



**Rohstoffe, Nahrung, Energie:
Technologische und moralische Szenarien
des 21. Jahrhunderts**

Professor Wolfgang A. Herrmann

Präsident der Technischen Universität München

01. Juni 2002

„Die Wissenschaft zieht die
Technik nach sich
wie der Magnet das Eisen.“

So hat der Mathematiker Carl Friedrich Gauss die Suche nach dem Neuen charakterisiert und damit die Grundlagenforschung gemeint. Sie ist es, die am Beginn unseres neuen Jahrhunderts mit atemberaubenden Entdeckungen aufwartet:

- Forscher haben ein spezielles Peptid entdeckt, das Alzheimer-Kranke erstmalig hoffen lässt (Zeitschrift *Nature*, Dezember 2000). Diese Entdeckung steht für die *Molekulare Medizin*. Sie charakterisiert das neue Jahrhundert ebenso wie die *Molekulare Biologie*.
- In München hat man gelernt, den Weg eines Bakteriums durch die Zelle zu filmen, um es einfach zu sagen (*Science*, November 2001). Jetzt weiß man, dass Viren in durchschnittlich fünf Anläufen die Zellwand durchdringen. Im Zellinneren setzen sie sich auf den Rücken von „Motorproteinen“ und nutzen so das Einbahnsystem der Zelle (Microtubuli), um rasch zum Kern vorzudringen, wo sie dann ihre Wirkung entfalten. Der nobelpreisverdächtige Befund betrifft die Biochemie der Zelle. Er nutzt Methoden der Laserphysik, die man lange für „Wissenschaft im Elfenbeinturm“ gehalten hat. Umwälzende Entwicklungen in der Medizin dürften nachfolgen.
- Vollständig aufgeklärt ist das menschliche Genom (*Science, Nature* Februar 2001): Der Bauplan des Lebens ist ein Schriftzug aus 3 Milliarden Buchstaben, die etwa 40.000 Gene beschreiben. Die Entschlüsselung der genetischen Kodierung wird mit der ersten Mond-

landung verglichen – zurecht, denn wie damals ist nur der erste wichtige Schritt gesetzt. Die 40.000 Gene sind wie ein Buch mit 40.000 Siegeln. Jetzt steht die Aufklärung der Genom-*Funktionen* an, erst dann ist der Text lesbar. Der Genomik folgt die *Proteomik*: Wie arbeiten die Proteine im Genom zusammen, *wie* wirken sie? Wir haben angefangen, den Film unserer Molekularen Evolution, der seit mehr als 600.000 Generationen läuft, Bild für Bild anzusehen, um herauszufinden was uns von der Tierwelt unterscheidet. Die Zahl der Gene kann es nicht sein, denn auch die gemeine Fruchtfliege bringt es auf 15.000. Das ist tröstlich, weil sich dadurch die noch viel spannendere Frage nach dem geistig-seelischen Sein neu stellt. Eingedenk der Tatsache, dass wir genetisch (DNS) zu 97,8 % mit dem Orang-Utan übereinstimmen, tritt der *technische Fortschritt* als Variante der Evolution ins Bild.

Genetisch unterscheiden wir uns untereinander um ganze 0,1 %, eine denkbar kleine Variationsbreite menschlicher Verschiedenheit. Und doch sind wir so unterschiedlich.

- Kürzlich entdeckt wurden aus Kohlenstoffatomen bestehende, submikroskopisch kleine Röhrenstrukturen, sog. *Nanotubes*. Dabei handelt es sich um Materialien, die bald das Chip-Silicium ablösen können. Für einen *ja/nein*-Schaltvorgang bemüht der Mikroprozessor neuester Bauart noch 800 Elektronen. Trotzdem nimmt dieser Mikroprozessor in jeder Sekunde bis zu eine Milliarde Maschinenbefehle entgegen. Bei den dreidimensionalen Speichersystemen aus Kohlenstoff, „*Cubic Memories*“ genannt, soll am Ende ein einziges „Schaltelektron“ ausreichen. Diese sog. „Quantencomputer“ werden in zwanzig Jahren die Speicherkapazität und das Rechenvermögen des menschlichen Ge-

hirns weit übertroffen haben. Visionäre wie Ray Kurzweil sprechen von der Konvergenz der natürlichen mit der maschinellen Intelligenz. Computer sind dann überall: im Mobiliar, in der Kleidung, im Körper. Fehlendes Wissen laden wir vom Rechner aufs Gehirn „herunter“ – oder hinauf, das ist hier die Frage.

Diese wenigen Beispiele, mögen Sie Ihnen verheißungsvoll oder furchterregend erscheinen, werfen ein Licht auf den technologischen Fortschritt. Brauchen wir diesen Fortschritt, werden Sie fragen. Die Antwort hängt auf zweifache Weise vom Blickwinkel ab: Zum einen ist es die *Entwicklung der Weltbevölkerung*, die den technischen Fortschritt zur Schicksalsfrage werden lässt. Ohne Naturwissenschaft und Technik wird eine exponentiell wachsende Menschheit – von heute 6 Milliarden bis auf 9-10 Milliarden Mitte des Jahrhunderts – am Hunger nach Nahrung und Energie scheitern. Diese globale Sichtweise wird zum anderen ergänzt um das Standortargument. Es betrifft die nationale Volkswirtschaft, also jeden von uns: Eine Techniknation, die den Existenzfragen der Menschheit nicht mehr naturwissenschaftlich-technische Lösungen entgegengesetzt, versinkt rasch in die Bedeutungslosigkeit. Ein Land, das außer Wasser und Salz keine Bodenschätze hat, das wohlstandsbedingt immer älter wird, das seine Bedenkenträger ernster nimmt als seine Ingenieure – ein solches Deutschland hätte die Zukunft verspielt. Mit Stolz müßte es uns erfüllen, dass wir imstande sind, die leistungsfähigste Forschungs-Neutronenquelle der Welt (FRM-II) zu bauen und mit der höchsten nur vorstellbaren Sicherheit zu betreiben.

Die Wirtschaftsgeschichte seit Beginn der Industriellen Revolution ist eine Geschichte des sich ständig differenzierenden Reichtums. Es ist die Geschichte der technischen Innovation und der daraus resultierenden

Wettbewerbskräfte. Nicht zu unrecht beschrieb der russische Nationalökonom *Nicolai Kondratieff* die wirtschaftliche Entwicklung der westlichen Welt als „*Theorie der langen Wellen*“ (1926), heute Kondratieff-Zyklen genannt. Jeder dieser Zyklen wurde durch eine Basisinnovation ausgelöst. Eine Basisinnovation ist als Wirtschaftslokomotive definiert, die nicht *nur* zu einem großen Konjunkturzyklus führt, sondern auch die Reorganisation der gesamten Gesellschaft mitsamt ihrer Arbeitsstrukturen umfaßt. Kennzeichnend ist die Erschließung immer neuer Knappheitsfelder der Gesellschaft, die sich seither von der *Agrargesellschaft* über die *Industrie-* zur *Wissensgesellschaft* gewandelt hat:

Erster Kondratieff:

1800 - 1850 Dampfmaschine/Baumwolle

James Watt 1765; Baumwollspinnerei F.P. Chur,
Augsburg 1850

Zweiter Kondratieff:

1850 - 1900 Stahl/Eisenbahn

Lokomotivenfabrik J.A. von Maffei 1838; Eisenbahn
Nürnberg-Fürth (10 PS) 1835

- Ab hier war Bayern in jeder Phase dabei, so auch beim

Dritten Kondratieff:

1900 - 1950 Elektrotechnik/Chemie

Chemieansiedlungen; Strom aus Wasserkraft, Oskar v.
Miller; z.B. Fa. Wacker Burghausen; Süddtsch. Kalkstickstoffwerke Trostberg: Alzkanal!)

Vierter Kondratieff:

1950 - 1975 Petrochemie/Automobilbau

Erdöl- und Ethylen-Pipeline Genua-Ingolstadt, Raffinerien
Neustadt/ Burghausen; Ethylen-Pipeline Ingolstadt-
Burghausen; Automobilindustrie

Fünfter Kondratieff:

1975 - 2000 Informationstechnologie

PERM TH München 1960; LRZ; Hochgeschwindigkeits-
rechner und -netz

Reichtum und Macht waren immer an den Boden und seine Schätze gebunden – Land, Edelsteine, Gold, Erdöl. Von David Rockefeller bis zum Sultan von Brunei war über hundert Jahre lang der *Rohstoff Erdöl* die Quelle des Reichtums. Aber 1997 trat Bill Gates an die Stelle der Öl magnaten. Er und seine Nachfolger kontrollieren *einen globalen Wissensprozess*, der den Reichtum weiter differenzieren wird.

Warum? Im Jahre 1700, also lange nach dem Beginn der Neuzeit, unterschieden sich die Pro-Kopf-Einkommen im reichsten und im ärmsten Land der Erde praktisch nicht. Überall waren die Erwerbstätigen weit überwiegend in der *Landwirtschaft* tätig. Sie nutzten dieselben Techniken: menschliche Arbeitskraft, Lasttiere, Mechanisches Gerät, Naturdünger, Saatgut aus der Vorjahresernte. Wo es bessere Böden und ein günstigeres Klima für den Ackerbau gab, dort gab es auch mehr Menschen, so dass die Ertragslage hier wie dort etwa ausgeglichen war. Als die Dampfmaschine an der Schwelle ins 19. Jahrhundert perfektioniert war, beginnt die aufblühende Industrie die historische Dominanz der Landwirtschaft abzulösen. Der neureiche Industrielle überrundet den reichen Landadel - Beispiel England, wo die Wiege der

ersten Industriellen Revolution stand. Wohlhabend wird, wer den Sprung in das Industriezeitalter schafft. Erstmals entstehen reiche und arme Regionen.

Die *zweite Industrielle Revolution*, ab 1880/90, entspringt einer deutschen Idee: Die chemische Industrie hatte erkannt, dass ihre Zukunft aus der wissenschaftlichen Laborforschung resultieren würde. Chemie – das war die Sache der jungen Abenteurer und Firmengründer. „*Die Stärke lag in den Laboratorien und nicht auf den Börsen*“, so der englische Chemiker Meldola später respektvoll über den Konkurrenten Deutschland (1886). Die Farbenfabriken eines Friedrich Bayer oder des Höchster Gründerteams Meister, Lucius und Brüning (Hoechst) veredelten ab 1864 „Kohleabfälle“, machten leuchtende Farbstoffe wie Malachitgrün und begründeten Deutschlands Ruf als „Apotheke der Welt“. Er sollte uns ein Jahrhundert lang begleiten. Investiert wurde in die organisierte Großforschung. Zum ersten Mal war eine große ausgebildete Arbeitnehmerschaft für den wirtschaftlichen Erfolg entscheidend. Zum ersten Mal machten Maschinen Produkte, die vorher der Natur in Sklavenarbeit abgerungen werden mussten. Als Beispiel mag das Indigo genügen, der „König der Farbstoffe“, der zuerst aus der indischen Krappwurzel, dann aus der Fabrik kam (1906), in noch viel größerer Reinheit dazu.

Einige Länder investierten in *Wissen und Bildung*, andere nicht. Einige Länder nutzten die Jahrhundertentdeckung der *Elektrizität*, andere nicht. Seither schreitet die wirtschaftliche Differenzierung voran. Mittlerweile ist das Pro-Kopf-Einkommen im reichsten Land der Erde 140 mal so hoch wie im ärmsten. *Gleichheit wurde durch Ungleichheit ersetzt.*

Datenmengen und Miniaturisierung

Dieser Prozess setzt sich fort. Die *dritte Industrielle Revolution* hat begonnen. Im Sinne der Kondratieff-Theorie versprechen die folgenden Technologien einen neuen, langen Wirtschaftsaufschwung anzutreiben:

1) Vernetztes Wissen

2) Intelligente Materialien und Werkstoffe

3) Biotechnologie, Umwelt und Gesundheit („Life Sciences“)

Mögen Ihnen diese Technologien noch so heterogen vorkommen, sie haben zweierlei gemeinsam: Man braucht *riesige Datenmengen*, um sie zu erschließen und anzuwenden. Und sie kommen aus dem vertieften Verständnis der Mikrostrukturen unserer Materie. *Miniaturisierung* heißt das Zauberwort, zum Labormikroskop und zur Röntgenröhre kommt die Neutronenquelle in der Garchingener Landschaft hinzu. Neutronen erschließen die Feinstruktur biologischer Systeme, ebenso wie sie aus Reinstsilicium per Atomumwandlung das Halbleitersilicium machen. Das sind zwei Beispiele, die für das „Supermikroskop Neutronenquelle“ stehen.

Datengiganten und Miniaturstrukturen. Hieraus entspringt der Strom der technischen Innovationen des neuen Jahrhunderts. Je fundamentaler die zugrunde liegenden Entdeckungen der Naturwissenschaften sind, um so größer ist logischerweise die Anwendungsvielfalt. Unausweichlich wird hier naturwissenschaftlich-technisches Wissen als Teil einer wohlverstandenen *neuen Bildungskultur* zum wirtschaftlichen Differenzierungsfaktor. Zurück bleibt, wer nicht lernt, neues Wissen abstrakt und prak-

tisch umzusetzen. Je nach Definition soll es auf der Welt ein bis zwei Milliarden Analphabeten geben. Sie haben keine Chance, denn mit ihnen wollen die Reichen nichts zu tun haben, so hart dies klingt. Also ist *Bildung* die Antwort auf die wachsenden Ungleichgewichte, jedes Land aus seiner eigenen Kultur heraus, womöglich mit Hilfe von außen, aber in eigener Hoheit. *Bildung* ist die unverzichtbare, ist die wichtigste Ressource nicht nur für das friedliche Zusammenleben, sondern auch für wirtschaftlichen Erfolg. Gebildete Regierungen werden die Zukunft ihres Landes auf Bildung ausrichten, auf Infrastruktur und auf Investitionen in Forschung und Entwicklung. Der „Tigerstaat“ Singapur ist ein kleines aber gutes Beispiel.

Zu den technologischen Schicksalsthemen des neuen Jahrhunderts gehören in der ersten Reihe drei Themen, über die ich heute sprechen möchte: *Rohstoffe - Nahrung - Energie*. Sie sind die Quintessenz des 6. Kondratieff.

Rohstoffe des 21. Jahrhunderts sind Nachwachsende Rohstoffe

Die Vielfalt unserer stofflichen Welt beschert uns ein langes Leben mit vielen Annehmlichkeiten. Diese Vielfalt heißt *Chemie*. Letztlich gestaltet sie alle Bereiche unseres Lebens, das Autofahren genauso wie den Spitzensport, Wohnung und Kleidung genauso wie Landwirtschaft und Medizin. Ob aus der Natur oder aus der Fabrik: Alles in uns und um uns ist Chemie. Man kennt 17 Millionen chemische Verbindungen, und 3.8 Millionen chemische Reaktionen zu deren Herstellung. Diese Chemie stammt überwiegend aus der Welt des Kohlenstoffs. Zusammen mit den Fortschritten der Landwirtschaft und modernen Sozialstrukturen war es

die Chemie, die unsere westliche Lebenserwartung seit 100 Jahren verdoppelt hat. Unsere Frauen bringen es mittlerweile auf 80 Jahre.

Für unsere bunte Welt sind Kohle und vor allem Erdöl die Basisressourcen. An ihrer Entstehung hat die Natur Jahrmillionen gearbeitet. Bedenkenlos bedient sich ihrer der technische Fortschritt der Neuzeit. Knappheiten beginnen sich abzuzeichnen. Hier ist eine der Herausforderungen des Jahrhunderts: Wie es der Natur mit genialer Syntheseleistung gelingt – nämlich mithilfe von Licht, Wasser, Kohlendioxid und einigen Nährstoffen - unablässig die komplexen Stoffe des Lebendigen zu erzeugen, so muß es auch uns gelingen, Nachwachsende Rohstoffe auf pflanzlicher Basis zu kultivieren. Daraus können Inhaltsstoffe als chemische Vorprodukte gewonnen werden. Die Zeit ist reif, denn für die stoffliche Nutzung können Pflanzen durch Optimierung ihres „Gencomputers“ so erzogen werden, dass sie bei vorgegebenen Zieleigenschaften (z.B. mechanische Festigkeit, chemische Inhaltsstoffe) eine ausreichende Wachstumsgeschwindigkeit verbinden mit einem zweckgerichteten Aneignungsvermögen für die Nährstoffe aus dem Boden. Hier wird der interdisziplinäre Anspruch künftiger Chemie augenscheinlich: *Pflanzen genetiker* optimieren die Kulturpflanze der Wahl auf ihre Eigenschaftsziele. Dazu gehört das Wachstumsverhalten ebenso wie ein spezieller erntewürdiger Inhaltsstoff. *Landwirte* optimieren die Anbau-, Wachstums- und Erntemethoden. Wir *Chemiker* veredeln den Rohstoff weiter. Immerhin ist die Kosmetikindustrie hier bereits im wirtschaftlichen Bereich, doch ist dies erst ein Anfang. Die Veredelung land- und forstwirtschaftlicher Abfälle sollte uns in ihrer chemischen Komplexheit nicht schrecken, zumal dieser Methodenansatz unausweichlich ist, und das Entwicklungspotential riesengroß.

Gentechnisch veränderte Pflanzen können wertvolle Wirkstoffe für die Medizin produzieren: „Grüne Fabriken“, die Arzneimittelwirkstoffe in ihren Zellen mit Hilfe von Licht, Wasser und Mineralstoffen erzeugen. Ein kanadisches Biotechnologie-Unternehmen (SemBioSys, Calgary) hat der Rapspflanze ein Gen eingesetzt, das den pharmazeutischen Wirkstoff Hirudin produziert. Das ist ein gerinnungshemmendes Eiweiß, das ursprünglich aus dem Blutegel stammt und in der Medizin gegen Thrombosen eingesetzt wird. „Molekulares Farming“, *Gen Farming*, nennt man die kommende Produktionsmethode der Biotechnologie. Die Zelle als Chemiefabrik. Schon gibt es transgene Pflanzen, die pharmazeutische Proteine produzieren. Dazu gehört ein in Tabakpflanzen erzeugter Antikörper gegen den Karieserreger *Streptococcus Mutans*. Karies ist eine Massenerkrankung mit großen gesundheitlichen Folgen und volkswirtschaftlicher Belastung. Die Firma Monsanto (St. Louis/USA) produziert in transgenen Sojabohnen einen Humanantikörper gegen das *Herpes Simplex*-Virus. Er ist in der klinischen Erprobung.

Die zukünftige Rohstoffsituation ist beides: ein *Mengenproblem* und ein *Nachhaltigkeitsproblem*. Wir werden sehen, dass die stofflichen *und* die energetischen Rohstoffe gleichermaßen des technischen Fortschritts bedürfen.

Nahrung für die Welt

Das Stichwort *Nachhaltigkeit* betrifft im Besonderen die Ernährung einer exponentiell wachsenden Weltbevölkerung. Erschwerend wirkt der Um-

stand, dass dieses Wachstum asymmetrisch verläuft und in den von der Natur besonders geschundenen Regionen maximal ist.

Um einen Stand von 1 Milliarde zu erreichen (1825), ließ sich der *Homo sapiens sapiens* zigtausende von Jahren Zeit. In weiteren 175 Jahren schaffte er es auf 6 Milliarden. Noch vor der Jahrhundertmitte laufen wir in eine Art „Sättigungskurve“ bei 9-10 Milliarden ein. Alle diese Menschen werden sich um die Güter der Zivilisation bewerben, zuallererst um *Nahrung*. Es wird dieses Stück sein, das dem Welttheater des neuen Jahrhunderts seine wahre Dramatik verleiht. Zwar sollte Robert Thomas Malthus, der englische Pfarrer und Volkswirt, noch im Unrecht bleiben, wenn er zu Beginn der europäischen Bevölkerungsexplosion befürchtete, dass die Nahrungsproduktion der Erde dem Bevölkerungswachstum nicht folgen könne.* Damals gelang es noch, durch künstliche Düngung – später auf Basis der großtechnischen Ammoniak-Synthese, also wieder Chemie! – die Bodenerträge zu vervielfachen. Jedoch sind wir hier an Grenzen gestossen. Abermals hat die Zukunft mit der *Miniaturisierung* zu tun: Es ist die Molekularstruktur der Erbsubstanz, die Kenntnis der genetischen Kodierung der Pflanze, aus der sich Milliarden Menschen letztlich das Überleben sichern, auch wenn sich das unsere heimische „Tischlein-deck-Dich-Gesellschaft“ noch nicht vorzustellen vermag. Zu befürchten ist, dass dem *Kampf um Nahrung* der *Krieg um Wasser* Beistand leistet. Der Wasserbedarf unserer Nutzpflanzen ist nur mehr gentechnisch hinreichend optimierbar. Für das *Menschheitsproblem Nahrung* technische Innovationen bereitzustellen, ist eine Frage unseres eigenen wirtschaftlichen Überlebens, aber auch eine Frage der Moral. Spätestens an dieser Stelle sollten wir begreifen, dass der Auftrag zur Bewahrung der

* „Essay on Population“ (1798)

Schöpfung die Fortentwicklung von Wissenschaft und Technik zur unausweichlichen Pflicht macht. Eine technikfreie Welt wäre eine unmoralische Welt.

Nach Expertenmeinung wird das globale Nahrungsangebot bis 2025 etwa gleichstark durch Biotechnologie und klassische Züchtung verbessert werden. Die vordringlichen Ziele sind

- die Schädlingsresistenz wichtiger Kulturpflanzen,
- Nutz- und Kulturpflanzen auf salzhaltige Böden und in wasserarme Regionen zu bringen,
- Massennahrungsmittel nutritiv zu verbessern, beispielsweise durch Einsetzen antibakteriell und antiviral wirksamer Gene.

Entgegen der Bevölkerungszunahme wird sich die landwirtschaftliche Nutzfläche im gleichen Zeitraum halbieren, und zwar bedingt durch Verödung, Dürre, Überschwemmung, Wind- und Wassererosion, Versalzung und Übernutzung. Schon heute leiden 800 Millionen Menschen an Hunger oder sind unzureichend ernährt. Jährlich sterben 10 Millionen Menschen, vor allem Kinder, schlicht an den Folgen von Nahrungsmangel. Tröstlich stimmt, dass die Wissenschaft innovative Kräfte entwickelt. Ich nenne einige Beispiele:

- *Insektenresistenz*: 40 Millionen Tonnen Mais – 7 % der Welternte – fallen Jahr für Jahr dem Maiszünsler, einem gefährlichen Schadinsekt, zum Opfer. Insgesamt werden 13 % aller Anbaukulturen weltweit von Insekten vertilgt, deshalb die Bedeutung des chemischen

Pflanzenschutzes (Insektizide). Vom Maiszünsler befallene Pflanzen werden leichter von Pilzen infiziert, die ihrerseits Gifte bilden, sog. Aflatoxine. Das Bodenbakterium *Bacillus thuringiensis* bildet ein für das Schadinsekt tödliches Bt-Toxin, das für andere Lebewesen harmlos ist und deshalb auch im Ökolandbau eingesetzt wird.

Dieses Toxin ist allerdings sehr teuer und zersetzt sich rasch an der Luft. Eine Errungenschaft der Gentechnik besteht nun darin, daß man die Gene für das Bt-Toxin aus dem Bakterium auf den Mais übertragen hat, der sich damit selbst schützt. Bis zu 90 % der chemischen Pflanzenschutzmittel können eingespart werden. In den USA wurde schon 1998 auf mehr als 20 % der Anbaufläche insektenresistenter Mais angebaut. Die Zulassung durch die Europäische Kommission erfolgte 1997.

- *Krankheitsprävention:* Gentechnisch läßt sich der Nährstoffgehalt von Lebensmitteln verbessern. In Entwicklungsländern leben die Menschen überwiegend von einem einzigen Nahrungsmittel. In Asien ist es der Reis. Folglich gibt es viele Mangelerscheinungen. Über 200 Millionen Menschen leiden unter Vitamin A-Mangel, viele Kinder erblinden, weil sie in einer entscheidenden Wachstumsphase nicht genügend Vitamin A für die Entwicklung des Augenlichts bekommen. Bahnbrechend war die Züchtung einer Reissorte, die das Provitamin A bildet und im Korn einlagert.
- *Nachwachsende Rohstoffe:* Die Kartoffel wird nicht nur als Nahrungsmittel verwendet und dabei lieblos behandelt, nur weil sie so billig ist. Sie wird auch für technische Zwecke eingesetzt, zum Beispiel in der Papierindustrie und als Textilstärke. Die Kartoffelstärke enthält

von Natur aus Amylose und Amylopektin. Amylose kann für kompostierbare Folien, Amylopektin als Klebstoffgrundlage verwendet werden. Wirtschaftlich ist entweder das eine oder das andere, die Trennung beider Komponenten ist zu teuer. Dieses Problem hat die Gentechnik gelöst. - Als nachwachsender Rohstoff gilt auch die Ölsäure aus Sonnenblumen oder die Erucasäure aus Raps. Entscheidend ist in allen diesen Fällen, daß man mit dem Überflußprinzip der Natur fertig wird: Statt vieler Stoffe soll die Nutzpflanze möglichst nur einen einheitlichen Inhaltsstoff produzieren. Erst wenn dies gelingt, bewegen wir uns im Bereich der Wirtschaftlichkeit.

Diese Beispiele lassen erahnen, wie im neuen Jahrhundert die Chemie und die Biologie aufeinander zugehen. Die Anbaufläche für genoptimierte Kulturpflanzen beträgt heute 44 Millionen Hektar (1996: 1,7 Millionen Hektar). Unverzichtbar wird bei allen Fortschritten der Gentechnik auch die standort-, sorten- und klimaabhängige Düngung. Es ist ein verbreitetes Mißverständnis, dass sich Nachhaltigkeit und Produktivität ausschließen. Landwirtschaftliche Nutzung ist *immer* ein Eingriff in Ökosysteme. Klar ist auch, dass nur hohe Bodenproduktivitäten die Herausnahme schützenswerter Ökosysteme aus der Urproduktion ermöglichen.

Wenn die berühmte „Gen-Tomate“ zum Antityp des sympathischen, gesunden Lebensmittels wurde, so sei doch in Erinnerung gerufen, dass vor 15 Jahren dieselben Menschen im gleichen Land die Möglichkeiten der *medizinischen Gentechnik* nicht erkennen mochten. Mittlerweile wissen wir, dass als unheilbar geltende Erkrankungen gentechnisch reparierbar sind. Womit Paul Ehrlich vor einem Jahrhundert (1910) durch sein „*Zielen lernen, chemisch zielen*“ die Chemotherapie begründete, mag uns Heutigen wie ein Schuss mit der Schrotflinte erscheinen. Aus

der Krankheitsbehandlung von morgen wird der präzise, d.h. molekulare Eingriff in die Genstruktur nicht wegzudenken sein.

Energie als Wärme und Strom – woher?

Neben dem *Hunger nach Nahrung* ist es der *Hunger nach Energie*, den das neue Jahrhundert stillen muß. Will heißen: Energie muß in ausreichender Menge preiswert und umweltschonend verfügbar sein. Die fossilen Brennstoffe unserer „Kohlenstoffwelt“ werden knapp im Schoß der Erde. Die eigentliche Begrenzung aber ist der Himmel: Durch Kohlendioxid mitverursachte Temperaturanstiege lassen sich nicht durch Energie-Einsparappelle umkehren. Das wäre ebenso blauäugig wie die Annahme, dass die globale Nahrungsversorgung durch bessere Verteilung global zu lösen ist.

Es muß uns Sorgen machen, dass die Winterperiode in Mitteleuropa um 3 bis 4 Wochen später eintritt und dass die Gletscher um 10 % geschrumpft sind. Der für dieses Jahrhundert bevorstehende Klimawandel hat Ausmaße, die zur Verschiebung der Lebensräume der Flora und Fauna führen. Häufen werden sich klimatische Extremereignisse (Hitze, Dürre, Niederschläge). Davon wird die *Nahrungsmittelsicherheit* in der Dritten Welt direkt betroffen sein.

Die Umwandlung von Hitze durch Maschinen in mechanische und elektrische Energie (Dampfmaschine, Dampflokomotive, Verbrennungsmotor) war der Auftakt zur ersten Industriellen Revolution. Die Nutzung der Kernkraft folgte als Quantensprung: Aus minimalen Mengen fossiler Rohstoffe (Uran) werden gewaltige Energiemengen freigesetzt. Die

zweite Hälfte des vergangenen Jahrhunderts ist in der westlichen Welt eine Technikgeschichte der Kernenergie.

Energie ist Leistung mal Zeit. Wir messen sie in Kilowattstunden oder in Tonnen Steinkohlen-Einheiten (SKE) – diejenige Energiemenge, die durch Verbrennung von 1 Tonne des Primärenergieträgers Steinkohle freigesetzt wird. Daraus kann beispielsweise im Kraftwerk der Endenergieträger Strom erzeugt werden, der beim Verbraucher wiederum in Nutzenergie, - das ist die eigentliche Energiedienstleistung - umgesetzt wird. Mit einer Kilowattstunde Endenergie kann man sich einige Minuten lang warm duschen, eine 100W-Glühbirne 10 Stunden leuchten lassen, oder mit dem Auto ca. 10 Kilometer weit fahren. Vom Weltverbrauch an Primärenergie (derzeit ca. 13 Milliarden Tonnen SKE entfallen 4 % auf Deutschland (485 Mio t SKE, Bayern 70 Mio t SKE) mit 1 % der Weltbevölkerung. Knapp 40 % des Energieangebots resultieren bei uns aus Kohle und Kernenergie, wobei letztere ausschließlich zur Strom-, aber nicht zur Wärmeerzeugung dient. 40 % kommen aus dem Erdöl (Heizung, Straßenverkehr, Industrie), die restlichen 20 % überwiegend aus Erdgas.

Man schätzt, dass der Weltenergieverbrauch bis zur Mitte des Jahrhunderts von derzeit 500 Exajoule, d.s. $500 \cdot 10^{18}$ Joule = $120 \cdot 10^{15}$ Kcal (ca. 17 Mrd. Tonnen SKE) auf knapp das *Dreifache* steigt. Abgesehen davon, dass etwa um 2015 die Hälfte der bekannten konventionellen Ölreserven ausgebeutet sein dürfte, ist dieser Energiebedarf mit den fossilen Brennstoffen Kohle, Erdöl und Erdgas nicht zu schaffen. Kommt hinzu, dass immerhin 70 % der Ölreserven in der strategischen Ellipse von Kasachstan bis zum Persischen Golf liegen. Der laufend wachsende Ölverbrauch wird schon jetzt nicht mehr durch den Explorationszuwachs aus-

geglichen. Ölschiefer und Ölsande kommen in Betracht, werden aber nur zu höheren Preisen und mit erheblich höheren spezifischen CO₂-Emissionen zu haben sein. Wir müssen vielmehr auf die erneuerbaren Energien setzen, mögen sie technologisch im Moment noch so wenig erschlossen sein: *Wind – Sonne – Kernfusion*.

Erdgas hilft aus meiner Sicht nur als Zwischenlösung. In 20 Jahren gibt es Vorkommen praktisch nur noch in den GUS-Staaten, womit für diesen Energieträger eine neue Importabhängigkeit aufzieht. Wie bei der Nahrung dürfte auch im Energiesektor die *Versorgungssicherheit* in ihrer politisch-wirtschaftlichen Bedeutung zunehmen.

Es ist nicht zielführend, die „deutsche Energiedebatte“ ins Lächerliche zu ziehen. Fest steht aber, dass diese Debatte hausbacken und ohne Augenmaß ist. Hausbacken, weil sie den ganzheitlichen Ansatz scheint. So wird der erwiesene Zusammenhang zwischen Mobilität und Wohlstand von Gesellschaften schlicht ignoriert. Hausbacken, weil Energiesparen zwar loblich aber kein Zukunftskonzept ist. Ohne Augenmaß, weil die Stärken der Kernenergie als derzeit sicherste und sauberste Form der Energiegewinnung nicht gegen das Endlagerungsproblem aufgewogen werden. Ohne Not verzichten wir vorfristig auf ein Drittel der kohlendioxidfreien Stromversorgung durch Kernenergie, während wir gleichzeitig bis 2010 das Musterland der CO₂-Reduktion um 40 % werden wollten. Die Unvereinbarkeit beider Ziele hat Bundeswirtschaftsminister Müller im „Energiebericht 2001“ namhaft gemacht. Für mich als Wissenschaftler ist es Verrat am eigenen Land, wenn man aus einer Technologie aussteigt, für die wir seit Jahrzehnten weltführend und respektiert sind. Wir sollen nicht nur keine saubere Kernenergie mehr machen, wir sollen zwangsläufig auch die technische

Kompetenzführerschaft auf einem Gebiet verlieren, das zahllose Ingenieurleistungen auf vielen anderen Gebieten nach sich gezogen hat. Wie töricht!

Selbst aus ökologischer Sicht ist der Ausstieg unbegründet:

Die Wertschöpfung des Energiesektors beträgt in Deutschland ca. 43 Mrd € (1998), d.s. 2.2 % des Bruttoinlandsprodukts, etwa so gross wie jenes der Chemischen Industrie. In den traditionellen Energiesektoren sind rund 300 Tsd Menschen beschäftigt. Zu bedenken ist, dass die europäischen Energiemärkte für deutsche Unternehmen immer wichtiger werden. Deutsche Kompetenz muss deshalb gefragt bleiben. Die deutschen Kernkraftwerke vermeiden etwa genausoviel Kohlendioxid wie durch unseren gesamten Kraftfahrzeugverkehr gebildet wird.

Selbst bei optimaler Nutzung nach dem Stand der Technik hinterlassen die genannten Alternativenergien allein in Deutschland ein hohes Verstromungsdefizit (ca. 13 % auf der Basis von heute), wenn die Kernkraftwerke vom Netz gehen. Effizienz- und Einsparungspotentiale, sind auszuschöpfen, beim Stromverbrauch ist ihr Umfang allerdings beschränkt.

Bekanntlich korreliert der Verbrauch der *elektrischen Energie* mit dem Wohlstand einer Volkswirtschaft. In Deutschland liegt der Pro-Kopf-Verbrauch bei 6900 kWh, den bevölkerungsreichen Staaten wie China und Indien sehr weit unter dem Weltmittelwert von 2400 kWh. In Deutschland erfolgt die Nettostromerzeugung* (ca. 500 Mrd. kWh) zu etwa einem Drittel aus Uran (Kernenergie), zur Hälfte aus Braunkohle und Steinkohle. Die Wasserkraft liegt mit 3 % weit hinten (in Bayern: 16 % Wasserkraft, 61 % Kernkraft). Die alternativen Energien sind bei 7 %.

* Daten für 2001: Kernenergie 30 %, Braunkohle 27 %, Steinkohle 23%, Erdgas 9 %, Heizöl 1 %, Regenerative Energien 7 %, Sonstige 3 % (VDEW-Daten).

Der Wegfall an Kernenergie aus der deutschen Stromproduktion würde eine Substitution von rund 180 Milliarden kWh jährlich bedeuten. Wir bräuchten mehrere Nachbarn, um diese Lücke halbwegs zu schließen (Frankreich, Schweden, Ukraine). Und wir müßten kurzfristig Gaskraftwerke errichten, die das wertvolle Erdgas unter CO₂-Bildung verbrennen. Viel intelligenter wäre das *Erdgas als Chemierohstoff* genutzt.

Der *Mobilitätshunger* in China wird bis auf weiteres durch Erdöl gestillt werden. China geht von einer Verdoppelung der Ölnachfrage bis 2020 aus. Das würde einem Verbrauch von 500 Millionen Tonnen Erdöl entsprechen, davon die Hälfte für den Transportsektor. Es gibt weltweit rund 1 Milliarde Verbrennungsmotoren, im übrigen der häufigste „Chemiereaktor“. Die Chinesen bauen nun viele Millionen dazu. Nicht das 3-Liter-Auto auf Basis fossile Energieträger bringt die Lösung, sondern das wasserstoffgespeiste *Null-Liter-Auto*, wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugt wird.

Alternativenergien

Wir brauchen also alternative Energien. Ich spreche von der *Wind- und Solarenergie*, von der *Geothermie* und von der *Kernfusion*.

Die *Windenergie* ist, ebenso wie die *Sonnenenergie*, auf Verbundsysteme angewiesen, sofern sie sich nicht auf die lokale Versorgung wind- bzw. sonnenreicher Regionen beschränkt. Witterungsabhängige Energiequellen entsprechen eben nicht der spezifischen Eigenschaft der elektrischen Energie: dass sie nämlich im Augenblick ihres Verbrauchs auch erzeugt werden muß, „just in time“. Elektrizität in großen Mengen

zu speichern (Batterien) und bei Bedarf schlagartig verfügbar zu machen, muß die größten Forschungsanstrengungen dieses Jahrhunderts wert sein, im übrigen das logische Anwendungsfeld für das, was manche „Ökosteuer“ nennen.

Die *Windenergie* gewinnt durch den Ausbau der Off-shore-Windparks. Bis 2010 erscheint ein 10 %-Anteil an der Stromversorgung realistisch, wenn man laufende Kostensenkungen um jährlich 5 % annimmt. Diese Entwicklung setzt allerdings voraus, dass nicht diejenigen, die bisher die Windenergie propagiert haben, durch Verschärfung des Naturschutzgesetzes neue Hemmnisse aufbauen. Obwohl die Walfische nicht durch Flügelgeräusche der Windkraftanlagen irritiert würden? Kraftwerksfelder mit einer Leistung um 1000 MW dürften bald Realität sein; sie hätten die Leistung eines heutigen Kernkraftwerks. Es ist nicht utopisch, Strom aus Windkraft zur elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff auf Hoher See zu nutzen. Wasserstoff ist der leistungsstärkste und eleganteste Treibstoff für Verbrennungsmaschinen, allen voran im Automobilsektor. Durch die Verbrennung von Wasserstoff entsteht in Umkehrung seiner Bildung nur Wasser. Ingenieurtechnisch beherrschen muß man lediglich die zugrunde liegende Knallgasreaktion, die Sie aus Ihrem Chemieunterricht kennen und als solche womöglich noch im Ohr haben.

Weit von der Wirtschaftlichkeit entfernt ist die *Solarenergie*. Dennoch: Diese Technologie dient schon heute in der ländlichen Elektrifizierung sonnenreicher Regionen (Südamerika, Südafrika, China) als dezentrale Erzeugungsform. Photovoltaik-Anlagen tragen so zur Zivilisation in der dritten Welt auf der südlichen Halbkugel bei.* Netzerschließungskosten fallen dabei nicht an. Auf bessere Wirkungsgrade und neue Sy-

* Bisher haben rund 2 Milliarden Menschen keinen Elektrizitätsanschluss!

stemkomponenten ist die Photovoltaik dringend angewiesen. Hier haben wir eine technologische Exportchance, die auf unserem Weltmarktanteil von derzeit 25 % aufsetzen kann.

Im Gegensatz zu Wind und Sonne ist die *Erdwärme* ganzjährig verfügbar. Für die Geothermie erscheinen staatliche Subventionen lohnend, insbesondere zur optimalen Erschließung der geothermischen Lagerstätten.

Am Rande erwähnt sei das *Biogas*. Dieser Energieträger wird vernachlässigt, obwohl sich die Fachwelt durchaus 5 % der Stromerzeugung vorstellen kann. Energiewirtschaftlich relevant sind *feste* biogene Energieträger (Biomasse).

Als Energiequelle schier unerschöpflich würde sich der Miniaturnachbau der Sonne erweisen. Die Sonne erzeugt seit über 4 Milliarden Jahren durch Wasserstoffatomverschmelzung, die sog. *Kernfusion*, unermessliche Energiemengen. Aufgrund ihrer Masse kann es sich unser Bezugsplanet von Anbeginn an leisten, in jeder Sekunde rund 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium zu verschmelzen und uns einen Bruchteil der so entstehenden Energie herunter zu schicken. Unmerklich nur nimmt dadurch die Masse ab (2 % pro Jahrmilliarde): $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Unlängst hat in Greifswald das nationale Kernfusionsprojekt „Wendelstein 7 X“ der Max Planck-Gesellschaft begonnen. Es nutzt die in Garching jahrzehntelang gesammelten Forschungsergebnisse. Sein Ziel ist die Beherrschung von 100 Millionen Grad heißen Plasmen, die zur Wasserstofffusion gebraucht werden. Es ist schon faszinierend sich vorzustellen, dass für die jährliche Stromversorgung einer Familie durch Kernfusion nur 2 Liter Wasser und 200 Gramm Gestein erforderlich sind; aus

letzterem kommt das Lithium, das man als Vorstufe für eine der Fusionskomponenten (Tritium) braucht. Diese Komponenten entsprechen der Energieleistung von 1000 (!) Liter Heizöl.

Der Vorteil der Fusionsenergie bestünde in unerschöpflichen Rohstoffvorkommen, in geringem radioaktiven Inventar (vor allem entstehen keine Radionuklide mit langen Halbwertszeiten) und in der naturgesetzlichen Unmöglichkeit, dass das Fusionsplasma plötzlich unkontrolliert brennt. Weiterer Vorteil: Die Energieausbeute ist bei der Kernfusion massebezogen viermal grösser als bei der Kernspaltung. Wie lange wird die technische Reife der Kernfusion noch auf sich warten lassen? Das wissen auch die besten Fachleute nicht. Umso größer muss Forschung geschrieben werden.

Neugierig auf Neues. Mut zum Neuen. Wissen wollen, Staunen können

Energieforschung ist Naturwissenschaft und Technik von hoher Komplexität. Wir *müssen* es schaffen, dass übermorgen unsere Autos mit Wasserstoff fahren. Wir *müssen* es schaffen, die Wärme von Mutter Erde zu nutzen, und die Sonne sowie den Wind für uns wirken zu lassen. Wir *müssen* uns von der naiven Vorstellung trennen, dass Energieeinsparung das Energieproblem löst. Wohl ist Energiesparen die unabdingbare Voraussetzung für einen verstärkten Einsatz von heute nach sehr kostenintensiven erneuerbaren Energietechnologien. So ist der Photovoltaik-Betrieb einer Speicherheizung wenig sinnvoll. Aber nur die *Neuen Technologien*, die Bereitschaft zur Erforschung dessen, was die Wissenschaft bis heute nicht erforscht hat, ist ein verantwortungsbewußter Zu-

gang zur Lösung des Energieproblems. Nur unter dieser Voraussetzung ist auch die Kernenergie eine Übergangslösung.

Eine Schlüsseltechnologie ist die *Brennstoffzelle*. Hier können Innovationen den Strom- und Verkehrsmarkt erheblich wandeln. Die Brennstoffzelle ist der „Zukunftsreaktor“: effiziente Umwandlung alternativer Rohstoffe (z.B. Wasserstoff, Methanol) in Energie = Arbeit.

Da stehen wir nun vor Herausforderungen, die in ihrer Grössenordnung völlig neu sind. Rohstoffe, Nahrung, Energie – das sind globale Themen geworden. Uns und unserer Nachwelt sind wir technische Lösungen schuldig, allein zur Überwindung der drohenden „ökologischen Engpässe“ dieses Jahrhunderts. Technische Entwicklungen brauchen die wissenschaftliche Forschung, und umgekehrt, sie stimulieren sich gegenseitig. Die Physik des 20. Jahrhunderts ist das beste Beispiel: Aus der Quantenformel eines Max Planck, aufgestellt am 14. Dezember 1900, resultierten der Transistor, der Laser, der integrierte Schaltkreis und letztlich die gesamte Mikroelektronik. Die Ingenieure sind diejenigen, „*die erst wahre Demokratie möglich machen*“, wie Albert Einstein räsionierte, ein wenig euphorisch freilich, aber im Kern richtig. Tatsächlich hat die Demokratisierung der Welt ursächlich mit der Teilhabe immer größerer Bevölkerungsschichten am technischen Fortschritt zu tun.

Der Auftrag unserer Gesellschaft vor den globalen Ansprüchen besteht darin, dass wir zu *Neuem* kommen: Dass wir unsere Jugend *neugierig* machen auf *Neues*, auf *neue* Erkenntnisse, eben auch in Naturwissenschaft und Technik. Das erfordert eine *neue* Erfinderkultur. Sie beginnt im Elternhaus, wo das Kind lernt, die Welt mit den Sinnen zu begreifen.

Sie setzt sich fort im Vorschulalter und in der Schulzeit. Schon den Kindern beizubringen, dass „*selber denken ... besser (ist) als denken lassen*“, wie der große Neutronenforscher Heinz Maier-Leibnitz seine Schüler und Kollegen gemahnt hat, muss in den Mittelpunkt unserer Schulerziehung. Denken kommt *vor* Büffeln, aber *ohne* Büffeln geht es nicht. Und auch nicht ohne emotionale Bindung ans Lernen. Der Schulbetrieb ist, landauf landab, immer noch zu sehr Lernschule, die sich über den Kopf rechtfertigt. Das ist einer der Gründe, warum die Chemie, mein eigenes Fach, für die 16-jährigen Schüler viel zu spät kommt. So spät, dass sie selten noch fruchtet. Die Chemie wäre kein Horrorfach, würde man – wie dies pädagogische Feldstudien zeigen – den 8-10-jährigen die Elementarzusammenhänge beim Ausprobieren und Neugierig-sein-dürfen näherbringen. In dieser Altersphase spricht eine Naturwissenschaft die Sinne an. Die Chemie ist eine solche „sinnliche Wissenschaft“, und die Physik nicht viel weniger. An dem einen Beispiel erweist sich, wie notwendig eine *innere Schulreform* ist, der Fachlobbyismus und Studentafeln weniger gelten als die Erziehung unserer Kinder zu denkfähigen, kritikfähigen, urteilsfähigen Menschen. Was unsere Lehrer betrifft, so sind die Prinzipien *Idealismus und Enthusiasmus* durch nichts zu ersetzen. Dafür müssen wir unsere Lehrer angemessen bezahlen, und zwar auch die Grund- und Hauptschullehrer.

Wenn wir international mithalten wollen, müssen Ausbildung und Bildung unsere wichtigste Investition sein. Je spezialisierter das technische Wissen dieser Welt wird, umso unverzichtbarer ist der geistige Rückbezug auf die Werte unserer Kultur, aber umso wichtiger wird auch die Wertschätzung anderer, teils viel älterer Kulturen dieser Erde. Damit rückt das Schul- und Bildungswesen ganz von selbst in die Mitte unserer Gesellschaft, und mit ihm die Lehrerbildung und Lehrerfortbildung. Wir

müssen uns als Land der Naturwissenschaftler und Ingenieure begreifen, aber auch als Land der Dichter und Denker. Dem neuen Wissen weichen wir nicht aus, dafür sorgen schon die Briefe aus dem Internet, die schneller geworden sind. Das Zwingende und Hoffnungsvolle dieser Erkenntnis ist in den Grabstein des grossen Mathematikers David Hilbert (1862-1943) gemeißelt: „*Wir müssen wissen, und wir werden wissen.*“ Als „*Freigelassene der Schöpfung*“, wie uns Herder nennt, sind wir in die Pflicht genommen, die Schöpfungsgeheimnisse zu entschlüsseln und die gewonnene Erkenntnis zum Nutzen der Menschen einzusetzen. Über das *Wissenwollen* hinaus sollten wir uns dafür das *Staunenkönnen* erhalten. Das Bekenntnis zur Unvollkommenheit, ja zur Gebrechlichkeit ist das eigentliche Humanum jenseits der „Zahlen und Figuren“ (Novalis) in der faszinierenden Technikwelt, in der wir leben.