

Quantenphysik und menschlicher Unternehmungsgeist — Die Eroberung des Nanokosmos¹

J. Honerkamp, Fakultät für Physik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Als ich darüber nachdachte, zu welchem Thema ich heute zu Ihnen sprechen könnte, fiel bei der Musterung meiner Bibliothek mein Auge auf das Buch: ‘Atomphysik und menschliche Erkenntnis’ von Niels Bohr. Dieses Buch enthält eine Reihe von Bohrs Ansprachen und Vorträgen aus den Jahren 1932 bis 1955 mit solchen Überschriften wie ‘Die Atome und die menschliche Erkenntnis’, aber auch eine ‘Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme in der Atomphysik’. Die Entwicklung der Quantenmechanik mit all ihren Hinterfragungen unserer klassisch physikalischen Begriffsbildungen hat die Naturwissenschaftler damals sehr bewegt. Auch heute noch ist die Diskussion um die begrifflichen Grundlagen der Quantenphysik keineswegs ausgestanden.

Ich möchte Ihnen aber nicht hierüber berichten, wohl aber darüber, dass wir heute die Folgen der Entwicklung der Quantenmechanik auf einem ganz anderen Gebiete erleben können. Die Quantenphysik, das heißt, die Physik aller atomaren und subatomaren Prozesse, tritt heute endgültig aus den Bereich der Grundlagenforschung und Philosophie heraus. Quantenphänomene, die wir bisher nur aus der Welt der Atome und Moleküle kennen, werden immer bedeutsamer für technologische Produkte und werden demnächst auch in unserem Alltag präsent sein.

Quantenphysik — bisher ein Grundlagenfach in der Physik — wird heute auch zur Grundlage eines ganzen Technologiezweiges, der uns in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren eine Innovationswelle bescheren wird, die nach manchen Schätzungen noch größer sein soll als die, die wir heute in der Informationstechnologie erleben. Davon möchte ich Ihnen erzählen und so kam ich auf die Idee, meinen Vortrag ‘Quantenphysik und menschlicher Unternehmungsgeist’ zu nennen. Ich möchte dabei einen Bogen spannen von den Anfängen der Halbleitertechnologie bis hin zu den Visionen über einen Quantencomputer.

Den Anfang der Quantenphysik kann man recht gut datieren. Am 14. Dezember im Jahre 1900 stellte Max Planck an der Friedrich-Wilhelm-Universität in Berlin (heute Humboldt-Universität genannt) seine Hypothese über die Quantelung der Energie der elektromagnetischen Strahlung vor. Dieses Ereignis wird allgemein als der Anfang der Quantenphysik angesehen. Der Hörsaal, in dem dieses geschehen ist, existiert heute noch und wird entsprechend in Ehren gehalten.

Im Juni 1912 stellte Max von Laue in Berlin im selben Saal eine Entdeckung vor, die wiederum als Anfang eines ganzen Zweiges der Physik gelten kann, der sogenannten Festkörperphysik. Er hatte Röntgenstrahlen an einem Kristall gestreut und auf der Photoplatte genau die Intensitätsverteilung erhalten, die er vorher berechnet hatte, und zwar ausgehend von der Annahme, dass in einem Kristall die Atome ein regelmäßiges Gitter bilden. Seine Arbeit, für die er im Jahre 1914 den Nobelpreis erhielt, eröffnete dem theoretischen Physiker den Zugang zu einem ganz neuen System. Es galt nun, die Regeln der Atomphysik auch auf eine regelmäßige Anordnung von Atomen anzuwenden statt nur auf einzelne Atome oder Moleküle. Insbesondere sollte es nun möglich werden, die elektrische Leitfähigkeit der

¹ Vortrag anlässlich der Mitgliederversammlung des Verbandes der Freunde der Universität Freiburg am 17. Juni 1998

kristallinen festen Körper zu verstehen sowie die Abhängigkeit dieser Leitfähigkeit von Verletzungen der Regelmäßigkeit und von äußeren Einflüssen wie Temperatur oder elektrischen Feldern.

Solch eine Aufklärung war äußerst erstrebenswert. Der Kristall hatte sich bisher in allen Experimenten als ein System erwiesen, an dem kaum reproduzierbare Messungen gelangen. Ferdinand Braun, den meisten als Erfinder der Braunschen Röhre bekannt, hatte schon in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts die Elektrizitätsleitung in Schwefelkieskristallen untersucht und eine Abweichung von den üblichen Gesetzmäßigkeiten gefunden. Insbesondere ließ der Kristall einen Strom nur in einer Richtung zu. Diese Gleichrichterwirkung des Kristalls wurde aber nicht weiter beachtet, zu suspekt schien den meisten Physikern der Kristall. Fruchtbarer erschien zunächst die Weiterentwicklung der Elektronenröhre, die die meisten von uns noch aus dem Radio der 50er Jahre kennen. Bei dieser verstand man 1904 den Gleichrichtereffekt zu nutzen, und bald lernte man auch einen Strom zu steuern und zu verstärken, d.h. die grundlegenden Aufgaben für eine Elektronik — Steuern und Verstärken eines elektrischen Stromes — konnten realisiert werden, und zwar zuverlässig. Die gerade in den Anfängen steckende Telegrafie-Industrie nahm einen großen Aufschwung und eine Radioindustrie entstand.

Inzwischen aber hatte man die Gleichrichterwirkung der Kristalle nicht ganz vergessen. Im zweiten Weltkrieg spielte das Radar, das die meisten von uns heute nur aus den Geschwindigkeitskontrollen der Polizei kennen, eine entscheidende Rolle. Die angelsächsischen Länder hatten ungeheure Mittel an Geld und Forschung in die Weiterentwicklung des Radars gesteckt und auch entdeckt, dass ein Detektor, nach der Anordnung von Ferdinand Braun gebaut, besonders geeignet war, auch noch schwache Radarsignale von sehr kurzen Wellenlängen zu empfangen. Der Kristall, der diesem Detektor diese besondere Eigenschaft gab, hieß Germanium. Im Jahre 1940 gab dieser Kristall — in den Radardetektoren der Engländer — in der Schlacht um England den Ausschlag. An einem Tag allein wurden 185 deutsche Flugzeuge durch Radar entdeckt und abgeschossen.

Die Konkurrenz zwischen Röhre und Kristall kam in eine neue Phase. Die Röhre war zwar noch viel zuverlässiger, aber für das immer stärker anschwellende Fernsprechnet in den Vereinigten Staaten brauchte man Ersatz für die mechanischen Schalter, die viel zu viel Platz und Energie verbrauchten. Da wäre ein kleiner Kristall mit seiner geringen Energieaufnahme gerade recht. Die Firma 'Bell Telephon' mit ihrem beeindruckenden Forschungslabor 'Bell Labs' hatte sich zum Ziel gesetzt, ein Schaltelement auf der Basis eines Kristalls zu entwickeln, das die Röhre ersetzen sollte.

Nach vielen Umwegen, missglückten Versuchen und zufälligen Entdeckungen war es am 23. Dezember 1947 so weit. Der Transistor wurde offiziell im Labor von den Erfindern J. Bardeen, W. Shockley und W. Brittain vorgestellt. Der Name, Transistor, bedeutet Transfer von Ladungsträgern durch einen Kristall.

Der kommerzielle Start des neuen elektronischen Schaltelementes war allerdings zunächst enttäuschend. Im Jahre 1948 wurde zwar ein Radio mit Transistoren vorgestellt. Von einer Aussicht darauf, dass ein solches Radio die Röhrenradios bald verdrängen würde, konnte noch keine Rede sein, zumal die Röhren auch noch sparsamer, kleiner und billiger wurden. Lediglich für Hörgeräte war der Transistor wegen seiner Kleinheit ein großer Fortschritt.

Der große Schub für den Transistor kam schließlich von dem Computer. Elektronische Rechner waren zu der Zeit schon gebaut worden. Konrad Zuse hatte 1941 in Berlin mit der Z3 den ersten vollautomatischen Rechenautomaten hergestellt. Im Krieg wurde ein Rechenautomat für die Engländer sehr wichtig: sie konnten den Geheimcode, mit dem das deutsche Oberkommando der Wehrmacht seine Befehle verschlüsselt hatte — mit einer mechanischen Verschlüsselungsmaschine, Enigma genannt — nur dann knacken, wenn sie genügend schnelle Rechenautomaten zur Verfügung hatten. Sie entwickelten so 'Colossus',

eine mit einer riesigen Anzahl von Elektronenröhren bestückte Rechenmaschine. Die Entschlüsselung des deutschen Codes war von entscheidender strategischer Bedeutung.

Berühmt wurde nach dem Krieg der Rechner 'Eniac', der 18 000 Elektronenröhren enthielt, 30 Tonnen wog, eine ganze Halle ausfüllte und eine riesige Wärme produzierte, die sich nur schwer abführen ließ.

Der Transistor war wie geschaffen, um die Rechner kleiner, schneller und sparsamer zu machen. So ist die nun einsetzende Beschleunigung in der Entwicklung der Rechner nicht denkbar ohne den Transistor. Und die Beschleunigung in der Entwicklung der Transistoren ist nicht denkbar ohne die Rechner. Dieses fruchtbare Zusammenspiel sehen wir noch heute bei den strategischen Allianzen zwischen entsprechenden Firmen wie z.B. der von Intel und Microsoft, der berühmten 'Wintel Connection'.

Shockley, einer der drei Erfinder des Transistors, wollte bald seinen Namen nicht nur im 'Physical Review', sondern auch im 'Wall Street Journal' lesen. Er gründete eine Firma 'Shockley Semiconductors' in Palo Alto, südlich von San Francisco, in der eine Diode, ein Basisschaltenelement für einen Rechner, produziert werden sollte. Statt Germanium benutzte er nun Silizium, eine Kristallsorte, die sich insbesondere unter Wärmeeinfluss robuster verhielt und schon für Starkstrom-Anwendungen viel eingesetzt wurde.

Shockley hatte aber kein Glück mit seiner Firma, die Ausbeute seiner Diodenproduktion wollte sich nicht verbessern lassen. Seine Mannschaft, ausgesuchte und bestens ausgebildete Physiker, meuterten gegen die wenig erfolgversprechende Firmenstrategie Shockleys, setzte sich ab und gründete eine eigene Firma, in der sie einen Transistor herstellte, der — insbesondere auch vom Militär nach dem Sputnickschock — für Satelliten und Raketen benötigt wurde. Diese Firma hatte bald Erfolg, 100 Millionen Dollar Umsatz waren bald erreicht. Eine Erfolgseuphorie machte sich breit. Durch neue Abspaltungen wurden immer mehr Firmen gegründet wie z.B. 'National Semiconductors' oder 'Intel'. Das Gebiet um Palo Alto wurde zum 'Silicon Valley', ein Ballungsraum von jungen stark expandierenden Firmen, in dem jeder jeden kannte — Zulieferer, Produzenten, Ingenieure und Physiker, Geschäftsleute.

Es genügte aber nicht, nur Transistoren zu bauen, auch nicht, diese dann im Rahmen von integrierten Schaltkreisen zu produzieren. Man musste sie auch mit einem Satz von Befehlen versehen können, die auf Anforderung abgearbeitet werden konnten. Die Informatik entstand. Die beherrschende Firma auf diesem Gebiet war IBM, gegründet schon lange vor dem Krieg von einem Büromaschinenhersteller Thomas J. Watson, der schon 1930 die Vision hatte, dass im Büro auf jedem Schreibtisch ein Rechner steht.

Die Firmen mussten aber immer größere Anstrengungen machen, um konkurrenzfähig zu bleiben. Die Herstellungsmethoden hatten sich bald grundlegend geändert. Man baute nicht mehr einzelne Schaltelemente, sondern ganze Schaltkreise mit vielen Transistoren. Solch ein Chip, wie man ganze, für bestimmte Funktionen bestimmte Schaltkreise nannte, wurden wiederum zuhauf auf einer einzigen Siliziumscheibe, Wafer genannt, produziert. Die 'Kosten pro Schalteinheit' wurden dadurch rapide gesenkt. Diese Entwicklung war nur möglich, weil die Strukturen auf den Chips immer kleiner werden konnten, so dass man mehr Chips pro Scheibe erzielt, und weil man die Scheiben immer größer machen kann. Heute produziert man etwa siebzig 64 Megabit Bausteine auf einer Siliziumscheibe von 20cm Durchmesser. Die Strukturen auf dem Chip haben die Breite von 0.25 Mikrometern, ein Haar ist dreihundertmal dicker. Das Ziel für die Jahrtausendwende ist: 170 Ein-Gigabit-Speicher mit Strukturen der Größe 0.18 Mikrometern auf einer 30cm Scheibe zu fertigen. Ein Gigabit entspricht etwa 60.000 Textseiten .

Die Herausforderungen für dieses Ziel sind enorm. Der Wafer, die Siliziumscheibe also, muss ein Kristall von solcher Regelmäßigkeit sein, dass eine Fläche von Frankreich und Deutschland zusammen keinen Hügel enthalten dürfte, der höher als 10 Meter wäre.

Diese Entwicklung in der Mikroelektronik setzt sich fort in der Mikrosystemtechnik. In den Schaltelementen der Mikroelektronik fließen elektrische Ströme, und die Fähigkeit, solche Ströme zu steuern und zu regeln, macht gerade die Funktion eines Schaltelementes aus. Mit einem Chip kann man rechnen, logisch schließen, in großen Datenbeständen suchen, sortieren. Man redet nicht umsonst von einem elektronischen Gehirn, auch unsere Gehirntätigkeit beruht auf elektrischen Strömen. Die Mikrosystemtechnik fügt nun einem solchen elektronischen Gehirn auch noch einerseits Sensoren, d.h. Augen, Nasen und Fühler bei, um Information aus der Umgebung aufzunehmen und andererseits Aktoren, d.h. Hände und Beine, um in der Umgebung Aktionen durchführen zu können, und zwar die, die das elektronische Gehirn aufgrund der Sensorsignale errechnet. Ein besonders anschauliches Beispiel für solch ein integriertes System aus Sensoren, elektronischer Verrechnungseinheit und Aktoren ist der Airbag-Auslöser, den wir inzwischen alle in unserem Auto haben. Der Sensor misst die Beschleunigung, das elektronische Hirn bewertet das Signal und bestimmt, ob ein Aktor den Airbag sich entfalten lassen soll. Mikrosysteme werden sich auch in der Medizin, insbesondere in der minimal invasiven Therapie als sehr nützlich erweisen.

Die Erweiterung der Mikroelektronik zur Mikrosystemtechnik ist naheliegend und wird rückblickend als natürlich und unvermeidbar erscheinen. Unsere Universität hat das schon früh erkannt und im Rahmen der neuen Fakultät für Angewandte Wissenschaften eine Lehr- und Forschungsinstitution für dieses Zukunftsgebiet geschaffen.

Aber schon diskutiert und arbeitet man an einer neuen Runde der technologischen Reise in die kleinsten Dimensionen. Die Längeneinheit, die für die Mikrosystemtechnik angemessen ist, ist das Mikrometer, gleich einem Millionstel Meter. Ein Würfel Silizium mit einer Kantenlänge von einem Mikrometer enthält aber noch viele Milliarden Atome. Wie wäre es, wenn man mit den Atomen selbst arbeiten könnte, wenn man sie wie Lego-Bausteine verschieben und stapeln könnte und mit ihnen von "unten nach oben" — 'bottom up', wie es im englischen heißt — etwas aufbauen kann. Das wäre die ultimative Technologie und eine grundsätzliche Kehrtwendung. Bisher bearbeiten wir das Material, auch noch in der Mikrosystemtechnik, so, dass wir stets Milliarden von Atomen, Molekülen und größere Einheiten wie Polymere aufeinander schießen, sprühen, verrühren, schütteln und miteinander reagieren lassen. Lithographie, Ätzen, Epitaxie, so heißen alle diese Methoden. Es ist enorm, was man damit schon alles erreicht, wie z. B. wunderbare Schichtstrukturen für bestimmte Transistoren, mit einzelnen Schichten, die oft nur wenigen Atomlagen eines bestimmten Materials entsprechen.

Aber diese Technologie stößt bald an ihre Grenzen, zur Lithographie benötigt man z.B. Licht, um die benötigten Strukturen einzubrennen. Da Licht eine Wellenlänge von etwa $600\text{nm}=0.6$ Mikrometer hat, ist man auf Strukturen solcher Größenordnung beschränkt. Mit bestimmten Tricks schafft man es noch ein wenig weiter. Für Strukturen einer Größe unterhalb 100 nm ist man mit der Lithographie am Ende. Versuche, kleinere Strukturen mit Röntgenstrahlen, deren Wellenlängen unterhalb von einigen nm liegen, zu erzeugen, waren bisher nicht erfolgreich.

Aber ist dieses Beschießen, Vermischen und Schütteln von solchen Haufen von Atomen nicht auch einfach zu primitiv? Können Sie z.B. ein Radio bauen, indem Sie Drähte, Transistoren und andere elektronische Komponenten in einen Sack werfen und diesen ordentlich schütteln. Erwarten Sie, dass Sie danach aus dem Sack ein fertiges Radio ziehen können? Entsteht auch nur ein einziges Auto, wenn Sie eine Unzahl von Motoren, Lenkern, Armaturen und Sitzen auf eine Fläche schleudern? Nein, Sie müssen die einzelnen Teile gemäß ihrer Funktion Stück für Stück zusammenpassen, eben wie Lego-Bausteine. Erst dann entsteht eine Einheit, die eine ganz definierte Leistung aufweist.

Eine solche Technologie, die — von unten nach oben— Systeme aus einzelnen Molekülen oder Atomen aufbaut, heißt Nanotechnologie. Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter, die Größenordnung eines Atoms oder Moleküls. Die ersten Schritte in dieser Technologie

sind schon getan, wie ich Ihnen gleich berichten werde. Ungeheure Visionen entzündeten sich mit dieser Technologie. Wenn wir Systeme Molekül für Molekül aufbauen können, können wir auch ganz neue Materialien entwickeln. Materialien, die z.B. viel weniger wiegen als Stahl, aber sonst die gleichen Eigenschaften haben. Wünschbare Eigenschaften können gezielt eingestellt werden. Heutige Großcomputer können so klein werden, daß man sie wie eine Uhr am Arm tragen kann.

Die Idee, einzelne Atome manipulieren zu wollen, ist zwar sehr verwegen, aber dennoch nicht so neu. Der berühmte Physiker Richard Feynman hat in einem Diner Speech mit dem Thema 'There is much room at the bottom' diese Vision schon im Jahre 1959 entwickelt.

Er hat dabei ein gutes Gespür für die Entwicklung in der Physik gezeigt. In der Tat hat es in den letzten Jahren spektakuläre Entwicklungen in der Physik gegeben, die in ganz neuen Methoden kulminierten, mit denen man eine Ansammlung von vergleichsweise wenigen Atomen analysieren und manipulieren kann. Diese bahnbrechenden Erfolge sind in der Öffentlichkeit kaum bemerkt worden, und doch werden sie vermutlich in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten das Leben der Menschen mehr bestimmen als alles, was heute jeden Tag in den bedeutendsten Zeitungen zu lesen ist. Die Fachwelt hat die Bedeutung allerdings erkannt, außergewöhnlich schnell wurde der Nobelpreis für diese neuen Methoden vergeben. Ich spreche von der Erfindung des Rastertunnelmikroskops 1981 durch Binnig und Rohrer, gewürdigt mit dem Nobelpreis im Jahre 1986.

Lassen Sie mich auf das Rastertunnelmikroskop und auf die Fortentwicklungen dieses Gerätes kurz eingehen.

In diesem Gerät bringt man eine Nadel aus Metall in die Nähe der Oberfläche eines Materials. Die Nadel ist dabei so spitz, dass manchmal nur ein Atom ihre Spitze ausmacht, und der Abstand zur Oberfläche des Material ist so gering, (eben nur einige Nanometer), dass wegen des sogenannten Tunneleffektes Elektronen aus dem Material austreten, in die Nadel fließen und dort einen Strom produzieren können. Der Strom, der sich dabei ergibt, hängt ganz empfindlich von dem Abstand zur Oberfläche ab, besser gesagt, zu dem, was man auf dieser Langenskala Oberfläche nennen kann. Denn auf dieser Skala löst man schon die einzelnen Atome auf und mit Oberfläche ist hier nicht eine Oberfläche im makroskopischen Sinne gemeint, sondern eine Äquipotentialfläche des Elektronensees, die allerdings gemäß der Lage der einzelnen Atome gewellt ist. Wenn man es nun schafft, diese Nadel über das Material zu führen und dabei jeweils den Abstand so zu regeln, dass der Strom in der Nadel konstant bleibt, so tastet man offensichtlich wie ein Blinder beim Lesen der Blindenschrift die Oberfläche des Materials ab. Das Auf- und Abregeln der Nadel ergibt ein Bild der Struktur der Oberfläche.

So sind wunderbare Bilder über viele Materialien entstanden, Fragen über die Struktur der Atomanordnungen in komplexeren Materialien konnten beantwortet werden, Oberflächen von Halbleitern konnten geprüft und chemische Reaktionen in Realzeit verfolgt werden. Als man daran gehen wollte, Bilder von DNA-Molekülen mit dieser Methode zu erzeugen, wurde aber bald eine Beschränkung klar. Die Oberfläche musste leitend sein, DNA-Ketten sind aber keine elektrischen Leiter. Eine Fortentwicklung des Rastertunnelmikroskops löste das Problem. Das 'atomic force' Mikroskop (AFM), im deutschen einfach Kraftmikroskop genannt, benötigt keine leitende Oberfläche und keine leitende Nadel.

Diese Fähigkeit, sich ein Bild von den wahren Verhältnissen auf einer Oberfläche zu machen — und zwar in atomarer Auflösung — ist nun der Schlüssel und Anstoß zu einer neuen Innovationswelle. Man kann nun studieren, wie sich auf der Nanometerskala die Oberfläche durch äußere Einwirkungen verändert, wie z.B. Haut und Haar im Nanometer-Maßstab altern. Man kann kontrollieren, was man schon mit konventionellen Methoden der Oberflächenbehandlung wie die Beschichtung mit Nanopartikeln erreicht.

Nanopartikel bestehen aus etwa 100-1000 Atomen, ein verhältnismäßig großer Teil der Atome siedelt an der Oberfläche dieser Partikel, bei einem Teilchen mit nur hundert Atomen sind es bereits mehr als die Hälfte. Diese Besonderheit verleiht Beschichtungen von Materialoberflächen mit Nanopartikeln besonders schöne Eigenschaften.

Autoscheiben können aus leichterem Material als Glas gemacht und so beschichtet werden, daß sie bei Feuchtigkeit nicht beschlagen, dass andererseits Schmutzpartikel an der ultraglaten Oberfläche nur schwer haften können. Man erhält so stets sichtfreie und selbstreinigende Autoscheiben, Regen oder Wind spülen die wenigen, doch haftenden Schmutzpartikel schnell weg. Mit der gleichen Technik kann man Oberflächen so präparieren, dass Graffiti-Farbe leicht abperlt. Nanobeschichtungen vermögen Aluminium, Messing, Kupfer und Stahl wirkungsvoll vor Korrosion zu schützen und mit Nanoschichten läßt sich die Lichtdurchlässigkeit bei Fenstern regeln.

Nanopartikel könnten auch in der Medizin neue Behandlungsmethoden anregen. Kleinste Magnetitpartikel, in ein Tumorgewebe eingeschleust, könnten in einem magnetischen Wechselfeld zur Erhitzung und damit zur Zerstörung des Tumorgewebes führen. Nanopartikel könnten selbst so beschichtet werden, dass sie gezielt an Tumore andocken und dort ihre Wirkstoffe zur Entfaltung bringen.

Solche Produkte werden also schon vor der Nanotechnologie im eigentlichen Sinne die Dinge unseres täglichen Lebens verändern, man schätzt das Weltmarktvolumen auf einen Betrag von zweistelliger Milliardenhöhe. Wir werden uns schnell an die verbesserten Eigenschaften gewöhnen und gar nicht mehr registrieren, welches Wissen, welche Forschung und Entwicklung dahinter steckt.

Mit dem Rastertunnelmikroskop und dem Kraftmikroskop kann man aber nicht nur Oberflächen kontrollieren und Bilder von diesen erzeugen. Im Jahre 1990 bemerkten Wissenschaftler am IBM-Laboratorium in San Jose, dass man auch einzelne Atome mit der Nadel über die Oberfläche verschieben kann. Sie schafften es, einzelne Xenon-Atome zu einem Wort 'IBM' zu gruppieren, zum kleinsten Wort der Welt, ein Nanometer mal ein Nanometer groß. An unserer Nachbaruniversität Basel gibt es Kollegen, die es denen bald nachmachen konnten und in Japan konnte man eine solche atomare Kalligraphie sogar bei Raumtemperaturen durchführen.

Was für Strukturen möchte man denn aufbauen? Das naheliegendste Ziel ist, die Schaltkreise, die man in einem Computer benötigt, noch kleiner und sparsamer zu machen. Das heißt, dass man noch mehr Information auf gegebener Fläche speichern kann und dass man noch kleinere Schaltelemente bauen kann. Das ultimative Ziel ist der Ein-Elektron-Transistor, d.h. ein Transistor, dessen Zustand man durch die Bewegung eines einzelnen Elektrons ändern kann.

Die mikroskopische Kleinheit dieser Elemente bedeutet auch, dass die Gesetze der Mikrophysik wie wir sie aus der Atomphysik in Form der Quantenmechanik kennen, nun voll zum Tragen kommen. Diese Gesetze gehören zum heiligsten Gut der Physikausbildung, ihre Bedeutung wird täglich in den Forschungslabors in aller Welt gewürdigt, ihre Gültigkeit bestätigt. In der Technologie spielten diese Gesetze aber in der Regel eine untergeordnete Rolle, da die meisten technologischen Geräte eben bisher makroskopische Geräte sind, und wir wissen, dass sich die quantenmechanischen Effekte mit zunehmender Größe des Systems rasch verlieren. So ist auch noch im Studiengang für Mikrosystemtechnik eine Vorlesung über Quantenmechanik nicht vorgesehen. Und ich entsinne mich an einen Vertreter der Akademischen Arbeitsvermittlung Frankfurt, der 1967 in Bonn seinen Vortrag vor Physikstudenten mit den Sätzen begann: 'Sie lernen hier an der Universität viel unnützes Zeug wie z.B. Quantenmechanik.....'. Die Mühlen des Fortschritts mahlen langsam und für viele im Verborgenen. Ohne das Grundwissen über Quantenmechanik hätte man die Leitungseigenschaften der Kristalle und des Transistors nicht verstanden, ohne Quantenmechanik wäre eine Nanotechnologie überhaupt nicht möglich. Quantenphänomene

wie der Tunneleffekt oder die Heisenbergsche Unschärferelation werden in Zukunft auch in der Öffentlichkeit häufiger genannt werden, auch von Ingenieuren verstanden und ausgenutzt werden.

Dieses allmähliche Eindringen der Quantenphysik in die Technologie ist ein besonders schönes Beispiel für die Bedeutung der Grundlagenforschung in der Naturwissenschaft. Das Wissen um grundlegende Gesetze der Natur kann nie unnützlich sein und ist immer bedeutsam, für unsere Kultur wie für unsere konkreten Lebensbedingungen, gehört immer zur Bildung wie zur Ausbildung. Der Gegensatz zwischen Grundlagenforschung und Angewandter Forschung ist oft künstlich hochgezüchtet, menschliche Erkenntnis und menschlicher Unternehmungsgeist sind keine Konkurrenten, sie sind eher aufeinander angewiesen und ergänzen sich.

Die Quantenphysik lehrt uns, wie die Natur sich wirklich verhält, wir verstehen mit ihr nicht nur immer besser, was 'die Natur im Innersten zusammenhält', sondern auch, wie sie sich im Innersten verhält. Wir stellen dabei fest, dass unsere Begriffe, die wir als makroskopische Wesen im Umgang mit makroskopischen Objekten auf natürliche Weise entwickelt haben, nur noch bedingt taugen. Mathematische Strukturen und Begriffe sind hier verlässlichere Begleiter bei der Formulierung von Modellen und Hypothesen, die experimentell geprüft zu werden haben. So gibt es eine Reihe von berühmten sogenannten Quantenphänomenen, die unserer, von makroskopischen Begriffen geprägten Anschauung zuwiderlaufen. Der bei dem Rastertunnelmikroskop erwähnte Tunneleffekt ist einer davon, die berühmte Heisenbergsche Unschärferelation ist Folge einer anderen Begriffserweiterung. Besonders aktuell ist seit einigen Jahren die Teleportation geworden, die instantane Übermittlung von quantenmechanischen Zuständen über makroskopische Strecken. Das sind hochinteressante Experimente, die unser Bild über die Quantenhaftigkeit der Natur stark bereichern. In den Zeitungen wird die Teleportation allerdings als Vorform vom sogenannten Beamen verkauft, das wir aus Science-Fiction Filmen kennen. Das ist ein Marketing-Trick, der nicht mehr seriös genannt werden kann.

Natürlich wird, wenn solche ungewohnten Phänomene in die breitere Öffentlichkeit gelangen, viel Phantasie und Spekulation frei gesetzt und der Unterschied zur Esoterik ist für Außenstehende oft kaum zu sehen. So wird es vermutlich mit der Idee gehen, einen Quantencomputer zu bauen. Solch ein Computer soll nicht nur ein Produkt der Nanotechnologie sein, d.h. Schaltelemente von der Größe einiger Nanometer enthalten. Seine Rechenschritte sollen auch durch Quantenprozesse dargestellt werden. Um das zu würdigen, muss man sich klar machen, dass in einem Computer jeder Rechenvorgang durch Änderung eines physikalischen Zustandes realisiert wird, durch Änderung einer elektrischen Ladung oder einer Magnetisierung. Die Gesetze, mit denen man damit auch sehr komplexe Rechenschritte aufbauen kann, sind die klassischen Gesetze der Logik und Elektronik.

In einem Quantencomputer wird ein Rechenschritt durch die Änderung eines mikroskopischen Quantenzustandes erzeugt. Aus einer solchen Änderung kann man aber ein Resultat ablesen, das auf gewöhnlichen klassischen Computern erst aus einer ungeheuren Vielzahl von Rechenschritten erzeugbar ist. Solch ein Quantencomputer würde also die Leistungsfähigkeit der klassischen Computer um Dimensionen übertreffen. Eine ganze Klasse von Problemen, die auf heutigen Computern noch nicht berechenbar ist, könnte dann behandelt werden.

Natürlich ist diese Vision umstritten, es gibt Stimmen, die die Verfügbarmachung der Quantenphänomene für Rechenzwecke für unmöglich halten. Aber es gibt schon eine Reihe von renommierten Labors in der Welt, die ernsthaft auf diesem Gebiet arbeiten.

Wahrscheinlich werden wir selbst es nicht mehr erleben, wie diese Frage entschieden wird. Um eine Perspektive zu gewinnen, lassen Sie mich an die Entwicklung der Elektrodynamik erinnern, die hauptsächlich im letzten Jahrhundert stattfand. Im Jahre 1831 formulierte

Faraday sein Gesetz über elektromagnetische Induktion, im Jahre 1867 dann Maxwell sein vereinheitlichtes Modell für alle elektromagnetischen Phänomene, 1887 entdeckte Hertz die elektromagnetischen Wellen. In unserem Jahrhundert wurde die Elektrotechnik groß. Heute ist unsere Welt ohne Elektrizität nicht mehr denkbar. Fast kein Gerät, ob im Haushalt, im Büro oder in der Industrie, funktioniert ohne Strom. Die Computer unserer Verwaltungen und unseres Wirtschafts- und Finanzlebens hängen davon ab.

Die Quantenphysik entstand in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts. In unserer Zeit, am Ende des Jahrhunderts, scheint sie die Bühne der Technologie endgültig zu betreten.

Am Ende des nächsten Jahrhunderts könnte, will man eine Analogie wagen, unser Leben mit Quantenphänomenen so durchsetzt sein wie heute mit den Erzeugnissen der Elektrotechnik. Das ist für uns weit weg, aber spätere Generationen werden diese Entwicklung letztlich schlicht auf die Zeit um die Jahrtausendwende datieren.

Bei alledem wird aber folgendes mehr und mehr zur Geltung kommen: Der Verbrauch an Rohstoffen und an Energie wird immer unbedeutender. Die neuen Technologien beruhen auf Wissen. Diejenige Gesellschaft wird bei dieser Entwicklung mithalten können, die solches Wissen in allen ihren Aspekten pflegt, weitergibt und weiterentwickelt, die dieses Wissen aber auch verwertet und — mit Verlaub — auch Nutzen daraus zieht.