
Die Nanowelt: Herausforderung und Chance

H. Rohrer

Wir stehen an der Schwelle einer neuen wissenschaftlichen und technischen Epoche mit dem Nanometer, dem Milliardstel eines Meters, als Massstab. Getragen wird diese Entwicklung zunächst von der fortschreitenden Miniaturisierung; später wird der Aufbau komplexer Funktionseinheiten aus kleinsten Bestandteilen von zentralem Interesse sein. Die Herausforderung und Chance bestehen darin, dank Nanometerdimensionen neue Möglichkeiten auszuschöpfen, die Nano- mit der Makrowelt zu verknüpfen sowie neue Methoden und Konzepte für den Umgang mit einer grossen Zahl von Nanoobjekten zu erarbeiten und damit komplexe Probleme im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu lösen.

1 NANOWISSENSCHAFT UND NANOTECHNIK

Vor 10 Jahren noch kaum bekannt, ist Nanowissenschaft und Nanotechnik heute ein stehender Begriff. Eine grosse Anzahl wissenschaftlicher und technischer Konferenzen und Veranstaltungen aller Art mit «Nano» als Thema werden heute abgehalten, neue Zeitschriften mit Nano auf dem Titelblatt erscheinen, Institute und Professurbereiche übernehmen Nano als Forschungsrichtung, und zum Teil recht hoch dotierte Programme mit Nano als Ziel verteilen Geld. Nano wurde Mode. Auch in der Wissenschaft gibt es Modeströmungen, die für manch einen Hilfe, Rückhalt oder gar Legitimation bedeuten, die aber leicht vom Wesentlichen ablenken.

Der Nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) als Massstab ist in der Wissenschaft nichts Neues. Der Abstand von Atomen im Festkörper beträgt einige Zehntel-nm, ist schon seit mehr als 100 Jahren bekannt und wird heute mit einer Präzision von bis zu 5 Stellen angegeben. Atomkerne sind etwa hunderttausendmal kleiner, und der Durchmesser des Elektrons steht heute mit einer oberen Grenze von weniger als einem Milliardstel-nm zu Buche. Aber auch Schwingungen von makroskopischen Körpern werden in Gravitationsexperimenten bis in den Millionstel-nm-Bereich mit Laserinterferenz gemessen.

Was bringen denn Nanowissenschaft und -technik an Neuem? Der Nanotechnik obliegt einerseits als naheliegendstes die Miniaturisierung vom μm -Bereich, dem Massstab der Mikrotechnik, in den nm-Bereich von, sagen wir, ein paar hundert nm abwärts zu tragen, mit Präzision in Herstellung und Bearbeitung bis hinunter zum atomaren Bereich. Dabei ist es vorerst technisch wünschbar, dass

Eigenschaften mit der geometrischen Verkleinerung skalieren, d. h. dass physikalische Gesetzmässigkeiten nicht ändern und dass die Funktionstüchtigkeit des miniaturisierten Objektes nicht beeinträchtigt wird. Es handelt sich also um eine Verkleinerung, bei der das Objekt sein Wesen bewahrt.

Von wissenschaftlichem Interesse andererseits sind die neuen Möglichkeiten, die der nm-Bereich eröffnet, wie z. B. neue Transporteigenschaften, wenn mittlere freie Weglängen grösser als die Dimensionen der Nanoobjekte werden, oder das Auftreten neuer Eigenschaften, wenn die Anzahl der Oberflächenatome ein wesentlicher Teil der Gesamtzahl wird, oder wenn für Eigenschaften und Prozesse Quanteneffekte bestimmend werden, oder ganz allgemein der Übergang vom atomaren und molekularen Verhalten zur kondensierten Materie. Zum Teil sind solche Problemstellungen schon heute Anliegen der mesoskopischen Physik. Das wesentliche Merkmal der Nanowissenschaft ist dabei, dass im Sinne der Miniaturisierung – und auch der mesoskopischen Physik – ein Objekt seine Eigenständigkeit bewahrt und als Individuum, nicht als Mitglied eines statistischen Ensembles, auftritt und behandelt wird und dass Prozessabläufe ebenfalls einzeln verfolgt und gesteuert werden und nicht durch statistische Grössen wie z. B. Druck, Temperatur, Zusammensetzung usw. Wir können Nanowissenschaft als die Wissenschaft im Umgang mit Nanoindividuen bezeichnen. Dies umschliesst Messen, Verstehen und gezieltes Ändern von Eigenschaften, Manipulieren, Positionieren und Bearbeiten von Nanoobjekten, Verfolgen, Kontrollieren und Ändern von Einzel-Prozessen und Funktionen, sowie Ausarbeiten neuer Konzepte im Umgang mit Nanoindividuen, insbesondere mit einer grossen Anzahl von ihnen.

Nanowissenschaft ist nicht eine eigenständige Disziplin, es gibt viele Nanowissenschaften. Wenn sich einmal die Denkweise vom Nanoindividuum eingebürgert hat und die damit verbundenen Basismethoden und Konzepte erarbeitet worden sind, dann wird wahrscheinlich auch der Begriff Nanowissenschaft der Vergangenheit angehören und in den anderen Wissenschaften aufgegangen sein. Aber vorderhand sind wir am Anfang.

2 MINIATURISIERUNG: FORTSETZUNG EINER ENTWICKLUNG

Miniaturisierung führt zu immer kleineren geometrischen Abmessungen und schliesslich zum Nanometer. Die wichtigste Triebfeder für die rasant fortschreitende Miniaturisierung der vergangenen vier Dekaden war die Datenverarbeitungsindustrie mit der Devise: «kleiner, schneller, billiger». Abb. 1 zeigt den Fortschritt in der Datenverarbeitung an den zwei Beispielen Speicherdichte und Wärmeentwicklung pro logischer Operation. Die Miniaturisierung verlief im grossen und ganzen gleichmässig und exponentiell, in beiden Beispielen etwa 2 bis 3 Grössenordnungen pro Dekade. Selbstverständlich gab es immer wieder Sprünge in der Entwicklung, verursacht durch neue Durchbruchtechnologien, die aber in Abb. 1 in der Breite des Bandes gut Platz finden. Gleichzeitig fiel der Preis

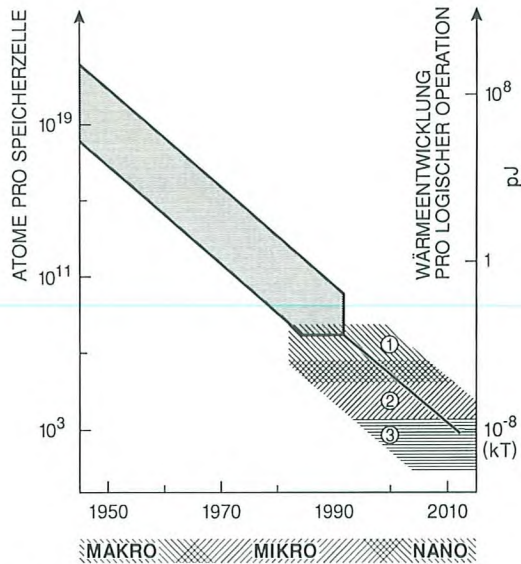


Abb. 1. Verlauf der Miniaturisierung in der Datenverarbeitung (1) aus (2).

pro Speicherzelle um das Tausendfache auf einen Mikrofranken, und die Zeit für eine «Floating point operation» verkürzte sich um das 30 000fache auf ein paar Nanosekunden. Die Miniaturisierung erstreckte sich deshalb auch auf Zeitbedarf, Preis sowie Unterhalts- und Energiekosten. Der durchschlagende Erfolg und der äusserst rasante Fortschritt waren nur möglich, weil die Wissenschaft das Rüstzeug für das Sehen und Verstehen sowie das Behandeln von Materialien in der Mikrowelt schon lange vorher bereitgestellt hatte.

Zurzeit gibt es keine Gründe zu glauben, dass die Miniaturisierung in naher Zukunft nicht in gleichem Masse fortschreiten kann, wenn auch die technische Herausforderung immer anspruchsvoller wird. In der nächsten Dekade, Periode 1 in Abb. 1, geht es darum, geeignete Methoden für die Massenproduktion zu finden. Zwar können schon heute bekannte Halbleiter-Elemente den Anforderungen eines Gigabit-Chips (Giga = 10^9) entsprechend miniaturisiert und in kleine Pakete von einigen tausend Stück integriert werden; ein produktionstüchtiges Verfahren für diese Chipgrösse fehlt aber allen Anstrengungen zum Trotz immer noch. Es ist dabei bemerkenswert, dass das so oft herbeigesagte Ende der optischen Lithographie, der heutigen Herstellungsmethode, immer noch auf sich warten lässt und Röntgenstrahl-Lithographie den Durchbruch noch nicht geschafft hat. Dies wäre eine technische Herausforderung ersten Ranges für ein Schweizer Synchrotron, für eine «Swiss Light Source». In der Periode 2 wird die Entwicklung neuartiger Schaltelemente die Herausforderung werden. Aber auch hier ist anzumerken, dass trotz Unkenrufen die Miniaturisierung der konventionellen Halbleiterelemente erfolgreich weitergeht.

Eine zentrale Frage in beiden Perioden betrifft die Investition in neue Technologien verglichen mit dem voraussichtlich erreichbaren Profit. Ganz generell scheint in Wissenschaft und Technik die finanzielle Tragbarkeit immer mehr zum begrenzenden Faktor für die Weiterentwicklung zu werden, nicht die Machbarkeit an und für sich.

Schliesslich wird die Miniaturisierung als Unterteilung in immer kleinere Elemente an Grenzen stossen (Periode 3). Bezüglich Datenspeicher wissen wir zurzeit von keiner Methode, die pro Informationsbit mit weniger als etwa 10 Atomen auskommen würde. Ob es je möglich sein wird, Information in Kernfreiheitsgraden zu speichern – wer weiss. Was die Wärmeentwicklung pro logischer Operation betrifft, kann die thermische Energie kT , bei Zimmertemperatur etwa 10^{-8} pJ (= 10^{-20} Joule), als untere Grenze angegeben werden. Das Ende der geometrischen Miniaturisierung bedeutet aber keineswegs das Ende der Entwicklung. Wie oben angetönt, gibt es verschiedene Aspekte der Miniaturisierung. Aus Platz- und Kostengründen ist zum Beispiel Miniaturisierung ein wichtiger Aspekt für den parallelen Verlauf und die Steuerung von Arbeiten sowie für den parallelen Einsatz und Betrieb irgendwelcher Instrumente und Werkzeuge. Und wenn wir daran denken, dass sich das Prinzip elektronischer Schaltkreise in all den Jahren wenig geändert hat, so sollte sich auch hier eine neue Türe auftun. Die Lösung «kleiner, schneller, billiger» könnte sich dann zu «gescheiter, komplexer, vielseitiger» wandeln.

3 WERKZEUGE FÜR DIE NANOWELT

Der Umgang mit Nanoindividuen erfordert in vieler Hinsicht Arbeiten mit Nano- und Subnanometerpräzision. Als erstes geht es ums Sehen, Messen und Verstehen. Sehen auf Nanometerskala hat mit dem Elektronenmikroskop in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts begonnen. Mit den sogenannten lokalen Sondenmethoden, wie Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie, ist man mit Sehen und Messen in den 80er Jahren in den atomaren Bereich vorgestossen. Die lokalen Sonden sind aber mehr, sie sind sozusagen die Fingerspitzen der Nanowelt. Wie wir mit unseren Fingern makroskopische Objekte abtasten und auch handhaben, so braucht man für Nanoindividuen eben Finger mit Nanometerfeinheit. Das Prinzip ist einfach. Da jede nicht speziell präparierte Spitze – Bleistiftspitze, Spitze einer Nähnadel oder Pinzette – atomar rauh ist, kann diese Rauigkeit am Ende der Spitze, gepaart mit ein paar guten Einfällen, als atomare Fingerspitze dienen. So wie wir mit einer Fingerspitze Form und Eigenschaften wie nass, trocken, kalt, warm, rauh usw. abtasten können, erfühlen die Sonden verschiedene Eigenschaften der Nanoindividuen mittels verschiedener Wechselwirkungen. Eine Wechselwirkung zwischen Elektronen führt zu einem Tunnelstrom, einem winzig kleinen Strom, der bei atomarem Abstand zwischen Sonde und Objekt fließen und bei Verkleinerung des Abstands um einen Atomdurchmesser um das Tausendfache ansteigen kann. Daraus erhält man vor allem elektronische Eigenschaf-

ten. Brauchen wir Kräfte, so erkennen wir nebst Form auch Ladungsverteilungen, magnetische Eigenschaften, Elastizität usw., je nach Kraft, die gebraucht wird. Zum Mikroskopieren muss die Wechselwirkung so schwach sein, dass die Objekt-Eigenschaft von Interesse nicht durch die Nähe der Sonde beeinflusst wird. Mit stärkerer Wechselwirkung können Nanoobjekte verschoben wie auch verändert werden. Dies alles geschieht mit der gleichen Sonde, genau wie wir mit den Fingern fühlen, verschieben und verändern können. Die Stärke der Wechselwirkung wird dabei sowohl durch Verändern des Abstandes Sonde-Objekt als auch extern, z. B. durch die Spannung zwischen Sonde und Objekt, eingestellt.

Der Stand der Dinge ist aus den folgenden drei Rastertunnelmikroskopaufnahmen von Nanoobjekten ersichtlich. In jedem der drei Experimente wurde jeweils mit derselben Sonde das Nanoobjekt zuerst hergestellt und anschliessend abgebildet. Abb. 2 zeigt 48 in einem Kreis von 12,4 nm Durchmesser angeordnete Eisenatome auf einer Kupferoberfläche. Sie bilden einen Pferch für die Elektronen im Inneren und führen damit zu der wellenförmigen Elektronenverteilung; andere Pferchformen können Anlass zu chaotischen Elektronenverteilungen geben. Ein Hauptproblem bei solchen Manipulationen besteht im Loslassen des Objektes, genau gleich wie mit einem klebrigen Finger ein Objekt zwar leicht verschoben werden kann, aber auch kleben bleibt. Das Manipulieren wird umso schwieriger, je stärker das Nanoobjekt an die Unterlage gebunden ist und somit eine umso «klebrigere» Sonde erheischt. Die Eisenatome im obigen Beispiel haften sehr schwach auf dem Kupfer; damit sie ihrer thermischen Energie wegen nicht von selbst herumhüpfen, werden sie bei 4 K ($= -269\text{ }^{\circ}\text{C}$) eingefroren.

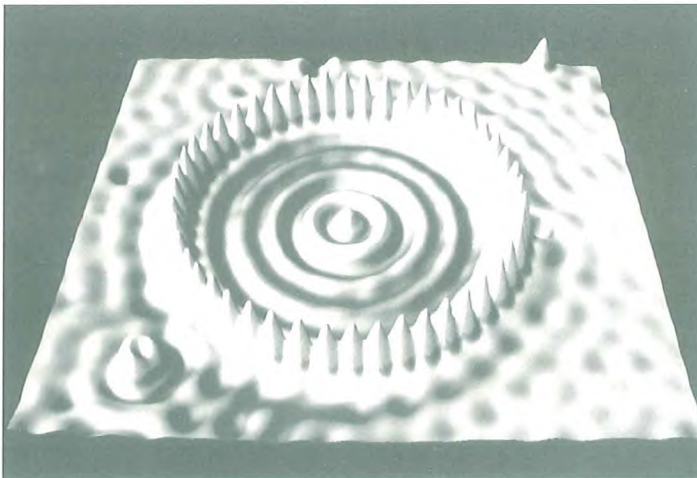


Abb. 2. Elektronenpferch aus 48 Eisenatomen auf Kupfer. (Mit freundlicher Erlaubnis von D.M. Eigler, IBM Research Division, Almaden Research Center, USA, siehe auch (3)).

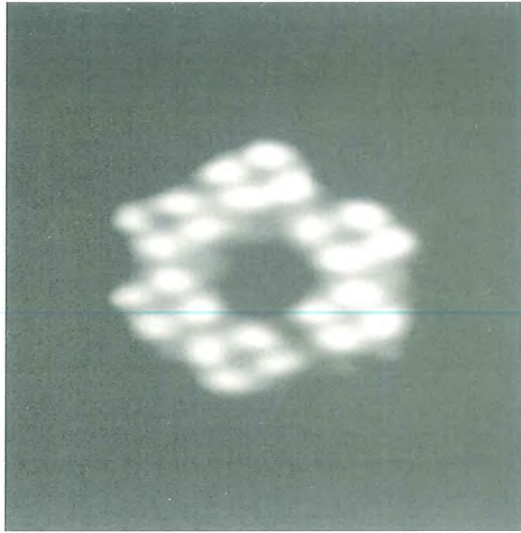


Abb. 3. Kreis aus sechs Cu-TPOB-Porphyrinmolekülen. Sichtbar von den Molekülen sind die je vier, quadratisch angeordneten «Beine». Bild: ungefähr 10 nm x 9 nm. (Mit freundlicher Erlaubnis von T.A. Jung et al., IBM Forschungslaboratorium Zürich.)

Kürzlich ist es nun auch gelungen, Moleküle, die selbst bei Zimmertemperatur an ihrem Platz haften bleiben, zu verschieben, wie der Molekülkreis von Abb. 3 zeigt, der aus sechs vierbeinigen Cu-TBOB-Porphyrinen besteht. Die vier Beine dienen als Abstandshalter, um die molekularen Eigenschaften des auf dem Kupfer festgehaltenen Porphyrins zu erhalten. Sie ermöglichen gleichzeitig durch unabhängiges Verbiegen und Zurückschnappen einen sanfteren Bewegungsablauf beim Verschieben des Moleküls.

Schliesslich wurden in Abb. 4 einzelne Atome durch Spannungspulse von wenigen Volt, die aber wegen des sehr kleinen Abstandes von Sonde zu Oberfläche extrem hohe elektrische Felder erzeugen, aus einer Oberfläche von Molybdänselenid gerissen und so das Wort NANO SPACE geschrieben, was übrigens einer Speicherdichte von 100 Terabit pro cm^2 entspricht (Tbit/cm^2 ; 1 Tera = 10^{12}). Manipulieren, gezieltes Entfernen und Deponieren von Atomen, Molekülen und Nanoobjekten sowie gezieltes Verändern auf Nanometerskala sind die Grundoperationen, um neue Strukturen, Verbindungen und funktionelle Einheiten Schritt für Schritt zusammzusetzen. Am schwierigsten scheint diesbezüglich noch das wohldefinierte Deponieren von Nanoobjekten aus einem Reservoir an der Sonde zu sein.

Lokale Sonden können in jedem Medium gebraucht werden, das die Wechselwirkung Sonde-Objekt nicht abschirmt und ein freies Positionieren der Sonde bezüglich Objekt erlaubt. Dies ermöglicht *in situ* Untersuchung und Bearbeitung von realen Systemen mit nm-Präzision. Von besonderem Interesse ist dabei die

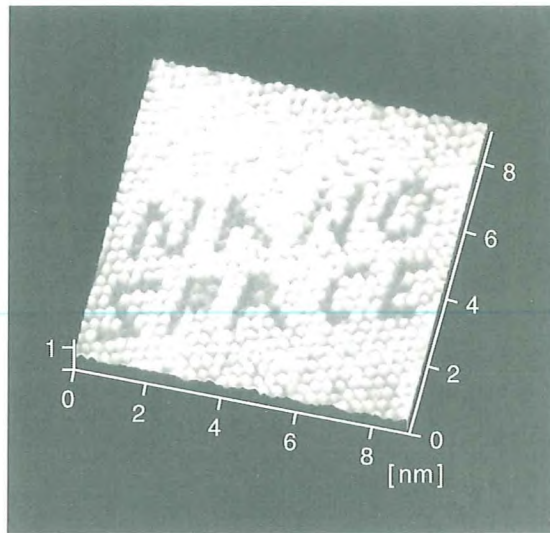


Abb. 4. Atomarer Schriftzug (aus 4).

fest-flüssige Zwischenfläche. Sie ist die Zwischenfläche der Zukunft, die an Vielfältigkeit und Verwendbarkeit keineswegs ärmer als die fest-vakuum Zwischenfläche der klassischen Oberflächenwissenschaften ist, neue Bearbeitungsweisen auf nm-Skala eröffnet und zentrale Bedeutung in Chemie und Biologie hat.

Ein weiterer, äusserst attraktiver Aspekt von lokalen Sonden und Werkzeugen ist die Tatsache, dass die darauf beruhende Instrumentierung selber miniaturisiert werden kann und damit Paralleleinsatz ermöglicht. Anordnungen von tausend bis einer Million solcher Sonden erscheinen nicht unrealistisch und werden von einigen Wissenschaftlern auch schon angegangen.

Selbstverständlich spielen auch Weiterentwicklungen von Schlüsseltechnologien der Mikrotechnik – die klassische Mikroskopie, Lithographie und Materialbearbeitung mit Licht, Röntgenstrahlen, Elektronen, Ionen usw. – eine wichtige Rolle als Nanowerkzeuge, jetzt und in Zukunft. Es ist durchaus denkbar, dass in manchen Fällen Verfahren und Prozesse vorerst mit lokalen Sondenmethoden studiert, ausprobiert und vervollkommen werden, dass aber für die Umsetzung zum verbreiteten Gebrauch klassische Methoden zum Zuge kommen.

4 EPOCHE DER POST-MINIATURISIERUNG: INTERDISZIPLINARITÄT

Die grosse wissenschaftliche Herausforderung beginnt mit der Post-Miniaturisierung, der Zeit, wenn die geometrische Miniaturisierung von Einzelkomponenten das Ende erreicht hat und die Miniaturisierung fortan auf Arbeitsvorgänge, Problemlösungen usw. ausgedehnt wird. Gebiete von zentralem Interesse betreffen das Ausschöpfen neuer Möglichkeiten dank Nanometerdimension, das Erstel-

len geeigneter Zwischenflächen zur Verknüpfung der Nanowelt zu unserer Makrowelt, das Aufbauen komplexer Funktionseinheiten aus molekularen Bausteinen, den Umgang mit einer grossen Zahl von Nanoindividuen, oft verbunden mit sehr vielen Steuerungs- und Kontrollparametern, und ein tiefes Verständnis und Engagement für Interdisziplinarität.

Zuerst zu den neuen Möglichkeiten. Nanomechanik verspricht eine lebensfähige Ergänzung zur Elektronik zu werden: Zugfestigkeiten können um eine Grössenordnung ansteigen, mechanische Eigenfrequenzen im Mega- bis Gigahertzbereich und thermische und Diffusionsrelaxationszeiten von weniger als einer Nanosekunde machen Nanomechanik, -thermik und -chemie recht schnell. Des weiteren können mechanische Systeme bezüglich Interferenz und thermischer Störungen sehr robust sein. Experimentell besonders herausfordernd ist die Kombination von nm-Grösse mit Nanoobjekten inhärenten ultraschnellen Vorgängen. Als Beispiel für Möglichkeiten der Nanomechanik sei das Mikrokalorimeter erwähnt. Basierend auf der Verbiegung eines miniaturisierten Bimorph-Bälkchens, können bei einer chemischen Reaktion Wärmeabgaben von einem μJ in weniger als einer Millisekunde gemessen werden; eine Steigerung der Empfindlichkeit und Bandbreite um zwei bis drei Grössenordnungen erscheint keineswegs unrealistisch. Ein anderes Beispiel betrifft das Messen der Kernresonanz durch magneto-mechanische Kopplung der Kernmomente an einen miniaturisierten mechanischen Schwinger. Auch wenn die Hoffnungen auf Detektion einzelner magnetischer Kernmomente den meisten allzu utopisch erscheint, sind ganz neue Grössenordnungen bezüglich Empfindlichkeit in speziellen Fällen durchaus realistisch. Die extrem hohen elektrischen Felder kamen schon oben im Zusammenhang mit dem Modifizieren auf atomarem Massstab zur Sprache. Nichtlineare Phänomene sind eine andere Anwendungsklasse. Ferroelektrika können dank der heute möglichen hohen lokalen elektrischen Felder von Volts/Angström erneut für Anwendungen von Interesse werden. Weitere interessante und fordernde Aspekte in nm-Dimensionen sind direkte Auswirkung von Quanteneffekten, sowie Messen und Kontrollieren von und Arbeiten mit einzelnen Elektronenladungen anstatt mit elektrischen Strömen.

Fortschritt in der Post-Miniaturisierung wird auf wachsender experimenteller und gedanklicher Komplexität in der «Miniaturisierung» von Arbeitsvorgängen, Problemlösungen usw. basieren. Ein vielversprechender Weg könnte der Zusammenbau von komplexen funktionalen Einheiten aus einzelnen funktionalen Elementen wie Makromolekülen sein. Ein solches Aufbauszenario steht im Gegensatz zur früheren Miniaturisierung und wird eine Mischung aus «self-assembly», Selbstorganisation und gezieltem individuellen Eingriff sein. Dies wird zu einer sehr fruchtbaren interdisziplinären Zusammenarbeit führen, die neue Dimensionen in Biologie und Supramolekularchemie erschliessen wird. Die Physik wird dazu die Werkzeuge und das Wissen um deren Einsatz bereitstellen sowie Konzepte ausarbeiten; Chemie und Biologie werden Bausteine, Prozesse sowie

Materialien und Prozeduren für «self-assembly» und Selbstorganisation liefern. Basis dazu bildet die unabhängig und gegenläufig zur Miniaturisierung verlaufende Entwicklung in der Chemie von kleinen Molekülen zu Makromolekülen mit biologischen Abmessungen (Abb. 5). Biologische Bausteine mögen zwar für das Aufbauszenario im grossen und ganzen nicht praktikabel sein, doch werden Konzepte aus der Biologie zu neuen Wegen des Denkens und des Tuns führen. Im Bereich der numerischen Berechnungen fand eine ähnliche Entwicklung wie in der Chemie statt: von den Atomen und kleinen Molekülen zu immer grösseren Nanoobjekten. Die numerischen Methoden werden eine grosse Bedeutung für das Verständnis von Eigenschaften, Funktionen und Abläufen im Nanometerbereich haben, weil einerseits die Theorie auf wenig Symmetrie und auf keine feste Dimensionalität bauen kann und andererseits die unmittelbare Umgebung eines Nanoobjektes nicht als kleine, sondern oft als nichtlineare Störung einbezogen werden muss.

Diese enge Verbundenheit des Nanoobjektes mit seiner Umgebung ist vor allem für seine Funktionstüchtigkeit ein kritischer Faktor. Als erstes muss das kunstgerechte Befestigen des Nanoobjektes an einem vorgegebenen Ort unter den für sein Funktionieren erforderlichen Bedingungen gelernt sein. Ein erster Schritt in dieser Richtung ist der Versuch, ein Molekül auf einer richtig funktionalisierten Trägerschicht zu verankern, z. B. auf «self-assembling» Monoschichten, oder ihm Abstandshalter beizufügen, wie z. B. dem Porphyrinmolekül in Abb. 3. Aber auch die Wechselwirkung mit der Sonde darf keine nachteiligen Auswirkungen haben. Auch wenn wir noch nicht an die Problematik quanten-

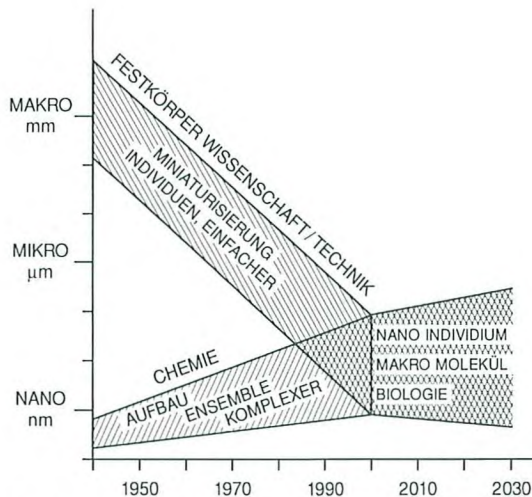


Abb. 5. Verlauf der Festkörperwissenschaft und -technik sowie der Chemie: der Weg zum Aufbauszenario in der Nanowelt (5). Wie so oft in der Wissenschaft ergänzen sich zur rechten Zeit voneinander unabhängig verlaufende Entwicklungen zu einer neuen, umfassenderen Entwicklung.

mechanischer Messprozesse stossen, so wird auch hier der «unbeteiligte Beobachter» leicht zur Beteiligung.

Sind die einzelnen Nanoindividuen im Griff, so kommen als nächstes deren Verknüpfung und der Umgang mit einer grossen Anzahl von ihnen. Um wiederum ein Beispiel aus der Datenverarbeitung zu nehmen: Speichereinheiten von Pbits (Peta = 10^{15}) sind durchaus abzusehen, dazu mit noch schnellerem Datentransfer und kürzeren Zugriffszeiten als heute. Mit solchen Speichern auch etwas Vernünftiges anzufangen, ist etwas anderes. Da wird die Strategie des Überflusses zum Zuge kommen: von einem Pbit wird das meiste dazu eingesetzt, um mit dem Rest, der immer noch fast unvorstellbar gross ist, äusserst effizient und vielseitig umzugehen; es entsteht dabei ein Speicher-Prozessor-Hybrid. Die Strategie des Überflusses wird in der Nanowelt ganz generell eine wichtige Rolle spielen.

5 NANO FÜR EINE NACHHALTIGE ENTWICKLUNG

Die Nanometerwelt stellt auch einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung dar. Nehmen wir wieder die Datenverarbeitungsindustrie als Beispiel. Die Reduktion des Energieverbrauchs pro logischer Operation um ungefähr 10 Grössenordnungen ist ein wunderschönes grünes Resultat. Diese Steigerung der Recheneffizienz wird durch die rasante Verbreitung der Datenverarbeitungsprodukte mit total installierten 10^{19} Joules pro Jahr wohl mehr als ausgeglichen – nicht mehr so grün. Ob grün oder nicht ist aber nicht nur eine Frage des absoluten Wertes, sondern vor allem auch der zu lösenden Aufgabe. Man kann sich natürlich zu Recht streiten, ob all das, was heute gerechnet, geordnet, übermittelt, gedruckt und verteilt wird, wirklich des Rechnens, Ordnen, Übermitteln, Druckens und Verteilens wert ist. Auch wenn daher in der Datenverarbeitung noch ein grosses Energiesparpotential vorhanden ist, so müssen wir doch zugeben, dass uns die Mikrowelt einiges näher an eine nachhaltige Entwicklung heranbrachte bzw. weniger weit davon entfernte – je nach Standpunkt.

Die weiterschreitende Miniaturisierung zu nm-Dimensionen bietet Gewähr, dass der Energieverbrauch in der Datenverarbeitungsindustrie trotz riesiger Mehrleistungen unter Kontrolle bleibt. Die Nanometerwelt kann jedoch etwas grundlegend anderes bedeuten und bieten, da sie uns Denk- und Arbeitsweisen erlaubt, wie wir sie in unserer Umwelt, in der Natur, finden.

Der Mensch, aus Nanoindividuen aufgebaut, ist an und für sich ein äusserst umweltfreundliches Wesen, mit einer Energieaufnahme von rund 100 Watt. Mit einem Bruchteil davon riecht oder schmeckt er den Zapfen des Weins, erkennt und klassiert Blumen, Bäume und Landschaften aus verschiedenstem Blickwinkel, verarbeitet Sprache und geniesst Musik. Technisch können diese Aufgaben auch mit gewaltigem Instrumentierungs-, Datenverarbeitungs- und damit auch Energieaufwand noch nicht oder nur rudimentär gelöst werden.

Das Faszinierende der Nanowelt ist die Perspektive, mit Hilfe von Nanowissenschaft und -technik Sensoren und Aktuatoren oder Werkzeuge von ähnlicher

Dimension und Komplexität wie die natürlichen Organe zu bauen – oder wenigstens guten Gewissens daran denken können. Der Grad der organinternen Vernetzung für wahrhaft verteilte, analoge, z. B. chemische und mechanische Signal- und Datenverarbeitung sowie Steuerung, sozusagen interne neuronale Netzwerke, wird entscheidend für die zulässige Komplexität der zu lösenden Aufgabe sein. Dies entspricht einer Abkehr von der heutigen Praxis einer frühestmöglichen Umwandlung von jeglicher Information und Messwerten für externe digitale Datenverarbeitung und einer spätestmöglichen Rückführung zur Steuerung von Sensoren und Aktuatoren. Technische Lösungen sind abzusehen. Völlig offen bleibt die Frage, wie ein Lernprozess in solche menschengemachten Erkennungs- und Arbeitssysteme zu integrieren ist.

All das oben Gesagte widerspiegelt das jetzige Können und Wissen im Umgang mit Nanoindividuen. Die Zukunft ist aber nicht eine blosse Extrapolation von gestern und heute auf morgen. Wissenschaftliche und technische Entwicklungen nahmen meist viel gewaltigere Formen an, als je zu einem bestimmten Zeitpunkt erwartet oder erahnt wurde. So wird es auch mit der Nanowelt sein. Wie RICHARD FEYNMAN es vor bald 40 Jahren ausdrückte, «there is plenty of room at the bottom» (6). Im Unterschied zu der durch die Mikrotechnik geprägten Epoche ist heute der Vorsprung der Wissenschaft auf die technischen Entwicklungen von morgen drastisch kleiner geworden. Dies hat zu einem grossen Teil damit zu tun, dass der Wissenschaft vermehrt die Verantwortung für «short time to market» überbunden wird, aus völligem Unverständnis für die langfristige Mission der Wissenschaft, nämlich heute das vorzubereiten, was morgen gebraucht wird. Die Wissenschaft ist aufgerufen, den einstigen Vorsprung auf die Technik wiederzuerlangen und die Möglichkeiten, welche die Nanowelt bietet, zum Wohle der Menschheit auszuschöpfen.

Literatur

- (1) R.W. KEYES, 1988. – IBM J. Res. Devel. 32, p. 24ff.
- (2) H. ROHRER, 1994. – Il Nuovo Cimento 107A, p. 989ff. © Società Italiana di Fisica.
- (3) M.F. CROMMIE, C.P. LUTZ & D.M. EIGLER, 1993. – Science 262, p. 218ff.
- (4) S. HOSAKA, S. HOSOKI, T. HASEGAWA, H. KOYANAGI, T. SHINTANI & M. MIYAMOTO, 1995. – J. Vac. Sci. Technol. B13, p. 281ff.
- (5) H. ROHRER, 1992. – Ultramicroscopy 42–44, 1ff.
- (6) P. FEYNMAN, 1959. Rede am 29. Dezember, an der Jahrestagung der American Physical Society, Pasadena, USA. In: «Miniaturization», H.D. GILBERT ed. – Reinhold Publ. Corp., New York.