, ihr Produkt so billig wie möglich anzubieten. Diese Preise sind aber durch Förderungen gestützt. Damit ist eine Konkurrenz der Nationen um die Höhe der Förderung entbrannt. Wenn die EU nicht mitbietet, gehen die Firmen eben nach Asien. Oder wie es Johann Bartha ausdrückt: „Natürlich ist das gut, wenn ich meinen 2-Gbyte-USB-Stick für eine Hand voll Dollar bekomme, aber da sind auch Steuergelder drin. Mir wäre es lieber, ich würde weniger Steuern zahlen und dafür einen fairen Preis für das Produkt zahlen. Aber einen weltweiten Kodex für die Vergabe von Förderungen ist illusorisch.“²²

Eine monetär viel günstigere Alternative ist die Mathematik. Auch mit ihr könnten Verbesserungen der Chipleistung um 20 oder 30 Prozent erreicht werden. Quasi nur durch Nachdenken! Ein Beispiel: Lange galt es als Dogma, dass sich die Latches²³ alle zur selben Zeit öffnen müssen. Was den unerwünschten Nebeneffekt hatte, dass das gleichzeitige Schalten sehr vieler elektronischer Bauteile zu Stromspitzen führte. Heute öffnen sich die Türen der Zwischenspeicher versetzt. Sie werden von einem separaten Netz gesteuert – auch Dank mathematischer Verfahren. Die Chips sind dadurch noch schneller geworden.²⁴ Grenzen können also auch durch Dogmen entstehen.

Simulationen ergänzen (ersetzen?) nach und nach das Nanolabor. Man könnte in Bezug auf die menschliche Wahrnehmung sogar nochmals einen Schritt weitergehen und behaupten, Grenzen können mit Algorithmen-Berechnungen ausgeglichen werden. Vergleichbar z.B. mit dem MP3-Musik-Format, welches Frequenzen herausfiltert, die infolge psychoakustischer Wahrnehmung (bei vielen Menschen) nicht wahrgenommen werden. Für den

unaudiophilen User jedenfalls, der Musik über die PC-Boxen hört, wirkt sich diese Datenverminderung nicht störend aus.

7 Ausklang

Eine der grössten Illusionen war die Vorhersage, dass wir durch die Miniaturisierung weniger Energie und weniger Ressourcen benötigen werden. Zwar stimmt das, wenn man nur das einzelne Objekt, das Mikrosystem, betrachtet. Man muss sich aber bewusst sein, dass wir nicht in einem Schritt zum Mini-Objekt gekommen sind, sondern dass es sich hier um eine riesige Forschungs- und Entwicklungsmaschinerie handelt. Dazu kommt, dass durch die dadurch entstandene Reproduzierfähigkeit und die sinkenden Kosten, der Konsum und die Anwendung solcher Produkte gewaltig angestiegen ist. Wenn man diese Mechanismen genauer betrachtet, dann wird einem klar, dass wir mit diesen vermeintlichen Energie- und Ressourceneinsparungen genau das Gegenteil bewirken und uns von einer nachhaltigen Entwicklung weit entfernt haben. Die steigende Effizienz führt zu keiner Entlastung der globalen Ökosysteme, weil der Mensch gleichzeitig auch immer mehr Güter herstellt. Verbesserungen in der Effizienz werden durch die immer grösseren Produktionsmengen mehr als ausgeglichen. Die Menschheit lebt bereits heute auf einem Niveau, welches die Regenerationsfähigkeit des Planeten übersteigt. Hätten alle Menschen der Erde einen Umweltverbrauch wie die Bewohner von Europa, so würden die Menschheit fast drei Erden benötigen, um die notwendigen Rohstoffe und die benötigte Energie bereitstellen zu können.²⁵

Prognosen sind ein Spiel mit Möglichkeiten, die zeigen, dass es noch Wünsche gibt. In der Vergangenheit hat sich herausgestellt, dass sie kurzzeitig zu optimistisch und langfristig zu pessimistisch waren.

Bei all dem dürfen wir aber nicht vergessen, dass wir an die Leistungen der Natur noch lange nicht herankommen. Das gesamte menschliche Erbgut mit seiner ungeheuren Informationsdichte hat in einem Zellkern mit einem Volumen von etwa einem Kubikmikrometer Platz. Somit ist die DNA der am höchsten integrierte „Chip“, den wir kennen, und dessen Komplexität viele Milliarden Mal grösser ist als die heutiger Hochleistungsspeicher.

8 Bildverzeichnis

Abbildung 1: Physikalische Grenzen in integrierten Schaltkreisen (Quelle: C'Nano Rhône-Alpes).....	3
Abbildung 2: Reparatur vs. Regeneration (Quelle: F. Schlottig)	6

9 Literaturverzeichnis

¹ Werner Brenner 2002: Mikrosystemtechnik – Miniaturisierung ohne Grenzen? Institut für Mikro- und Feinwerktechnik, Technische Universität Wien.

² Sönke Mehrgardt 2002: Moore's Zukunftformel. changeX, Das unabhängige Online-Magazin für Wandel in Wirtschaft und Gesellschaft.

³ Als Wafer bezeichnet man Scheiben aus Halbleitermaterialien (meist Silizium, aber etwa auch Germanium oder Galliumarsenid), aus denen man die eigentlichen "Chips", also die integrierten Schaltungen, herstellt.

⁴ Labortests in der IBM Forschung.

⁵ Jäpel Dieter 2007: Trends in der Informationstechnik. Die Sicht der IBM Forschung. IBM Research GmbH, Rüslikon

⁶ ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors): Von Halbleiterfirmen und Forschungsinstituten gemeinsam erarbeiteter und jährlich aktualisierter 15-Jahres-Fahrplan für Fertigungstechnik und Strukturverkleinerungen.

⁷ Christof Windeck 2003: Schneller, heisser, mehr. Aktuelle Themen und Projekte der Halbleiter-Entwickler. c't 26/2003, S. 20: Halbleiter-Entwicklung.

⁸ Sebastian Raab 2006: Die physikalischen Grenzen in der Nanoelektronik. Das Ende des Mooreschen Gesetzes. C'Nano Rhône-Alpes.

⁹ Laurent L. 2006: Phénomènes physiques incontournables à l'échelle du nanomètre. C'Nano Rhône-Alpes.

¹⁰ Tom Theis 2001: Immer kleiner, immer schneller... Wo liegen die Grenzen der heutigen Computerarchitektur? Scinexx Das Wissensmagazin. Springer-Verlag, Heidelberg / MMCD New Media, Düsseldorf.

¹¹ Guber A., Wieneke P. 1997: Innovative instruments for endoscopic neurosurgery. In Hellwig D., Bauer B, editors. Minimally invasive techniques for neurosurgery, current status and future perspective. Springer, Heidelberg.

¹² Manfred Fischer 2001: MINOP – Entwicklung eines Mikro-Neurochirurgischen Operationssystems für die minimalinvasive Therapie. Infobörse Mikrosystemtechnik Nr. 17-2001. Informationsreihe der VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn.

¹³ Peter Nick 2006: Nanobiologie – Nano meets Bio. Botanisches Institut 1, Universität Karlsruhe.

¹⁴ Die „Natur des Menschen“ in Neurowissenschaft und Neuroethik. Symposium 20.-21. Oktober 2006. BMBF-Nachwuchsgruppe „Zur Relevanz der Natur des Menschen als Orientierungsnorm für Anwendungsfragen der biomedizinischen Ethik“ am Lehrstuhl für Bioethik. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

¹⁵ Merck forscht im eigenen Labor an der TU Darmstadt.

¹⁶ International Technology Roadmap for Semiconductors (2004).

¹⁷ Christian Trieflinger 2004: Mehrfach adressierbare molekulare Schalter auf Basis von funktionellen Farbstoffen. Dissertation der Universität Regensburg.

¹⁸ Bennet Charles, Landauer Rolf 2001: Über die Grenzen hinaus... Auf der Suche nach Alternativen. Scinexx Das

Wissensmagazin. Springer-Verlag, Heidelberg / MMCD New Media, Düsseldorf.

¹⁹ F. Schlottig 2007: Vorlesungsunterlagen „Materialien und Biowerkstoffe“, Studiengang „Life Science Technologies“, 3. Semester, FHNW.

²⁰ BIODON, Glossar, TU Ilmenau.

²¹ Mark Rossi 2000: Atomlithographie, Hauptseminar SS2000, Ultrakalte Atome und Atomphysik, Physikalisches Institut, Universität Stuttgart.

²² Johann Bartha 2008: Vortrag an der „Semiconductor Conference“ in Dresden, Prof. Dr. Johann Bartha, Institutsdirektor des Instituts für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik an der TU Dresden.

²³ m.o.w. Flipflop, 1-Bit-Speicher.

²⁴ NZZ am Sonntag 2008: Schleichwege im Nanoland. Kooperationen zwischen Mathematik und Computerindustrie.

²⁵ Jill Jäger 2007: Was verträgt unsere Erde noch?. Forum für Verantwortung. Fischer Taschenbuch Verlag.