

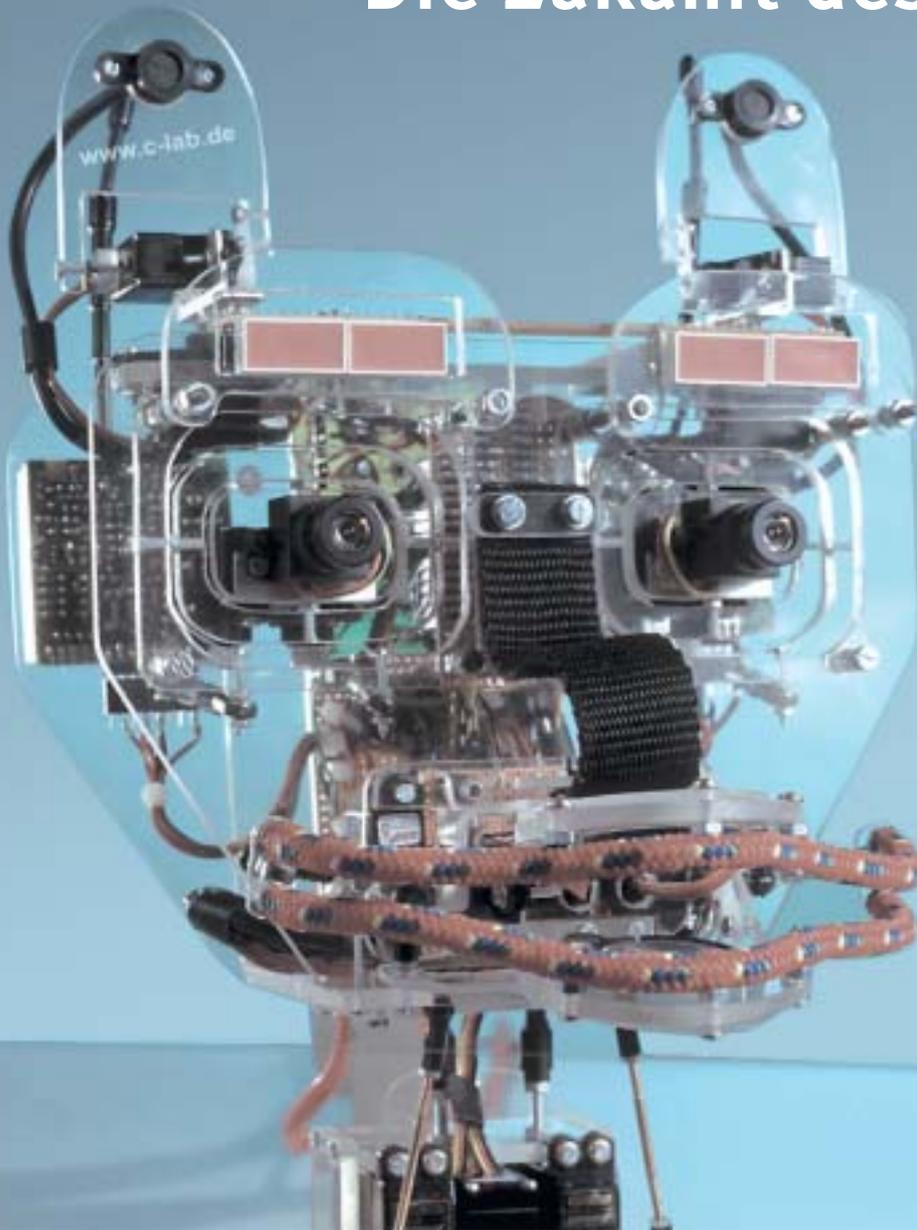


10 JAHRE  
**AKADEMIE FÜR  
TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG  
IN BADEN-WÜRTTEMBERG**

**LANDESSTIFTUNG**  
*Baden - Württemberg*

# Kongress Die Zukunft des Menschen

Dokumentation



8./9. Juli 2002, Stuttgart

# Inhalt

- 1 **Vorwort** *Ulrich Mack*
  
- 2 **Zur Verantwortbarkeit der technologischen Entwicklungen:  
Bedingungen und Reflektionen** *Ortwin Renn*
  
- 10 **Chancen und Risiken neuer Technologien und die politische  
Verantwortung** *Peter Frankenberg*
  
- 14 **Zäsuren der Technikentwicklung: Kränkung oder Herausforderung  
– Bruder Robot** *Norbert Bolz*
  
- Die Maschinisierung des Menschen:  
Gen- und Nanotechnologie und die Würde des Individuums
- 22 **Gen- und Nanotechnologie und die Würde des Individuums** *Christiane Ziegler*
- 27 **Ist Gentechnologie überhaupt noch ein Streitfall?** *Hans Mohr*
- 31 **Kommentar** *Regine Kollek*
- 35 **Kommentar** *Dietmar Mieth*
  
- Die Vermenschlichung der Maschine: Chancen und Risiken Künstlicher Intelligenz
- 43 **Die Vermenschlichung der Maschine:  
Chancen und Risiken künstlicher Intelligenz** *Thomas Christaller*
- 49 **Kommentar** *Helge Ritter*
- 57 **Kommentar** *Joseph Weizenbaum*
  
- 60 **Technische Entwicklung, Globalisierung und Wirtschaft  
– einige systemare Aspekte** *Bruno Fritsch*
  
- 65 **Das Zukunftspotenzial Baden-Württembergs und seiner Regionen aus  
wirtschaftsgeographischer Sicht** *Michael Thiess*
  
- Von der Vision zur konkreten Entwicklungsperspektive für Baden-Württemberg
- Workshop 1: Gentechnologie
- 70 **Gentechnologie für die Gesundheit des Menschen** *Ernst-Dieter Jarasch*
- 74 **Bio-Leads – Berührungspunkte zur Gentechnik** *Fritz Hansske*
  
- Workshop 2: Nanotechnologie
- 76 **Nanotechnologie für Hochleistungs-Baugruppen der Automobiltechnik**  
*Christoph Treutler*
- 78 **Rastersondenmikroskope: Werkzeuge und Mess-Sonden für die Nanotechnologie**  
*Thomas Schimmel*
- 84 **Nanotechnologische Werkstoffe heute und morgen: Chemische Nanotechnologie**  
*Helmut Schmidt*
  
- Workshop 3: Künstliche Intelligenz
- 90 **Humanoide Roboter: Entwicklungstendenzen** *Rüdiger Dillmann*

## Vorwort *Ulrich Mack*

Die Lebenswissenschaften haben einen Forschungsstand erreicht, der es ihnen erstmals erlaubt, an den Grundfesten des Menschseins zu rühren. Erwartungshaltung und Wirklichkeit klaffen jedoch weit auseinander. Zudem ist es oft schwierig, das Machbare von der Fiktion zu unterscheiden, angesichts der häufig emotional geführten Diskussion und dem ungehemmten Drang zur Selbstdarstellung bei manchen Beteiligten. Die „Durchbrüche“ auf diesem Gebiet sind außerdem noch wenig belastbar, wie man an dem frühen Tod des Klonschafs Dolly unschwer erkennen kann. Orientierungswissen und -hilfe ist daher mehr denn je gefragt.

Die Entschlüsselung des menschlichen Genoms hat die unterschiedlichsten Akteure auf den Plan gerufen. Sie liefern sich wie früher, als es darum ging, als erster den Nord- oder Südpol zu erreichen, einen Wettlauf um neue Sensationsmeldungen – da bleiben Wahrheit und Seriosität häufig auf der Strecke. Motivation und Ziele dieser Akteure sowie ihre moralischen Beweggründe sind höchst unterschiedlich. Neben dem seriösen Forscher, der etwa genetisch bedingte Krankheiten heilen und seine Erkenntnisse zum Wohle der Allgemeinheit einsetzen will, tummeln sich auf diesem Feld Sektierer, die den idealen Menschen oder schlimmer noch typisierbare Menschen nach ihren eigenen Vorstellungen formen wollen. Entweder ist das Ziel ein kommerzialisiertes Produkt „Mensch“, am besten noch abgesichert durch ein exklusives Patent, oder ein Kunstwesen nach dem Willen des jeweiligen „Machers“. Die Achtung vor der Schöpfung spielt, wenn überhaupt, nur noch eine sekundäre Rolle.

Auch wenn sich solche Zielvorstellungen heute noch nicht realisieren lassen, so lehrt die Erfahrung, dass es nur eine Frage der Zeit sein wird, bis der wissenschaftliche Fortschritt Wege und Möglichkeiten bereitstellen wird, um die Allmächtsphantasien von wenigen zumindest ansatzweise in die Wirklichkeit umzusetzen. Die Frage „Dürfen wir alles tun, was wir können oder müssen der wissenschaftlichen Freiheit, wie schon verschiedentlich geschehen, Grenzen gesetzt werden?“ beantwortet sich damit fast von selbst.

Die Entscheidung, wo solche Grenzen zu ziehen sind, darf nicht allein der Politik und diversen Ethikkommissionen überlassen bleiben, die ex cathedra über

die Zukunft des Menschen bestimmen. Bei solch fundamentalen Entscheidungen muss der aufgeklärte, mündige und kritisch begleitende Bürger, der um die Chancen und Risiken dieser Technologien weiß, in gleichem Maße seine Werteordnung, sein moralisches Empfinden und seine Erwartungen und Ängste einbringen können. Schließlich geht es um die Zukunft von uns allen und Fehlentwicklungen werden kaum mehr reversibel sein.

Die Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg trägt gemäß ihrem Auftrag zu Information, Dialog und Beteiligung bei dieser Thematik bei. Durch die 2001 erschienene, inzwischen in 2. Auflage vorliegende Publikation „Klonen“ leistet sie einen wichtigen Beitrag zu einer fundierteren und sachbezogeneren Diskussion. Der gemeinsam mit der Landesstiftung Baden-Württemberg im Juli 2002 durchgeführte Kongress „Die Zukunft des Menschen“ war ein weiterer Meilenstein auf diesem Weg. Er hatte zum Ziel, renommierte Experten aus den Fachbereichen Gentechnik, Biotechnologie und Künstliche Intelligenz zu einem intensiven Austausch und Dialog mit Multiplikatoren und der interessierten Öffentlichkeit zusammenzubringen. Dank eines hochkarätigen Programms, hervorragenden Referenten und einer großen Zahl hoch qualifizierter und motivierter Teilnehmer konnte dieser Anspruch in jeder Hinsicht eingelöst werden.

Denjenigen, die an dem Kongress teilgenommen haben, soll diese Publikation Erinnerung und Nachschlagewerk sein und all denen, die diese Möglichkeit nicht hatten, eine hoffentlich informative, inspirierende und richtungsweisende Hilfestellung, wenn es darum geht, die eigene Position auf diesem schwierigen Feld zu bestimmen.

Stuttgart, im März 2003



*Ulrich Mack*  
Geschäftsführer

# Zur Verantwortbarkeit der technologischen Entwicklungen

## Zur Verantwortbarkeit der technologischen Entwicklungen: Bedingungen und Reflektionen *Ortwin Renn*

### *Prof. Dr. Ortwin Renn*

ist Leitender Direktor der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg und dort für den Forschungsbereich „Technik, Gesellschaft und Umweltökonomie“ zuständig. Gleichzeitig ist er seit 1994 Inhaber des Lehrstuhls Soziologie II (Umwelt- und Techniksoziologie) an der Universität Stuttgart. Renn studierte Volkswirtschaftslehre, Soziologie und Journalistik an der Universität Köln und am Institut für Publizistik in Rodenkirchen. Seine berufliche Laufbahn führte ihn über das Forschungszentrum Jülich, eine Professur an der Clark University in den USA und eine Professur an der ETH Zürich nach Stuttgart.



**Die Gefährdung der heutigen Menschheit entspringt nicht so sehr ihrer Macht, physikalische Vorgänge zu beherrschen, als ihrer Ohnmacht, das soziale Geschehen vernünftig zu lenken.**

Konrad Lorenz

### **1. Einleitung**

Die Geschwindigkeit des technischen Wandels hat inzwischen schwindelnde Ausmaße erreicht. Kommt das Designer-Baby, kann die Maschine intelligente Entscheidungen treffen, wird die Biotechnologie unsere Ernährung revolutionieren, werden wir in Zukunft von Biochips in unserem Gehirn gesteuert, können wir mit Hilfe der Medizintechnik unser Leben weiter verlängern? Fragen nach Fragen, die nicht nur die technische Entwicklung, sondern alle Dimensionen des sozialen, politischen und psychischen Lebens berühren. Um die Interdependenzen dieser verschiedenen Entwicklungen zu beleuchten, werde ich mich im ersten Teil dieser Rede mit einigen Makrotrends der globalen Entwicklung auseinander setzen. Dann gehe ich spezifisch auf die zur Zeit zu beobachtenden Techniktrends ein, um dann zum

Schluss auf die Möglichkeiten und Grenzen der Technikfolgenabschätzung hinzuweisen.

### **2. Makrotrends der globalen Entwicklung**

Bei der schon angesprochenen Unübersichtlichkeit der modernen (oder besser gesagt postmodernen) Entwicklung mag es vermessen erscheinen, anhand weniger Zentralbegriffe die Makrotrends zu identifizieren. Die hier vorgenommene Auswahl an Trends erhebt deshalb weder den Anspruch auf Vollständigkeit noch stellt sie eine Reihenfolge der Wichtigkeit dar. Sie ist vielmehr als ein Versuch zu verstehen, verschiedene Farbtupfer eines komplexen Gemäldes zu beschreiben, aus deren Kenntnis man zumindest die Umrisse des Gesamtgemäldes erahnen kann.

#### **2.1 Basistrend: Bevölkerungsentwicklung und Siedlungsdichte**

Die Bevölkerung der Welt wächst ständig – jedes Jahr um rund 85 Millionen Erdenbürger: Das sind mehr Menschen als die Gesamtbevölkerung der Bundesrepublik Deutschland. Heute sind es bereits rund sechs Milliarden, die unsere Erde bevölkern.

Die Vereinten Nationen rechnen mit über neun Milliarden Menschen im Jahre 2050, von denen aller Voraussicht nach über die Hälfte in Großstädten leben werden<sup>1</sup>. Die Spezies Mensch hat inzwischen eine Siedlungsdichte erzielt, die um den Faktor tausend bis zehntausend mal größer ist, als das, was uns die Natur freiwillig geben würde, wenn wir auf Kultivierung verzichten würden. Ein „Zurück zur Natur“ kann es für den Menschen nicht mehr geben. So sehr man von der Natur noch lernen kann, so sehr brauchen wir neue Technologien und Verfahren, die weiterhin die Versorgung der Menschheit unter der Bedingung einer unnatürlich großen Bevölkerungsdichte sicherstellen können, ohne die natürlichen Grundlagen, auf der die Existenzfähigkeit der Menschen beruht, zu zerstören. Die technische Entwicklung ist damit unabdingbare Voraussetzung für die Existenzfähigkeit der Menschheit in ihrer jetzigen Populationsdichte.

## 2.2 Kultur und Natur: Gefährdung auf globalem Niveau

Die Menschheit verändert seit vierzigtausend Jahren die Umwelt und hat damit Tausende von Umweltkatastrophen verursacht, die aber lokal begrenzte Katastrophen waren. Diese Situation hat sich heute grundlegend geändert. Erstmals in der Geschichte der Menschheit beeinflussen wir nämlich die globalen geo- und biochemischen Kreisläufe der Erde<sup>2</sup>.

Die Emissionen von Industrie und Landwirtschaft haben in solchen Ausmaßen zugenommen, dass wir in signifikanter Weise, d.h. im Prozentbereich, die globalen Stoffkreisläufe verändern. Dies gilt beispielsweise für den Kohlenstoffkreislauf. Seit Beginn der Industrialisierung stieg der Gehalt an Kohlendioxid in der Atmosphäre durch den vom Menschen verursachten Kohlenstoffeintrag (durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, Waldrodung und veränderte Bodennutzung) um ca. 30 Prozent. Viele Experten rechnen mit einer Verdoppelung der Kohlendioxidkonzentration ab Mitte des nächsten Jahrhunderts<sup>3</sup>. Auch wenn bis heute nicht restlos

geklärt ist, welche klimatischen Auswirkungen mit diesem Konzentrationsanstieg verbunden ist, so besteht jedoch kein Zweifel daran, dass wir damit ein Großexperiment mit der gesamten Erde durchführen, aus dem es für niemanden ein Entrinnen mehr gibt. Für die Zukunft ist es entscheidend, die Eingriffstiefe des Menschen in Natur und Umwelt einzudämmen oder zumindest konstant zu halten, sie darf unter keinen Umständen noch weiter ausgedehnt werden. Wie dies bei einer wachsenden Bevölkerung und weiter wachsenden individuellen Ansprüchen umzusetzen ist, bleibt eine offene Frage. Mit dem Leitbegriff der Nachhaltigkeit ist weltweit ein ernsthafter Versuch unternommen worden, die Entwicklung von Technik, Wirtschaft und Gesellschaft mit den Bedingungen einer Existenz im Rahmen der natürlichen Gegebenheiten in Einklang zu bringen.

## 2.3 Der Siegeszug der globalen Marktkräfte

Was bedeutet Globalisierung? Dass Güter weltweit ausgetauscht werden und man weltweit miteinander kommunizieren kann, ist seit vielen Jahrzehnten eine Tatsache. Die Möglichkeiten der Internationalisierung haben sich sicher in den letzten Jahren erheblich ausgeweitet, aber sie sprechen nicht den Kern der Globalisierung an. Mir diesem Begriff verbindet sich der *Bedeutungsverlust von Ort und Zeit für Produktion, Handel und Kommunikation*. Das globale Dorf ist nicht nur im Internet Wirklichkeit geworden. Transportkosten sind praktisch unerheblich geworden. Räumliche Bindungen spielen so gut wie keine Rolle mehr im kommerziellen Austausch; wer irgendwo auf der Welt preiswerter oder qualitätsbewusster produziert, erhält den Vorzug. Der Verlust von Ort und Zeit ist dabei nicht auf das Wirtschaftsleben beschränkt. Die Ereignisse der Welt sind zeitgleich überall und potenziell jedem verfügbar. Alle Kulturanprüche auf Einzigartigkeit und Exklusivität, alle Religionen mit Alleinvertretungsanspruch, alle Machtsysteme, die auf Isolierung gegenüber der Außenwelt bauen, brechen zunehmend auseinander.

<sup>1</sup> Vgl. World Resources Institute/United Nations Environment Programme/United Nations Development Programme/World Bank (1996): World Resources 1996-97. A Guide to the Global Environment. Oxford., S. 3 und S. 174.

<sup>2</sup> Schulze, E.D. (2000): Der Einfluss des Menschen auf die biogeochemischen Kreisläufe der Erde. Sonderdruck des Festvortrages auf der 51. MPG-Jahresversammlung. Max Planck Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft, IV/2000, S. 77-89

<sup>3</sup> Vgl. Riebesell, U./D. Wolf-Gladrow (1993): Das Kohlenstoffrätsel. In: Biologie unserer Zeit, Jg. 23, Nr. 2, S. 97-101, hier S. 97, Weinheim und Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (1995): Mehr Zukunft für die Erde. Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz. Bonn., S. 24.

der. Pluralität und postmoderne Vielfalt bestimmen das globale Bild und ersetzen traditionelle Verwurzelungen in umfassende Sinnsysteme. Gegen diese Form der globalen Modernisierung mit ihren relativistischen Begleiterscheinungen regt sich natürlich auch Widerstand: die ökonomischen Verlierer, die Traditionalisten, die Moralisten, die alte Linke, die neue Rechte, die Vertreter von Leitkulturen, die Anhänger der „Zurück zur Natur“-Bewegung – sie alle fühlen sich durch die Globalisierung bedroht. Andere dagegen begrüßen sie euphorisch – die neuen Business-Eliten, die von Kontinent zu Kontinent jettenden Kulturfürsten, die universalistisch ausgerichteten Weltgelehrten und all die anderen Gewinner der Modernisierung. Konflikte sind also vorprogrammiert.

#### **2.4 Schlüsselvariable: Wissen**

Alles systematisch zusammengetragene Wissen, das seit Beginn der Aufzeichnung von Wissen angesammelt worden ist, hat sich in den letzten Jahrzehnten rein quantitativ immer schneller vermehrt. Die explosionsartige Zunahme des Wissens ist aber nicht einmal der Kernpunkt der vielfach beschworenen Wissensgesellschaft. Entscheidend ist vielmehr, dass sich die Halbwertszeit des angewandten Wissens ständig verringert. Mit Halbwertszeit ist die Zeitspanne gemeint, in der sich das einmal gelernte Wissen als überholt erweist. Heutzutage veraltet nichts so schnell wie dieses Wissen. Ohne ständige Erneuerung des eigenen Wissens ist die wirtschaftliche Zukunft weder individuell noch in der Gesellschaft als Ganzes zu meistern. Wissen muss ständig aufgebessert und erneuert werden. Daraus folgt, dass wir für eine langfristige Sicherung unserer wirtschaftlichen und sozialen Leistungsfähigkeit zunehmend Investitionen in Bildung und Wissen benötigen. Die kostbarste Ressource in unserem Lande ist weder Wasser noch Gold oder Platin, es ist das Wissen, das in den Gehirnen der Menschen und in Datenbanken wie Büchern und Computern gespeichert ist.

#### **2.5 Die Gerechtigkeitslücke: eine tickende Zeitbombe**

Der Zugriff auf die Ressourcen in dieser Welt ist von wachsender Ungleichheit geprägt. Die armen Länder verbrauchen nur einen Bruchteil der Ressourcen, die wir als Bewohner eines Industrielan-

des wie selbstverständlich in Anspruch nehmen. Wäre es aber physisch überhaupt möglich, den Lebensstil der Industrienationen auf alle Regionen dieser Welt zu übertragen? Jedem wird sofort einleuchten, dass eine Verallgemeinerung des Lebensstils der reichsten Erdenbürger auf alle Menschen dieser Welt die Ressourcenbasis innerhalb von wenigen Jahrzehnten aufbrauchen würde. Das gleiche gilt auch für die Einkommensverteilung. Die Kluft zwischen den Reichen und den Armen innerhalb eines Landes wie auch zwischen den armen und den reichen Ländern weitet sich aus. Der Wirtschaftswissenschaftler Rademacher hat in einer großen internationalen Untersuchung festgestellt, dass nicht nur die Kluft zwischen den Ärmsten und den Reichsten wächst, es wächst auch die Kluft zwischen dem Durchschnittseinkommen einer Gesellschaft und dem Einkommen der zehn Prozent reichsten Menschen<sup>4</sup>. Diese Kluft ist insofern von besonderer Bedeutung, weil Gesellschaften, in denen die Masse der Menschen keinen wirtschaftlichen Bewegungsspielraum haben, immobil bleiben und sich nicht weiterentwickeln können. Sie bleiben auf dem Feudalstatus stehen.

#### **2.6 Individualisierung der Lebensansprüche bei gleichzeitiger Universalisierung von Teilkulturen**

Wir leben in einer Welt, die zunehmend Wert auf individuelle Lebensplanung und eigene Entfaltung legt. Jeder möchte nach eigener Fassung nicht nur selig sondern schon auf Erden glücklich werden. Die moderne Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft hat die Möglichkeiten der Individualisierung geschaffen mit ihren unbestreitbaren Vorteilen, aber auch ihren Problemen.

Die Akademie für Technikfolgenabschätzung hat gemeinsam mit der Universität von Melbourne (Australien) einen Sammelband zum Thema „Wahrnehmungen von Technik, Risiken und Einstellungen“ in sehr unterschiedlichen Ländern und Kulturen zusammengestellt<sup>5</sup>. Es wurden Einzelgruppen weltweit in Australien, Südamerika, Europa und Kanada befragt. Dabei stellte sich heraus, dass jede der befragte Einzelgruppen vom Pflegepersonal in Krankenhäusern bis hin zu Obdachlosen mehr miteinander gemein hatten, gleichgültig aus welchem Land oder welcher Kultur sie stammten, als Personen aus unterschiedlichen Gruppen inner-

<sup>4</sup> Rademacher, F. J. (2000): Zukunftsfragen der Menschheit: Technische, gesellschaftliche und ethische Aspekte. Manuskript FAW, Ulm

<sup>5</sup> Renn, O. und Rohrmann, B. (2000): Cross-Cultural Risk Perception. Dordrecht und Boston.

halb eines Landes. Um es kurz zu sagen: Die Banker dieser Welt verstehen sich wesentlich besser untereinander, als jeder einzelne Banker mit seinen eigenen Kindern. Das ist eine neue Entwicklung. Alte Bindungskräfte etwa des nationalen Zusammengehörigkeitsgefühls schwinden zugunsten von neuen Lebensentwürfen, die über die Grenzen der eigenen Nation hinaus wirksam werden, weil sich Gleichgesinnte dank Internet und anderen globalen Medien weltweit zusammenfinden. Nationale Integration setzt dabei immer weniger Bindungskraft frei. Politik muss sich auf diese Aufweichung nationaler Bindungskräfte zugunsten einer Aufsplitterung in subkulturelle aber weltweit agierende Sinngruppen einstellen.

### **2.7 Die kulturelle Dimension des technischen Wandels: Die Identität des Menschen**

Als Sigmund Freud auf die großen Kränkungen der Menschheit hinwies, hatte er vor allem den Stellenwert des Menschen im natürlichen Kosmos und in der kulturellen Evolution im Visier. Die Erkenntnis, dass die Erde nicht Mittelpunkt des Sonnensystems war, die Einsicht, dass der Mensch in evolutionärer Abfolge von den Tieren abstammt, und die Wahrnehmung der Begrenztheit der eigenen Handlungsfreiheit durch die Kräfte des Unbewussten zog er als wesentliche Belege dafür heran, dass das Selbstbild des Menschen, ein einzigartiges und souveränes Geschöpf zu sein, schmerzlich erschüttert wurde<sup>6</sup>. Die weitere Entwicklung von Naturwissenschaft und Technik ist in diesem Sinne noch ein Schritt weitergegangen: Mit den Erkenntnissen der neuen Gehirnforschung und den damit verbundenen Möglichkeiten der externen Steuerung von menschlichen Denkprozessen auf der einen und den zunehmend intelligenteren Maschinensystemen auf der anderen Seite steht nun die Identität des Menschen selbst zur Debatte. Die verbale Gegenüberstellung von „Vermenschlichung der Maschine“ und „Maschinisierung des Menschen“ ist ein beredter Ausdruck für diese Grundhaltung.

In dieser Situation sind alle Technologien, die das Selbstbild des Menschen infrage stellen, auf einem besonderen Prüfstand. Es ist schon schwer zu verkraften, dass der Mensch in seinen genetischen

Anlagen weitgehend mit der Bäckerhefe identisch ist<sup>7</sup>. Die Debatten um Stammzellenforschung, um Präimplantationsdiagnostik, um Biochips im Gehirn, um neue bewusstseinsverändernde Medikamente, um menschenähnliche Roboter drehen sich bei aller Unterschiedlichkeit ihrer wissenschaftlichen Fundierung um die Grundfrage nach der Identität des Menschen. Diese Frage erledigt sich nicht von selbst. Gleichzeitig kann sie auch nicht gelöst werden wie eine mathematische Gleichung oder wie ein Verteilungskonflikt. Der Umgang mit dieser Frage setzte eine behutsame Ko-Evolution von technischer Entwicklung und Bewusstseinsentwicklung voraus. Ko-Evolution (in der auch die ökologische Komponente einbezogen werden muss) bedeutet keine Einladung zur post-modernen Beliebigkeit von Moral. Die Grundsätze der Menschenwürde und das Verbot der Instrumentalisierung des Menschen zu menschlichen Zwecken, wie es Kant formuliert hat, haben universelle Geltungskraft – über Ort und Zeit<sup>8</sup>. Wie diese Grundsätze aber im Wechselverhältnis von technologischer Entwicklung und kulturellem Selbstverständnis umgesetzt und konkretisiert werden sollen, lässt sich nur im ständigen und kontinuierlichen Dialog zwischen den an dieser Entwicklung beteiligten und betroffenen Personengruppen festlegen.

### **3. Auswirkungen auf die Dynamik der Technikentwicklung**

Die hier vorgestellten sieben Makrotrends bilden die Begleitmusik, die für die technische Entwicklung und den sozialen Wandel den Ton angibt. Bevölkerungsdichte und Umweltgefahren sind die eher externen Rahmenbedingungen, die weitgehend dem menschlichen Zugriff entzogen und bei denen im Wesentlichen Anpassungsprozesse gefragt sind. Globale Märkte und Wissensexplosion sind bestimmende Elemente der ökonomischen Entwicklung, die eher als interne, d.h. aus dem Vollzug menschlichen Handelns sich ergebende Phänomene anzusehen sind. Auch diese sind für den einzelnen Akteur zunächst einmal von außen her vorgegeben; sie bieten jedoch für kollektive Akteursgruppen Gestaltungsspielräume und Freiheitsgrade, die konstruktiv genutzt wer-

<sup>6</sup> Freud, S. (1972): Studienausgabe, Band 1. Frankfurt am Main, S. 283f.

<sup>7</sup> dazu: Orzessek, A. (2001): Braucht uns die Zukunft? Universitas, 56. Jahrgang, Heft 1, S. 55

<sup>8</sup> Höffe, O. (1992): Immanuel Kant. München.

den können. Die drei letzten Trends, ungerechte Verteilung, die Entstehung neuer funktionaler und global wirksamer Teilkulturen und die Bedrohung der menschlichen Identität charakterisieren wesentliche Entwicklungen im sozialen und kulturellen Bereich, die ebenfalls als intern generiert angesehen werden können. In beiden Fällen sind in begrenztem Maße Einflussmöglichkeiten durch aktive politische oder soziale Steuerung gegeben. Im Folgenden sollen diese sieben Trends auf ihre Implikationen für technische Entwicklung und Gestaltungsräume hin untersucht werden.

### 3.1 Externe Rahmenbedingungen und Technikentwicklung

Die Zunahme der Bevölkerungsdichte und die Gefährdungen globaler Stoffkreisläufe durch menschliche Aktivitäten sind bestimmende Einflussgrößen der zukünftigen Entwicklung von Technik, Wirtschaft und Gesellschaft. Mit beiden Trends werden wir leben und uns daran anpassen müssen. Natürlich können und sollten wir die umweltbedingten Gefährdungen der Menschheit nicht tatenlos hinnehmen: die Gefährdung als solche ist aber aufgrund der Bevölkerungsdichte nicht mehr rückgängig zu machen, es sei denn, wir wollten die Menschheit zwangsweise um mehr als die Hälfte reduzieren. Das will, so hoffe ich wenigstens, niemand. Im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung wird es deshalb darauf ankommen, Risikobegrenzungen vorzunehmen. Allein dieses eher bescheiden anmutende Ziel wird von den Menschen viel abverlangen. Denn Risikobegrenzung setzt eine konsequente Politik der Nachhaltigkeit voraus. Eine gesellschaftliche Entwicklung hin zur Nachhaltigkeit kann an vier Enden ansetzen: *der Erhöhung der Umwelteffizienz, der Schließung von Stoffkreisläufen, der Förderung von ressourcen- und umweltschonenden Innovationen und der Anpassung von Lebensstilen an eine nachhaltige Wirtschaftsweise (Suffizienz)*<sup>9</sup>. Alle vier Strategien müssen parallel verfolgt werden, wenn man dem Ziel der Nachhaltigkeit näher kommen will.

Die externen Rahmenbedingungen der Bevölkerungsdichte und der ökologischen Gefährdungen

erfordern dazu eine Entwicklung der Technik, die auf der einen Seite eine erweiterte Transformation von Natur- in produktive Kulturlandschaft ermöglicht, zum anderen aber die Knappheit der Naturgüter durch verbesserte Effizienz, Schließung von Stoffkreisläufen, umweltgerechte Innovationen und „entmaterialisierten“ Konsum widerspiegeln muss.

### 3.2 Interne Rahmenbedingungen und technische Entwicklung

Kommen wir als Nächstes zu den zwei wirtschaftlichen Trends: Globalisierung und Wissensorientierung. Beide bestimmen heute weitgehend den wirtschaftlichen Ablauf in der Welt. Sie sind einerseits Reaktionen auf technische Neuerungen, die sich als Folge der Bedeutungslosigkeit von Ort und Zeit entwickelt haben. Diese Form der Technikentwicklung wird weiter fortschreiten; denn mit der Aufhebung von Ort und Zeit lässt sich viel Geld verdienen. Globalisierung und Wissensorientierung sind aber andererseits Auslöser neuer Entwicklungen, die auf den Humus der globalen Wissensvermehrung angewiesen sind. In welche Richtung wird sich der technische Wandel angesichts dieses Innovationsmotors weiter entwickeln? Auch wenn der technische Wandel dem Zugriff prognostischer Instrumente weitgehend entzogen ist, so lassen sich dennoch auf der Basis der vorhersehbaren Strukturänderungen und der kollektiven Aufgabenerfüllung innerhalb der Gesellschaft Bedarfswelder ausfindig machen, für deren Deckung neue technologische oder organisatorische Angebote erforderlich sind.

Dazu zwei Beispiele:

- Unsere Gesellschaft wird zunehmend älter. Für ältere Menschen werden einige Techniken an Bedeutung verlieren, andere an Einfluss gewinnen. Gesundheitsschutz, Freizeitgestaltung, Reisen, Geselligkeit, soziale Aktivitäten und Unterhaltung sind nur einige der Stichworte, die in einer älter werdenden Gesellschaft expandierende Märkte kennzeichnen. Dazu gehören auch Techniken, die dazu geeignet sind, diese Bedürfnisse effizient und altersgerecht zu stillen.
- Wenn auch niemand weiß, in welchem Umfang Wanderungsbewegungen in den nächsten Jahr-

<sup>9</sup> Renn, O (2001): Ethische Anforderungen an eine Nachhaltige Entwicklung: Zwischen globalen Zwängen und individuellen Handlungsspielräumen. In: G. Altner und G. Michelsen (Hrsg.): Ethik und Nachhaltigkeit. Grundsatzfragen und

Handlungsperspektiven im universitären Agendaprozess. Frankfurt am Main, S. 64-99



zehnten auftreten werden, so sind sich doch alle Prognostiker darin einig, dass sich Gesellschaften, die einen hohen Lebensstandard genießen, mit einer konstanten Immigration von Ausländern rechnen müssen. Dies schafft die Notwendigkeit der Integration und der Qualifikation dieser Menschen. Sekundäre Bildungsangebote müssen verbessert und neue organisatorische Formen der Eingliederung gefunden werden. Auch in diesen, zunächst technikfernen Bereichen werden neue Anwendungen der Informations- und Kommunikationstechnik eine wesentliche Rolle spielen.

Mit den strukturellen Veränderungen, von denen ich hier nur zwei herausgegriffen habe, gehen gesellschaftliche Probleme und Anforderungen einher, die neue kollektive Leistungen der Politik und innovative technische Entwicklungen erfordern. Zur Illustration können auch hier zwei Beispiele herausgegriffen werden:

– Die Ereignisse des 11. September 2001 haben die hohe Verwundbarkeit der technisch orientierten Zivilisation deutlich herausgestellt. Letztlich konnten die Attentäter mit drei Teppichmessern eine Katastrophe auslösen, indem sie systematisch das Risikopotenzial ziviler Technologien als Waffen eingesetzt haben. Gleichgültig ob dieses Attentat zu weiteren ähnlich gelagerten Übergriffen von Terroristen oder Saboteuren führen wird, die bislang vorgenommene Unterscheidung in zivile und militärische

Technologien ist zunehmend brüchig geworden. Staudämme, Chemieanlagen, Flugzeuge, Gentechnik-Labors, Kernkraftwerke und andere mehr stellen Risikopotenziale dar, die bei entsprechendem Willen und der Bereitschaft, das eigene Leben einzusetzen, zu Massenvernichtungswaffen werden. Nicht nur die großen Versicherungsgesellschaften schlagen inzwischen Alarm. Auch Hersteller und Betreiber solcher Anlagen sowie die Hüter von Infrastruktureinrichtungen befinden sich in einer intensiven Diskussion um die Reduzierung von technischen Verwundbarkeiten unabhängig vom kalkulierten Versagensrisiko. In Zukunft wird die technische Entwicklung zunehmend auf Reduktion von Verwundbarkeiten bei gleichzeitiger Beachtung von Verdichtungsfunktionen (etwa im Siedlungsbereich) ausgerichtet sein.

– In Zukunft wird der Bedarf nach kollektiver Orientierung angesichts der Zunahme von pluralen Lebensstilen und Werten ansteigen. Schon heute erleben wir eine Zersplitterung der modernen Gesellschaft in Lebensstilgruppen mit eigenem Wissenskanon, eigenen Überzeugungen, Normen, Gewohnheiten und Konsumbedürfnissen, wie dies im sechsten Trend der universellen Teilkulturen schon angeklungen ist. Die Präferenzen dieser Gruppen sind in der Tat schwer vorhersehbar, aber die Tendenz zur Abschottung und eigenständigen Lebensweise scheint auch in der Zukunft anzuhalten. Damit wächst die Notwendigkeit der Koordination, da in dicht besiedel-

ten Räumen die Handlungen des einen die Handlungsmöglichkeiten des anderen beeinträchtigen. Koordination und Orientierung sind beides Aufgaben, die auf der einen Seite bessere Kommunikationskanäle voraussetzen, auf der anderen Seite neue organisatorische Formen der Mitbestimmung und Selbstbestimmung erforderlich machen. Hier gehen soziale und technische Innovationsanforderungen Hand in Hand.

Das schon erwähnte Leitbild der nachhaltigen Entwicklung bietet sich für diesen Prozess der gegenseitigen Abstimmung sozialer, wirtschaftlicher und technischer Wandlungsprozesse an, da es den Anspruch auf Integration von ökologischen, ökonomischen und sozio-kulturellen Aspekten erhebt und explizit auf kommunikative und partizipative Formen der Zukunftsgestaltung aufbaut<sup>10</sup>.

Die Entwicklung eines gemeinsamen Leitbildes der Nachhaltigkeit allerdings wird nichts an der Tatsache ändern, dass einzelne Technologiefelder soziale und kulturelle Konflikte auslösen werden. Konflikte gehören zu einer demokratischen und offenen Gesellschaft und sind oft die Motoren für technischen und sozialen Wandel. Solche Konflikte werden dort besonders virulent, wo Menschen sich von den Entwicklungen „abgehängt“ oder sogar aufs Abstellgleis gedrängt sehen oder wo die eigene Identität infrage gestellt ist. Beides, so haben wir gesehen, ist mit der Entwicklung der modernen Technik verbunden. An diesem Punkt hilft es wenig, auf noch neuere Technikentwicklungen der x-ten Generation hinzuweisen; vielmehr ist gerade hier eine neue Kultur der Konfliktbearbeitung gefragt. Folgende Merkmale prägen diese neue Kultur:

– Menschen dürfen nicht von Techniknutzungen abgeschnitten werden, die sie zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensfunktionen benötigen. Treten neue effektivere oder effizientere technische Lösungen auf den Markt, so hat die Gesellschaft darauf zu achten, dass die alten Angebote noch so lange fortbestehen, bis sich die Nutzer haben umstellen können. Das gilt vor allem für den Ersatz von lebenswichtigen Dienstleistungen wie die Ausführung von Bankgeschäften oder Telefonieren, bei denen effiziente Internet-basierte Lösungen vorliegen, ohne dass aber eine Groß-

zahl der traditionellen Nutzer diese neue Möglichkeiten in Anspruch nehmen (können). Hier greift der etwas altmodische Begriff der Daseinsvorsorge, der sicherstellt, dass grundlegende Leistungen für alle Bürger verfügbar gemacht werden müssen.

- Zum Zweiten benötigen wir ein ergebnisoffenes Kommunikationskonzept, das nicht darauf beruht, möglichst viel Sachwissen über Technik an möglichst viele Menschen zu vermitteln. Vielmehr sollten alle Anstrengungen zur Technikkommunikation von dem Leitbild der Technikmündigkeit getragen sein. Kommunikation soll allen interessierten Bürgern die Möglichkeit verschaffen, auf der Basis der Kenntnis der faktisch nachweisbaren Auswirkungen, der verbleibenden Unsicherheiten und der vertretbaren Interpretationsspielräume eine persönliche Beurteilung der jeweiligen technischen Entwicklungen vornehmen zu können, die den eigenen oder den von einem selbst als für die Gesellschaft ethisch gebotenen Kriterien entspricht. Kommunikation ist dabei als ein offener Prozess des gegenseitigen Abgleichs von Informationen und Argumenten zu verstehen. Wie immer das letztendliche Urteil der Kommunikationspartner ausfallen mag, ob Akzeptanz erzeugt oder verweigert wird, ist dabei zweitrangig. Wichtig ist, dass Transparenz, Nachvollzug und – zumindest gedankliche – Teilhabe am Innovationsprozess das Geschehen bestimmen und dadurch den Tendenzen der sozialen und kulturellen Ausgrenzung entgegengewirkt werden kann. Das gilt im nationalen wie internationalen Maßstab.
- Schließlich benötigen wir neue Konflikt-schlichtungsverfahren. Dass Konflikte auftreten und Positionen aufeinanderprallen, ist kein Problem. Konflikte müssen aber sozial und kulturell bearbeitet werden; ob sie dann gelöst werden, ist eine andere Frage. Zunehmend sind die traditionellen Formen der Konfliktlösung, vor allem was Nutzung und Regulierung technischer Entwicklungen anbetrifft, in Legitimationsnöten geraten. Nicht umsonst sprießen zur Zeit Runde Tische, Konsensuskonferenzen, Enquete-Kommissionen, Ethik-Räte und anderes mehr wie Pilze aus dem Boden, sobald die Frage nach dem „richtigen“ Umgang mit neuen Technikentwicklungen

<sup>10</sup> Renn, O (2001): Nachhaltige Entwicklung- Eine kommunikative Reise in eine reflexive Zukunft. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Perspektiven für die Veranke-

rung des Nachhaltigkeitsleitbildes in der Umweltkommunikation. Chancen, Barrieren und Potenziale der Sozialwissenschaften. Berlin, S. 240-256

ansteht. Die Gefahr bei all diesen neuen zivilgesellschaftlichen Gremien besteht darin, dass der Konflikt professionalisiert wird, also die Berufsfunktionäre und die neue Kaste der „Zeitgeistdeuter“ stellvertretend für alle kollektiv wirksame Entscheidungen vorbereiten, die letztlich an den eigentlichen Nutzern und Betroffenen vorbeigehen. Auch die demokratische Legitimation der Teilnehmer solcher Runden ist oft unklar. Die TA-Akademie bemüht sich deshalb seit ihrer Gründung vor 10 Jahren um innovative Beteiligungsverfahren, die vorrangig die von den Technikfolgen betroffenen Menschen in die Urteils- und Entscheidungsfindung einbinden<sup>11</sup>.

All diese Bemühungen bleiben aber Makulatur, wenn es nicht gelingt, den bislang ausgesparten Trend, die zunehmende Gerechtigkeitslücke zwischen arm und reich, zu überwinden. Hier spielt die weitere Technikentwicklung im Sinne der Bereitstellung von Lösungsansätzen nur eine marginale Rolle. Denn die Gerechtigkeitslücke ist nicht durch technische Innovationen, nicht einmal durch besseren Techniktransfer zu beheben. Hier geht es allein um die Bereitschaft der Reichen, den Armen einen gerechten Anteil an der Wertschöpfung einzuräumen. Dabei ist der direkte Geldtransfer im Sinne der Entwicklungshilfe nicht das Hauptproblem, wenn auch die reichen Länder hier seit Jahren hinter den selbst gesteckten Zielen hinterherhinken. Zum einen erschweren die Barrieren, die von den reichen Ländern aufgebaut worden sind, angefangen von den Handelsrestriktionen bis hin zu den Rechten an genetischen Ressourcen, die Chancen für einen wirtschaftlichen Ausgleich. Zum anderen fließen zu wenig Investitionsmittel in die armen Ländern, um eine wirtschaftliche Entwicklung voranzutreiben. Die Bereitstellung sogenannter angepasster Technologien wie auch der Transfer an Wissen und Technik bilden dann eher das Beiwerk eines umfassenden Ausgleichsprogramms. Die Frage nach einer gerechten Verteilung der Reichtümer dieser Welt ist in erster Linie eine Frage des politischen Willens und der sozialen Akzeptanz; alles andere ist zweitrangig.

<sup>11</sup> Renn, O. und Webler, Th. (1998): Der kooperative Diskurs - Theoretische Grundlagen, Anforderungen, Möglichkeiten. In: O. Renn, H. Kastenholz, P. Schild und U. Wilhelm (Hrsg.): Abfallpolitik im kooperativen Diskurs. Bürgerbeteiligung bei der Standortsuche für eine Deponie im Kanton Aargau. Zürich, S. 3-103

#### 4. Schlussfolgerung

In meinen Augen ist die Bewältigung der Dynamik in der globalen Entwicklung auf einen diskursiven Prozess der Erfassung, Orientierung und Optionenbewertung angewiesen<sup>12</sup>. Um adäquat mit den Problemen der Entwicklungsdynamik umzugehen, sind Gestaltungsdiskurse auf der lokalen, regionalen, nationalen und globalen Ebene erforderlich. Diese Diskurse müssen geprägt sein von der Erkenntnis der Ko-Evolution von Technik, Umwelt und Kultur. Erst im Gleichklang dieser drei Entwicklungen kann so etwas wie Zuversicht in den technischen Wandel entstehen. Zudem brauchen wir mehr Transparenz, Nachvollzug und Mitwirkungsmöglichkeiten bei der Gestaltung des technischen und sozialen Wandels. Dabei geht es nicht um Verbot oder Technikfeindlichkeit. Im Gegenteil, der angestrebte Diskurs soll die Teilnehmer zu mehr „Technikmündigkeit“ befähigen, d.h. sie aufgeschlossen machen gegenüber den Möglichkeiten des technischen Wandels, sie aber gleichzeitig sensibel machen gegenüber den Risiken, die damit verbunden sind. Technikmündigkeit ist ein integraler Bestandteil einer veränderten Konfliktkultur, in der die Nutzer und die von Technikfolgen betroffenen Menschen gemeinsam mit den Entwicklern und den Regulierungsbehörden die Bedingungen und Auswirkungen des technischen Wandels reflektieren und mit gestalten.

Ob es gelingen wird, den Problemen der Globalisierung in diskursiven Verfahren zu begegnen, ohne sie damit gleich lösen zu wollen bzw. zu können, hat nicht nur Einfluss auf die Zukunft der wissenschaftlichen Technikfolgenabschätzung als Mittel der Zukunftsvorsorge, sondern wird auch maßgeblich die Möglichkeiten bestimmen, ob und in wie weit moderne Gesellschaften in Zeiten schnellen technischen Wandels in eigener Verantwortung und mit Blick auf die als wesentlich erkannten Werte des Menschseins handlungsfähig bleiben können.

<sup>12</sup> Eine ausführliche Argumentation für eine diskursive Form der Technikfolgenabschätzung findet sich zum Beispiel bei: Evers, A. und Nowotny, H. (1987): Über den Umgang mit Unsicherheit. Die Entdeckung der Gestaltbarkeit von Gesellschaft. Frankfurt/Main, S. 244ff. Oder: Baron, W. (1995) (Hrg.): Technikfolgenabschätzung - Ansätze zur Institutionalisierung und Chancen der Partizipation. Opladen.

# Chancen und Risiken neuer Technologien

## Chancen und Risiken neuer Technologien

und die politische Verantwortung *Peter Frankenberg*

### *Prof. Dr. Peter Frankenberg*

ist seit 13.6.2001 Minister für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg. Seit 1.9.2001 ist er Aufsichtsrat der Landesstiftung Baden-Württemberg gGmbH. Frankenberg studierte Geschichte, Geografie, Geologie und Botanik an der Universität Bonn. Promotion zum Dr. rer. nat. an der Universität Bonn. 1982 Habilitation an der Universität Bonn. 1983 Berufung zum Professor für Physische Geografie an der Kath. Universität Eichstätt. 1986 Berufung auf den Lehrstuhl für Physische Geografie und Länderkunde an der Universität Mannheim. 1991-94 Prorektor für Forschung der Universität Mannheim. 1994-01 Rektor der Universität Mannheim. 1997-01 Vizepräsident Forschung der Hochschulrektorenkonferenz.



Es gibt kein Thema, das interessanter oder wichtiger wäre als die Zukunft des Menschen selbst. Die gewählten Themen des Kongresses „Quo vadis homine?“ zeigen, dass hier ein umfassender Ansatz verfolgt wird und die wichtigen Entwicklungsströmungen in ihrem Potenzial für die Zukunftsgestaltung erfasst werden sollen. Angesichts dieser in ihrer rasanten Dynamik beeindruckenden Themen stellen sich folgende Fragen:

**Welchen Gestaltungsspielraum hat die Politik bei den wirklich zukunftsrelevanten Fragen?**

**Kann die Politik ihrer Verantwortung für das Wohl der Menschen und des Gemeinwesens noch gerecht werden?**

Ich werde versuchen, diese Thematik wenigstens anzureißen und mit Beispielen zu illustrieren.

### **Ausgangslage**

Wir sehen uns heutzutage mit einer zunehmenden Entwicklungsgeschwindigkeit neuer Technologien konfrontiert. Eine immer größer werdende Eindringtiefe in die biologische und kulturelle Identität des Menschen stellt uns vor neue ethische und sozialpolitische Fragestellungen (neue Dimension des technischen Wandels). Dabei verlieren feste Bezugsgrößen ihre Orientierungsfunktion. Die Reaktion der Menschen sind Unsicherheit, Skepsis und Zukunftsangst.

Eine mangelhafte gesellschaftliche Auseinandersetzung kann in diesem Zusammenhang zu Abwehrreaktionen bzw. zu einer sich vergrößernden Technikablehnung führen. Dabei herrschen nahezu gleichzeitig euphorische Erwartungen und blinde Technikbegeisterung bei Entwicklern und Nutzern der Technik vor. Diese beiden Einschätzungen stehen in einer großen Diskrepanz zueinander und müssen durch einen Dialog zwischen den einzelnen Gruppierungen überwunden wer



den. Die Politik spielt hierbei eine Mittlerfunktion. Sie diskutiert diese Themen auf einer breiten Basis. Dabei gilt es zu bedenken, dass beide Haltungen, die technikfreundliche wie auch die technikfeindliche in ihrer Reinform gefährlich sind, da sie zu Fehleinschätzungen und damit zu Fehlentwicklungen führen können.

Bereits kleine Fehlentwicklungen können in unserer globalisierten und zunehmend vernetzten Welt zu unübersehbaren sozialen Kosten führen.

Für langfristige Entwicklungsperspektiven sind daher folgende Parameter erforderlich:

- Reflektierter und verantwortungsbewusster Umgang mit Chancen und Risiken neuer Technologien (auch Gebot nachhaltiger Politikgestaltung)
- Formen des Dialogs und der Verständigung, die auch psychologisches und soziales „Schritthalten“ mit Fortschrittsdynamik erlauben
- Orte, an denen Entwickler, Nutzer und Beobachter neuer Technologien kritisch und konstruktiv mit den Herausforderungen neuer Potenziale umgehen (z. B. dieser Kongress).

Dabei muss die fachwissenschaftliche Information mit einer kulturwissenschaftlichen Reflektion verbunden werden.

### Die „großen Kränkungen der Menschheit“ nach Freud

Nach Freud gibt es „Kränkungen der Menschheit“, die durch die Technisierung des Menschen und die Vermenschlichung der Maschinen entstehen:

- Wende (Abkehr von der Erde als Mittelpunkt des Kosmos),
- Evolutionstheorie (Einsicht in die natürliche Entstehung des Menschen aus dem Tierreich),
- Psychoanalyse (Verhaltenssteuerung durch das Unbewusste).

Heute stehen wir vor der Tatsache, dass die Eingriffsmöglichkeiten der Gentechnik in die biologische Identität des Menschen sowohl Bestürzung als auch Beglückung auslösen. Die medizinische Anwendung der Gentechnik verspricht Heilung für viele Krankheiten. Zugleich sehen wir uns mit einer Schreckensvision von „Designer-Babies“ und anderen Formen der Manipulation der Natur konfrontiert. Der Mensch als Manipulator nicht nur seiner Umwelt, sondern auch seiner eigenen biologischen Evolution stellt uns vor eine gänzlich neue Qualität unserer Handlungsoptionen.

Wir müssen uns in diesem Zusammenhang neuen Fragen stellen: Ist dies die klassische Hybris? Oder ist es Auftrag des Menschen, seine Fähigkeiten zu nutzen, um als Mitschöpfer seiner selbst zu agieren?



Für eine ausgewogene Entscheidungs- und Urteilsfindung bedarf es daher des notwendigen Sachwissens und der richtig angesetzten Maßstäbe. Das Sachwissen verhilft uns dabei dazu Möglichkeiten, Grenzen und Unsicherheiten in Bezug auf neue technische Potenziale aufzuzeigen. Die Maßstäbe, aus den grundlegenden Menschenrechten abgeleitet und auf einem breiten gesellschaftlichen Konsens fußend, helfen uns, diese Möglichkeiten bewerten zu können.

Die derzeitige Diskussion ist gekennzeichnet durch einen Mangel an beidem: Die Grenzen von Wissenschaft und Wissen werden verkannt, gleichzeitig vertreten manche den Fehlschluss, der Mensch sei ethisch aufgefordert, alles zu tun, was technisch möglich sei.

Es gibt aus meiner Sicht in diesem komplexen Entwicklungsfeld keine Patentrezepte, und somit auch keine einfachen Lösungen. Die Konflikte, die sich vor uns auftun, müssen ausgehalten werden. Aus diesem Grunde sind für mich Kongresse wie dieser heute wichtig. Sie vermitteln Orientierung und mehr Handlungssicherheit in einer unsicheren und ambivalenten Welt.

#### **Auswirkungen auf das politische Handeln**

Die Gesellschaft befindet sich momentan in einem Prozess der gemeinsamen Suche nach Möglichkeiten der Integration wissenschaftlicher, politischer, wirtschaftlicher, ethischer und gesellschaftlicher Aspekte bei der Bewertung neuer technischer Entwicklungen.

Ziel ist es, Orientierungsangebote zu finden, die dazu beitragen, Chancen richtig wahrzunehmen, Risiken und Begrenzungen deutlich zu identifizieren, Handlungsspielräume erkennbar zu machen.

Anders ausgedrückt: Freudsche „Kränkungen der Menschheit“ sollen nicht als Schicksalsschläge, sondern als Herausforderung an den Menschen, über sich selbst hinauszuwachsen, gesehen werden. Sowohl in der Forschungsleistung als auch in der ethischen Bewältigung der immer weitreichenderen Folgen.

Dieser Kongress bietet ein interdisziplinäres Forum hierfür mit Entscheidungsträgern, Wissenschaftlern und Vertretern der breiten Öffentlichkeit. Am Ende aller Diskussionen muss politisch gehandelt werden. Jede Entscheidung hat positive und negative Auswirkungen.

Das Problem vor dem wir stehen: Wegen der Eindringtiefe heutiger Technologien in unsere Natur und Kultur ist der traditionelle Weg von *trial and error* (Versuch und Irrtum) nur noch begrenzt tragfähig, da Irrtümer globale und irreversible Folgen haben können.

Deshalb bedienen wir uns heute eines ganzheitlichen Ansatzes, um erfolgreiche (Forschungs-)politik zu betreiben.

Eine wichtige Leitschnur auf dem Weg zur verantwortbaren politischen Entscheidung kann die „Heuristik der Furcht“ sein, die Hans Jonas empfahl: *„Erst die vorausgesehene Verzerrung des Menschen verhilft uns zu dem davor zu bewahrenden Begriff des Menschen.“*

#### **Beispiel Forschung an humanen embryonalen Stammzellen**

Die Forschung an embryonalen Stammzellen ist hierfür ein besonders gutes Beispiel, da es den medizinischen Forschern und den Ethikern um den Menschen geht.

Die Mediziner wollen Menschen heilen. Wenn aber Fortschritte bei der Heilung von Patienten in Bereiche eingreifen, in denen die Würde oder die Rechte anderer Menschen betroffen sind, kann die „Heuristik der Furcht“ deutlich machen, dass es letztlich immer darum geht, den Begriff des Menschen zu bewahren: beim Patienten und beim Embryo.

Gerade das Zerrbild kann uns einen Begriff vom Menschen geben, eine grundlegende Vorstellung, die weder beim Menschen noch beim Embryo aufgegeben werden darf.

In der Konsequenz heißt dies, dass sich das Land Baden-Württemberg gegen die Förderung der Forschung an humanen embryonalen Stammzellen in Deutschland ausgesprochen hat. Für uns gilt die Prämisse „Das Menschsein beginnt mit Verschmelzung von Ei- und Samenzelle“, es kann aus moraltheologischer Sicht keine Abwägung geben. Die Begriffe „Menschenwürde“ und „Person“ sind nicht steigerungsfähig und damit auch nicht verhandelbar.

Die entscheidende Frage ist allerdings: Lässt sich diese Definition relativieren, nach der menschliches Leben mit Verschmelzung von Ei- und Samenzelle beginnt?

Für die derzeitige Auslegung der Definition spricht, dass ab diesem Zeitpunkt nicht die Entwicklung zum Menschen, sondern die Entwicklung als Mensch stattfindet; danach gibt es keine Zäsur mehr, die in ihrem Ausmaß eine ähnliche Dimension hätte.

Die Abstufung „je jünger, je älter, je kränker, desto weniger Mensch“ darf es nicht geben. Die Zerlegung des Embryos zur Heilung von Patienten wäre ein Zerrbild, das die Grenze des Verantwortbaren aufzeigt.

Politisches Handeln heißt in diesem Zusammenhang aber auch, die Chancen neuer Technologien unter Wahrung ethischer Grenzen konsequent zu ergreifen. Deshalb gibt es in Baden-Württemberg, finanziert von der Landesstiftung, das Forschungsprogramm „Adulte Stammzellen“. Damit stellt die Landesstiftung erheblich mehr Mittel für die gezielte Forschung im „ethisch grünen Bereich“ bereit, als es die DFG getan hat.

### **Ausblick**

Dieses Beispiel gibt Antwort auf die Frage der abschließenden Podiumsdiskussion „Findet die Zukunft ohne uns statt?“:

Es geht nicht darum, jeder Zukunft blind zu folgen, es geht darum, Zukunft selbst mitzuprägen. Dabei gilt die Aussage von Hans Jonas:

*„Das Wissen muss dem kausalen Ausmaß unseres Handelns größengleich sein. Die Tatsache aber, dass es ihm nicht wirklich größengleich sein kann, das heißt, dass das vorhersagende Wissen hinter dem technischen Wissen, das unserem Handeln die*

*Macht gibt, zurückbleibt, nimmt selbst ethische Bedeutung an. Die Kluft zwischen Kraft des Vorherwissens und Macht des Tuns erzeugt ein neues ethisches Problem.“*

### **Schluss**

Gerade deswegen sollten wir nicht jeder Zukunft, jedem Tun nachrennen und damit die Kluft zwischen Vorherwissen und Tun nur vergrößern, sondern versuchen, so früh und so klar wie möglich zu erkennen, was auf uns zukommt. Dafür ist eine Akademie für Technikfolgenabschätzung unabdingbar, die schon jetzt darüber nachdenkt, welche kategorial neuen Probleme auf uns zukommen, wenn sich die drei Themenfelder dieses Kongresses, Gentechnologie, Nanotechnologie und Künstliche Intelligenz, verbinden. Dann werden wir vor ethischen Fragen stehen, die die Probleme bei den humanen embryonalen Stammzellen weit in den Schatten stellen werden. Wird die Hochzeit von Gentechnik, Nanotechnologie und künstlicher Intelligenz am Ende doch den Homunkulus gebären, vor dem wir seit Jahrhunderten wohligh schaudern in der Annahme, er werde niemals Wirklichkeit?

Ich bin der Akademie für Technikfolgenabschätzung und der Landesstiftung zu Dank verpflichtet, dass sie den Entscheidungsträgern aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft diese Gelegenheit zur sachkundigen Information und umfassenden Reflektion an den folgenden beiden Tagen bietet. Ich bin mir sicher, dass wir alle auf der Basis des hier gebotenen Programms nach diesen beiden Tagen mit besserem Hintergrundwissen und mehr Orientierungssicherheit in diesen schwierigen Fragen nach Hause gehen können. Damit wir uns nicht in folgender Situation wiederfinden, um ein letztes Mal Hans Jonas zu zitieren: *„Nun zittern wir in der Nacktheit eines Nihilismus, in der größte Macht sich mit größter Leere paart, größtes Können mit geringstem Wissen davon, wozu.“*

# Zäsuren der Technikentwicklung

## Zäsuren der Technikentwicklung: Kränkung oder Herausforderung –

Bruder Robot Norbert Bolz

### *Prof. Dr. Norbert Bolz*

ist seit 2002 Inhaber des Lehrstuhls für Medienberatung an der TU Berlin und war von 1992 bis 2002 Inhaber des Lehrstuhls für Kommunikations- und Medientheorie an der Universität Essen und stellvertretender Leiter des Instituts für Kunst- und Designwissenschaften (IKUD). Er studierte in Mannheim, Heidelberg und Berlin Philosophie, Anglistik, Germanistik und Religionswissenschaft. Promotion und Habilitation in Philosophie an der FU Berlin



Was auch immer mit Künstlicher Intelligenz gemeint sein mag – stets geht es um die Konstruktion von Maschinen, deren Leistung als funktionales Äquivalent für menschliche Intelligenz akzeptiert werden kann. Und die Schlüsselattitüde dieses Projekts lässt sich genau bestimmen: Künstliche Intelligenz subsumiert Mensch und Computer unter informationsverarbeitenden Systemen. In ihrer noch jungen Geschichte lassen sich immerhin schon drei entscheidende Etappen markieren.

- Die Universalmaschine Alan Turings ist die prinzipielle Konstruktion eines „mind“, eine Imitation der Funktionsprinzipien des menschlichen Geistes; es geht also nur um Software.
- Der Konnektionismus macht dann Ernst mit der Einsicht, dass wir zwar linear denken, das Gehirn aber parallel prozessiert. Deshalb versucht er, ein „brain“ zu modellieren, d.h. die Schaltungen des menschlichen Gehirns zu imitieren; es geht also um *hard wiring*, um Hardware.
- Die Robotik ist die neueste Variante der Kritik des Leib-Seele-Dualismus. Nicht das Wissen, sondern das Verhalten ist entscheidend. Der Roboter soll nicht primär denken wie ein Menscheng Geist oder funktionieren wie ein Gehirn, sondern eine „illusion of life“ stabilisieren; es geht also letztlich um Wetware.

Um die Dynamik dieser kurzen Geschichte der Künstlichen Intelligenz zu verstehen, muss man sich zunächst klar machen, dass schon für Turing die Frage, ob Maschinen denken können, völlig belanglos ist. An die Stelle des „Denkens“ und der „Intentionalität“ tritt ganz pragmatisch die Bewährung im Turingtest. Alan Turing gibt also dem Computer-Anthropomorphismus keine Nahrung; ihn interessieren einzig und allein die mathematischen Funktionsanalogien zwischen Mensch und Maschine. Hier tut sich eine neue Welt auf, in der allein Unterschiede Unterschiede machen – Hardware spielt keine Rolle. Mensch und Computer werden subsumiert unter: informationsverarbeitende Systeme. Das Physikalisch-Chemische des Gehirns ist demnach nur ein Medium für die Verkörperung diskreter Zustände; andere Verkörperungen sind möglich.

„*The mind is not in the head*“ (Varela) – sondern in der Organisation, bzw. in der Maschine, die einen Algorithmus abarbeitet. Und Maschine heißt: von Verhaltensgesetzen gelenkt sein, ein Prozess nach Faustregeln. Der Geist in der Maschine unterstellt, wie wohl erstmals Thomas Hobbes, ein Denken als Rechnen mit symbolischen Repräsentationen. In Turings Universalmaschine, die jede andere Maschi-

ne emulieren kann, kommt diese Entzauberung des Menschengesistes als Rechenmaschine mit Feedbackschleifen dann zu sich. Weil es nur um die Software geht, muss man nicht wissen, wie das Gehirn funktioniert, um zu wissen, wie der Geist funktioniert. Entsprechend genügt es, einen Geist zu bauen – es ist nicht nötig, ein Gehirn zu modellieren.

Die mathematische Funktionsanalogie zwischen Mensch und Maschine bewährt sich aber nicht nur als Geist in der Maschine, sondern auch als Computer-Bild des Menschen. Altvertraut ist die Rede von der digitalen Maschine als Elektronengehirn. Aber genau so selbstverständlich versteht man heute den Menschengesist als eine Art Computer. Mit anderen Worten: Mensch und Maschine metaphorisieren sich wechselseitig. Und die sogenannte *Strong AI* unterscheidet sich von den weicheren Varianten lediglich darin, dass sie die Metaphern wortwörtlich nimmt. So bekanntlich schon Turing: „*Ein Mensch, ausgestattet mit Papier, Bleistift und Radiergummi sowie strikter Disziplin unterworfen, ist in der Tat eine Universalmaschine.*“<sup>1</sup>

Der Geist in der Maschine ist der Geist als virtuelle Maschine, ein System von Systemen, wie es der deutsche Idealismus vor 200 Jahren vorausgedacht hat. Man könnte auch sagen, Kybernetik, Automaten-theorie, Kognitionswissenschaften und Artificial Intelligence arbeiten daran, den Hegelschen Geist zu operationalisieren. Den entscheidenden Schritt über die reine Philosophie hinaus macht eigentlich schon Norbert Wieners Kybernetik mit ihrem neuen Begriff von Maschine, der auch biologische Systeme umfasst. Im Anschluss daran hat dann G. Günther eine radikale, vom „Lokalpatriotismus des menschlichen Gehirns“ emanzipierte Geistesgeschichte gefordert, d.h. eine Logik des Lebens, für die der Mensch nur eine kontingente Verkörperungsform unter anderen ist. Diese Vision wird heute von der Robotik eingelöst. Wir können deshalb sagen: Wer vor Robotern Angst hat, wird eigentlich von der „metaphysischen Irrelevanz des Menschen erschüttert“<sup>2</sup>.

Alle Angst vor Robotern konzentriert sich auf die Frage, ob Menschen irgendwann einmal Maschinen gegenüberstehen werden, die sie nicht selbst entworfen haben. Dass das prinzipiell möglich ist, weiß man, seit John von Neumann eine sich selbst reproduzierende Maschine skizziert hat. Das Grundkonzept ist einfach: Man konstruiert eine Maschine, die nicht nur aus einem klassischen, physische Arbeit verrichtenden Teil und einem mechanischen Gehirn zusammengesetzt ist, sondern auch noch einen algorithmischen Schwanz hat. Dieser Schwanz enthält eine mathematisch-logische Beschreibung des gesamten Mechanismus. Das mechanische Gehirn übersetzt den Algorithmus in Instruktionen, die dann vom klassischen Teil der Maschine ausgeführt werden. Damit reproduziert sich die Maschine aber auch selbst. Nun muss man dem algorithmischen Schwanz nur noch Zufallselemente einfügen, um beim Bau der neuen Maschinen zu unvorhersehbaren Variationen zu gelangen. Was so entsteht, hat kein Mensch entworfen.

Wenn aber Maschinen über eine mathematisch-logische Beschreibung ihres eigenen Mechanismus verfügen können, dann können sie auch die Effekte ihres eigenen Operierens beobachten und daraus „lernen“. Die lernende Maschine hat sich selbst zum Gegenstand; sie beobachtet die Ergebnisse des eigenen Verhaltens und kann so die eigenen Programme modifizieren. Deshalb ist so etwas wie „Selbstreflexion“ bei Robotern durchaus möglich, wenn man ihnen ein Modell ihrer eigenen Operationen zur Steuerung dieser Operationen einkonstruiert; ähnlich wie sie ein Weltmodell brauchen, um überhaupt erfolgreich in „ihrer Welt“ (z.B. aus Lego-Bausteinen) operieren zu können.

Gewiss, der Sieg von Deep Blue über Kasparow hat uns beeindruckt - aber das Hantieren mit Bausteinen? Ein Buchtitel von Marvin Minsky, *The Society of Mind*, signalisiert, was man bisher aus dem Scheitern der Robotik gelernt hat: Etwas scheinbar so einfaches wie zum Beispiel „Sehen“ lässt sich nur durch das Zusammenspiel einer Vielzahl unterschiedlicher Prozesse implementieren. Skills,

<sup>1</sup> A. Turing, *Intelligence Service* 91

<sup>2</sup> G. Günther, *Beiträge Bd. I*, S.XV

Geschicklichkeiten sind – mit Michael Polanyis Wort – „tacit“. Sie werden parallel prozessiert und verlaufen unbewußt, also ohne zentrale Kontrolle. Daraus folgt aber: Nur ein Roboter mit parallel *distributed processing* könnte „wahrnehmen“. Hier und nicht im Denken liegt das große Problem der künstlichen Intelligenz. Immer wieder scheitert sie an der technischen Implementierung des gesunden Menschenverstandes. Der Umgang mit Alltagsproblemen unter Bedingungen der Unsicherheit scheint rätselhafter als Hegels Große Logik. „*In general, we're least aware of what our minds do best.*“<sup>3</sup>

Man könnte das Projekt der Robotik auch so formulieren: Es geht für die Künstliche Intelligenz darum, den Schritt vom Schachbrett zum Fußballplatz zu wagen, d.h. von der bloßen Semiose zum Zusammenspiel von Wahrnehmung und Verstand. Die kommunikationsunbedürftige Koordination von frei beweglichen Körpern zu simulieren, ist nämlich eine unendlich viel komplexere Aufgabe als das Durchrechnen möglicher Stellungen auf dem Schachbrett. Deshalb spricht man heute vielfach schon von post-algorithmischen Computern, ja sogar von „organischem Rechnen“. Was auch immer im Einzelnen damit gemeint sein mag – in jedem Fall soll eine konnektionistische Wende von der Artificial Intelligence der Turingmaschine zum Artificial Life markiert werden.

Artificial Life will nicht den Menscheng Geist nachkonstruieren, sondern von der Evolution lernen. Und die erste Lektion lautet: „*The brain evolved to act, not to think.*“<sup>4</sup> Das ist die entscheidende Differenz, die alle bisherigen Theoriendesigns der Computer Science von der neuen Robotik trennt: Es geht darum, Systeme auf Aktivität, statt auf Funktion hin zu betrachten. Der General Problem Solver, der ganz in der Logik der Universal Turing Machine steht, funktioniert nach dem Prinzip der Repräsentation. Dagegen folgt das künstliche Leben dem Prinzip des „enactment“, der inszenierenden Kognition. Man denkt nun also ganz anders über das Denken. Kognition wird nicht mehr als Problemlösung, son-

dern als Inszenierung, als verkörpertes Handeln verstanden. Es geht um die technische Implementierung von Intelligenz im evolutionären Kontext. So ist wohl auch Varelas Satz zu verstehen: „*dass die kognitiven Fähigkeiten untrennbar mit Lebensgeschichten verbunden sind, die Wegen ähneln, welche erst im Gehen gebahnt werden.*“<sup>5</sup>

Wohlgermerkt handelt es sich hier um eine Evolution ohne Anpassung. Humberto Maturana hat dafür den Begriff der Autopoiesis geprägt. Im Blick auf unsere Fragestellung besagt er, daß komplexe kybernetische Systeme auf die Umwelt nicht mit „adaption“ sondern mit „enactment“ reagieren. Roboter, die das könnten, wären Computer zweiter Ordnung, also Roboter ohne Fernsteuerung, d.h. ohne Menschen; Maschinen, die sich selbst entwickeln. An dieser Stelle sieht man sehr deutlich, daß „Maschine“ eigentlich ein unglücklicher Begriff für nicht-triviale Maschinen ist. Jeder Mensch denkt bei dem Wort „Maschine“ ja automatisch (!) an triviale Maschinen, die dadurch charakterisiert sind, daß sie ihr Verhältnis zur Außenwelt nicht regulieren können. Autos zum Beispiel. Der Roboter dagegen ist als autonomes kybernetisches System gerade auch in dieser Hinsicht nicht trivial. Der Roboter steht für das Autonomwerden des Computers; er „verkörpert“ eine operative Intelligenz ohne Menschen. Und um sich davon zu überzeugen, muss man nicht mehr in Science Fiction-Filme gehen. Längst kennt die militärische Realität „smart bombs“ oder Panzer ohne Besatzung.

Die konnektionistische Wende von der geistorientierten Artificial Intelligence zum evolutionsorientierten Artificial Life ermöglicht also ein neues Konzept von Robotern jenseits der klassischen Steuerungswissenschaft. Man arbeitet an komplexen, evolvierenden Systemen ohne menschliche Kontrolle. Entscheidend ist dabei, dass an die Stelle zentraler Fernsteuerung nun die Kommunikation zwischen den Elementen der Roboter tritt. Ihr künstliches Leben beginnt nicht mit Schachpartien, sondern eher mit einem „*insect-like behavior by responding locally to their environment*“<sup>6</sup>. Ganz in die-

<sup>3</sup> M.Minsky, *The Society of Mind*, S. 29

<sup>4</sup> L.Tiger, *The Pursuit of Pleasure*, S. 206

<sup>5</sup> Varela/Thompson, *Der Mittlere Weg der Erkenntnis*, S. 279

<sup>6</sup> S.Turkle, *Life on the Screen*, S. 98



sem Sinne hat S. Lem im Modus des Futur II rückblickend auf das 21. Jahrhundert die interessante These entwickelt, dass die künstliche Intelligenz *„gerade dadurch Weltmacht erlangte, dass sie nicht zu einer Intelligenz im Sinne des einer Maschine einverlebten Verstandes wurde.“*<sup>7</sup> Diese Fiction ist wohl schon Science geworden.

Es spricht also einiges für den Erfolg von Robotern, die gerade nicht anthropomorph gedacht sind. Man weiß ja, dass Flugzeuge möglich wurden, als man die Nachahmung der Vögel aufgab. Und man könnte daraus lernen, dass Roboter möglich werden, sobald man die Nachahmung des Menschen aufgibt. Doch gleichgültig, ob man die Erfolgsgeschichte der Universal Turing Machine fortschreibt, oder die konnektionistische Wende zum künstlichen Leben mitmacht – wir können hier definitiv festhalten: Roboter sind Formen im Medium der künstlichen Intelligenz. Und diese mobilen intelligenten Artefakte werden der zentrale Gegenstand einer neuen Wissenschaft vom Künstlichen sein. Schon heute ist die Robotik die pragmatische Dimension der Artificial Intelligence.

Doch zumeist wird – und mit einigem Recht – der Ursprung der Robotik viel weiter zurückdatiert. Es gibt eine lange Geschichte des Jahrmarktzaubers

mechanischer Enten und Schachspieler, mit dem sich die stupende Ingenieurskunst der Moderne ihre verdiente Anerkennung beim Volk geholt hat. Doch die Faszination dieser Artefakte verdankt sich nicht nur der ingenieurstechnischen Spitzenleistung. Man könnte sogar sagen: Der Automat fasziniert unabhängig von seiner Leistung. Der Anthropologe Arnold Gehlen hat das als „Resonanzphänomen“ beschrieben. Am Automaten erfährt der Mensch sich selbst. Alles Habitualisierte und Rhythmische, Routinierte des Alltagslebens, Gewohnheiten, soziales Rollenverhalten, kritikfeste Denkfikturen, aber auch Herzschlag und Atmung sind ja Automatismen. Kurzum, das, was man den Handlungskreis des Menschen nennt, also „die plastische, gesteuerte, am rückempfundenen Erfolg oder Misserfolg korrigierte und schließlich gewohnheitsmäßig automatisierte Bewegung“<sup>8</sup>, entspricht präzise dem Rückkopplungsprinzip der kybernetischen Maschine.

Deshalb träumen Ingenieure von einer Maschine, die den Menschen erfolgreich vorspielt, ein Mensch zu sein. Schon der Turing-Test setzt diesen Traum in Kommunikationspragmatik um. Und der logisch nächste Schritt lautet dann: „More human than human is our motto.“ So formuliert es Mastermind Tyrell in Ridley Scotts „Bladerunner“. Das Dämo-

<sup>7</sup> S. Lem, Waffensysteme des 21. Jahrhunderts, S. 8

<sup>8</sup> A. Gehlen, ASU, S. 158

nische dieses Films liegt ja genau darin, dass die Unterscheidung Mensch/Replikant undarstellbar wird. Beide erfüllen das Goethe-Kriterium: geprägte Form, die lebend sich entwickelt<sup>9</sup>.

Doch diese Kinotraumperfektion der Technik ist gar nicht nötig, um Menschen dazu zu bringen, Maschinen als lebendig zu erfahren. Feedbackschleifen genügen nämlich schon, um das Gefühl der Belebtheit zu schaffen. Wir haben es hier mit einer modernen Form von Animismus zu tun, den die bloße Zuschreibung von Intentionalität initiiert. Mit anderen Worten: Weil der Mensch das Tier ist, das ständig Bedeutung produziert (sensemaking), genügt schon der „effort after meaning“ (Frederic C. Bartlett), um den Animismus der Artefakte in Gang zu halten. Irgendetwas gibt Zeichen – und schon unterstellen wir Geist.

Doch der moderne Animismus begnügt sich nicht mehr mit Geistern, die in Bäumen hausen, sondern erwartet „Subjektivität“. Und auch diese Erwartung lässt sich maschinell befriedigen. In der kalten Prosa des Mathematikers taucht das Subjekt bekanntlich nur als das Rauschen auf, das die formale Logik stört. Also muss man umgekehrt „noise“ in die maschinelle Abarbeitung des Algorithmus einführen, um den Eindruck von Subjektivität zu produzieren. Menschliche Intelligenz stellt sich dann als ein Rechnen zwischen Zufall und Wiederholung dar. Es genügt deshalb ein Digitalrechner mit einem zufälligen Element, um den Eindruck von freiem Willen zu erzeugen. Denn diese Kombination ist dem Gleichgewicht zwischen Kenntnis und Unkenntnis seiner selbst, das das Gefühl des freien Willens erzeugt, funktional äquivalent.

More human than human? Mag man auch Denken, Entscheiden und Kreativität maschinell imitieren können, so scheint den Robotern doch nie die Stunde der wahren Empfindung zu schlagen. Oder können Roboter Gefühle haben? *Affective modelling* nennt man die Versuche, Programme zu schreiben, die eine Simulation emotionaler Effekte ermöglichen. Und das ist gerade deshalb nicht aussichtslos, weil wir uns über unsere Gefühle ohnehin nicht analytisch klar werden können. Wir haben Gefühle immer nur als inszenierte, in Situationen, gehal-

ten von Frames – und die lassen sich beschreiben. „Since basic feelings are signals that have no symbolic structure, there cannot be analytical concepts of them. There can be concepts only of the scenarios into which they typically enter“<sup>10</sup>. Gerade daraus folgt aber, dass Signale über den inneren Zustand des Roboters, z.B. Warnsignale, genau wie Gefühle funktionieren können. Die Antwort lautet also: Roboter können ein funktionales Äquivalent für Gefühl haben.

Und das genügt zumeist, um die Erwartung emotionaler Zuwendung zu erfüllen. Auf dem sozialen Feld, das sich hier auftut, wird man wohl die *killer applications* der Robotik erwarten dürfen. Die leitende Frage lautet ganz einfach: Wie weit kann man *human service* durch Roboter ersetzen? Als Industrieroboter und Expertensysteme haben sie ja längst ihren festen Platz im Wirtschaftsleben. Doch nun übernehmen die Roboter nach Symbolanalyse und Routine auch noch das „Care“. Und zwar nicht nur in der Gestalt von Pflegerobotern im Krankenhaus. Bruder Robot wird Subjekt und Objekt der Sorge sein. Ein immer mehr wachsender „market of care“ wird dafür sorgen, dass das Pflegen von Robotern zur alltäglichen Beschäftigung derer wird, die niemanden (mehr) haben, um den sie sich sorgen könnten. Um Roboter kann man sich „sorgen“ – und der Roboterhund, den Sony ja schon gebaut hat, hat jedem realen Hund gegenüber den unschätzbaren Vorteil, dass seine Pflegebedürftigkeit berechenbar ist. Man kann deshalb prognostizieren: Roboter ersetzen die Haustiere als „lebendige Psychopharmaka“<sup>11</sup>.

Es geht also gar nicht um die Frage, ob Maschinen Geist und Gefühl *haben*, sondern ob wir sie ihnen *zuschreiben* müssen. Wir müssen ja auch Menschen Geist, Gefühl und Freiheit zuschreiben, um mit ihnen kooperieren zu können. Und Maschinen Bewusstsein zuzuschreiben wird für Menschen gefühlsmäßig immer leichter, weil das Ausmaß der Reflexion im Mechanismus immer mehr anwächst. Die durch Feedbackschleifen implementierte Reaktionsfähigkeit der Maschine empfinden wir als Lebendigkeit. Schon heute scheinen lernfähige Roboter aus Searles Chinese Room auszubrechen. Dazu genügt im Grunde schon ein Moment der Über-

<sup>9</sup> Vgl. hierzu die eindringliche Analyse von R. Zons, *Die Zeit des Menschen*

<sup>10</sup> P.N. Johnson-Laird, *The Computer and the Mind*, S. 382

raschung. Die Minimalanforderung an Maschinen, die uns überraschen, kann man so formulieren: „*Es gilt ein geschlossenes System (Äquivalent zu Organismus) zu konstruieren, das regulierte Kontaktstellen mit der Außenwelt besitzt. Jeder solche Kontakt muss als Information verarbeitet werden können. Und das geschlossene System muss ein Informationssystem von in sich reflektiertem Charakter sein.*“<sup>12</sup> Ob man diese Operationen dann als Fühlen und Verstehen empfindet und versteht, ist eine empirische Frage. Wie sein menschliches Pendant kann sich der Roboter als Hochstapler jedenfalls darauf verlassen, dass die Betroffenen betroffen werden wollen.

Diese Auskunft kann Philosophen natürlich nicht befriedigen. Ihnen müssen wir das Projekt der Robotik anders schmackhaft machen. Etwa so: Vicos Axiom „*verum et factum convertuntur*“ besagt im Kern, dass der Mensch nur versteht, was er macht. Er versteht die Welt genau in dem Maße, als er sich frei handelnd in ihr bewegt. Will er sich aber selbst verstehen, so muss er seinen handelnden Körper in einer Maschine wiederholen. Entscheidend ist hierbei folgendes: Das Projekt der Robotik ist technisch möglich, weil „Bewusstseinsakte [...] in Handlungsformen deponiert“<sup>13</sup> werden können. Und es ist dann eine Frage des menschlichen Gefühls, bzw. des „*effort after meaning*“, ob die technisch nachgebauten Handlungsformen von uns als Manifestationen von Bewusstsein empfunden werden. Ein anderes, objektiveres Kriterium gibt es nicht, denn Bewusstsein ist das an einem System, was man nur erkennen kann, wenn man das System ist.

Doch Maschinen Bewusstsein zuzuschreiben, heißt nicht auch schon, ihnen Selbstbewusstsein zuzuschreiben. Denn um einem mechanischen Gehirn Selbstbewusstsein anzukonstruieren, müsste man es in einer Sprache programmieren, die auf einer Metaebene gegenüber Begriffen wie Ich, Du und Selbst liegt – diese Metaebene gibt es aber nicht. Wenn wir Menschen „über“ Ich, Du und Selbst sprechen, nehmen wir Paradoxien in Kauf. „Paradoxien aber sind nicht als technische Objekte konstruierbar.“<sup>14</sup> Und daraus folgt, dass sich der Eindruck der Lebendigkeit von Robotern immer nur der technischen Implementierung von icerlebnisfrei-

en Bewusstseinszuständen verdankt. Speichern, Rechnen, Lernen und *pattern recognition* sind auch ohne Icherlebnis möglich (so ist Searles Chinese Room zu verstehen). Das Fazit für Philosophen würde dann lauten: Roboter haben Bewusstsein, aber kein Selbstbewusstsein – ähnlich wie Kleinkinder und Tiere. Der ideelle Gesamtprogrammierer wäre dann das Ich des Roboters, dessen Bewusstsein letztlich immer ein ferngesteuertes bliebe.

Raimar Zons hat eine Kritik (im Kantischen Sinne des Grenzziehens) des Posthumanismus vorgelegt, in der die Geisteswissenschaften von sich selbst Abschied nehmen und den Platz frei machen für eine neue Wissenschaft vom Künstlichen. Ihr Motto könnte Nietzsches Grundüberzeugung sein, dass der Mensch etwas sei, was überwunden werden müsse. Das Interessanteste an ihm ist das, was ihm fehlt; denn dieser Mangel öffnet den Menschen auf die Welt der Maschinen. Im Jargon der Philosophie heißt das: Um den Menschen als das Wesen, dem Wesentliches mangelt, in seinem Wesen zu denken, muss man vom Menschen wegdenken. Weg vom Menschen, d.h. hin zum Programm, das sein Wesen formt.

Dieser neue Weg des Denkens weg vom Menschen war aber von der hartnäckigen Fehlleitung der Anthropologie durch die Mensch-Tier-Unterscheidung verbaut. Schon der Computer als neue Leitmetapher, erst recht aber Bruder Robot bieten uns heute die Chance einer radikalen Umorientierung. Wir müssten wieder (wieder!) begreifen, dass der Mensch den Göttern und Maschinen ähnlicher ist als den Tieren. Man könnte hier anschließen an Descartes, der den Körper als Maschine modelliert hat; an Freud, der die Seele als Apparat entzaubert hat; und schließlich an Turing, der Menschen wie Computer gleichermaßen unter der Rubrik „datenverarbeitende Maschine“ subsumiert. Ganz in diesem Sinne findet sich in Raimar Zons Kritik des Posthumanismus der nüchternste aller Sätze: „*Der Mensch ist die Gesamtsumme seiner Daten.*“<sup>15</sup>

Menschen mit Maschinen, Apparaten und Rechnern zu vergleichen, ist aber mehr als bloßer Metaphernzauber. Denn soweit der Mensch von Verhaltensgesetzmäßigkeiten gelenkt ist, ist er in der Tat

<sup>11</sup> G. Staguhn, Tierliebe, S. 250

<sup>12</sup> G. Günther, a.a.O., S. 111

<sup>13</sup> A.a.O., S. 112

<sup>14</sup> A.a.O., S. 99 Anm

<sup>15</sup> R. Zons, a.a.O., S. 253



eine Art Maschine. Der ganze Sinn einer Wissenschaft wie der Soziologie besteht ja darin, zu zeigen, dass und wie Menschen Regeln folgen, weil es sie gibt. Dass das Geschehen dennoch als Freiheit erscheint, liegt daran, dass der Mensch eine Maschine ist, dessen Algorithmus man nicht kennt. Und dieses Nichtwissen ist sozial funktional. Man könnte diesen faszinierenden Sachverhalt vielleicht so zusammenfassen: Der Mensch ist eine Maschine, die von der Kultur so programmiert wurde, dass sie sich selbst nicht als solche erkennt.

Früher hat man Götter erfunden, um die Frage nach dem Wesen des Menschen zu beantworten; heute konstruiert man Roboter. Die beliebte Frage, ob Rechner denken, Sätze verstehen oder fühlen können, ist sinnvoll nur als die Frage nach der funktionalen Äquivalenz von Menschen und Computern. Heute stellt sich der Mensch die Frage nach sich selbst mit Hilfe des Roboters. Bruder Robot ist die

Frage nach dem Menschen als Gestalt. Oder nüchterner formuliert: Im Roboter wird die Einsicht, dass der Mensch eine durch und durch technisches Wesen ist, zur Gestalt. Indem wir Roboter konstruieren, ersetzen wir stellengenau die unlösbare Aufgabe der Selbsterkenntnis durch ein image mathématique im Sinne Valerys. Könnten Philosophen ihre Technikangst abstreifen, so würden sie sehen, dass in diesem mathematischen Bild genau das geboten wird, worum das Denken des Denkens seit 2500 Jahren vergeblich ringt: „Je mehr das Ich von sich selbst abgibt und in den Mechanismus verbannt, desto reicher wird es an reflexiven Einsichten in sich selbst.“<sup>16</sup>

Alle Roboter sind Computer, alle Computer sind Programme, und alle Programme sind Text, Geschriebenes. Das tritt zutage, wenn der Roboter kaputtgeht und der Schein seiner Autonomie zerreißt. Der wahrhaft autonome Roboter wäre ja ein Text, der

<sup>16</sup> G.Günther, a.a.O., S. 88

sich selbst schreibt – ähnliches hat man bisher nur von Gott erwartet. So lange alles gut geht, genügt die staunende Beobachtung der Oberflächen; wir nehmen alles *at face value*, d.h. *at interface value*. Hier erweist sich der autonome Roboter als das genaue Komplement zum computerilliteraten User – nichts erinnert mehr an die Schreibearbeit der Programme.

Auf beiden Seiten also, beim Menschen wie bei seinem Bruder Robot, wird das Entscheidende im Namen der Benutzerfreundlichkeit verhüllt. Das kann man kritisch beklagen und mehr Computer Literacy fordern. Man kann diese Entwicklung zur totalen Benutzerfreundlichkeit aber auch ganz anders interpretieren. Schon vor fünfzig Jahren hat Gotthart Günther den Verdacht geäußert, dass sich die Menschen der westlichen Welt nicht mehr mit den Formen des klassischen Denkens identifizieren, denen sie doch ihre technischen Triumphe verdanken. Die abendländische Rationalität ist dem modernen Menschen zur lästigen Bürde geworden. „*Er sucht diese Formen dadurch von sich abzu stoßen und sie innerlich zu überwinden, dass er versucht, sie aus seinem Seelenleben zu entlassen und in die Maschine, den denkenden Robot, zu verbannen.*“<sup>17</sup>

Hier schließt sich ein Kreis. Der Animismus war ein vorrationales Wissen von Leben und Seele, das uns der stolze Prozess der Aufklärung ausgetrieben hat. Ein Wissen von Leben und Seele unter Aufklärungsbedingungen zu reformulieren, war dann das Projekt der (unübersetzbar deutschen) Geisteswissenschaften. Und als alle Wissenden glaubten, man müsse den Geist als animistischen Rest aus den Geisteswissenschaften austreiben, um ihnen Anschluss an die triumphal erfolgreichen hard sciences zu verschaffen, rettete die Kybernetik diesen Geist im Konzept der Rückkopplung. Seither formiert sich eine neue Wissenschaft vom Künstlichen, in deren Paradies der Baum des Wissens vom Baum des Lebens nicht mehr zu unterscheiden ist.

Gleichzeitig aber schreitet die Entzauberung der Welt weiter fort – ohne unsere, der User, bewusste Teilnahme. Im Roboter hat die abendländische Rationalität ihr endgültiges Gehäuse gefunden, in dem sie von Menschen ungestört funktionieren kann; er nimmt die Last des klassischen Denkens von unseren Schultern. Der Mensch lebt in seinen künstlichen Paradiesen – Bruder Robot kümmert sich um die Details.

Literatur:

*Bolter, David Jay: Writing Space: The Computer Hypertext, and the History of Writing*, Hillsdale (1991)

*Gehlen, Arnold: Anthropologische und sozialpsychologische Untersuchungen*, Rowohlt Taschenbuch (1986)

*Günther, Gotthard: Beiträge zu einer operationsfähigen Dialektik*, Bd. 1. Meiner (1980)

*Johnson-Laird, Philip N.: The Computer and the Mind*, Harvard University Press (1989)

*Zimmerli, Walther Ch./Wolf, Stefan: Künstliche Intelligenz*. Philipp Reclam (1994)

*Lem, Stanislaw: Waffensysteme des 21. Jahrhunderts oder die verkehrte Evolution*. Suhrkamp-Taschenbuch (1983)

*Minsky, Marvin L.: The Society of Mind*, Touchstone Books (1988)

*Staguhn, Gerhard: Tierliebe. Eine einseitige Beziehung*, Carl Hanser (1996)

*Tiger, Lionel: The Pursuit of Pleasure*. Transaction Press (2000)

*Turing, Alan Mathison: Intelligence Service*. Schriften, Brinkmann, (1996)

*Turkle, Sherry: Life on the Screen*, Weidenfeld & Nicholson (1996)

*Varela, F.J./Thompson E./Rosch, E.: Der Mittlere Weg der Erkenntnis*. Goldmann (1995)

*Zons, Raimar Stefan: Die Zeit des Menschen. Zur Kritik des Posthumanismus*, Suhrkamp (2001)

<sup>17</sup> A.a.O., S. 114

# Gen- und Nanotechnologie

## Gen- und Nanotechnologie und die Würde des Individuums Prof. Dr. Christiane Ziegler

# und die Würde des Individuums

### *Prof. Christiane Ziegler*

ist Professorin für Technische Physik an der Universität Kaiserslautern. Sie ist Leiterin des Kompetenzzentrums „Nanotechnologie: Funktionalität durch Chemie“, Leiterin des Steinbeis-Transferzentrums „Grenzflächenanalytik und Sensorik“, wissenschaftliche Leiterin des Instituts für Oberflächen- und Schichtanalytik (IFOS) GmbH und von „NanoBioNet“ Netzwerk der Region Saar-Rheinhesen-Pfalz sowie Direktorin des Nano+Bio Zentrums der Universität Kaiserslautern. Ziegler studierte Chemie in Tübingen, promovierte und habilitierte am Institut für Physikalische und Theoretische Chemie.



Ich will Sie heute in ein Spezialgebiet der Nanotechnologie, nämlich in die Nanobiotechnologie entführen, weil ich das Gefühl hatte, das ist der Bereich, der am besten zu der Thematik dieses Kongresses hier passt. Dazu muss ich Ihnen erst mal erklären, was Nanotechnologie überhaupt ist. Nanotechnologie heißt, sich mit sehr kleinen Dimensionen zu beschäftigen. Ein Moskito, das wissen Sie selbst, ist einige Millimeter groß. Die roten Blutkörperchen, auf die es dieser Moskito abgesehen hat, sind schon um den Faktor 100 kleiner, das heißt, sie sind nur noch 10 Mikrometer groß. Die Membranen auf diesen Zellen sind kleiner als 100 Nanometer. Definitionsgemäß beschäftigt sich die Nanotechnologie mit all den Dingen, die mindestens in einer Dimension weniger als 100 Nanometer Ausdehnung haben.

Einzelne Moleküle und Atome haben gerade die Größe von einzelnen Nanometern, das heißt, wir beschäftigen uns hier mit etwas, was ein Millionstel Millimeter groß ist und die Größenordnung von einzelnen Bausteinen unserer Materie hat.

Es gibt nicht nur eine Nanotechnologie, es gibt eine ganze Reihe. Doch zuerst müssen Sie Nanostrukturen herstellen können. Das können Sie auch für die Nanoelektronik, da geht es um Strukturieren-

gen, Selbstanordnung. Sie müssen einfach etwas aktiv herstellen können, was eine Größe in Nanometerdimensionen hat. Das Zweite ist, dass Sie gerne Materialien entwickeln wollen. Sie wollen ja nicht nur irgendwas haben, was nanometergroß ist, sondern Sie wollen sehr häufig etwas mit einer bestimmten Funktion haben, zum Beispiel eine Antireflexschicht auf Ihrem Auto oder eine easy-to-clean-Beschichtung für Ihr Waschbecken oder eine bessere Prothese, das sind makroskopische Materialien, die Sie aber über Nanotechnologie modifizieren wollen und das beschreibt diesen zweiten Bereich. Das Dritte ist, Sie können herstellen was Sie wollen, wenn Sie nicht wissen, dass Sie es hergestellt haben, dann haben Sie ein Problem. Das heißt also, der Analytik von diesen Nanostrukturen kommt eine ganz große Rolle zu, denn Sie müssen wirklich einzelne Atome auch anschauen können.

Eines der Hauptgeräte dazu ist das Rasterkraftmikroskop. Ich habe hier etwas makroskopisch mitgebracht. Es ist so eine etwas schlabbrige Zunge und Sie sehen: Wenn ich da dagegendrücke oder ziehe, also Kräfte ausübe, dann verbiegt sich diese Zunge und dieses Verbiegen können Sie sehr empfindlich in ganz kleinen Größenordnungen messen. Wenn Sie jetzt über irgendeine Oberfläche



drüberfahren, dann kriegen Sie allein durch diese Wechselwirkungen eine Auslenkung und können so eine Abbildung von Oberflächen darstellen. Sie können das allerdings auch ganz anders einsetzen, und zwar können Sie sich vorstellen, wenn Sie diese Zunge nehmen und damit nicht über eine Oberfläche drüberraßern, sondern sie in etwas ganz Weiches reindrücken wie meine Haut, dann sehen Sie – sehen Sie wahrscheinlich nicht, aber Sie können sich vorstellen – dass das meine Haut eindellt, das heißt, auch so etwas wie Elastizitäten, Weichheiten können Sie nachweisen. Wenn ich jetzt einen Klebstoff hätte, dann würden Sie feststellen, wenn ich diese Spitze zurückziehen will, dass dann Kleb- oder Adhäsionskräfte wirken, das heißt Sie können über so einen ganz einfachen Biegebalken, wenn der nur klein genug und vorne nur scharf genug ist, ganz viele Eigenschaften über ein System auf der atomaren Skala charakterisieren.

Ein Beispiel, das Ihnen vielleicht erst mal etwas exotisch vorkommt, aus meiner Zeit in Tübingen, als ich mit Stas Gorp beim MPI zusammengearbeitet habe. Der interessiert sich vor allem dafür, warum Fliegen eigentlich an verschiedensten Oberflächen entlang laufen können, und zwar sowohl an Blättern, die wachsig sind, also wasserabstoßend, als auch an Blättern, die nicht wachsig sind und Wasser eher anziehen.

An den Fliegenfüßchen sind feine Härchen. Und wenn man sich das genau anguckt, dann stellt man fest, dass da ein Sekret rauskommt aus diesen Fliegenhärchen an den Füßen. Und man hat das Gefühl, dieses Sekret spielt irgend eine besondere Rolle. Ein Problem ist, dass Sie diese Tröpfchen, diese Fußspur, die die Fliege hinterläßt – manchmal sehen Sie sie auch als Dreck an Ihrer Fensterscheibe, meistens sind die aber so fein, dass Sie die kaum sehen können – sehr schlecht untersuchen können. Eine Möglichkeit ist das Rasterkraftmikroskop. Ich will jetzt hier nicht auf Einzelheiten eingehen, aber Sie können damit sozusagen die Klebrigkeit und die Eigenschaften von diesem Sekret feststellen und sehen, dass die Fliege etwas ganz Intelligentes macht, die macht nämlich eine Emulsion, so wie Milch, das heißt also, sie hat ölige Tröpfchen und wässrige Tröpfchen und je nachdem, welche Unterlage diese Härchen benetzen soll, spielt mehr das Eine oder das Andere die Vermittlerrolle, macht dann eine große Oberfläche und führt so dazu, dass die Fliege optimal haften kann, aber auch optimal sich wieder ablösen kann. Das ist nicht nur für die Biologen interessant, sondern ist natürlich auch interessant, wenn Sie neue Klebmaterialien entwickeln wollen, neue Pflaster zum Beispiel oder verschiedenste adhäsive oder antiadhäsive Systeme.

Es gibt noch einen ganz anderen Bereich, den Sie ebenfalls mit dem Rasterkraftmikroskop bearbeiten können: Dabei bilden Sie gar nichts ab, sondern lassen diesen Cantilever, wie dieser Balken heißt, einfach nur schwingen. Und wenn Sie den jetzt schwerer machen, indem Sie was draufbringen, dann stellen Sie fest, dass er viel langsamer schwingt. Das heißt, Sie können Masseänderungen ganz einfach über diese sogenannte Resonanzfrequenz von diesem Balken ausmessen. Das ist dann sehr interessant, wenn Sie auf diesen Balken bestimmte Erkennungsstrukturen, zum Beispiel Antikörper aufbringen, die dann ein bestimmtes Antigen erkennen. Das ist insbesondere interessant für die Medizindiagnostik. Sie alle wissen, wenn Sie irgendwie eine Probe an ein Labor einschicken, dauert es typischerweise einige Tage bis Sie ein Ergebnis bekommen. Aber es wäre sehr wichtig, dass man mit kleinsten Mengen in möglichst kurzer Zeit möglichst online sofort eine Dia-

agnostik bekommt. Und genau daran arbeiten wir, das mit solchen Cantilevern als Sensoren hinzubekommen. Für die, die sich ein bisschen auskennen: Eine Methode, mit der man das bisher auch machen kann, ist der Einsatz von sogenannten Schwingquarzen. Das sind die Quarze, die Sie in Ihren Quarzuhren haben, die schwingen auch ganz genau, so misst nämlich Ihre Uhr die Zeit. Und auch da können Sie Veränderungen der Resonanzfrequenz sehen, allerdings makroskopisch. Diese Cantilever sind sehr klein, das heißt das Ganze ist mikroskopisch und Sie sehen, dass das Kleiner-machen von dem System das Ganze tausendmal empfindlicher macht. Das bedeutet, dass Sie mit tausendmal weniger Material auskommen, außerdem können Sie ganz viele von diesen Systemen nebeneinander haben und so nicht nur auf einen Krankheitserreger, sondern auf ganz vieles nebeneinander testen.

Dann gibt es noch einen ganz anderen Sensor: Elektroden, im Prinzip ein Chip, der Ihnen elektrische Signale auslesen kann und darauf die Bausteine, die bei uns die elektrischen Signale liefern und bei uns die Daten verarbeiten, nämlich Nervenzellen. Da können Sie in so einem Invitro-System, also in so einer Art Petrischale hier das Gezucke von diesen Nervenzellen messen, ohne dass Sie irgendetwas tun, das heißt, die vernetzen sich von alleine und werden von alleine spontan aktiv und geben irgendwelche Signale ab. Gut, das ist erstmal ganz interessant, aber für die praktische Anwendung noch nicht besonders spannend. Wenn Sie jetzt aber irgendwas Neuroaktives zugeben, also zum Beispiel eine Droge oder ein Neuropharmakon, dann sehen Sie plötzlich ein geändertes Signalmuster in diesen Nervenzellen und es ist natürlich sehr interessant, dass Sie in der Pharmaforschung nicht nur feststellen, ob ein neues Pharmakon bestimmte Bindeeigenschaften hat. Das wird Ihnen jetzt erstmal nichts sagen, wenn Sie nicht aus dem Fach sind, aber es sind ganz einfache Reaktionen, ob A mit B reagiert oder nicht, was heutzutage in der pharmazeutischen Industrie getestet wird. Und anschließend muss man dann in den Tierversuch gehen, um zu testen, ob es tatsächlich die pharmakologische Wirkung im Organismus auch gibt, dass A an B angedockt hat.

Man kann hier etwas, was zumindest ähnlich ist,

zu einer In vivo-Reaktion mal als Vortest nehmen, ob sich tatsächlich die erwartete, die gewünschte Reaktion ergibt. Außerdem könnte es interessant sein als Drogentest für Ecstasy, LSD oder ähnliche neuroaktive Substanzen. Nun, was hat das mit Nanotechnologie zu tun? Da ist es besonders interessant für verschiedene technologische Anwendungen – auf die ich jetzt auch nicht näher eingehen kann – diese Zellen tatsächlich an bestimmten Stellen anzuhafte. Sie möchten die nämlich dort haben, wo die Signale auch abgegriffen werden und an diese Elektroden angebunden werden. Jetzt wollen diese Nervenzellen aber alles, bloß nicht an diese Elektroden ran. Also diese Verheiratung der Biologie mit der Technik ist nicht so einfach, wie es im Schema aussieht. Sie brauchen dazwischen so eine Art Wohlfühlteppich, der Ihnen die Bindung überhaupt vermittelt. Und seit 15 bis 20 Jahren sind die Leute daran, dieses so einfache Problem wie Zellhaftung an den Elektroden zu optimieren und ich muss sagen, wir sind immer noch alle miteinander verdammt weit weg davon, allein nur dieses In vitro-Anhaften von den Zellen langzeitstabil hinzubekommen. Es ist aber in gewissem Maße in solchen Hundert- bis Zweihundert-Nanometer-Strukturen möglich. Diese kleinen Knubbelchen hier, das sind die Nervenzellen, hier drunter ist so eine Elektrodenstruktur, die Nervenzellen tatsächlich an bestimmte Orte zu bringen, und auch das ist ein wichtiger Punkt.

Nun, die Vision ist natürlich, so etwas wie eine Prothese zwischen den Nervenzellen tatsächlich herstellen zu können. Auch hier haben Sie noch das ganz einfache Problem, dass Sie diesen Nervenzell-Elektroden Kontakt nicht gut herstellen können, rein technisch schon mal nicht. Geschweige denn, dass Sie bisher genau wissen, wie Sie diese Signale verstehen oder auslesen sollen. Man hat in der Zwischenzeit ganz einfache Systeme wie ein Hör-, ein sogenanntes Cochleaimplantat entwickelt. In 10 bis 20 Jahren gibt es vielleicht für bestimmte blinde Patienten, die eine bestimmte Degeneration der Netzhaut haben, die Möglichkeit, dass so kleine Chips die Netzhautfunktion ersetzen. Das wird dann aber nur so weit helfen, dass jemand, der komplett blind ist, überhaupt wieder ein bisschen Schwarz-Weiß-Kontrast sehen kann und sich ohne Blindenstock und Hund bewegen kann, aber

ohne Möglichkeit wirklich scharf zu sehen. Man ist also extrem weit davon entfernt, überhaupt nur unser jetziges Sehvermögen wieder herzustellen, geschweige denn irgendetwas so Utopisches wie diese Sehfunktion zu verbessern.

Nun, man kann auch Nanomaterialien ganz anders in der Medizin einsetzen, zum Beispiel kann man Nanopartikel für den Transport verschiedenster Dinge, zum Beispiel Medikamente im Körper benutzen. Nanopartikel sind dafür prädestiniert. Sie sind nämlich so klein, dass sie von einem Teil unseres Immunsystems, nämlich den Makrophagen, nicht als Fremdkörper erkannt werden. Erst Teilchen, die größer sind als die Nanopartikel, werden von dem Immunsystem erkannt, ansonsten hätten wir ja sofort eine Abwehrreaktion. Zum anderen sind sie auch so klein, dass sie zum Teil von den Zellen direkt über die Zellmembran aufgenommen werden können. Andere Möglichkeiten sind neue Biomaterialoberflächen, zum Beispiel für Prothesen, zum Beispiel in der Zahnmedizin. Nun ein spezielles Beispiel, das ein Mitglied bei uns im Kompetenzzentrum, Herr Jordan von der Charité in Berlin entwickelt hat und das im Moment auch sehr durch die Medien geht. Das sind magnetische Nanopartikel. Die haben gar nichts Besonderes, außer dass sie aus Eisenoxid sind, und das ist magnetisch. Wenn man die in die Nähe von Tumorzellen bringt, dann stellt man fest, dass diese Tumorzellen, wenn diese Nanopartikel eine bestimmte Beschichtung haben, diese besonders gern aufnehmen. Nun, Eisenoxid ist absolut nicht toxisch, das stört die Zellen erstmal gar nicht, aber Sie können jetzt ein magnetisches Wechselfeld einschalten und immer sozusagen die Magnetisierung hin und her schalten. Vielleicht haben Sie noch aus Ihrer Physikvorlesung so was wie eine Hysteresekurve im Kopf, und das, was da an Hysterese, wenn Sie die Magnetisierung einschalten, als Fläche übrig bleibt, wird einfach in Wärme umgewandelt. Das heißt, Sie haben Verluste und da wird es warm. Aber Zellen mögen es nicht besonders, wenn es warm ist, Sie alle wissen, bei 42 Grad Fieber fühlen Sie sich ziemlich schlapp und diese Krebszellen sind noch temperaturempfindlicher als normale Zellen. Das ist jetzt keine eigene Therapie, allerdings wenn Sie die zusammen anwenden, zum Beispiel mit der Che-



motherapie, dann ist das eine Möglichkeit, um diesen Krebszellen zusätzlich noch einen gewissen Kick zu geben und sie dadurch abzutöten. Diese Hyperthermie wird schon seit langem gemacht, aber über diese magnetischen Nanopartikel kann man dies wirklich nur gezielt in dem Tumor machen.

Über Nanotechnologie kann man Biomaterialien modifizieren: Wenn Sie sich eine Zelle vorstellen, dann hat die Zelle selber nicht Nanometer-Ausmaße, sondern eher Mikrometer-Ausmaße. Wenn Sie das Andocken an die Elektrode betrachten, sind das lauter Prozesse, die entlang von dieser Zellmembran ablaufen und es sind Abstände und Größenordnungen von einigen Nanometern bis einigen hundert Nanometern. Ein sehr schönes biokompatibles Material wie Kohlenstoff können Sie eventuell so nanostrukturieren, dass Sie ganz gezielt solche Adhäsionsstrukturen einbringen können. Zellen mögen manchmal lieber raue Oberflächen, die also ein bisschen wellig sind, manche Zellen mögen lieber glatte Oberflächen. Auch hier gilt: Diese Adhäsionsstrukturen sind bei weitem noch nicht bekannt, auch hier ist noch eine enorme Menge an Grundlagenforschung nötig, um überhaupt festzustellen, welche Zelle eigentlich was mag. Und dann können Sie anschließend, wenn Sie

etwas produziert haben und vielleicht irgendwann mal die Mechanismen verstanden haben, zwei Sachen optimieren: Das eine ist, Sie wollen Zelladhäsion, das ist für alle Implantate wichtig. Sie wollen, dass Ihr Hüftgelenk einwächst oder dass ein Zahnimplantat einwächst. Auf der anderen Seite wollen Sie außen am Zahn keine Zahnbeläge haben, Sie wollen in einem Lebensmittelkessel keine Beläge haben, Sie wollen außen am Schiff keine Algen haben, Sie wollen insbesondere in den Klimaanlage weder hier noch in Ihrem Auto irgendeinen Bakterienbefall haben, weil es dann so komisch müffelt, das heißt überall dort wollen Sie keine Zelladhäsion haben.

Und deswegen kann man die Sachen, die man in der Medizin entwickelt, wie diese bioziden Oberflächen, zum Beispiel auch in der Lebensmittelindustrie benutzen. Man kann auch versuchen, Membranen zu optimieren und das gilt auch für die Textilindustrie, für die Sie zum Beispiel neue Materialien zur Applikation von pharmazeutisch aktiven Substanzen oder bioabbaubare Textilien entwickeln wollen.

Nun, ich komme jetzt noch zu einigen Zukunftsvisionen, das ist ja hier etwas die Thematik. Ein Movie von einer Gruppe aus Cornell zeigt einen molekularen Motor, der direkt in der Zellmembran vorkommt. Ein Motor, der in der Membran rotiert. Und diesen rotierenden Motor können Sie nehmen und können ihn so verändern, dass Sie da irgendwas dranbasteln. Sie können auf jeden Fall so etwas wie einen Propeller dranbauen.

Sie haben die Möglichkeit, diese Motoren an so kleine „Hütchen“ anzuheften und damit irgendetwas zu bewegen, wie so eine Art Rührer sag ich jetzt mal, oder man kann sich vorstellen, dass man da jetzt irgend etwas selektiv, also irgendwelche Erkennungsstrukturen draufbringt, damit etwas einfängt und zu irgendeiner anderen Stelle rotiert. Die große Frage ist, kann man diese Dinger auch benutzen, um damit durch die Adern durchzuflitzen. Sie alle kennen diese Vision von irgendwelchen Robotern, die tatsächlich durch unsere Adern durchgehen. Doch das ist noch eine riesengroße Frage, ob das funktionieren wird, weil alleine die Tatsache, dass etwas rotiert, noch lange nicht heißt,

selbst wenn es das in Flüssigkeit tut, dass das auch in irgendeiner Form einen Vortrieb gibt. Wenn Sie sich einen Motor angucken, dann müssen zum Beispiel die Schiffsschraube oder ein Propeller die Flüssigkeit vertreiben um einen Vortrieb hinzubekommen. Und das ist bis heute noch absolut ungeklärt, das hat mit Nanotechnologie noch nicht mal was zu tun, das ist noch in den Nanowissenschaften. Kein Mensch weiß, ob so ein Propeller – der selber Ausmaße hat, dass in die Grube gerade mal einzelne Wassermoleküle reinpassen – überhaupt eine Verdrängung von Wasser hervorrufen kann oder nicht. Und deswegen wollen wir auch hier wieder das Rasterkraftmikroskop benutzen, hier unten einen solchen Motor dranbasteln und einfach mal angucken, was der tut. Ich habe Ihnen vorher gesagt, dass Sie hier ganz kleine Auslenkungen sehen können, und wenn dieser Motor jetzt tatsächlich einen Vortrieb erzeugt, dann sollte diese Feder sich verbiegen in die eine oder andere Richtung, es kann ja auch sein, dass der Motor gerade einen Rückwärtsgang eingelegt hat. All das wissen wir nicht und es wäre natürlich interessant zu wissen, wenn es denn geht, ob Sie so was beeinflussen können. Wie gesagt, kein Mensch weiß, ob es prinzipiell physikalisch möglich ist. Allerdings weiß auch noch kein Mensch, dass es prinzipiell nicht möglich ist und deswegen finde ich das spannend.

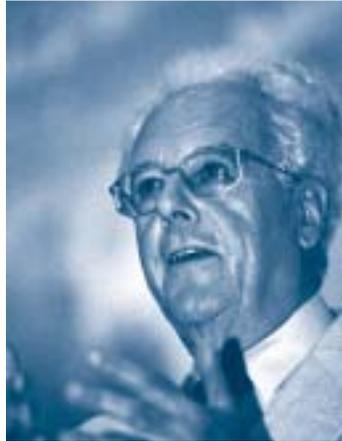
So, und was Sie hier sehen, ist von der NASA ein Video, das Ihnen eben genau solche Miniroboter hier sehr artifizuell gezeigt darstellt, wie die durch die Adern flitzen. Es ist nämlich eine von den größten Fragen, wie sich solche Miniroboter im Blutstrom verhalten. Wenn Sie sich den Blutdruck angucken, es ist unglaublich, was da an Kraft herrscht, dass da irgendwas gegen den Strom schwimmt ist schon mal mehr als unwahrscheinlich. Und wenn Sie mich jetzt irgendwann nachher auf dem Podium fragen, ob irgendjemand solche Dinger herstellen würde, nicht um Krankheiten zu bekämpfen, sondern als kleine Kriegsmaschinen, dann würde ich sagen: Absoluter Blödsinn, weil die Natur hat schon perfekte Maschinen hergestellt, die absolut selbstreplizierend sind, dass es aus meiner Sicht völliger Wahnsinn wäre, nicht einfach Viren oder Bakterien zu nehmen und stattdessen solche Nanoroboter zu entwickeln.

# Ist Gentechnik überhaupt

## Ist Gentechnik überhaupt noch ein Streitfall? *Hans Mohr* noch ein Streitfall?

### *Prof. Dr. Hans Mohr*

war von 1992 bis 1996 Mitglied des Vorstands der Akademie für Technikfolgenabschätzung. Von 1960 bis zu seiner Emeritierung 1997 wirkte er als Professor für Biologie an der Universität Freiburg i.Br. Seine Forschungsschwerpunkte waren vor allem Molekulare Grundlagen der Entwicklung; Biologische Signalreaktionsketten, Nitratassimilation. Mohr studierte Biologie, Physik und Philosophie und promovierte 1956 an der Universität Tübingen. Die Universitäten Strasbourg (Frankreich) und Limburg (Belgien) verliehen ihm die Ehrendoktorwürde.



Meine Aufgabe ist es, einige Argumente zugunsten der Gentechnik vorzutragen. Gentechnik ist ein Methodenarsenal! Man bezeichnet mit „Gentechnik“ die Summe aller Methoden zur Isolierung, Charakterisierung, gezielten Veränderung und Übertragung genetischer Substanz.

Gentechnik wird vorrangig im Rahmen biotechnologischer Verfahren praktisch wirksam. „Biotechnologie“ umfasst die technisch gesteuerte Produktion organischer Substanz durch Lebewesen. Biotechnologie bildet seit dem Neolithikum die Grundlage unserer Kultur – Landwirtschaft, Tierzucht, Getreide, Brot, Milch, Käse, Wein, Bier, Heilmittel, Gewürzdrogen...; Gentechnik gibt es seit 30 Jahren.

### **Was hat die erprobte Biotechnologie mit der jungen Gentechnik zu tun?**

Die neue Biotechnologie zeichnet sich dadurch aus, dass sie gentechnische – oder andere molekularbiologische Verfahren einsetzt, um die Produktion und die technische Nutzung organischer Substanz zu optimieren.

Ein Beispiel: Von meinem früheren Laboratorium am U.S.D.A. in Beltsville wurde kürzlich eine neue Tomatensorte der Praxis vorgestellt. Diese Sorte

besitzt, wie man sagt, eine hohe biologische Wertigkeit. Die Früchte enthalten besonders viel Lycopin. Dieser rote Farbstoff, der die Farbe der reifen Tomate maßgeblich bestimmt, gilt als Radikalfänger, als Antioxidans. Derartige Moleküle schützen unsere Gewebe vor Krebs.

Die Tomate ist eine alte Kulturpflanze. Sie wurde bereits von den Indianern Mexikos und Perus kultiviert und gezüchtet. Ihre Bedeutung in anderen Teilen der Welt hat die Tomate freilich erst im 20. Jahrhundert – dank der modernen Züchtungsverfahren – gewonnen. Da man bis vor kurzem von der wohltätigen Wirkung des Lycopins nichts wusste, legte man bei der Züchtung der Tomatensorten keinen besonderen Wert auf den Lycopingehalt. Man versuchte vielmehr, den  $\beta$ -Carotingehalt der Tomaten auf Kosten des chemisch verwandten Lycopins zu vergrößern.  $\beta$ -Carotin ist bekanntlich eine Vorstufe des Vitamin A, dem wir unser Sehvermögen verdanken.

Jetzt möchte man den Gehalt an Lycopin steigern. Mit den Methoden der klassischen Züchtung ist dies schwierig und langwierig. Die Nutzung der Gentechnik hingegen – in diesem Fall ein genetischer Eingriff in das Regulationsgeschehen – erlaubte

eine schnelle und zielsichere Lösung des Problems. Die Pflanzenphysiologen haben nämlich gezeigt, dass die Reifung der Tomate von zwei antagonistisch wirkenden Substanzen gesteuert wird, von dem Reifungshormon Äthylen einerseits und dem retardierenden Faktor Spermin, einem Polyamin. Das Zusammenspiel der beiden Substanzen bestimmt die Geschwindigkeit des Reifeprozesses und damit auch den Endgehalt der Frucht an Lycopin.

Der genetische Eingriff in das Regulationsgeschehen bewirkte einen höheren Pegel an retardierendem Polyamin. Dies verzögert die Reifung und steigert den Gehalt an Lycopin.

Dies ist, mit dürren Worten dargestellt, ein typisches Beispiel für Grüne Gentechnik der Stufe 2: Es geht auf dieser Stufe vorrangig um die qualitative Verbesserung des Ertragsguts bereits bestehender Kulturpflanzen. Ich hoffe, Sie verstehen die Faszination meiner Kollegen: Sie können schnell und genau das herstellen, was die Menschen brauchen.

Ein zweites Beispiel, Ihnen allen im Prinzip bekannt, ist das Humaninsulin. Humaninsulin, ein Peptidhormon, wurde als erstes menschliches Hormon gentechnisch über Bakterien, denen das Insulingen eingepflanzt worden war, hergestellt. Humaninsulin ersetzt den bisher mühsam aus Rinder- und Schweinepankreas isolierten artfremden (und damit antigenaktiven) Wirkstoff bei der Therapie der wichtigsten endokrinologischen Erkrankung des Menschen, dem Diabetes mellitus.

Humaninsulin ist aus der Therapie nicht mehr wegzudenken. Niemand agitiert heute noch gegen Humaninsulin. Wir sollten aber im Gedächtnis behalten, dass es in unserem Land 16 Jahre gedauert hat, von 1981-1997, bis die Firma Hoechst schließlich die Betriebsgenehmigung für die industrielle Herstellung von Humaninsulin erhalten hat. Ich habe die Kampagne gegen das Humaninsulin seinerzeit aus der Nähe verfolgen können. Es ging den Wortführern nicht um Ethik oder Risikoanalyse – dafür waren sie gar nicht kompetent –, sondern um das politische Durchsetzen von Vorurteilen gegen eine Basisinnovation.

Vor dem Hintergrund dieser beiden Fallstudien fasse ich meine Apologetik der Gentechnik zusammen: Wir billigen der Gentechnik – aufgrund der durchweg positiven Erfahrungen in Medizin, Pharmazie, Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion – ein

enormes Potenzial zu. Ähnlich hoch schätzen wir die Bedeutung der Gentechnik in der biologischen und biomedizinischen Grundlagenforschung ein: Die modernen Forschungsfelder der Entwicklungsgenetik und der experimentellen Medizin sind ohne Gentechnik nicht denkbar.

Eine neue Dimension im Umgang mit Genen eröffnet die funktionelle Genomanalyse, „functional genomics“. Es geht darum, über die Genomsequenzierprojekte hinaus die Strukturgene des menschlichen Genoms – und die der übrigen Modellgenome – zu identifizieren (zu „entziffern“), ihre Funktion zu beschreiben und die Regulation der Genexpression durch Steuergene und Umweltfaktoren aufzuklären. Die umfassende funktionelle Genomanalyse, der Weg von der Bauanleitung zum Organismus, ist die eigentliche Herausforderung für die molekulare Biologie. Technisch sind wir dabei, den Funktionszustand einzelner Gene in einem Gewebe auf dem Niveau der Proteine möglichst quantitativ zu erfassen. Durch derartige Expressionsanalysen lässt sich – so erwartet man – die Entstehung bestimmter Krankheiten durch defizitäre oder übersteigerte Genexpression ebenso verstehen wie die Verstärkung erwünschter und die Dämpfung unerwünschter metabolischer Leistungen in der Pflanzenzüchtung.

Die ethische Reflexion hat in der Molekularbiologie von Anfang an eine wesentliche Rolle gespielt. Ethik, das philosophisch-disziplinierte Nachdenken über das angemessene Orientierungswissen, ist längst in die Biologie eindiffundiert. Ein Schwerpunkt ethischer Reflexion in der Biotechnologie betrifft die Einschätzung der Risiken, auf die man sich einlässt, wenn man Gentechnik praktisch einsetzt.

Natürlich muss man in Forschung und Praxis Vorsichtsmaßnahmen treffen, wenn man Neuland betritt. Und dies können erfahrungsgemäß die Fachleute selber am besten. Erinnern möchte ich nur an die Richtlinien, die 1975 aus den Diskussionen der Asilomar-Konferenz über rekombinante DNA entstanden sind.

Die Bedenken kamen auf, weil damals viel mit rekombinanten Viren gearbeitet wurde. Die Forscher hatten Angst davor, dass sich ein unvorhersehbarer und nicht beherrschbarer Vorfall mit den Viren ereignen könnte. Daraufhin wurden von den Wissenschaftlern selbst Richtlinien für gentechnologisches Arbeiten und für die Entwicklung von



sicheren Vektoren und Bakterienstämmen aufgestellt, die dann in den wichtigen Forschungsnationen in Kraft gesetzt wurden. Philosophen und Theologen waren an dem ethischen Unternehmen nicht beteiligt. Sie hatten seinerzeit das neue Zielgebiet noch gar nicht entdeckt. Die Fachleute waren unter sich, als es um die Debatte der potenziellen Risiken und um angemessene Konsequenzen ging. Aus heutiger Sicht waren die meisten der Vorsichtsmaßnahmen nicht nötig. Man ist weit übers Ziel hinausgeschossen. Dennoch halte ich die Asilomar-Konferenz für einen Meilenstein in der Geschichte der Biologie. Sie zeigte die ethische Kompetenz der beteiligten Forscher. Das Ereignis hat auch mich seinerzeit persönlich geprägt. Wir haben im Kontext der Asilomarkonferenz auch über die Einbindung der neuen Biotechnologie in die Wirtschaft nachgedacht, bis hin zum Verkauf patentierter Genfunktionen an die praktischen Pflanzenzüchter. Ich trage Ihnen einige Formulierungen vor, auch wenn die Wortwahl Ihnen vielleicht veraltet vorkommt.

Die moderne Wirtschaft – so habe ich damals argumentiert – wäre ein absurder Vorgang, wenn das Ziel der Produktion die Produkte wären. Das eigentliche Ziel ist ein immaterielles Gut, nämlich „menschliches Glück“. Das Glück der Menschen ist an materielle Güter gebunden, aber nicht mit ihnen identisch.

Die theoretische Vernunft des Homo oeconomicus beurteilt die Effizienz des Mitteleinsatzes im Hinblick auf ein vorgegebenes Ziel; die praktische Vernunft des Homo sapiens beurteilt die Vernünftigkeit der Ziele und Zwecke. Ich weiß, dass mein Plädoyer für Biotechnologie in Medizin und Landwirtschaft nur dann glaubwürdig und überzeugend ist, wenn es vor der praktischen Vernunft im Kant'schen Sinne bestehen kann.

In den Laboratorien herrscht derzeit eine Aufbruchsstimmung wie 1975.

Viele meiner jungen Kollegen glauben, dass sich die Auseinandersetzung um die Gentechnik, besonders um die Grüne Gentechnik, mit dem Fortschreiten der „functional genomics“ auflösen wird, weil der Konflikt seine Basis, unbegründete Ängste, verliert. Wir verstehen immer besser, was wir tun, und warum wir etwas tun. Die Risikoszenarien sind weitgehend entkräftet. Die EU-Kommission zum Beispiel hat bislang 81 Projekte der biologischen Sicherheitsforschung bewertet, und in keinem der Projekte konnten Gefahren nachgewiesen werden.

Auch das öffentliche Meinungsklima hat sich neuerdings in Sachen Gentechnik, auch gegenüber der Grünen Gentechnik, geradezu dramatisch verbessert: Für manche meiner Kollegen ein Grund zur Euphorie!

Aber wir sollten uns nicht täuschen. Die Gentechnik wird anfällig bleiben für Verständigungsschwierigkeiten zwischen den Fachwissenschaften und der Öffentlichkeit.

Dies hat vor allem zwei Gründe:

Erstens, der Einsatz der Gentechnik in der biotechnologischen Praxis wird in der Öffentlichkeit weit stärker beachtet als wir es von anderen praktischen Anwendungen unseres kognitiven Wissens gewohnt sind. Dies hängt mit dem Gefühl unmittelbarer existentieller Betroffenheit zusammen. Das implizierte Sachwissen ist indessen ein Expertenwissen geblieben. Die meisten Menschen wissen viel zu wenig von Genetik und Molekularbiologie als dass sie mit dem Fachmann einen rationalen Dialog über gentechnische Fragen führen könnten. „Betroffenheit“ tritt an die Stelle von Kompetenz und Urteilsfähigkeit.

Unter diesen Bedingungen kann man die Menschen nahezu beliebig ins Bockshorn jagen. Die derzeitige Aufregung in England über den BBC-Thriller „Fields of Gold“ ist dafür bezeichnend. In dem Science-fiction-Film geht es um den horizontalen Transfer einer Vancomycin-Resistenz von einem transgenen Weizen in das Bakterium *Staphylococcus aureus*, mit der Konsequenz einer tödlichen und unkontrollierbaren Ausbreitung von Staphylokokken-Infektionen.

Das Drehbuch widerspricht allen einschlägigen Erfahrungen der Wissenschaft: „If genes moved with any frequency from plants to bacteria, we would find them in bacterial genomes. We don't.“ So hat der Molekularbiologe Peter Lund dieser Tage unser Wissen auf den Punkt gebracht. Aber weder der Präsident der Royal Society noch die Statements der besten Fachleute konnten gegen die ausbrechende Hysterie etwas bewirken.

Die Möglichkeiten, durch Aufklärung zu einem Konsens beizutragen, erweisen sich selbst in England als begrenzt. Auch unsere lokalen Konsensuskonferenzen in Sachen Gentechnik haben in der Regel ihr Ziel verfehlt.

Die meisten Ökobauern zum Beispiel, mit denen ich zu tun hatte, lehnten nicht nur „direkte Eingriffe in das Erbgut“ ab, was immer dieser Ausdruck bedeuten mag, sondern auch die Befassung mit den Erkenntnissen der modernen Genetik.

Dies hat gelegentlich paradoxe Konsequenzen. So wird der Gattungshybrid zwischen Weizen und Roggen, Triticale genannt, ohne erkennbare Skrupel im ökologischen Anbau eingesetzt, obgleich bei der Herstellung von Triticale (um 1980) ganze Genome gemischt wurden.

Zweitens, absichtlich oder fahrlässig wurde die Gentechnik und die neue Biotechnologie in die öffentliche Debatte um die eher bizarren Blüten der Fortpflanzungsmedizin hineingezogen: Extrakorporale Befruchtung, Leihmütter, pränatale Diagnostik, reproduktives Klonen, therapeutisches Klonen ... alles firmierte unversehens unter Gentechnik. In der biopolitischen Debatte um die Stammzellenforschung zeigt die Auseinandersetzung zwischen der Wissenschaft und der politischen Öffentlichkeit geradezu tragische Züge. Die Verwirrung in der Sache und der Mangel an ethischer Stringenz haben die Fachleute schockiert. Aus einem rationalen Diskurs, auf den wir eingestellt

waren, entwickelte sich eine von den Medien und den Kirchen geschürte Phantomdebatte.

Was können wir besser machen? Die Fehlschläge im Umgang mit der Öffentlichkeit zeigen, dass die erprobten wissenschaftsimmanenten Diskursformen, die wir beherrschen, keine hinreichende Basis für den öffentlichen Diskurs bieten. Forschung und Wissenschaft sind weiten Bereichen der modernen Gesellschaft fremd geblieben. Wir müssen anders vorgehen. Es gibt neue Ansätze.

Der Codex Alimentarius zum Beispiel, der von einer Intergovernmental Task Force der FAO und der WHO unter dem Titel „Principals for the risk analysis of foods derived from biotechnology“ ausgearbeitet und dieser Tage verabschiedet wurde, hat offenbar sowohl bei den Konsumenten als auch bei den Produzenten und dem Handel Zustimmung gefunden. Unter den Fachleuten gilt der Codex heute bereits als ein gelungenes Regelwerk für den Umgang von Wissenschaft und Öffentlichkeit. Auch insofern hat die Gentechnik neue Dimensionen eröffnet. Vielleicht lernen wir es allmählich, die Menschen für deren Wohl zu arbeiten, für unsere Arbeit zu gewinnen. Wir leben besser, weit besser, als jemals Menschen vor uns gelebt haben. Wer dies nicht anerkennt, weiß einfach nicht oder will es nicht wissen, wie unsere Vorfahren gelebt und gelitten haben und wie die meisten von ihnen gestorben sind. Die Menschen unserer Zeit verdanken ihr gutes Leben den Naturwissenschaften und ihren Technologien. Die Erwartung indessen, hier folge ich Hubert Markl, dass die Wissenschaft für das, was sie für die Menschen tut, auch noch geliebt wird, ist ebenso realistisch wie die Erwartung der Amerikaner, dass die Vereinigten Staaten von den übrigen Nationen geliebt werden, weil sie der Welt eine wunderbare Verfassung geschenkt haben.

Aber es lohnt dennoch, sich immer wieder um Vertrauen und Zustimmung zu bemühen. In diesem Sinn mögen Sie meine Anmerkungen zur Gentechnik verstehen.

Und noch eines unter Freunden:

Natürlich gehört der neuen Biotechnologie die Zukunft! So wie ich meine Zeitgenossen kenne, wird es nicht viele geben, die tatsächlich auf Lycopin und Humaninsulin verzichten – um bei diesen schlichten Beispielen zu bleiben –, wenn Gesundheit und Leben auf dem Spiel stehen.

Literatur kann per e-mail abgefragt werden: [adobatti@biologie.uni-freiburg.de](mailto:adobatti@biologie.uni-freiburg.de)

# Die Maschinisierung des Menschen: Gen- und Nanotechnologie und die Würde des Individuums

Kommentar *Regine Kollek*

## *Prof. Dr. Regine Kollek*

ist seit Oktober 1995 Professorin für Technologiefolgenabschätzung der modernen Biotechnologie in der Medizin an der Universität Hamburg. Arbeitsschwerpunkte: Konzeptionelle Weiterentwicklung der Technikfolgenabschätzung und -bewertung der modernen Biotechnologie in der Medizin und Durchführung von TA-Projekten in den Bereichen Reproduktionsmedizin, Gendiagnostik und Neurobiologie. Stellvertretende Vorsitzende des Nationalen Ethikrates und Mitglied im International Bioethics Committee der UNESCO.



Dieser Teil der heutigen Veranstaltung steht unter dem Titel: „Die Maschinisierung des Menschen. Gen- u. Nanotech und die Würde des Individuums.“ Im Zusammenhang mit Technologien, die, wie die Gentechnik auf der Ebene der Makromoleküle, oder wie die Nanotechnik auf der der Atome operieren, scheint der Begriff der Maschine auf den ersten Blick etwas unpassend zu sein. Dennoch verweist er auf ein Konzept, das in der modernen Naturwissenschaft eine lange Geschichte und einen zentralen Stellenwert hat.

Einer seiner prominentesten Vertreter ist der französische Philosoph Julian Offray de la Mettrie (1709-1751). Bereits im 18. Jh. entfaltete er seine mechanistisch-rationalistische Vision vom „l’homme machine“, in der er den menschlichen Organismus als Maschine konzeptualisierte, die in ihren wesentlichen Funktionen den Gesetzen der Mechanik und Hydraulik folgt. La Mettries kaum zählbare Vorläufer und Nachfahren haben dieses Konzept variiert und ausdifferenziert. Aufschwung bekamen solche Maschinenmodelle immer dann, wenn neue wissenschaftliche oder technische Errungenschaften neue Einsichten und Interventionsmöglichkeiten in zuvor nicht zugängliche Bereiche der Natur eröff-

neten. Aus den entsprechenden historischen Zeugnissen lassen sich relativ konstante Beweggründe herausdestillieren, die die Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit des Maschinen-Paradigmas erhellen. Einer dieser Beweggründe scheint das Bedürfnis zu sein, auch die menschliche Natur der wissenschaftlichen Rationalität zu unterwerfen. Das Modell der Maschine spielt dabei in zweierlei Hinsicht eine wichtige Rolle. Zum einen sind Vorgänge, die sich im Innern des Körpers abspielen nur indirekt über physikalische oder chemische Verfahren sichtbar zu machen. Bei der Konzeptualisierung oder Darstellung molekularer oder atomarer Phänomene und Prozesse greift die menschliche Vorstellungskraft auf Bewegungs- oder Wirkungsmodelle zurück, die ihr aus der Mesowelt der menschlichen Erfahrung vertraut sind. Weniger als um eine funktionelle Analogie oder Erklärung handelt es sich bei der Anwendung des Maschinenbegriffs auf den Organismus jedoch um eine metaphorische Beschreibung. Sie leistet das, was Metaphern für gewöhnlich tun: sie verbinden in einem sprachlichen Bild – wie beispielsweise dem des „L’homme machine“ oder dem der „molekularen Maschine“ – zwei kategorial von einander getrenn-



te Bereiche: das Sichtbare mit dem Unsichtbaren, das Abstrakte mit dem Konkreten, oder das Bekannte mit dem Unbekannten.

Die Anwendung der Maschinen-Metapher auf die Prozesse im Innern des menschlichen Körpers und seiner Zellen suggeriert dabei, dass ihre Funktion wie die einer vom Menschen konstruierten Maschine zu verstehen ist. Damit soll nicht in Abrede gestellt werden, dass die Kontrolle physiologischer Prozesse punktuell nicht auch gelingen kann. Die Frage ist nur, ob die erzielten Effekte ein Beweis für die theoretische Angemessenheit des Maschinenmodells sind, oder eher das Zufallsresultat einer Versuchs- und Irrtums-Strategie.

Wichtiger als dieser metaphorische Aspekt des Maschinenmodells ist jedoch zweitens seine wissenschaftstheoretische Bedeutung in der Erklärung komplexer biologischer Prozesse und Phänomene, wie beispielsweise der Vererbung oder Entwicklung. Im experimentellen Forschungsprozess wird die Komplexität solcher Phänomene zunehmend reduziert; es erfolgt eine Konzentration auf immer kleinere, scheinbar grundlegenden Prozesse und Einheiten. Grundsätzlich spricht nichts gegen eine solche experimentell-praktische Reduktion. Bei der Erforschung komplexer Phänomene, hat sie sich als außerordentlich erfolgreiches Analyseverfahren erwiesen. Entscheidend ist jedoch, wie die aus guten Gründen gemachte Zerlegung in einzelne

Bestandteile oder Prozesse bei der gedanklichen Rekonstruktion des komplexen Phänomens oder Gegenstandes – beispielsweise einer Krankheit – wieder berücksichtigt wird.

In vielen Umkehrungen dieses reduktiven Vorgehens der experimentellen Naturforschung zeigt sich, dass die im Zuge der Analyse gemachten Beschränkungen, wie der Philosoph Peter Janich es einmal formulierte, „nun als Hypothek für die neue Gegenstandskonstitution auftreten“. Während die Reduktion auf wenige Komponenten bestimmte Aspekte komplexer Zusammenhänge erfolgreich klären hilft, führt das umgekehrte Vorgehen häufig dazu, den Menschen nur noch als physikochemisches System aufzufassen, und dabei noch nicht einmal mehr originär biologische Prozesse adäquat zu beschreiben. Der Mensch wird dann als komplexe Maschine begriffen, die aus Millionen und Milliarden kleinster und einfacherer Maschinchen (Zellen oder deren Subsysteme) besteht, die als Ionenkanäle das elektrische Potenzial von Zellmembranen regeln, als Replikationskomplexe die Erbsubstanz verdoppeln, oder als Ribosomen an der Synthese von Proteinen beteiligt sind, die dann wiederum planvoll in Organe oder Gewebe integriert werden. Dabei geht häufig genug die Aufmerksamkeit für die Frage verloren, wie das, was unmittelbar genetisch bedingt ist, von genetisch nur mittelbar oder nicht beeinflussen zu unterscheiden ist. Am Ende kommen nur

noch solche Phänomene in den Blick, die zuvor kausal auf genetische und chemische Prozesse reduziert werden konnten.

So gesehen kann die Molekularbiologie beispielsweise mit dem Begriff der Würde nichts anfangen. Sie lässt sich nicht durch molekulare Prozesse beschreiben, und gehört demzufolge nicht zum Gegenstandsbereich dieser Disziplin.

### **Realisierung gen- und nanotechnischer Visionen: Traum oder Alptraum?**

Gentechnik und Nanotechnik ermöglichen menschliche Eingriffe in submikroskopische Bereiche. Moleküle und Atome können in nie zuvor gekannter Präzision analysiert und manipuliert werden. Dabei werden die Möglichkeiten der Gentechnik durch nanotechnische Errungenschaften erweitert und verstärkt. Durch Miniaturisierung auf den Nanomaßstab sollen genetische Analysen noch schneller, genauer und umfangreicher durchgeführt werden können, als mit den gerade auf den Markt kommenden DNA-Chips oder gar mit herkömmlichen Gentests. Darüber hinaus werden neue Vektor-Moleküle für den Transport von therapeutischen Genen entwickelt, die die Begrenzungen und Risiken derzeitiger viraler Transportmoleküle für die Gentherapie überwinden sollen. Schließlich werden mithilfe der Nanotechnologie eine Vielzahl neuer therapeutischer Ansätze entwickelt, die (nicht nur) den Krebs endgültig besiegen sollen.

Ich habe wenig Zweifel daran, dass es auf diesem Wege gelingen wird, immer zielgenauere Medikamente zu entwickeln, die exakt am Ort ihrer Bestimmung, z.B. einen Rezeptor, andocken und dort ihre Wirkung entfalten. Je weitreichender und komplexer diese Wirkungen jedoch sind, desto schwieriger wird es, sie vorherzusagen und kontrollieren zu können. Dies betrifft zum einen die Wirkungen im Organismus des behandelten Menschen selber, zum anderen aber auch diejenigen, die über das Individuum hinaus gehen. Solche Effekte sind vor allem dann zu erwarten, wenn gen- oder nanotechnische Veränderungen dauerhaft im menschlichen Körper verankert werden.

Vor allem von angelsächsischen bzw. US-amerikanischen Wissenschaftlern wird die Diskussion möglicher Eingriffe in die menschliche Keimbahn vorangetrieben. Vorausgesetzt, solche Eingriffe wären gezielt und ohne das Risiko einer unerwünschten

Veränderung bzw. Mutation in anderen Genen möglich, dann sei die Menschheit es sich schuldig, solche Eingriffe nicht nur mit therapeutischen Zielsetzungen, sondern langfristig auch mit dem Ziel der Verbesserung der genetischen Ausstattung vorzunehmen. So lautet jedenfalls das Credo der Befürworter von Keimbahnintervention.

Ähnlich weitreichende Visionen wie im Diskurs um die Keimbahninterventionen finden sich auch bei einzelnen Protagonisten der Nanotechnik. Erik Drexler (Institute for Molecular Manufacturing) glaubt sogar, dass Roboter im Nanoformat, die Nanobots, Vereisungsschäden in den Zellen kryokonservierter Leichen eines Tages so weit reparieren können, dass diese wieder zum Leben erweckt werden können. Etwas weniger gewagte Überlegungen gehen immerhin davon aus, dass solche molekularen Maschinen Ablagerungen aus den Gehirnen von Alzheimer-Patienten, oder aus den Arterien von Infarktgefährdeten entfernen können. Mithilfe solcher Reparaturprozesse würde sich die Lebenserwartung möglicherweise deutlich erhöhen. Hier treffen sich die Visionäre der Nanotechnik mit einigen Kollegen aus dem Bereich der molekularen Genetik, die diejenigen Mechanismen, die Alterungsprozessen zugrunde liegen, beeinflussen und auf diesem Wege das Leben der Menschen verlängern wollen.

Abgesehen davon, dass solche Handlungsoptionen auf absehbare Zeit aller Voraussicht nach nicht zur Verfügung stehen werden, ist zu fragen, ob sie überhaupt wünschenswert sind. Denn mit ihnen stellt sich die Frage nach den anthropologischen Grundlagen dessen, was Freiheit und Würde des Menschen und seine Stellung als moralisches Wesen in einer sozialen Gemeinschaft ausmacht. Zu den anthropologischen Grundbedingungen der menschlichen Existenz gehört unter anderem die Zufälligkeit seiner biologischen-genetischen Grundausstattung. Nicht durch andere für einen bestimmten Zweck geschaffen worden zu sein, ist eine elementare Voraussetzung für die Möglichkeit von Freiheit. Diese ist wiederum für die Moralfähigkeit der Menschen ebenso konstitutiv wie für ihre Würde. Jede Beschneidung dieser Freiheit durch eine fremdbestimmte Implantation genetischer oder nanotechnischer Konstrukte ist – so gut sie auch immer gemeint sein mag – ein Angriff auf diese Freiheit, und demzufolge auf die menschliche Würde. Ähn-

liches trifft zu, wenn andere anthropologische Grundbedingungen menschlichen Lebens wie beispielsweise die Anfälligkeit und Verletzbarkeit des menschlichen Körpers durch gen- oder nanotechnische Eingriffe entscheidend verändert würden. Insofern wäre die weitgehende Realisierung gen- und nanotechnischer Visionen Traum und Alptraum zugleich. Dem perfekt nach den Vorstellungen seiner Eltern gestalteten und selektierten Kind sind deren Erwartungen im wörtlichen Sinne eingepflanzt, wodurch die Vorstellung von der Offenheit und Selbstgestaltbarkeit des eigenen Schicksals unterminiert wird. Die genetische Selektion durch die Präimplantationsdiagnostik stößt ebenso in diese Grenzbereiche vor wie die imaginierte nanotechnische Selbstreparatur von Alterungsprozessen zur Verlängerung des Lebens; mit dem reproduktiven Klonen würde das Terrain jenseits davon betreten werden.

#### **Technikfolgenabschätzung: Konzentration auf realistische Perspektiven.**

Bei genauerem Hinsehen erweist sich also die in der Maschinenwelt verankerte Vorstellung von der vollständigen Kontrolle aller Lebensprozesse als ein Phantasma, ein Trugbild und Wahngelbilde. Sie ist weder erreichbar noch wünschenswert. Denn wenn wir die Zufallhaftigkeit, Verletzbarkeit und Endlichkeit menschlichen Lebens überwinden, dann lassen wir das hinter uns, was den Menschen zum Menschen macht, und in einem moralischen Sinne menschlich werden lässt. In der Verwirklichung des Phantasmas würde der Mensch tatsächlich zur Maschine, die im besten Fall nach dem Plan ihres Konstrukteurs funktioniert, aber kein eigenes spontanes Leben mehr hat. Die Befreiung von den Zufälligkeiten und scheinbaren Unzulänglichkeiten der Natur ist nur um den Preis der Auslieferung an die menschliche Willkür und an durch Menschen gesetzte kontingente Ziele und Zwecke zu haben.

Nicht nur nach der Lektüre von „Brave new world“ von Julian Huxley, sondern auch nach der von Erik Drexlers „Engines of Creation“ oder Lee Silvers „Recreating Eden“ bin ich froh, dass wir nicht so weit sind. Ohnehin ist alles viel schwieriger, als uns die Visionäre glauben machen wollen. Deshalb wird es vermutlich die selbstreplizierenden Nanobots in unserer Welt – wie Richard E. Smalley, der Erfinder

der Fullerene und Nobelpreisträger sagt – nie geben, und auch der Mensch mit der durchgestylten genetischen Ausstattung wird wohl eher ein Bewohner der fiktiven Welt bleiben als einer der realen werden.

Deshalb macht es Sinn, sich hinsichtlich der gesellschaftlichen Folgenabschätzung nicht auf utopistische Szenarien zu kaprizieren, sondern sich auf das zu konzentrieren, was aus heutiger Sicht mittelfristig als realistisch und machbar erscheint. Erhöhte Aufmerksamkeit ist hier vor allem hinsichtlich der nanotechnischen Verstärkungen gendiagnostischer Verfahren geboten. Denn ähnlich wie die Konvergenz von Reproduktionsmedizin und molekularer Genetik zu einer neuen Qualität der genetischen Selektion von Embryonen im Rahmen der Präimplantationsdiagnostik führt, könnte die Konvergenz von molekularer Genetik bzw. Gendiagnostik und Nanotechnik in eine neue Quantität und Qualität der Erfassung von genetischen und biologischen Parametern des menschlichen Körpers einmünden. Einerseits hieße dies eine bessere und schnellere klinische Diagnostik von Krankheiten und Informationen über Behandlungsverläufe. Fraglich ist jedoch, in welchem Umfang dieses Gebrauchswertversprechen eingehalten werden kann, und ob es den Patienten letztendlich nutzt oder nur zu einer Ausweitung der Datensammlung beiträgt. Andererseits können gendiagnostische Verfahren durch nanotechnische Verstärkung eine ins Phantastische reichende Sensibilität erreichen. Besonders angesichts des immer enger werdenden Finanzrahmens der Krankenversicherungen ist zu fragen, ob hier nicht ein Überwachungsinstrumentarium für biologische Parameter aufgebaut und etabliert werden wird, dessen konsequente Anwendung mit Freiheits- und Persönlichkeitsrechten in Konflikt kommen könnte. Dabei denke ich an ein zeitnahe Monitoring physiologischer Parameter, die zum wissenschaftlich begründbaren Ausgangspunkt für die Krankheitsprävention und somit für die Kontrolle von Verhalten werden könnten.

Aber dies sind offene Fragen, auf die es keine vorgefertigten Antworten gibt. Aber sie zeigen, dass wir auch über die gesellschaftlichen Konsequenzen neuer gen- und nanotechnologischer Entwicklungen nachdenken müssen, wenn ihr Science Fiction Anteil nicht realisiert wird.

# Die Maschinisierung des Menschen:

## Gen- und Nanotechnologie und die Würde des Individuums

Kommentar *Dietmar Mieth*

### *Prof. Dr. Dietmar Mieth*

ist Professor für Theologische Ethik unter besonderer Berücksichtigung der Gesellschaftswissenschaften an der Universität Tübingen. Mieth ist EU-Ethikberater, Deutsches Mitglied der Embryonenschutz-Protokollgruppe des Europarates, Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirates des Berliner „Institutes Mensch-Ethik-Wissenschaft“ (IMEW) und Mitglied der Bioethik-Kommission der Deutschen Bischofskonferenz. Nach dem Studium der Theologie, Germanistik und Philosophie mit Promotion und Habilitation war Mieth von 1974 bis 1981 Professor für Moralthologie an der Universität Fribourg-Schweiz.



### **Menschenbild und Menschenwürde angesichts des Fortschritts der Biotechnik**

Die beiden großen, in den sogenannten Lebenswissenschaften erforschten, Bereiche der Reproduktionstechnik und der Gentechnik bilden zusammen die Biotechnik. Dieser Bereich entwickelt sich schwungvoll. In Europa erleben wir derzeit einen großen Schub. Das Wort „Leben“ wird daher mit den Biowissenschaften und mit der Biomedizin assoziiert. Als z.B. 2001 in den Universitäten Baden-Württembergs angefragt wurde, wer an einer Evaluierung der Universität in Sachen Lebenswissenschaften teilnimmt, haben sich Philosophie und Theologie nicht gemeldet. Sie sahen zu, wie der Begriff „Leben“ aus dem geisteswissenschaftlichen Bereich in den biologischen Bereich transferiert wurde. Als der Begriff „Bios“ von Laplace 1801 in die Biologie übertragen wurde, gab es dafür nur einen pragmatischen Grund. Man hatte bereits den Begriff Zoologie, der aber auf Tierkunde festgelegt war, so dass man einen neuen Begriff brauchte.

Der Begriff „Bios“ stammte freilich aus der Lehre von der menschlichen Lebensführung. Die gesamte Antike, die mittelalterliche und die humanistische Tradition, wusste, dass mit „Bios“ (lat. vita) die Kunst der Lebensführung gemeint war. Als dieser Begriff aus der Lebensführung des Menschen in den neuen Typus von Biologie umgesetzt wurde, geschah dies kurz nach der Begründung des Begriffes der „Menschenwürde“ durch Immanuel Kant. Die Zuspitzung des Begriffes „Leben“ auf Biologie und die Zuspitzung der Lebensführung auf „Würde“ gingen von da ab verschiedene Wege. Der neue Begriff der Biologie oder der Biowissenschaften verfolgte das Paradigma der neuzeitlichen Wissenschaft: die Wissenschaft betrachtet nicht nur die Welt, sondern sie greift experimentell in sie ein und ist so auf Verwertung aus, auf Nutzen im Sinne der Verbesserung der Lebensbedingungen des Menschen (so sieht es bereits Francis Bacon). Die Fortschrittsmentalität rechnet damit, dass der Mensch seine Lebensbedingungen wirklich, wenn auch schrittweise, effektiv verbessern kann. Man wird, wie jede andere, auch diese Möglichkeit der

Verbesserung der Bedingungen des menschlichen Lebens daraufhin befragen müssen, ob Verbesserungen nicht gleichzeitig auch Veränderungen mit sich bringen, die keine Verbesserungen sind, ob neue Problemlagen entstehen und ob die genannten Probleme wirklich gelöst werden. Das entspricht der teleologischen Vernunftregel in der Folgenabschätzung: Man soll Probleme nicht so lösen, dass die Probleme, die durch die Problemlösung entstehen, größer sind als die Probleme, die gelöst werden. Wenn man aber diese Regel, die sich aus Vernunft und Erfahrung begründen lässt, ernst nimmt, dann bedarf man einer gewissen Relativierung des Fortschrittsglaubens. Dazu muss freilich der einzelne, nachhaltige Fortschritt keineswegs bezweifelt werden.

### **I. Diesseits der Zwänge**

Der Fortschrittsglaube ist aber präsent. Welche Zwänge ergeben sich daraus, dass die moderne Gesellschaft ein nicht mehr aufkündbares Bündnis mit Wissenschaft – Technik und Wirtschaft geschlossen hat? Wissenschaft – Technik und Ökonomie stellen ein Verbundsystem dar, das sich gegenseitig bedingt und den Fortschritt in Gang hält. Mit einem nicht aufkündbaren Bündnis meine ich: jede Alternative zur Technik ist heute eine technische Alternative, oder: jede Alternative zu einer wissenschaftlichen Option ist eine wissenschaftliche Alternative. Und jede Alternative zu einer bestimmten ökonomischen Vorgehensweise ist eine ökonomische Alternative. Wir können nicht in eine Steinzeitkultur oder in eine mittelalterliche Welt zurücksteigen. Nur im Sinne der Kontinuität der Geisteskultur, etwa ästhetischer, religiöser und moralischer Empfindungen und Überzeugungen, können wir die Werte der Geschichte weitertragen.

Mit der Einübung in eine Sachzwangfolge ist zugleich auch eine Propaganda des Sachzwangs verbunden. Ich nenne das freilich die normative Kraft des Fiktiven. Es ist nämlich nicht nur so, dass die Propagandisten der Biowissenschaften und der Biomedizin schlicht die normative Kraft des Faktischen betonen, denn die normative Kraft des Faktischen würde soviel nicht erbringen. Ein Beispiel: Im Oktober 2001 hat das Europäische Patentamt endgültig die Einsprüche von etwa hundert Oppo-

nenten in Sachen Patent auf eine Onkomaus (Krebsmaus) zurückgewiesen. Das Patent ist bereits '87 beantragt gewesen, '92 gewährt worden, seit '92 wähen die Einsprüche, erst im Jahre 2001 ist die Verhandlung zu Ende gegangen. Ich habe an der letzten Einspruchs-Verhandlung teilgenommen. Es wird mit diesem Urteil festgestellt, dass die Harvardfirma, die dieses Mauspatent haben möchte, die Krebsmaus „erfunden“ hat. Das ist nun amtlich und in letzter Instanz rechtlich bindend, weil es keine Appellationsinstanz gegen das Europäische Patentamt gibt. Aber jeder vernünftige Mensch wird selbstverständlich einsehen, dass ein Mensch eine Maus nicht erfinden kann. Die Maus als Tierart ist schon vorher da, und wir haben bis jetzt noch nicht mehr zustande gebracht, als irgendwelche Plastikwesen, denen man bestimmte Verhaltensformen und –variablen antrainieren kann. Aber sie sind deswegen natürlich keine lebenden Wesen. Es mag sein, dass die Nanotechnologie dies einmal miteinander verschmilzt. Aber eine Maus kann nicht erfunden sein. Wieso behauptet dann das Patentamt, die Maus sei erfunden? Weil für die Patente der Erfindungsvorbehalt gilt. Ohne Erfindung kein Patent. Also muss der Begriff der Erfindung verändert werden. Das nenne ich Fiktion. Die Begriffe sind nicht mehr in die Realität eingebunden, sondern sie verwandeln sich unter dem Druck der Optionen für bestimmte Fortschrittsparadigmata.

Ein anderes Beispiel ist die Sprachpolitik. Sie lässt sich gut an zwei Beispielen verfolgen: erstens am Gebrauch Wortes „Therapie.“ Seit ungefähr fünfzehn Jahren und vielleicht schon länger sind wir daran gewöhnt, von „Gentherapie“ zu sprechen. In der Zeitung der Alzheimer Gesellschaft war (2001) die Überschrift zu lesen: „Erste Gentherapie bei Alzheimer.“ Darunter stand, dass man (erstens) den klinischen Versuch, der hier angestrebt wird, wissenschaftlich bezweifeln kann, und dass (zweitens) ein Ergebnis möglicherweise nicht zu erwarten sei. Wie so oft war die Überschrift vom Redakteur gemacht und hatte mit der Wirklichkeit, die im Artikel beschrieben wurde, nichts zu tun. Aber das Wort „Gentherapie“ ist in aller Munde. Damit ist aber nichts anderes als eine Ansammlung von Forschungsvorhaben und genetischen Versuchen gemeint. Es gibt nämlich noch keine zweifelsfreie nachgewiesene Gentherapie. Es gibt Forschungs-

Erfolge, man sollte sie anerkennen. Aber das Wort „Gentherapie“ erzeugt in der Bevölkerung seit fünfzehn Jahren die Illusion, als gäbe es eine erfolgreiche Behandlung durch Gene.

Ähnlich wird der Ausdruck „Therapie“ im Zusammenhang mit der Stammzellforschung gebraucht. Stammzellen sind jene Zellen, die mehr können als nur die Funktion auszuüben, die sie im Körper innehaben: sie können sich in verschiedene Richtungen unter ganz komplizierten Bedingungen zurück- und weiterentwickeln. Man hofft, sie könnten in Zukunft irgendwann einmal als Organersatzzellen dienen. Das ist zunächst nichts anderes als eine Option. Und wenn wir lesen, dass „adulte“, also von erwachsenen Menschen genommene Stammzellen, bei Herzrhythmusstörungen bereits Erfolge erzielt hätten, dann müssen wir in Rechnung stellen, dass niemand nachgewiesen hat, dass sie die entscheidende oder gar alleinige Ursache für den Erfolg waren. In einer Fachdiskussion werden alle diese Erfolge relativiert. Wenn man die Sachlage genauestens darstellt, dann zeigt sich, wie eingeschränkt die Möglichkeiten sind, und dass es zunächst im Wesentlichen um eine Erweiterung der Grundlagenkenntnis und der Optionen geht.

Die Biopolitik als Sprachpolitik lässt sich am besten am Beispiel des „reproduktiven“ Klonens zeigen. Das Verbot des „reproduktiven“ Klonens steht sogar in der Charta der europäischen Grundrechte. Der Hintergrund ist folgender: Diese spezifische Verwendung des Ausdrucks „reproduktiv“ ist erst 1997, als alle „Räte“ über „Dolly“ sprachen, entstanden. Sie enthielt eine Sprachverschiebung. Bis 1997 war klar, dass Eizelle und Samenzelle jeweils zu den sog. „reproduktiven“, biologischen „Substanzen“ gehören. Das Wort „reproduktiv“ fing also bei Ei- und Samenzelle an, so wie es heute noch im Ausdruck „reproduktive Medizin“, die ja eine Basistechnik der Biotechnik darstellt, enthalten ist. Denn wenn wir von Reproduktionsmedizin oder „Fortpflanzungsmedizin“ sprechen, meinen wir die Beihilfe zur Verschmelzung von Ei- und Samenzelle in vitro. Also sind Ei und Samenzelle reproduktiv. Aber beim Ausdruck „reproduktives“ Klonen werden Ei und Samenzelle nicht mehr als reproduktiv verstanden. „Reproduktives Klonen“ meint nämlich nur das Austragen nach Einpflanzung in

den Uterus, ein geklonter Embryo wird nach Einpflanzung bis zur Geburt ausgetragen. Das Verbot des reproduktiven Klonens, das im Augenblick weltweit deklariert wird, wie z.B. in der UNESCO-Deklaration „Zum Schutz des menschlichen Genoms und der Menschenwürde“ (1998) umfasst also nicht den In-vitro-Bereich. Ist also irgendwo zu lesen, reproduktives Klonen sei verboten, dann muss man den Subtext mitlesen, nämlich: das nicht-reproduktive Klonen in vitro ist nicht darin eingeschlossen. Nicht-reproduktives Klonen ist das Klonen von Embryonen ohne Einpflanzung, z.B. zum Zweck der verbrauchenden Embryonenforschung. Wenn also in der Charta für europäische Grundrechte steht, reproduktives Klonen ist verboten, dann ist zugleich in einem Subtext den Embryonen ein Lebensrecht entzogen.

Sprachpolitik ist auch im Ausdruck „therapeutisches“ Klonen enthalten. (Man benutzt ja auch gern den Ausdruck Stammzelltherapie, obwohl es noch keine Therapie gibt). In kirchlichen Textvorlagen tauchte der Ausdruck therapeutisches Klonen mehrfach auf. Sie wenden sich gegen das „therapeutische“ Klonen, weil es ja ein Erzeugen von Embryonen zu ihrer Vernichtung darstellt. Das ist im Augenblick noch ein europäischer Konsens. Die britische Vorstellung, Embryonen für Forschungszwecke herzustellen, findet derzeit in Europa keine Zustimmung. Aber was ist „therapeutisches“ Klonen? Nichts anderes als ein Klonen mit einer bestimmten Forschungsabsicht, nämlich in der Hoffnung, einen Teil der Immunabwehr überwinden zu können bei einer später vielleicht einmal möglichen Stammzelltherapie. Das Klonen selbst ist keine Therapie, sondern ein Forschungsweg. Dies sollte stets transparent bleiben. Die Genauigkeit der Sprache ist eine Bringschuld der Wissenschaft.

Ein anderes Beispiel: In der Biopatentrichtlinie Europas ist konsequent immer nur vom „biologischen Material“ die Rede, aber es handelt sich um „Leben“ – ich habe von der Krebsmaus ja schon gesprochen – auch menschliche Gene sind Teil dieses Lebens, also kein biologisches „Material“. Die totale Materialisierung des Lebensbegriffs greift um sich. Für viele ist das nur eine „methodologische“ Materialisierung, weil sie anders die Verhältnisse



von Ursache und Wirkung nicht erkennen und beschreiben können. Wenn man fragt, welche Definition denn den „Lebenswissenschaften“ zugrunde liege, dann heißt es: „die Forschung an lebendigen Systemen“, die als Organismen bezeichnet werden. Dabei wird nicht tiefer gefragt: wodurch unterscheiden sich Organismen von physikalischen und chemischen Vorgängen? Solange diese Physikalisierung der Lebenswissenschaften methodologisch ist, d.h. solange die Sprache ihre eigene Relativität im Kontext der verschiedenen Disziplinen und Ansätze anerkennt, besteht kein Problem. Aber wenn diese Sprache zu einem herrschenden Paradigma für die Sprache über Leben wird und wenn wir unser Lebensverständnis im allgemeinen davon ableiten, entsteht eine Gefahr. Dann, meine ich, haben wir Grund, über das Menschenbild nachzudenken.

## II. Menschenbild und Menschenwürde

Der Begriff der Menschenwürde wird viel als oberstes Prinzip gebraucht, mit dem man Auswüchse und Missbräuche in der Entwicklung der Biotechnologie abzuwehren hofft. Man muss aber genau-

er auf den Begriff eingehen und sich fragen, was er in unserer säkularen Debatte eigentlich bedeutet. In unserer Alltagssprache gibt es zwei Alternativen: Wenn Menschen als würdevoll angesehen werden, dann ist damit gemeint, dass sie ansehnlich sind und wenig Belastungen haben. „Ansehnlichkeit“ kann man zusammenfassen in dem breiten Wort „Ehre“, später verwandelt in „Prestige“. Diese Ansehnlichkeit, zu der auch eine gewisse Souveränität gehört, ist mit dem Begriff Würde jedoch nicht gemeint, wenn man ihn im Sinne eines christlich-kantianischen Kontinuums versteht. Wenn man Kant als einen christlichen Aufklärer betrachtet, dann ist der kantische Begriff von Würde eine Realisierung christlicher Motive. Kant ist in der Tat der Philosoph, der auf den Begriff gebracht hat, was im Rahmen des Christentums ein Bild war, – wir kommen gleich auf das Verhältnis zwischen Begriff und Bild noch zu sprechen. Dieser Begriff setzt voraus, dass es sich um etwas handelt, was nicht bewertet werden kann, auch nicht im Hinblick auf Privilegien, Ehren, andere „Würdigkeiten“, empirische Qualitäten usw. „Würde“ heißt nicht Bewertbarkeit, sondern ist das Kriterium aller ein-

zelen Bewertungen. Diese Art von Würde ist – gesehen als philosophischer Fachbegriff – transzendentale zu verstehen, d.h. nicht an empirische Qualitäten gebunden. Deshalb heißt eine Formel bei Kant: „Achte die Menschheit in jedem Menschen.“ D. h. Würde ist ein Menschheitsbegriff. Wo immer jemand zur Menschheit gehört, weil er ein menschliches Lebewesen ist, ist diese Würde präsent. Jürgen Habermas spricht von einer Gattungsethik. Denn die Mitgliedschaft zur Gattung Mensch fällt von vornherein unter den Begriff Würde. Diese christlich-kantianische Tradition hat sich in der deutschen und in der französischen Verfassung ausgewirkt. Würde des Menschen ist als eine transzendente Qualität zu betrachten, d. h. als eine Qualität, die auf jedes Mitglied der Menschengattung anwendbar ist, unabhängig von empirischen Bedingungen. Umgekehrt ist nicht zu übersehen, dass ein Begriff der Würde, der mit „Ansehen“ zu tun hat, ein empirischer Begriff ist. Was wir sehen können, ist die Ansehnlichkeit. Ein englische Embryologe, dem ich 1985 die Frage gestellt habe, wann für ihn ein menschliches Lebewesen beginne, antwortete er: „When I can see the nose.“ Das war eine empirische Antwort. Sie war flapsig gemeint. Er meinte, man muss es doch wenigstens sehen können. Und viele Menschen sagen, was sehen wir denn in der Petrischale in vitro im Reagenzglas? Nichts davon. Es ist äußerst unansehnlich, was wir da sehen.

Wenn Menschen also eine transzendente Auffassung von Würde haben, die jeder Bewertung und jeder empirischen Qualifizierung vorausgeht, dann wird die Frage, ob man dem Embryo etwas ansehen kann, für sie zweitrangig sein. Sie werden im Gegenteil fragen: wie steht dieser Embryo, aus dem ich geworden bin, zu mir? Ein Behinderter, dem man erzählt, man möchte einen Embryo auswählen, weil er oder sie die gleiche Behinderung hat, sagt, dann wäre ja „ich“ ausgewählt worden. Diese Kontinuität wird rein intuitiv überall anerkannt. Zur Frage Immunabwehr bei der Einpflanzung embryonal abgeleiteter Stammzellen, meinte ein Stammzellforscher: „Ja, da tritt natürlich die Immunabwehr des Menschen auf, es handelt sich ja um ein fremdes Individuum.“ (Gemeint ist der geklonte Embryo mit der entkernten fremden Eizelle). Wenn man zudem davon ausgeht, dass Menschenwürde nicht

darin gebunden werden kann, ob ein Mensch selbstbewusst oder selbstbestimmungsfähig ist, ob er interessenfähig ist, wie Peter Singer voraussetzt, dann gehört jedes menschliche Lebewesen in den Bereich dieser Menschenwürde.

Diese Einsicht entscheidet noch nicht alles, aber sie ist eine wichtige Vorentscheidung. Diese Vorentscheidung hat zu den unterschiedlichen Modellen der Embryonenschutzgesetze in Deutschland und in Großbritannien geführt. Deutschland ist keine Insel. Dieses Embryonenschutzmodell hat z.B. Einfluss in Norwegen, in Irland, in Portugal, in Österreich, in der Schweiz. Eine Reihe von europäischen Ländern, z. B. Italien und Griechenland, haben überhaupt keine Gesetze auf diesem Gebiet – auch ein interessanter Vorgang und verschieden zu erklären. Das britische Paradigma wirkt in Skandinavien, außer in Norwegen. Man macht dafür die noch stärkere Präsenz des kirchlichen Christentums in Norwegen etwa gegenüber Schweden oder Dänemark verantwortlich.

Im britischen Embryonenschutzgesetz ist der einzelne Embryo in vitro noch kein Würdeträger. Wann wird der Embryo dazu? Diese Frage ist nach Meinung vieler durch Zuschreibung zu entscheiden. Dafür brauchen sie Anhaltspunkte. Die einen sagen: Würde beginnt mit der Rechtsperson nach der Geburt, Peter Singer meint, erst nach drei Jahren, andere sagen, nach der Herausbildung der Großhirnrinde, also nach etwa drei Monaten, wieder andere sagen: nach der Herausbildung der ersten Zelldifferenzierung im Embryo, die seine Totipotenz aufhebt, so dass durch Teilung nicht mehr zwei Individuen entstehen können. Damit sind die ersten 14 Tage ausgenommen. Im Zeitraum vor der Einpflanzung in der Petrischale sei demnach noch keine Würde vorhanden, sondern nur der Respekt vor der Gattung des Menschen. Der Mensch als Gattungswesen gilt als etwas anderes als der Mensch als Person. In der Präambel der Europäischen Menschenrechtskonvention zur Biomedizin (1997) steht, dass der Mensch zu schützen sei und zwar sowohl als Person wie als Mitglied der menschlichen Gattung. Damit werden der Personbegriff und der Mitgliedsbegriff voneinander getrennt, und der Schutz des Mitglieds ist nur noch ein prozeduraler Schutz, der Schutz der Person ist hingegen ein substantieller Schutz. Nach der Bioethikkonvention

dürfen Personen z.B. nicht diskriminiert werden, aber, nur als Mitglied der Menschengattung betrachtet, ist das menschliche Lebewesen diskriminierbar.

Wenn wir zwischen einer Mitgliedschaft in der Menschengattung und einer Person trennen, werden alle Menschen, die nur noch einen „vegetativen Status“ haben, nicht nur die Embryonen, bloß noch als Mitglied der Menschengattung zählen. Viele Menschen werden also durch das Öffnen dieser Tür mit gefährdet. Wenn man einmal die beschriebene Unterscheidung eingeführt hat, dann kann man sie an verschiedenen Stellen benutzen. Pathozentriker könnten z.B. sagen, frühe Embryonen können doch getötet werden, weil sie schmerzempfindlich sind. Kann ein menschliches Lebewesen dann getötet werden, wenn es schmerzempfindlich ist? Wie will man aber diese Verallgemeinerung verhindern, wenn man qualitative Merkmale zu einer Legitimation erhebt? Die Spannung, die im Würdebegriff liegt, zwischen Ansehnlichkeit einerseits und Nichtbewertbarkeit, Nichtverfügbarkeit, Nichtinstrumentalisierbarkeit andererseits, ist bisher ungenügend wahrgenommen worden.

Das empirische Verständnis der Würde als Ansehnlichkeit ist z.B. jetzt schon unter dem Titel zu finden: „Menschenwürdig sterben.“ Denn damit ist gemeint, ansehnlich und belastungsarm und souverän zu sterben. Der Begriff des christlich-kantianischen Kontinuums wird damit nicht mehr erreicht. Mit den beiden Würdebegriffen in der säkularen Diskussion hängen auch zwei Selbstbestimmungsbegriffe oder zwei Autonomiebegriffe zusammen. Wenn ein Mitglied der menschlichen Gattung, das noch nicht über Selbstbestimmung verfügt, für die Selbstbestimmung eines anderen verfügbar wird, spricht man dann mit Recht von Selbstbestimmung? Zum Beispiel im Kontext der In-Vitro-Fertilisation, der Präimplantationsdiagnostik, der Pränataldiagnostik und der Nachzucht von Menschen für Organe? Dann gibt es nämlich nur die Selbstbestimmung des selbstbestimmungsfähigen Wesens. Meistens sind damit die werdende Mutter oder die Eltern gemeint. Dabei wird vergessen, dass jede Selbstbestimmung in diesem Bereich, wenn man den Begriff des christlich-kantianischen Kontinuums aufrecht erhält, eine Fremdbestimmung einschließt. Und zwar die

Fremdbestimmung eines Wesens, das ein Würdeträger ist, in welchem Ausmaß auch immer. Wenn man das christlich-kantianische Kontinuum auf den Autonomiebegriff anwendet, dann heißt Autonomie nicht Selbstbestimmung, sondern in genauer Übersetzung „Selbstverpflichtung“. Ein freier Wille und ein Wille unter dem sittlichen Gesetz, sagt Kant, seien einerlei. Autonom bin ich nur dann, wenn meine eigenen Maximen verallgemeinerungsfähig sind. Nicht wenn ich mir etwas als Individuum, im Unterschied zu allen anderen Individuen, herausnehme oder etwas beanspruche, sondern gerade dann, wenn meine Entscheidung so geartet ist, dass sie jeder andere unter den Bedingungen, unter denen ich lebe, in gleicher Weise fällen müsste, bin ich „autonom“. Diese Autonomie, ist Selbstverpflichtung und nicht Selbstbestimmung. In der angelsächsischen philosophischen Tradition taucht aber dieser kantische Autonomiebegriff nicht auf. Vielmehr herrscht eine Spaltung zwischen einer religiösen Tradition, in der der Mensch vor Gott verpflichtet ist und in dem Sinn nicht autonom ist, sondern theonom, einerseits, und einer säkularen Situation andererseits, in der Menschen sich selbst bestimmen können. Diese Zuweisung der Menschenwürde an religiöse Sondersprache ohne philosophisches Konzept wirkt sich auf viele wichtige Dinge aus.

Ich habe zu zeigen versucht, dass es eine philosophische Formel gibt, in der die christlichen Bilder „realisiert“ sind, und ich habe dafür Immanuel Kant als Beispiel gebraucht. Es gibt auch philosophische Traditionen, in denen diese christlichen Bilder nicht realisiert sind. Wenn z.B. John Locke, einer der Begründer der englischen Staatsphilosophie, Personalität auf „Selbstbewusstsein“ festlegt, dann ist das eine Formel, die nicht im christlichen Kontinuum steht, denn der christliche Personenbegriff meinte immer Menschsein in Beziehung, natürlich auch individuelles Menschsein, aber nicht atomistisch verstanden. Diese Tradition kann man an der jüdischen Philosophie eines Emanuel Lévinas nachvollziehen.

### **III. Menschenwürde im Menschenbild**

Die begriffliche Auslegung der Menschenwürde begegnet den Traditionen der Menschenbilder.

Menschenwürde – so lautet meine These – wirkt nur dort konkret, wenn sie gehaltvoll ist, und gehaltvoll wird sie wiederum nur durch Menschenbilder. Es gibt zwei Elemente im christlichen Menschenbild, das als eine gemeinsame Formel für verschiedene Bilder, die hier zusammenfließen, gebraucht wird. Das erste Element lässt sich zusammenfassen im Bild der Endlichkeit. Das Christentum lebt mit dem Bild vom endlichen geschaffenen Menschen. Ich habe am Anfang darauf hingewiesen, dass die Verbesserungsmöglichkeiten für die menschlichen Lebensbedingungen seit Francis Bacon das entscheidende Forschungsprogramm sind. Dabei wird die Endlichkeit oft vergessen: der Mensch bleibt, wenn er handelt, auch wenn er unterlässt, ein fehlerfähiges Wesen. Er kann auch die Folgen seiner Handlungen, das ist in der Geschichte beweisbar, nachträglich nicht alle kontrollieren. Ja er kann sie nicht einmal völlig voraussehen. Das erste lässt sich z.B. an der Atomenergie erkennen. Die Frage nach der endgültigen Entsorgung des spaltbaren Materials war nicht geklärt. Das wusste man im Voraus, aber man sagte: das Problem wird man später lösen, es tritt ja nicht sofort auf. Und deswegen sind wir jetzt in dieser schwierigen Situation des schrittweisen Ausstieges. Die Endlichkeit des Menschen ist eine bildliche Form auch für die Sterblichkeit, die Leidenschaft und die Schuldhaftigkeit des Menschen. Diese Form geht aus der Meditation der Schöpfung und aus der Situation des Menschen in der Sünde hervor. Die Festlegung der Leidenschaftlichkeit des endlichen Menschen wendet sich keineswegs dagegen, Leiden zu bekämpfen und zu verringern. Aber die Sensibilität des Menschen ist nicht ohne Leidenschaftlichkeit zu denken.

J. Habermas hat in seiner Friedenspreisrede darauf hingewiesen, dass solche Sensibilitäten, die in der Tradition der Religionen lägen, nicht verloren gehen dürfen, auch wenn man sie selber nicht teilt. Kirchen und Religionen müssten sich um diese Sensibilitäten bemühen. Das heißt aber auch, dass es eine ständige übergreifende Konkurrenz zwischen den Menschenbildern des Fortschrittsdenkens und den Menschenbildern der Endlichkeit gibt. Eine Konkurrenz, eine Spannung, zum Teil einen unaufhebbaren Widerspruch, auch eine Herausforderung, miteinander auszukommen, einander zu korrigieren.

Das zweite Element des christlichen Menschenbildes ist mit dem Wort „unbedingte Annahme“ bezeichnet. Wenn wir über die Art nachdenken, wie der Glaube, die Zuwendung Gottes zum Menschen erfahren wird, dann gelangen wir – und zwar, so denke ich, unabhängig von den Konfessionen – zu der Ureinsicht, dass Gott den Menschen vorbehaltlos annimmt, unabhängig von seiner Befindlichkeit. Er stellt für diese Annahme keine Bedingungen. In der Rechtfertigungslehre ist dies besonders deutlich zum Ausdruck gebracht. Deshalb verstehe ich nicht, weshalb einige evangelische Theologen (in der FAZ vom 23.01.02) der Meinung sind, weil die volle Versöhnung des Menschen noch ausstehe, liege seine eigentliche Würde erst im Reich Gottes. Freilich kann der Mensch sich selbst Bedingungen stellen. Er kann sich verweigern. Das ist das Problem menschlicher Freiheit. Aber Gott kommt dem Menschen stets entgegen. Er ist auf seine offenbare Göttlichkeit und damit auf dieses Entgegenkommen festgelegt. Das ist unbedingte Annahme. Wir versuchen in Bildern von Gott diese unbedingte Annahme zum Ausdruck zu bringen, indem wir zu ihm sagen: „unser Vater“ oder „unsere Mutter“, weil wir nämlich der Meinung sind, dass Eltern das irdische Bild dafür sind, dass man jemanden unbedingt annimmt und ihm keine Bedingung für seine Existenz stellt. Das Bild ist ja auch in der Bibel von Eltern genommen. Aber von der Erfahrung her, dass Eltern an ihre Grenzen stoßen, dass sie fehlerfähig sind, dass wir alle fehlerfähig sind in der Frage der Annahme des anderen, ist die religiöse Idee als Erfahrung stärker geworden, dass wir der Annahme als einer religiösen Wirklichkeit bedürfen, um die menschliche Annahme von daher stärken zu können.

Mit einem Beispiel lässt sich verdeutlichen, was mit unbedingter Annahme im zwischenmenschlichen Verhalten gemeint ist und was jetzt schon durch unsere Praxis zur Debatte steht: Wenn ein zwölfjähriges Mädchen abends mit seinen Eltern ein schönes Gespräch führt, – der Fernseher ist ausnahmsweise ausgeschaltet, – und sie unterhalten sich darüber, wie dieses Mädchen geworden ist und warum die Eltern ihm eine solche Liebe entgegenbringen. Das Mädchen ist dankbar, es hört seinen Eltern zu, es ist ein schönes Gespräch, und die Eltern erklären dem Mädchen, dass sie es in beson-

derer Weise lieben, weil sie es vor der Geburt haben testen lassen und es die Krankheit von Tante Emma nicht gehabt hat. Dieses Beispiel trifft schon Wirklichkeit; es ist nicht etwas, was bevorsteht. Und das ist offensichtlich ein Zeichen dafür, dass wir die Idee der unbedingten Annahme schon aus dem Blick verloren haben. Denn dieses Mädchen hat zwei Möglichkeiten, es kann sagen: vielleicht ist es besser, dass ich nicht geboren worden wäre, wenn ich so gewesen wäre wie die Tante Emma. Aber es kann auch so denken: werden meine Eltern von mir erwarten, dass ich beispielsweise auf einem Musikinstrument eine besondere Leistung erbrin-

ge und dann erst von ihnen besonders angenommen bin, wenn ich es tue. Das heißt das Selbstgefühl eines solchen Menschen wird verändert, entweder zur Gleichgültigkeit oder zur Einschränkung des Selbstgefühls im Sinne einer Abhängigkeit von dem, was andere über mich denken.

Was ich psychologisch zu erfassen versucht habe, ist eine zutiefst religiöse Idee, ohne die man sich im Grunde Menschenwürde nicht konkret vorstellen kann. Die gehaltvollen Ideen des christlichen Menschenbildes können die formale philosophische Überlegung im Sinne Kants mit Leben zu erfüllen.



**Weiterführende Literatur vom Verfasser:**

**Die Diktatur der Gene. Biotechnik zwischen Machbarkeit und Menschenwürde.** Freiburg i.Br. 2001

**Was wollen wir können? Ethik im Zeitalter der Biotechnik.** Freiburg i.Br. 2002

**Ferner:**

*Geyer, Christian (Hg.): Biopolitik. Die Positionen.* Frankfurt am Main 2001

*Graumann, Sigrid (Hrsg.): Die Genkontroverse. Grundpositionen (Mit der Rede von Johannes Rau).* Freiburg 2001

*Haker, Hille: Ethik der genetischen Frühdiagnostik. Sozialethische Reflexionen am Beginn des menschlichen Lebens.* Paderborn 2002.

*Anne Langlois, Art. Dignité humaine, In Gilbert Hottois – Jean-Noël Missa (Hrsg.) Nouvelle encyclopédie de bioéthique, Bruxelles 2001, 281-284.*

# Die Vermenschlichung der Maschine

## Die Vermenschlichung der Maschine:

Chancen und Risiken Künstlicher Intelligenz *Thomas Christaller*

### *Prof. Dr. Thomas Christaller*

ist seit 1991 Professor für Künstliche Intelligenz an der Universität Bielefeld, seit 2001 Leiter des Fraunhofer Instituts für Autonome Intelligente Systeme (AIS). Nach dem Studium der Mathematik (Physik, Informatik) in Marburg und Bonn promovierte Christaller 1986 im Fachbereich Informatik an der Universität Hamburg. Er ist Mitglied der wissenschaftlichen Kommission des Wissenschaftsrats und Sprecher des DFG Schwerpunktprogramms Kooperierende Teams mobiler Roboter in dynamischen Umgebungen.



Ich habe meinen Vortrag in drei Teile geteilt, einmal möchte ich gerne etwas zur künstlichen Intelligenz als wissenschaftlicher Disziplin sagen, und zwar was dieser Disziplin aus meiner Sicht an grundsätzlichen Überlegungen zugrunde liegt und wo auch die darin liegenden Grenzen sind und dann werde ich auf ein ganz anderes Gebiet einsteigen, was aber damit zusammenhängt, nämlich auf die natürliche Intelligenz. Für mich scheint es nämlich sehr offensichtlich zu sein, dass wenn man sich mit künstlicher Intelligenz beschäftigt oder künstlich intelligente Systeme bauen will, dass man sich eigentlich erstmal darüber verständigen muss, was man unter natürlicher Intelligenz verstehen will und wir haben ja vorhin schon das Beispiel des Schachspiels gehört und wir werden dann sehen, was dazu zu sagen ist, also ob Schachspielen nun wirklich das paradigmatische Beispiel ist für menschliche Intelligenz. Und ganz zum Schluss möchte ich Ihnen einige eigene Impressionen geben von dem ersten Wettbewerb von humanoiden Robotern vor gut zwei Wochen in Japan bei dem sogenannten International Robo Cup Ereignis in Fukuoka in Süd-Japan, wo ich das Vergnügen und auch die Ehre hatte, diesen

Wettbewerb mit zu organisieren. Fangen wir also an mit der künstlichen Intelligenz.

Die Idee zur künstlichen Intelligenz ist sehr alt, zumindest in unserer westlichen Kultur und die frühesten Hinweise darauf finden sich in der Ilias bei dem Götterschmied Hephaistos von dem berichtet wurde, dass er verschiedene Hilfsmittel benutzt hat unter anderem auch Blasebälge, die automatisch seine Esse angefeuert haben. Er hatte auch humanoide Roboter, so würden wir sie heute bezeichnen, nämlich „güldene Jungfrauen, schön anzusehen und der Stimme mächtig und sie hatten Verstand in ihrer Brust.“ Es gibt noch einen humanoiden Roboter den Hephaistos gebaut haben soll, nämlich Pandora mit der berühmten Büchse, in der zur Bestrafung der Menschen verschiedene Krankheiten und Leid enthalten waren. In unserer geistigen Geschichte geht das dann über Jahrhunderte hinweg weiter. Man kann verweisen auf den Wundarzt Paracelsus, der den Homunkulus propagiert hat, mit einem schon fast biotechnischen Verfahren, um einen künstlichen Menschen zu erzeugen. Es gibt den berühmten Rabbi Löw, der angeblich den Golem gebaut hat, einen Hausdiener, der die groben Arbei-

ten gemacht hat und vor allem auch die lästigen Besucher, die Rabbi Löw vom Studieren abgehalten haben, vor die Tür gesetzt hat. Dann gibt es die Geschichte von Dr. Frankenstein, von Mary Shelly. Heutzutage können wir uns ja gar nicht mehr retten vor dem Genre der Science Fiction Literatur und vor allen Dingen auch der Filme, in denen künstlich intelligente Systeme eine große Rolle spielen. Mit anderen Worten, wenn wir mit unseren Labors heute in der Lage wären, wirklich künstlich intelligente Systeme zu bauen, ich glaube, es würde sich fast keiner in unserer Öffentlichkeit darüber wundern, dass es so etwas gibt und möglich ist. Vielleicht muss man vor einem solchen Hintergrund, in dem der Zeitgeist es nahe legt, dass man relativ einfach künstlich intelligente Systeme bauen kann, verstehen, wie solche Äußerungen von Kurzweil, wie sie vorhin auch schon zitiert wurden, zustande kommen.

Es gibt bereits einen humanoiden Roboter Asimo, einen Roboter der von Honda gebaut worden ist. Außer normal laufen, also 20 cm/sec. und sehr langsam Treppen steigen, kann er nichts weiter. Es sieht auch so aus, dass dieser Roboter bei vielen Vorführungen teleoperativ gesteuert wird und nicht selbständig die Bewegungen durchführt.

Dann gibt es noch den sogenannten Gesichtsroboter, der an der Universität Tokio entwickelt wurde. Hier war die Idee die, ein Gesicht zu realisieren, wo durch Sensoren und Motoren, die hinter der künstlichen Haut liegen, emotionale Gesichtsausdrücke zustande gebracht werden können.

Den – wie ich finde – elegantesten humanoiden Roboter, den man heute bekommen kann, kann man von der Firma Sareos kaufen. In dem Labor von Kawato am ATR in Japan sind er und seine Mitarbeiter damit beschäftigt, neuronale Modelle zu entwickeln über menschliche Bewegungsabläufe und diese neuronalen Modelle dann als Steuerungsprogramm in solchen humanoiden Robotern einzusetzen. Der Grundgedanke ist der, die neuronalen Modelle von menschlichen Bewegungsabläufen mit Hilfe von humanoiden Robotern zu überprüfen.

Auch der Cog-Roboter von Brooks am MIT ist als Humanoid Roboter gedacht, er ist aber nur bis zu der Hüfte realisiert und sitzt auf einem Tisch in dem

Labor von Brooks. Er wollte einen humanoiden Roboter haben, der in einer menschlichen Umgebung und auch von Menschen umgeben ist und dadurch in die Lage versetzt werden soll, durch Beobachtung der Menschen in ihren normalen Bewegungsabläufen zu lernen. Allerdings muss man feststellen, dass bis heute diese Art des Lernens mit Cog nicht realisiert wurde. Jede einzelne Bewegung von Cog muss sehr sorgfältig programmiert werden und es ist alles andere als einfach, ein gutes Kontrollprogramm für diesen Roboter zu entwickeln.

Ich möchte nun auf einen Punkt eingehen, der die KI als Wissenschaft betrifft, nämlich was eigentlich künstliche Intelligenz ist. Die erste von mir vorgestellte Definition stammt aus einem sehr schönen Textbuch über künstliche Intelligenz von Matt Ginsburgh, und er stellt direkt in der Einleitung die Behauptung auf, künstliche Intelligenz sei das Unterfangen, intelligente Artefakte zu konstruieren. Da stecken natürlich verschiedene Aspekte drin. Zuerst einmal „Artefakt“, von Menschen gemacht. Zweitens, dass es wirklich konstruiert wird, also regelhaft und gezielt erstellt worden ist. Und dann natürlich das wichtige Adjektiv „intelligent“, das aus der biologischen Welt her übernommen wurde.

Er führt das ein bisschen weiter aus und stellt dann zu Recht die wichtige Frage, wenn wir denn künstlich intelligente Systeme realisieren wollen, was denn eigentlich natürliche Intelligenz sei. Er stellt dabei einen Vergleich an, den viele auch anstellen: Bei der Konstruktion von Flugzeugen gehe es ja auch darum das Fliegen als eine Eigenschaft von Lebewesen, zu der Menschen eigentlich nicht fähig waren, auf ein Artefakt zu übertragen. Es habe dann eine ganze Weile gedauert, bis von der Legendenbildung über sukzessive Versuche es möglich gewesen ist, Flugzeuge zu bauen, wie wir sie heute kennen. Und bei dem immer tiefer gehenden Verständnis beim Flugzeugbau stellte sich auch heraus, dass bestimmte Eigenschaften, über die Vögel verfügen, völlig uninteressant sind für das Fliegen und dass sie deswegen auch uninteressant sind, um sie in Flugzeuge einzubauen. Dazu gehört zum Beispiel das Balzen, Eierlegen, Nestbau usw., alles

Eigenschaften, wo man zumindest heute aus guten Gründen darauf verzichtet, das bei Flugzeugen vorzusehen und dort auch zu erleben. Im Analogieschluss sagt nun Ginsburgh, dass man ähnlich vorgehen müsse, wenn es um künstliche Intelligenz geht. Man müsse einfach identifizieren, in welchen Dingen Menschen auch gut sind, es aber unerheblich ist für die Intelligenz. Er hebt besonders hervor, dass Menschen darin gut sind – was er aber gerne raushalten möchte aus der künstlichen Intelligenz – nämlich er sagt, die Menschen sind gut darin, Menschen zu sein und ich werde auf diesen Aspekt nachher nochmal zurückkommen.

Er gibt dann am Ende seiner Einführung eine etwas technischere Definition von künstlicher Intelligenz als Disziplin: „Künstliche Intelligenz ist die Unternehmung um physikalische Symbolsysteme zu konstruieren, die zuverlässig den Turingtest passieren können“. Nun müsste man eigentlich alle diese Begriffe wie „physikalisches Symbolsystem“ und „Turingtest“ genauer erklären. Das will ich auch andeutungsweise machen.

Unter einem physikalischen Symbolsystem wird in der künstlichen Intelligenzforschung folgendes verstanden: Eigentlich taucht ja Intelligenz nur in einem Lebewesen auf, das aus einem Körper besteht, in dem zum Beispiel auch ein Gehirn enthalten ist. Darin finden Prozesse statt, deren Ergebnis wir dann als intelligent bezeichnen. Die Frage ist nun, wie kann man mit Computersystemen versuchen, etwas vergleichbares zu machen. Die grundsätzliche Überlegung und Beobachtung bei Computersystemen ist zumindest die, dass es eigentlich keine Rolle spielt, welchen Typ von Hardware man zugrunde legt, um bestimmte Softwareprogramme zu realisieren und ablaufen zu lassen. So sind Herbert Simon und Alan Newell auf die Idee gekommen, von der Hardware, die in Computersystemen ja auch vorhanden ist, zu abstrahieren: Wenn ich Software von einer bestimmten Leistungsfähigkeit ablaufen lassen will, dann reicht es mir, dass meine Computerhardware bestimmte allgemeine Eigenschaften hat und diese erfüllt, denn das gibt mir die Garantie dafür, dass ich dann auch mein Softwareprogramm ablaufen lassen kann.

Sie argumentieren dann analog, dass das menschliche Gehirn als biophysikalisches Substrat für Intelligenz eben vergleichbare Eigenschaften hat wie unsere heutigen Hardwaresysteme. Aus diesem Grund ist es legitim, von dem Gehirn als Hardware für menschliche Intelligenz zu abstrahieren, genauso wie es eben möglich ist, auf der Computersystemseite, von dem konkreten Chip oder dem konkreten Festplattensystem usw. zu abstrahieren und dann auf diese Art und Weise künstlich intelligente Systeme zu realisieren.

An dieser Stelle möchte ich den KI-Teil abschließen und auf den zweiten Teil eingehen, nämlich den zur natürlichen Intelligenz. Basierend auf der Überlegung, dass man künstlich intelligente Systeme nur dann wirklich bauen kann, wenn man weiß, was Intelligenz überhaupt ist. Hier möchte ich mit einem Zitat aus einem Buch von Julian Jaynes beginnen, „Der Ursprung des Bewusstseins“: „Was für eine Welt des augenlosen Sehens und des hörbaren Schweigens, dieses immaterielle Land der Seele welche mit Worten nicht zu fassenden Wesenheiten, diese körperlosen Erinnerungen, diese niemandem vorzeigbaren Takt der Träumereien und wie intim das ganze. Eine heimliche Bühne des sprachlosen Selbstgespräches und mit sich zu Rate gehens, die unsichtbare Arena allen Fühlens, Phantasierens und Fragens, ein grenzenloser Sammelplatz von Enttäuschungen und Entdeckungen. Ein ganzes Königreich, wo jeder von uns als einsamer Alleinherrscher regiert, Zweifel übt, wenn er will, Macht übt, wenn er kann. Eine versteckte Klausel, wo wir die bewegte Chronik unserer vergangenen und noch möglichen zukünftigen Taten ausarbeiten können, ein inneres Universum das mehr ist, als was mir der Spiegel zeigen kann. Dieses Bewusstsein, das mein eigenstes, innerstes Selbst ist, das alles ist und doch ein reines Nichts, was ist es und wie entstand es und warum.“

Die letzte Frage, warum gibt es überhaupt so etwas wie Intelligenz oder Bewusstsein, ist natürlich eine Frage, die sich ein Ingenieur normalerweise gar nicht stellt. Und ich denke, dass in Teilen der Naturwissenschaften Warum-Fragen normalerweise nicht zugelassen sind, wie zum Beispiel in der klassischen Physik.

Bei biologischen Systemen ist die Warum-Frage aber zentral, weil nämlich alle biologischen Lebensformen möglicherweise aus ganz wenigen Grundformen mit Hilfe des Evolutionsprinzips entwickelt worden sind. Wir sind ja auch nicht als Menschen einfach aus dem Nichts heraus in die Welt hinein gekommen, sondern viele andere uns mehr oder weniger verwandte Lebensformen mussten vor uns da gewesen sein, damit wir überhaupt in die Welt hinein kamen. Wenn das so ist, dann sind natürlich unsere Fähigkeiten die wir heute haben, mindestens schon in der Anlage auch in früheren Lebensformen vorhanden gewesen, müssen vorhanden gewesen sein, damit das Evolutionsprinzip sie zu dem ausbilden konnte, was sie heute für uns darstellen. Ich habe hier ein paar andere Bilder, angemessen dem Thema natürliche Intelligenz aus dem Buch Anima, wo Humanoiden und Primaten gemeinsam fotografisch dargestellt wurden ...

Zuerst einmal ist natürliche Intelligenz, für mich zumindest gebunden an lebende biologische Systeme. Keiner von uns hat bis heute Intelligenz in der Natur in einem toten biologischen System oder unabhängig von einem biologischen Körper beobachten können. Das zweite ist, es muss ein enormer Druck in der evolutionären Entwicklung von bestimmten Lebensformen existiert haben, um überhaupt intelligent zu werden. Meine Hypothese ist die folgende: es hat zwei wichtige Gründe gegeben, warum Lebewesen von unserer Art, in die Welt hinein kamen. Erstens einmal, behaupte ich, dass die steigende Komplexität des sogenannten Verhaltenssystems in seiner Quantität ein wichtiger Auslöser war. Das heißt also, dass die Anzahl möglicher Verhaltensweisen bei unserer Lebensform und auch bei verwandten Lebensformen, ein sehr viel höheres Maß haben als bei sogenannten einfacheren Lebensformen. Um dieses zu erreichen, wurden immer mehr einzelne Verhaltensweisen nicht mehr in den Genen explizit kodiert, sondern nur noch die Dispositionen dafür. Mein Lieblingsbeispiel ist das Begrüßen bei Menschen. Es sieht so aus, dass wir uns begrüßen müssen, wenn wir uns begegnen. Aber wie wir uns begrüßen, ob wir das durch Händeschütteln machen, umarmen oder voreinander in die Knie gehen, steht offensichtlich

frei. Es können ganz verschiedene Bewegungsabläufe benutzt werden, um die Funktion des Begrüßens zu übernehmen. Damit ist ein zweiter Aspekt des Verhaltenssystems verbunden. Nicht nur, dass im Laufe der Evolution sich die Verhaltensweisen immer freier machen konnten von der genetischen Kodierung, sondern dass auch in der Lebenszeit eines Individuums sich Verhaltensweisen durch Anpassung und Lernen ausprägen bzw. spezialisiert werden konnten.

Das ist also der eine wichtige Grund für mich, warum Intelligenz überhaupt in die Welt der Lebewesen hineinkam. Der zweite wichtige Grund ist der der steigenden komplexen persönlichen Sozialbeziehungen. Gerade in der künstlichen Intelligenz wird oft mit dem Gedanken kokettiert, dass so etwas wie Roboter, die Ameisen nachgebaut worden sind, soziale Intelligenz realisieren. Die Biologen unterscheiden zu Recht mindestens zwei grundsätzliche Formen der Gesellschaftsbildung, nämlich eine, die der anonymen Gesellschaften, zu der die Ameisen genauso gehören, wie die Bienen. In diesen anonymen Gesellschaften spielt es im Prinzip keine Rolle, dass bestimmte Individuen vorhanden sind, sondern es reicht vollständig aus, dass sich Mitglieder dieser Gesellschaft an relativ einfachen Dingen gegenseitig erkenntlich machen können. Bei personalisierten sozialen Gemeinschaften sieht es aber anders aus.

Hier spielt es eine enorme Rolle, welches Individuum von der eigenen Art uns gegenüber steht. Und dies ist die zweite Quelle für mich für Intelligenz. Denn beide Tendenzen der Komplexsteigerung, die der Verhaltenssysteme und die der Ausbildung von sozialen Beziehungen und sozialen Gesellschaften, führen dazu, dass für das einzelne Individuum die Schwierigkeit entsteht, genügend gute Vorhersagen zu machen über das mögliche Verhalten von Artgenossen. Meine Grundhypothese ist die, dass unsere Fähigkeit, gute Vorhersagen über menschliches Verhalten zu machen, das ist, was wir umgangssprachlich Intelligenz nennen.

Stellen Sie sich vor, dass Sie mit einem guten Freund oder einer guten Freundin, vielleicht Ehefrau oder Ehemann zusammen kochen. Jeder kann sich das in Gedanken gut vorstellen, wie das aussehen wird.

Meine erste Frage lautet: Können Sie sich auch vorstellen, worin Ihr Partner oder Partnerin gut ist beim Kochen. Und wenn Sie sich sogar eine bestimmte Zubereitung einer Mahlzeit vorstellen, können Sie sich dann auch vorstellen, was Ihr Partner oder Partnerin in der Küche dann entsprechend tun wird. Meine hypothetische Antwort lautet: Wir können es, Sie können es genauso gut wie ich. Wir haben genau die richtigen Voraussetzungen dafür in unserem Gehirn, um genau solche Vorstellungen zu generieren. Meine zweite Frage hier ist, stellen Sie sich vor, es geht irgend etwas schief beim Kochen, mein Lieblingsbeispiel ist das Kuchenbacken. Ich selber kann nicht Kuchenbacken, aber meine Frau kann es und ich beobachte sie manchmal dabei.

Und natürlich macht sie etwas, was Frauen gerne machen, sie benutzt leider Gottes stumpfe Gegenstände, um rohe Eier aufzuschlagen. Das finde ich als Mann natürlich unmöglich, weil die Gefahr sehr groß ist, dass dann Eierscherben in den noch nicht fertigen Teig hinein fallen und dann mühselig wieder herausgefischt werden können. Und das stellt natürlich ein typisches Mann/Frau-Szenario dar, wo wir beide uns am Schluss natürlich darüber freuen, welche Vorurteile wir jeweils dem Anderen gegenüber bringen. Aber der Hinweis sollte hier dazu dienen, dass wir genau die richtigen Voraussetzungen dafür haben, um solche Vorurteile auszubilden, die subjektiv gesehen zumindest auch häufig genug zutreffen, so dass sie dann auch vernünftig anwendbar sind.

Es gibt in der Primatenforschung eine ganze Reihe von Wissenschaftlern, die eine vergleichbare Position einnehmen, wie ich sie hier darstelle, nämlich dass Primaten in erster Linie gute Primatologen darstellen, die in der Lage sind, andere Primaten hervorragend zu beobachten in ihrem Verhalten und zu beurteilen.

Ein interessanter Punkt auf den ich noch zum Abschluss eingehen möchte, ist der der Sprache. Dieser wird ja häufig auch als ein wichtiger Aspekt unserer Intelligenz dargestellt. Untersuchungen zeigen aber, dass ungefähr 60 Prozent von Alltagsdialogen von Menschen dazu benutzt werden, um zu Klatschen und zu Tratschen. Und Klatschen und Tratschen ist eigentlich nichts anderes als über die

sozialen Beziehungen zwischen verschiedenen Menschen sich etwas zu erzählen. Und Sie alle kennen dieses Phänomen. Sie werden immer, wenn Sie in einen öffentlichen Raum hineingehen, sei es in einer Straßenbahn oder in einem Café oder in einem Theater, nun für immer wissen, dass dies ein grundsätzliches menschliches Verhalten ist, nämlich über andere Menschen Geschichten zu erzählen. Ich glaube, dass in diesem gegenseitigen Geschichtenerzählen über andere Menschen noch ein wichtiger Aspekt enthalten ist. Es ist eine Grundvoraussetzung für uns gewesen, Kultur und Tradition zu entwickeln, denn Klatschen und Tratschen tun wir ja speziell über Personen, die gar nicht anwesend sind. Das heißt also, Klatschen und Tratschen geht auch über Menschen, die nicht anwesend sind. Und tote Menschen sind spezielle nicht anwesende Menschen. Weil wir eben solche Fähigkeiten ausgebildet haben, Vorhersagen über menschliches Verhalten zu machen, konnten wir auch Fähigkeiten ausbilden, um uns genau über solche Vorhersagen zu unterhalten, und damit auch Vorhersagen über menschliches Verhalten von Menschen, die nicht da sind.

Zum Schluss möchte ich noch ein Zitat bringen, bevor ich dann einige Bilder von humanoiden Robotern zeige und ein wenig dazu sagen werde, wie der Stand der Technik heute zu sehen ist. Es ist ein Zitat aus dem Ende eines Buches von Karl Grammer „Biologische Grundlagen des Sozialverhaltens“. Karl Grammer hat sich ungefähr zwölf Jahre lang mit Kindergartenkindern beschäftigt und hat sich dabei insbesondere mit unterschiedlichen Problemlösungsstrategien von Mädchen und Jungen beschäftigt. Ganz am Schluss seines Buches sagt er das Folgende: „Kinder sind Sozialingenieure, sie verwenden den Hauptteil ihrer Zeit, ihre Beziehungen zu pflegen, im positiven und im negativen Sinne, sie sind, was dies betrifft, erfinderischer als die Erwachsenen, sie bauen ihre kleine Welt für die teilweise biologische Faktorenverarbeitungsmöglichkeiten und Sortierungsprozesse bestimmend sind. Der wichtigste Aspekt, den Kinder verfolgen ist, ihre Umwelt vorhersagbar zu machen und deren Komplexität zu reduzieren“, das ist jetzt mein Einschub, meine Hypothese ist, dass Karl Grammer hier sehr



wohl auch die soziale Umwelt und die Komplexität menschlichen Verhaltens gemeint hat. „Und damit“, so sagt Karl Grammer, „ist die Kinderwelt nicht das Abbild der Erwachsenen sondern deren Voraussetzung.“ Und ich denke, dass es ein Missverständnis ist, speziell der künstlichen Intelligenz, mit dem obersten Ende der Intelligenz anzufangen und nicht mit seinen Voraussetzungen. Es war ein großer Fehler zu glauben, so meine ich, das Schachspielen sei der Ausbund menschlicher Intelligenz und nicht zu begreifen, dass das Lernen von Kindern im Kindergarten der Ausbund von Intelligenz ist des Menschen. Und nun, wie versprochen, einige Bilder ... Hier sehen wir nochmal die Lego-Technik Roboter etwas näher. An dieser Stelle möchte ich meinen Vortrag mit ein paar Bemerkungen beenden. Meine Einschätzung der künstlichen Intelligenzforschung ist die, dass wir in der künstlichen Intelligenzforschung selber viele Jahre lang das Ziel verfolgt haben, Intelligenz als reines Softwareproblem zu sehen und für mich hat sich vor ungefähr 10 Jahren herausgestellt, dass das eine Sackgasse ist. Wir werden auf der reinen Softwareseite nicht in der Lage sein, künstlich intelligente Systeme in dem

Sinne zu realisieren, wie wir Intelligenz beim Menschen verstehen können. Das zweite ist, dass wenn wir uns Robotern zuwenden, um unseren künstlichen Systemen eine physikalische Basis zu verschaffen, die ungefähr so ähnlich sein könnte wie unsere körperliche Basis eine für unsere Intelligenz ist, dann stehen wir ganz am Anfang. Da ich selber in diesem Gebiet seit einigen Jahren arbeite, möchte ich die Hypothese wagen, dass die Vorhersagen von Kurzweil mehr als optimistisch sind, ich glaube, sie stimmen nicht. Er verwechselt, wie übrigens andere Technologie-orientierte Zukunftsvorhersager einfach technologische Entwicklungen mit biologischen Systemen und da sind doch viele Unterschiede zwischen diesen vorhanden, die man berücksichtigen muss und die jemand wie Kurzweil oder Moravec nicht berücksichtigen.

# Die Vermenschlichung der Maschine:

## Chancen und Risiken künstlicher Intelligenz

Kommentar Helge Ritter



### *Prof. Dr. Helge Ritter*

ist seit 1990 Professor an der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld und leitet dort seit 1993 eine Arbeitsgruppe auf dem Gebiet der Neuroinformatik. Er studierte Physik und Mathematik an den Universitäten Bayreuth, Heidelberg und München und promovierte an der TU München. Helge Ritter war Mitveranstalter der Forschergruppe „Prärationale Intelligenz“ am Bielefelder Zentrum für interdisziplinäre Forschung (ZiF) sowie Fellow des Wissenschaftskolleg zu Berlin. Für seine Forschungen im Bereich der Neuroinformatik wurde ihm 1999 der SEL Alcatel Forschungspreis und 2001 der Leibnizpreis der Deutschen Forschungsgemeinschaft verliehen.

Lassen Sie mich an die Ausführungen meines Kollegen Christaller anknüpfen und dabei einige zusätzliche Aspekte beleuchten. Beginnen wir dazu mit einem kleinen Streifzug durch die Entwicklung der künstlichen Intelligenz. Ich möchte Ihnen daraus einige Schlussfolgerungen entwickeln und fünf Hypothesen über die künftige Entwicklung des Gebiets vorstellen.

Die erste Begeisterung für künstliche Intelligenz in Computern brach aus, als man für Strategiespiele – also beispielsweise Mühle oder Schach – Programme schreiben und Computern damit ermöglichen konnte, sich in Partien gegen den Menschen einigermaßen anständig zu behaupten. Durch diese Anfangserfolge wurde man rasch ehrgeiziger: Als nächstes wollte man so etwas wie „allgemeine Problemlösefähigkeiten“ realisieren. Dies führte noch in den sechziger Jahren zu Programmen wie dem „General Problem Solver“, der etliche Arten typischer Rätselaufgaben ganz gut bearbeiten konnte, wenn man die Aufgabenstellung in eine für das Programm geeignete formale Kodierung übersetzte. Die Entwicklung ging sogar noch weiter: Man bemerkte, dass den bis dahin entwickelten Programmen jegliche Sensorik und damit jegliche Möglichkeit fehlte, etwa Dinge ihrer Umgebung wahr-

zunehmen und über solcherart Wahrgenommenes Schlussfolgerungen zu entwickeln. Damit rückten neue Ziele ins Blickfeld der Forscher, insbesondere Computersehen und Kommunikation mittels Sprache. Es entstanden Programme wie SEE von Guzman oder Winograds SHRDLU, die einfache, geradkantige Objekte erkennen (SEE) und darüber eine einfache Unterhaltung (SHRDLU) führen konnten und die als Meilensteine in die KI-Forschung eingingen. Diese Erfolge fand man sehr ermutigend und sah allzu leicht darüber hinweg, dass diese Fähigkeiten nur in relativ kleinen und oft stark vereinfachten „Spielzeugdomänen“ entwickelt und erprobt worden waren. Dies begann erst aufzufallen, als man größere Anwendungen in Angriff nahm. Dabei zeigte sich schnell und sehr deutlich, dass noch viele wichtige „Zutaten“ für praktische einsetzbare künstliche Intelligenz fehlten. Eine davon war schlicht ein ausreichendes Maß an Wissen über die Welt oder zumindest den beabsichtigten Anwendungsausschnitt. Der Ansatz, solches Wissen in formalen Regeln zu formulieren und damit für Computer handhabbar zu machen, führte in den achtziger Jahren zu den Expertensystemen, eine der ersten auch praktischen Erfolgsgeschichten der KI-Forschung. Damit wurde es erstmals möglich,

zumindest in engumgrenzten Anwendungsdomänen Expertenwissen so zu „verpacken“, dass Computer damit umgehen und nichttriviale Entscheidungen treffen konnten. Die Weiterführung dieses Ansatzes führte bis hin zu den heutigen Computeralgebrasystemen, die Mathematikern mühsame algebraische Umformungen abnehmen können.

### **Reflexe statt logischen Verknüpfungen**

Wie Sie aber unschwer erkennen, waren diese Anstrengungen alle gewissermaßen ausgesprochen „kopfgerichtet“. Es standen Fähigkeiten im Vordergrund, die uns Menschen eigentlich Schwierigkeiten machen, für die wir uns sehr konzentrieren müssen und die wir uns oft nur mühsam aneignen, manchmal beinahe mit dem Gefühl eines „Missbrauchs“ unseres eigenen Gehirns. Zugleich hatte man völlig aus dem Blickfeld verloren, dass viele derjenigen Dinge, die uns einfach vorkommen, damit mitnichten gelöst wurden. Ein Alltagsbeispiel ist die vermeintlich einfache Aufgabe, unsere Beine beim Gehen nicht zu verwechseln – vielleicht für einen Tausendfüßler eine noch größere Herausforderung – aber dafür müssen wir auch zusätzlich immer unser Gleichgewicht behalten. Andere Beispiele sind das Erkennen eines Bekannten in einer Menschenmenge, das Verstehen unseres Gegenüber selbst wenn gleichzeitig andere Unterhaltungen im Hintergrund stattfinden, oder das Zuknöpfen eines Hemdenknopfes, womit wir wieder bei der Bewegungskoordination – in diesem Falle unserer Finger – angelangt sind.

Kaum war diese Thematik ins Visier der Forscher geraten, stellte man sehr rasch fest, dass schon bei vermeintlich sehr einfachen Lebewesen die Koordination ihrer Extremitäten eine Aufgabe beachtlicher Komplexität bildet, die sich einer Lösung mit den damaligen Methoden hartnäckig entzog. Die rettende Idee fand der Robotikpionier Rodney Brooks zu Beginn der neunziger Jahre: Er zeigte anhand seiner später berühmt gewordenen „Roboterinsekten“, dass am Vorbild der Natur orientierte Verknüpfungen aus reflexartigen Reaktionen sehr viel geeigneter zur Koordination von Bewegungen waren als die bis dato favorisierten, auf einer Verknüpfung logischer Regeln und Symbole basierenden Methoden. Die nächsten Entwicklungsschritte bestanden darin, Roboter nicht nur

in wohl behüteten Laborräumen agieren zu lassen, sondern sie in realen Umgebungen, wie beispielsweise Museen „auszusetzen“, beispielsweise um Besuchern Museumsexponate zu zeigen und womöglich gar zu erläutern. Die ersten erfolgreichen Demonstrationen dieser Art gelangen dann in den frühen neunziger Jahren und sie können an den Robotern draußen in der Halle selbst sehen, wie weit diese Entwicklung inzwischen vorangeschritten ist.

Eine nächste Herausforderung bildete der aufrechte zweibeinige Gang. Einer der ersten weltweit bekannt gewordenen zweibeinigen Roboter stammt von der japanischen Firma Honda. Er kann auch eine Treppe emporsteigen, jedoch muss die Höhe der Stufen genau abgestimmt sein und darüber hinaus ist der Roboter derzeit noch „blind“; Fähigkeiten, wie etwa die Reaktion auf visuell erkannte Hindernisse sind derzeit noch Gegenstand der Forschung. In den letzten Jahren bemerkte man zudem, dass Intelligenz nicht nur eine Frage einzelner Individuen ist. Jedenfalls für uns Menschen sehr wichtig ist auch die Intelligenz im Team. Auch Roboter sollten im Team intelligent agieren können, und ein inzwischen unter den Roboterforschern sehr populär gewordenes Gebiet zur Untersuchung dieser Frage ist der „Roboterfußball“. Hier gibt es inzwischen sogar alljährliche Weltmeisterschaften – Herr Christaller kommt gerade von einer solchen – wenngleich es einige Großzügigkeit des menschlichen Betrachters zeigt, die Aktivitäten der dort agierenden Roboter mit der Bezeichnung „Fußball“ zu belegen. Nichts desto Trotz lassen sich dabei Strategien untersuchen, die ein Kooperieren im Team vor dem Hintergrund einer beständig wechselnden und immer nur ausschnittsweise erfassbaren Situation ermöglichen.

### **Die Evolution der Intelligenz**

In allerjüngster Zeit rückte dann auch die menschliche Emotion ins Visier einer Nachahmung durch Maschinen. Eine der ersten Pioniere dieses jungen Gebiets ist die amerikanische Forscherin Cynthia Breazil. Von ihr wurde der mittlerweile weltweit bekannte Roboterkopf KISMET gebaut, der Emotionen seines menschlichen Gegenüber aus Bewegungen, Stimmführung und Kontext erschließt und dann in seinem Roboter Gesicht eigene „Emotionen“

wie „Neugier“ oder „Furcht“ zum Ausdruck bringt. Wir sehen daran, dass die Entwicklung der künstlichen Intelligenz in den letzten Jahren über die zunächst vorwiegend logikbasierten Ansätze spürbar hinausgewachsen ist. Sie ist dabei wesentlich farbiger geworden, indem sie auch solche Fähigkeiten, die für uns vermeintlich mühelos erscheinen, in ihr Blickfeld gezogen hat.

Wenden wir zum Vergleich einmal den Blick weg von der Technik und fragen, wie hat eigentlich die Natur das, was wir als Intelligenz kennen, hervorgebracht? Die allerersten Anfänge reichen sehr weit zurück. Vor 500 Millionen Jahren, im Erdzeitalter Kambrium, entstanden die ersten Lebewesen, die mit Nervenzellen ausgestattet waren. Millionen Jahre später wurden einige dieser Zellen lichtempfindlich und damit zu den frühesten Vorboten des Auges. Bereits diese einfache Sensorik ermöglichte es ihren Besitzern, sich zwischen Hell und Dunkel zu orientieren. Vor 300 Millionen Jahren war die Entwicklung dann soweit vorangeschritten, dass einzelne Objekte grob diskriminiert werden konnten. Eine solche Fähigkeit eröffnete völlig neue Dimensionen bei der Verfolgung von Beute. Mit dem Auftauchen der ersten Organismen mit fronto-parallel angeordneten Augenpaaren begann die Ära des Stereosehens mit dreidimensionaler Tiefenwahrnehmung – einem weiteren wertvollen Hinweis. Die Sehfähigkeit entwickelte sich zu immer höherer Auflösung bis zum heutigen Gipfel in den Sehsystemen hochentwickelter Säugetiere. Vor ungefähr 30 Millionen Jahren kamen unter den Primaten allmählich personalisierte, soziale Gemeinschaften auf und erzeugten neue Anforderungen an die Gehirnleistung. Vielleicht sind in diese Zeit die ersten Anfänge von Intelligenz zu datieren. Als weiterer wichtiger Faktor sollte sich der Übergang zum aufrechten Gang erweisen: er machte die vorderen Extremitäten frei und damit das Greifen von Objekten möglich. Daraus entwickelte sich vor zwei Millionen Jahren die Fähigkeit zur manuellen Handhabung von Objekten und später von Werkzeugen. Eine weitere Entwicklung führte zur Gestik und damit zu ersten symbolischen Kommunikationsfähigkeiten. Sprache kam dann vor etwa 300.000 Jahren auf. Auf die ersten Anfänge der Mathematik musste man dann noch bis etwa 6.000 v. Chr. warten, und Schach ist urkundlich erst ab etwa 500 nach Christi Geburt belegt.

Wenn wir diesen Gang der Entwicklung einmal mit der Geschichte der KI-Forschung vergleichen so fällt uns auf, dass die künstliche Intelligenz lange Zeit im Vergleich zur Evolution gewissermaßen rückwärts gearbeitet hat: Sie hat mit Schach angefangen, dann ging es weiter mit Logik, mit Problemlösen und nach und nach kamen dann Sensorik und Basisfähigkeiten wie Bewegungskoordination hinzu. Und die Aufgabenstellungen, mit denen sie angefangen hat, waren gerade diejenigen, die die natürliche Evolution erst seit ganz kurzer Zeit und zuletzt „erobert“ hat und für die unser Gehirn daher am schlechtesten angepasst ist. Dabei kann man keineswegs sagen, dass diese Aufgaben deswegen besonders schwierig sein müssen: Wenn wir auf die Zeitskala der Evolution blicken, so sehen wir, dass die Entwicklung von Basisfähigkeiten, wie Sensorik und Bewegungskoordination, mit vielen zig Millionen Jahren die bei weitem meiste Zeit in Anspruch genommen hat, und man darf annehmen, dass sich in dieser langen Zeitspanne auch ein Teil der beträchtlichen Komplexität der Aufgaben widerspiegelt. Das Ergebnis ist dabei so hervorragend, dass uns die Ausübung dieser Fähigkeiten praktisch mühelos und unbewusst gelingt. Sprache kam erst sehr viel später und benötigte im Vergleich dazu nur einige hunderttausend Jahre, war für die Evolution also vergleichsweise „einfach“. Sozusagen erst im allerletzten Moment kamen Fähigkeiten wie logisches Denken und die daraus entwickelten Kulturleistungen, insbesondere Mathematik hinzu. Es ist daher kein Wunder, dass wir in der Ausübung dieser Fähigkeiten an die Grenzen dessen gebracht werden, wofür unser Gehirn von der Natur gut entwickelt werden konnte.

Ein zweiter Punkt fällt auf. Die Richtung der biologischen Evolution wird immer sehr stark von Umwelteinflüssen geprägt, denn sie muss in erster Linie ihre Organismen so ausstatten, dass sie überlebensfähig sind. Dagegen verlief die Evolution der künstlichen Intelligenz lange Zeit sozusagen „laborgetrieben“, in gänzlich künstlichen Umgebungen mit klar definierten, für Computer „mundgerecht“ vorbereiteten Dateneingaben. Das ist inzwischen anders geworden: beflügelt durch die heute verfügbare Hardware und ihrer Rechenleistung, haben die Produkte der KI-Forschung begonnen, ihr angestammtes „Herkunftsbiotop“ zu verlassen und in eine zunehmende Anzahl von Anwen-

dungsfeldern einzudringen. Indem sie sich dabei als Produkte im Konkurrenzkampf mit anderen Lösungsansätzen bewähren müssen, geraten sie nunmehr in eine ähnliche Lage wie biologische Organismen. Daher sehen wir jetzt neue Kräfte am Werk, die die weitere Evolution der künstlichen Intelligenz maßgeblich prägen werden.

Dies führt mich zu meiner ersten These: Roboter und KI-Systeme werden sich nach ähnlichen Gesetzen wie biologische Spezies entwickeln, nur haben wir es mit einem anderen „Biotop“, nämlich mit Anwendungsfeldern und mit Märkten zu tun, und die Entwicklungszyklen verlaufen wesentlich schneller als es in der Natur bei der biologischen Evolution möglich war. Eine gute Illustration für diese These bilden beispielsweise heutige Roboter in ihren verschiedenen Anwendungsbereichen: Serviceroboter in Krankenhäusern, Reinigungsroboter in Röhren oder am Grunde von Gewässern, oder Unterhaltungsroboter auf Messen oder zuhause sind „Roboterspezies“ mit ganz unterschiedlichen Einsatzfeldern und Aufgaben. Dies spiegelt sich stark in ihrem äußerlichen Körperbau wider: Wir alle kennen mittlerweile die „niedlichen“ Sony-Hunde, die die ersten Vorboten künstlicher Haustiere darstellen, und deren „Intelligenz“ besonders auf das „freundliche“ Reagieren auf Menschen hin ausgelegt sein muss (mittlerweile arbeitet man in Japan auch an künstlichen Fischen). Reinigungsroboter für Röhren ähneln dagegen eher der Gestalt eines Maulwurfs und können mental wesentlich „einfältiger“ daherkommen, da eine Röhre eine recht langweilig strukturierte Umgebung ist. Dies ist wieder anders für Roboter für Aufräum- oder Erkundungsaufgaben in unwegsamem Gelände: Diese nähern sich in ihren Bauformen häufig (über großen) Insekten und, wenn sie nicht über eine „Nabelschnur“ vom Menschen ferngesteuert werden können, müssen sie über erhebliche eigene Fähigkeiten zur Navigation und zur Erkennung und Umsteuerung von Hindernissen verfügen.

### **Roboter als Helfer**

Die zweite These ist, dass die weitere Entwicklung dieser Produkte durch die Anforderungen von uns Menschen am entscheidendsten geprägt werden (dazu gehört insbesondere auch Bezahlbarkeit).

Dies wird die weitere Entwicklung künstlicher Intelligenz sehr stark prägen, und dieser Einfluss ist auch sehr wünschenswert. Begünstigt wird dadurch nämlich in erster Linie die Entwicklung von Spezialfähigkeiten, die unser eigenes Können gut ergänzen oder verstärken, denn sonst besteht kein Bedarf, gibt es kein Interesse und als Folge auch kein Geld. Damit liegt das Schicksal künftiger Roboter nahezu zwangsläufig darin, unsere Helfer zu sein, uns zu unterstützen und das können wir gut finden. Übrigens wird dies auch – sollten wir eines Tages diesen Punkt erreichen – die mentale Ausstattung von Robotern betreffen: Wir dürfen daher erwarten, dass künftige Roboter uns ausgesprochen „gern“ unterstützen werden, denn alle Rahmenbedingungen ihrer Entwicklung begünstigen genau diese Eigenschaft.

Eine etwas allgemeinere Fähigkeit, die über das Spezialistentum herausragt und eine eigene Diskussion verdient, ist die Fähigkeit zu Kommunikation. Kommunikationsfähigkeit ist für uns Menschen ein ganz wichtiger Akzeptanzfaktor, der auch sehr stark unser Urteil darüber beeinflusst, ob wir ein technisches System als einen sturen Automaten empfinden, oder ob wir ihm ein Stück künstliche Intelligenz zusprechen. Selbst wenn wir nur einen schmucklosen Kasten vor uns sehen: sobald wir mit diesem „Etwas“ reden können, halten wir es nahezu zwangsläufig für intelligent (manchmal auch nur für ein Telefon!). Dort, wo es nicht allein auf intellektuelles, sondern stattdessen (oder zusätzlich) auf physisches Kooperieren ankommt, wird eine weitere Eigenschaft wichtig: menschenähnlicher Körperbau. Der Grund dafür liegt nicht so sehr in ästhetischen Anforderungen; vielmehr liegt er einfach darin, dass viele Dinge unseres Alltags naheliegenderweise eben besonders auf den menschlichen Körperbau zugeschnitten sind: denken wir an Türen, Treppen und Fenster, an die zahlreichen Griffe von Objekten wie Tassen, Koffer, wiederum Türen, an die Formgebung von Schränken, Autos, Bahnen und unzähliges mehr. Roboter mit einer gänzlich anderen Körperform als der menschlichen würden daher in unseren Alltagsumgebungen ständig „anecken“ und könnten nur von geringerem Nutzen sein als anthropomorpher geformte Konkurrenten. Beim Zusammenarbeiten mit solchen Robotern könnten wir ihre Bewe-



gungsfähigkeiten zudem sehr viel schlechter einschätzen. Dies geht bis hin zur Kommunikation, denn auch hier spielen körperliche Aspekte eine wichtige Rolle, wie etwa das unwillkürliche „Weitergeben“ des Worts durch Anblicken oder eine Wendung des Kopfes.

Derartige Überlegungen motivieren eine Forschungsrichtung, die in der Öffentlichkeit häufig besondere Aufmerksamkeit erheischt: die Entwicklung sogenannter „humanoider Roboter“, die einen am Vorbild des Menschen ausgerichteten Körperbau besitzen und die uns daher besonders leicht an Roboter aus Science-Fiction Szenarios erinnern. Ein solcher humanoider Roboter verfügt zwangsläufig über eine sehr große Anzahl an Gelenken und beweglichen Gliedmaßen, deren Bewegungskoordination eine sehr schwierige Aufgabe bildet. So geben selbst Teilbewegungen, wie etwa die Nachbildung eines Tennisschlags, zu ganzen Forschungsprojekten Anlass, und autonome Bewegungen (nicht die für Filmzwecke durch Sensoren von Menschen abgenommenen und dann ähnlich einem Tonband starr nachgespielten Bewegungssequenzen) humanoider Roboter sind derzeit noch auf sehr enge Situationskontexte begrenzt. Dafür ist das Aussehen dieser Roboter auch heute schon sehr eindrucksvoll. Übrigens gibt es auch schon die ersten humanoiden Roboter im Kleinformat, als High-Tech Puppenspielzeug für Kinder. Entwickelt von dem bereits im Zusammenhang mit Insekten-

robotern erwähnten Rodney Brooks, handelt es sich dabei um käufliche Roboter mit zwar noch sehr einfachen Bewegungsfähigkeiten, wie Zappeln, Kopfdrehen und Armrudern, aber auch rudimentärer Gesichtsgestik, wie Lachen, Ärger oder Weinen. Für die Verknüpfung dieser Verhaltenselemente sorgen Sensoren und eine recht frappierend wirkenden Steuerung, die auch einfache emotionale Regungen nachahmt und damit ein Spielzeug bietet, das Kindern Zuwendung in noch intensiverer Art abfordert, als das ja schon uns allen in erstaunlicher Weise bekannt gewordene Tamagotchi-Spielzeug, das vor acht bis neun Jahren große Verbreitung fand. Das Beispiel zeigt zudem, dass KI-Forschung auch Anlass zur Entwicklung von Kinderspielzeugen sein kann, die sich im Vergleich zu manch anderen Computerspielen an einer durchaus positiven Stelle einreihen. Auch ein recht naturgetreu wirkender Gesichtsroboter wurde bereits in japanischen Labors entwickelt. Dieser Roboter kann menschliches Minenspiel erstaunlich gut nachahmen und damit ein Stück weit Emotionen suggerieren.

### **Virtuelles Entwicklungsbiotop**

Hier gelangen wir zu einem Punkt, an dem ich mit meinem Kollegen Thomas Christaller nicht gänzlich übereinstimme, ich denke nämlich, dass die heutige Situation Robotern ein zusätzliches, nicht an die Verfügbarkeit eines realen Körpers gebundenes Entwicklungsbiotop zur Verfügung stellt, das

deswegen in der Natur auch kein Gegenstück besitzt, nämlich die virtuelle Realität. Der Gesichtsroboter bietet ein Beispiel: zur Nachahmung von Gesichtsmimik ist es keineswegs erforderlich, tatsächlich einen Kopf in realer Hardware zu bauen. Vielmehr könnte man denselben Effekt, womöglich noch weitgehend naturgetreuer, in einer dreidimensionalen Simulation in der virtuellen Realität erzielen. Damit sind wir bei meiner dritten These: Es wird eine neue Roboterspezies entstehen – es gibt sie eigentlich schon – die sogenannten virtuellen Roboter, die allein als Simulation existieren. Sie mögen gleich einwenden, ein Roboter in Simulation kann ja nichts Nützliches tun, aber bei genauerem Hinsehen ist dies nicht korrekt. Ein simulierter Roboter kann natürlich auch einen simulierten Gegenstand, etwa ein simuliertes Rad an einem simulierten Auto montieren, und dies ist zweifellos eine nützliche Tätigkeit. Warum? Nun, genau auf solchen Möglichkeiten beruht die ganze Nützlichkeit von Robotersimulationen zur Vorbereitung des realen Einsatzes von Robotern und zur Umstellung von Fertigungsstraßen auf neue Produktvarianten unter Minimierung kostspieliger Umrüstzeiten. Darüber hinaus können wir virtuelle Roboter auch an Kameras anschließen, mit denen sie in unsere Welt hinausblicken können, ganz ähnlich, wie wir Bildschirme benutzen, um in ihre Welt hineinzublicken. Und ebenso wenig, wie sie aus ihrer Welt in unsere Welt gelangen können, genauso wenig können wir Bestandteil ihrer virtuellen Welt werden. Aber die Vermittlung kann in beiden Richtungen sehr symmetrisch gestaltet werden, und mit zunehmender Rechenleistung werden wir auch die virtuelle Welt mit einem immer feinkörnigerem Realismus ausstatten können, bis vielleicht eines Tages die einzige Unsymmetrie darin besteht, dass es in der einen Welt noch einen Stecker gibt, von dem die andere Welt abhängt.

Ein großer Vorteil virtueller Roboter besteht darin, dass wir sie wesentlich leichter bauen (und umbauen) können, als ihre realen Geschwister: wir können uns gänzlich auf den Informationsverarbeitungsaspekt konzentrieren und viele Probleme realer Roboter, wie ihre Energieversorgung, Antriebs-elemente, begrenzte Werkstofffestigkeit und unvermeidlicher Verschleiß treten in der virtuellen Welt gar nicht erst auf. Daher können wir virtuelle

Roboter ungleich rascher entwickeln und dann, wenn wir eine gute Konstruktion gefunden haben, diese nahezu kostenlos beliebig oft vervielfältigen und über das Internet in Sekundenschnelle an jeden anderen Ort der Welt verteilen. Damit bietet sich für die Evolution virtueller Roboter eine sehr günstige Situation, aufgrund der sich virtuelle Roboter sehr schnell entwickeln werden (moderne Computerspiele geben uns bereits eine Ahnung von der Rasanz dieser Entwicklung). Virtuelle Roboter brauchen auch nicht zu altern. Dennoch können sie eine Menge an höchst nützlichen Tätigkeiten verrichten, sie sind gewissermaßen eine reine Informationsverarbeitungs- und Darbietungsspezies. Dies ist keineswegs gering einzuschätzen, denn viele Dienstleistungsaufgaben haben in erster Linie mit der Präsentation von Informationen zu tun. Sie können daher hervorragend von virtuellen Robotern übernommen werden, die mit ihren Möglichkeiten sehr gut an die Anforderungen einer schnell wachsenden Dienstleistungssparte angepasst sind. Kennen Sie die virtuelle Heldin Aki aus dem Film „Final Fantasy“, der vor ungefähr einem Jahr (2001) im Kino zu sehen war? Aki besteht eigentlich nur aus computer-generierten Polygonen, sieht aber schon höchst menschenähnlich aus. Allerdings konnte sich diese virtuelle Figur noch nicht autonom bewegen. Jede einzelne Bewegung musste noch mühsam in allen Details von Hand zusammengesetzt werden (wobei man als „Rohmaterial“ von Sensoren erfasste Bewegungen menschlicher Schauspieler verwendete). Daher besteht ein großes Interesse, solche virtuellen Schauspieler künftig mit autonomer Intelligenz auszustatten, damit bei ihrem Einsatz ein Regisseur nicht länger von einem Bataillon an Programmierern umgeben sein muss, sondern stattdessen seine Anweisungen auf herkömmlichen Wege, durch Sprache und Gestik übermitteln kann und die virtuellen Figuren dann ihre Bewegungen autonom koordinieren.

### **Information ist der attraktivere Rohstoff**

Meine vierte These: Ähnlich wie für den Menschen, so wird auch für Roboter in Zukunft Information im Vergleich zu realer Materie der langfristig attraktivere Rohstoff sein. Viele heutige Entwicklungen sind immer stärker auf die Verarbeitung von Information fokussiert, eine Richtung, in der virtuelle

Roboter große Stärken entfalten können. Die Fähigkeit mechanischen Eingreifens wird dabei an Bedeutung verlieren (beziehungsweise auf hohem Niveau stagnieren). Unsere eigentliche Herausforderung ist daher der Informationsroboter. Vielleicht hilft ein etwas salopper Vergleich, die Situation plastisch zu verdeutlichen: Wir finden es heute selbstverständlich, dass uns moderne Baumaschinen die Erstellung selbst riesiger Gebäude in kurzer Zeit routinemäßig ermöglichen. Solche Gebäude zu bauen gelang auch schon in sehr viel früheren Zeiten, jedoch nahm es sehr lange Zeit (bei Dombauten konnten es Jahrhunderte sein) und die Kräfte sehr vieler Menschen in Anspruch. In einer ähnlichen Situation befinden wir uns heute, wenn wir ein neues Wissensgebäude errichten wollen: in der Regel beansprucht dies sehr lange Zeit (manchmal mehrere Generationen) und sehr viele Köpfe müssen sich daran beteiligen. Vielleicht können uns leistungsfähige Informationsroboter – ähnlich wie Baumaschinen heute beim Bewegen großer Massen an Erdaushub und Beton – künftig dazu befähigen, große „Informationsberge“ zu bewegen, zu durchforsten und in kurzer Zeit zu neuen Wissensgebäuden zusammzusetzen. Angesichts der vor uns stehenden, immer komplexer werdenden Fragestellungen wäre eine solche Fähigkeit in vielen Gebieten überaus hilfreich, und vielleicht werden in der Entwicklung von Suchrobotern für das Internet erste Anfänge einer solchen Technologie erkennbar.

Diese Suchroboter sind nun nicht nur virtuell, sondern auch noch gänzlich körperlos (wenn wir das lediglich graphisch dargestellte dreidimensionale Erscheinungsbild der anderen virtuellen Roboter diesen als „Körper“ anrechnen), denn zur Erbringung ihrer Informationsdienstleistungen ist ein solcher Körper nicht erforderlich (er wäre allenfalls von ausschmückendem Wert). In diesen Suchmaschinen finden wir bereits etliche KI-Techniken integriert, etwa, um Texte nach inhaltlicher Bedeutung zu durchsuchen und zu vergleichen oder – wenn auch noch holprig – in eine andere Sprache zu übersetzen. Ein aktueller Forschungsgegenstand ist die Ausstattung solcher Suchmaschinen mit virtuellen Wahrnehmungsfähigkeiten, damit sie zusätzlich zu Texten beispielsweise auch Bilddateien „anschauen“ und den menschlichen Benutzer bei

der Suche nach bestimmten Bildansichten möglichst intelligent unterstützen können (die Bildsuchfunktionen heutiger Suchroboter stützen sich noch auf die zum Bild gehörenden Textunterschriften).

### **Roboter fördern menschliche Stärken**

Wo werden KI Ansätze so weit gedeihen, dass unsere eigenen Fähigkeiten erreicht oder sogar überholt werden? Hierzu habe ich als fünfte (und letzte) These: Dies wird überall dort stattfinden, wo eine Fokussierung auf ein eng umgrenztes Aufgabenfeld möglich ist. Wir sehen heute schon in bestimmten Gebieten, wie etwa Schach, Optimierung, formales Schließen und etliche andere Spezialgebiete, dass dort computergestützte Ansätze menschliche Expertise erreichen und überholen. Dies ist keineswegs ein Nachteil: Es hilft uns, neue Dinge tun zu können und uns stärker auf Bereiche zu konzentrieren, in denen in erster Linie unsere menschlichen Stärken gefragt sind, und nicht so sehr angelegertes Fachspezialistentum.

Angesichts des Untertitels dieses Symposiums sollten wir fragen: besteht die Gefahr einer Vermenschlichung der Maschine, und ergibt sich daraus für uns eine Bedrohung? An und für sich ist eine Vermenschlichung bei Lebewesen und auch bei Dingen eigentlich kein neues Phänomen: schon seit jeher zeigte unsere Phantasie eine große Neigung, in Puppen, Tiere, Felsformationen, ja sogar in Naturphänomene oder unwesentliche Alltagsgegenstände mehr oder weniger viel von uns selbst hineinzudeuten. Aus dieser Sicht erscheint die Vermenschlichung eher als ein Ausweis unserer Phantasie. Die Neigung, in andere Dinge, in andere Objekte etwas Animiertes hineinzudenken, ist in uns sehr stark verankert und dies ist den Psychologen seit langem gut bekannt. Besonders sichtbar wird dies beispielsweise wenn wir ungeduldig werden: es passiert uns dann leicht, dass wir einen toten Gegenstand anschimpfen oder gar mit dem Fuß anstoßen, geradeso als ob in dem toten Objekt ein Funke von Wahrnehmung oder gar Verständnis steckte. Computer und Roboter werde die Liste unserer „Vermenschlichungsoffer“ einfach verlängern. Wir sollten uns dabei meines Erachtens nicht zuviel Negatives dabei denken, denn als oberflächliche Verpackung bietet solche Vermenschli-

chung durchaus eine Reihe von Vorteilen. Denken wir an das vorhin angesprochene Spielzeug für Kinder, bei dem Vermenschlichung (übrigens auch schon bei ganz „herkömmlichen“ Puppen oder Teddybären) Fürsorge und soziale Hinwendung zu einem vermeintlich pflegebedürftigen Wesen schon frühzeitig zu entwickeln gestattet. Man kann ja kleinen Kindern nicht immer schon echte Babys and die Hand geben, aber mit Puppenspielzeug können sie gefahrlos schon einmal „trainieren“. In der Erwachsenenwelt können vermenschlichte Maschinen die Kantigkeit heutiger Technik abstreifen helfen, die Kommunikation mit Robotern müheloser gestalten und dazu beitragen, dass nicht wir die Bedienung komplexer Systeme mühsam erlernen müssen, sondern dass umgekehrt diese System von uns lernen, was sie tun sollen. Und schließlich erscheint es nicht von Nachteil, wenn sich die Entwicklung von Technik am Menschen orientiert, damit sie auch in menschengemäßen Umgebungen, wie etwa humanoide Roboter im Haushalt, gut funktionieren kann. Die Befürchtung einer Bedrohung unterschätzt vielleicht auch unsere eigenen Fähigkeiten, die Gefahr einer tiefgehenden Verwechslung ist meines Erachtens nur gering. Menschliche Intelligenz und KI liegen auf absehbare Zeit weit genug auseinander, und wir werden sehen, dass die nachfolgende Generation sehr gut in der Lage sein wird, beide klar zu trennen. Vielleicht müssen nur wir, die wir diesen Übergang in beiden Hälften miterleben, an manchen Stellen ein bisschen stärker aufpassen.

Zum Ende möchte ich noch kurz auf die oft sehr optimistischen Prognosen eingehen, dass die Nachbildung menschlicher Intelligenz durch KI-Systeme vielleicht im Kern doch gar nicht so schwierig ist und in erster Linie nur von einem genügend hohen Maß an schneller Rechenleistung abhängt. Mir erscheint eine solche Annahme etwas naiv, und ich möchte diese Naivität mit einem Beispiel einer technischen Entwicklung verdeutlichen, die wir aus heutiger Perspektive vergleichsweise gut überblicken: die Entwicklung von Technologien zur Hervorbringung von Licht. Anfänglich bediente man sich dazu des Feuers, technisch etwas weiterentwickelt in Gestalt der Petroleumlampe oder einer Kerze. Der englische Physiker Michael Faraday schrieb dazu im 19. Jahrhundert ein berühmtes

Buch, in dem er die beim Brennen einer Kerze stattfindenden, bereits beachtlich komplexen physikalischen Prozesse eindrucksvoll darstellte. Etwa in dieselbe Zeit fiel der große Durchbruch der Erfindung der Glühbirne durch Thomas Edison. Diese umwälzende Erfindung konnte nun leicht zu der Erwartung verleiten, in der Lichterzeugung wäre im Prinzip alles Wesentliche durchschaut; der weitere Fortschritt auf diesem Gebiet wird allein aus der Konstruktion immer größerer und zahlreicherer Glühbirnen hervorgehen, ganz ähnlich, wie heute einzelne Kollegen die Realisierung höherer Stufen künstlicher Intelligenz in erster Linie als beinahe zwangsläufiges Resultat einer Zusammenschaltung zahlreicherer und schnellerer Rechenprozessoren erwarten. Bei der Entwicklung von Lichterzeugungstechnologien begegneten uns nach der Glühbirne aber noch etliche Überraschungen: so etwa das kalte Licht in Neonröhren, dessen Erzeugung auf einem gänzlich anderen Prinzip als bei der Glühbirne beruht, das hochgradig „geordnete“ Laserlicht, das wiederum andere Entstehungsbedingungen braucht, chemisches Licht, das auch bei ganz niedrigen Temperaturen erzeugt werden kann, und schließlich Licht aus Halbleiterdioden, dessen Erzeugung keineswegs auf einem Erhitzungsprozess, sondern auf verwickelten festkörperphysikalischen Prozessen beruht, die einen viel besseren Wirkungsgrad als das vertraute Glühlampenlicht ermöglichen und die so schnell steuerbar sind, dass auf diesem Wege erzeugtes Licht sogar elektrische Signale zur breitbandigen Nachrichtenübertragung abzulösen beginnt. Heute blicken wir in der Physik auf eine Theorie, die all diese Fortschritte wunderbar durchschauen lässt und die uns klar macht, wie diese einzelnen Formen und Erzeugungsweisen von Licht miteinander zusammenhängen. Auf dem Weg zu diesen Einsichten lagen – auch nach der Erfindung der Glühbirne – noch viele überaus spannende wissenschaftliche Überraschungen und ich wäre enttäuscht, wenn dies im Falle der KI anders wäre. Ganz im Gegenteil, ich bin sicher, dass die Hervorbringung von Intelligenz keine einfachere Aufgabe ist und eher noch vielfältigere Überraschungen zu Tage fördern wird als die Hervorbringung von Licht.

# Die Vermenschlichung der Maschine:

## Chancen und Risiken künstlicher Intelligenz

Kommentar *Joseph Weizenbaum*

### *Prof. Dr. Joseph Weizenbaum*

beschäftigte sich während seinem Berufsleben hauptsächlich mit Computern. Im Rahmen einer achtjährigen Tätigkeit für General Electrics war er für die Hardware-Software-Integration eines bahnbrechenden Computerprojektes für die Bank of America verantwortlich. 1963 erhielt Weizenbaum einen Ruf an das Massachusetts Institute of Technology (MIT), wo er neben seiner Lehrtätigkeit an der Entwicklung und Durchführung des ersten großen Teilnehmer-Rechensystems beteiligt war. Das erste Computernetzwerk, das sogenannte ARPA-Netz, ging teilweise aus dieser Forschungsarbeit hervor und wurde zur Vorlage für das heutige Internet. Prof. Weizenbaums Forschung richtete sich später auf virtuelle Kommunikation. Während dieser Forschungen entwickelte er das ELIZA-Programm, mit dem, in aus heutiger Sicht primitiver Weise, die Kommunikation mit Computern in natürlicher Sprache möglich wurde.



Nach fünfundzwanzig Jahren am MIT wurde Prof. Weizenbaum emeritiert und zum Professor Emeritus und Senior Lecturer des Instituts ernannt. Während seiner akademischen Laufbahn schrieb er neben zahlreichen Artikeln für Fachzeitschriften sein Buch „Computer Power and Human Reason“. Zu seinen Ehrentiteln gehören der Doctor of Science Degree, h.c. der State University of New York, ein Dokortitel der Literatur, h.c. des Daniel Webster College of New Hampshire, Doktor der Naturwissenschaften ehrenhalber sowie ein Ehrendokortitel der Universität Bremen.

„ Ich glaube die Schwierigkeit, über die wir nachdenken müssen, liegt nicht darin, was wir hier heute gehört haben, das ist alles sehr interessant, alles hochinteressant.

Ich glaube, das allermeiste davon ist auch richtig, obwohl manche der Ziele, manche der Wünsche nicht nur ein bisschen unrealistisch sind.

Zum Beispiel, dass man diese Puppen herstellt, die Lachen und Weinen können und unsere emotionalen Regungen nachahmen, wie die von Rodney Brooks und dass man denkt, das könnte vielleicht sehr gut für Kinder sein. Als Beitrag zu ihrer Erziehung, dass sie schon ganz früh etwas lernen können über Wesen, die Pflege brauchen und alles das, ich glaube, das ist ein katastrophaler Fehler, ein katastrophaler Fehler.“



## „Der Mensch als eine Maschine ...,

das ist auf einer Ebene eine Erklärung, aber so sehen wir den Mensch fast nie. Viele von uns haben den Mensch jedenfalls nie so gesehen. Wir sehen den Mensch, wie ich ihn heute sehe, nicht als eine Sammlung von Molekülen, sondern als ein soziales Wesen, das unter anderem ein Mensch ist, indem er von Menschen als Mensch behandelt wird.

Das ist es. Und auf dieser Ebene, **der Mensch als soziales Wesen, der Mensch in der Gesellschaft ist alles andere als eine Maschine** und deswegen können wir den Mensch nicht nachbauen, indem wir die Maschinenteile zusammensetzen, oder so etwas. Aber es ist schon im Sprachgebrauch, dass wir über den Mensch als eine Maschine reden und

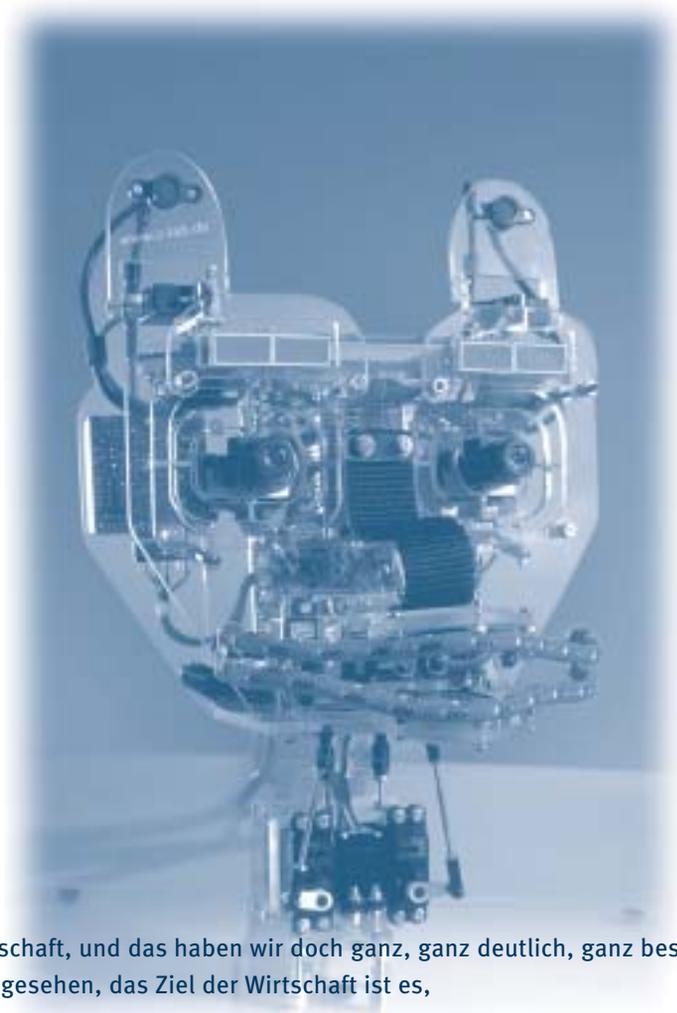
ich glaube das Menschenbild wird immer weiter zu dem Bild einer Maschine.“



„Was passiert,

wenn wir so ein Menschenbild haben?

Da brauchen wir uns nur erinnern an die letzte Hälfte des letzten Jahrhunderts und was wir, ich meine jetzt wir Menschen, mit anderen Menschen getan haben. Bevor wir das tun könnten, müssten wir die Menschen, denen wir es antun, als Unmenschen identifizieren und richtig verinnerlichen, dass sie Unmenschen sind, dass sie keine Menschen sind. **Und wenn wir wirklich soweit kommen, den Mensch nur eine Variante und sogar eine mittelmäßige Variante von einem intelligenten Roboter sehen, dann wird es uns möglich, alles, ich würde fast sagen alles Unmögliche mit anderen Menschen zu tun.**“



„ Das Ziel der Wirtschaft, und das haben wir doch ganz, ganz deutlich, ganz besonders in den letzten Monaten gesehen, das Ziel der Wirtschaft ist es,

den Profit für einen ganz winzigen Teil der

Menschheit zu optimieren, zu maximieren,

würde ich sagen. Und was ich gesehen habe, und ich spreche von meiner ganz persönlichen Erfahrung, ich habe – es tut mir leid, das sagen zu müssen – aber ich habe eine ganze Anzahl Gentechniker in den letzten drei Jahren kennengelernt, hier in Deutschland, **und ihr Ziel ist einfach Geld.** Es ist ein wesentliches Geschäft in das sehr viel Geld reingepumpt wird, in dem man sehr viel Geld verdienen kann. Es ist bestimmt auch so, dass es einen Nutzen hat und dass es wissenschaftlich ist und so weiter, aber das ist es nicht, was sie motiviert. “

# Technische Entwicklung, Globalisierung und Wirtschaft

## Technische Entwicklung, Globalisierung und Wirtschaft – einige systemare Aspekte *Bruno Fritsch*

### Prof. Dr. Bruno Fritsch

wurde 1959 als ordentlicher Professor für Volkswirtschaft an die Technische Universität Karlsruhe berufen. 1962 Berufung an die Universität Heidelberg, von 1965-92 ordentlicher Professor an der ETH Zürich und Co-Direktor des Instituts für Wirtschaftsforschung. Mitbegründer des 1972 an der ETW eingeführten Nachdiplomstudiums über Probleme der Entwicklungsländer (NADEL). Fritsch studierte in Harvard und habilitierte an der Universität Basel. Er ist Mitglied verschiedener schweizerischer und deutscher Expertenkommissionen u.a. der vom schweizerischen Bundesrat eingesetzten Expertengruppe Energieszenarien (EGES), Mitglied verschiedener Stiftungsräte.



Die Weltbevölkerung hat sich seit Ende des Zweiten Weltkrieges verdreifacht und der Energieverbrauch pro Kopf circa versechsfacht. Daraus ergibt sich eine Zunahme des globalen anthropogen verursachten Stoffdurchsatzes im Interaktionsbereich von Hydro-, Litho- und Atmosphäre um den Faktor 18. Wahrscheinlicher ist, dass sich dieser Durchsatz in der evolutionshistorisch kurzen Zeit von

55 Jahren sogar um den Faktor 20 erhöht hat. Angesichts solcher Größenordnungen und der Schnelligkeit ihres Auftretens (Impulscharakter) kann der anthropogene Faktor im Prozess der Evolution nicht mehr vernachlässigt werden. Es kommt hinzu, dass die Subsysteme des Wirkungsgefüges Mensch – Umwelt – Wissen intertemporär verschränkt sind.

#### Bevölkerungsdichte und Energiefluß pro km<sup>2</sup>

Jahr	Weltbevölkerung (in 10 <sup>9</sup> )	Einwohner / km <sup>2</sup>	kW / cap.	kW / km <sup>2</sup> (anthrop. Energiefluß)
1830	1.0 <sup>1)</sup>	0.75 <sup>1)</sup>	0.50	0.37
1930	2.0	1.50	1.39	2.08
1960	3.0	2.25	1.88	4.23
1990	5.3	3.97	2.55	10.12
2000	6.1 <sup>1)</sup>	4.60	4.10	18.90
USA				
1999	0.278	28.0	13.00	37.10

1) Schätzung  
 Angenommene „Weltsiedlungsfläche“: 133,6x10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>  
 übrige Daten: Weltbankberichte sowie Berichte des World Energy Council (WEC).

Folgende Faktoren erschweren die politische Umsetzung wissenschaftlich gewonnener Erkenntnisse:

1. Der Wirkungsbereich von Umweltprozessen geht über den Legitimationsbereich der Akteure hinaus. Das gilt insbesondere für die Emission von Treibhausgasen. Die wichtigsten Akteure sind nach wie vor Nationalstaaten – insbesondere große Industrienationen.

2. Es ist schwierig – wenn nicht gar unmöglich – den anthropogenen Anteil der zweifellos stattfindenden Klimaveränderung genau zu bestimmen und die Eigenschaften der Wechselwirkungen (Synergien) zwischen anthropogen verursachten und natürlich erfolgenden Umweltprozessen zu eruieren.

3. Die *Nichtlinearität* ökologischer Systeme impliziert plötzliche Phasenübergänge bei gleichzeitigem Verzögerungsverhalten (Hysterese). Zunächst geschieht lange nichts, jedenfalls nichts, was Anlass zu Besorgnis gäbe; plötzlich kippt das System um und geht schlagartig in einen neuen Zustand über, der in der Regel unumkehrbar ist. (s. Punkt 10).

4. Die *Messgenauigkeiten* haben in den letzten Jahren um den Faktor *Tausend* bis eine *Million* zugenommen. Fortschritte in der Gaschromatographie und die Entwicklung hochempfindlicher Massenspektrometer erlauben heute den Nachweis von einigen Tausend Atomen in einer Umgebung von  $10^{25}$  bis  $10^{28}$  Atomen benachbarter Isotope. Heute können Konzentrationen von einigen *ppt* (*parts per trillion*), d.h. Relationen von 1 zu  $10^{12}$ , gemessen werden. Für die Umweltpolitik stellt sich dann die Frage nach der Verhältnismäßigkeit der sich auf solche Veränderungen stützenden Maßnahmen.

5. Einerseits nimmt unser Wissen über ökologische Zusammenhänge ständig zu; andererseits entdecken wir aber gerade durch diese Wissenszunahme auch, dass der Bereich unseres *Nichtwissens* zunimmt. Im politischen Bereich entstehen dadurch neue Schwierigkeiten: die einen berufen sich auf „gesichertes“ Wissen, die anderen auf die

noch bestehenden Unsicherheiten und die zu erwartenden neuen (besseren) Daten. Dadurch wird die Umsetzung der jeweiligen Erkenntnisse in konkrete Entscheidungen stark verzögert.

6. Die Umweltpolitik muss in einem „zeitverstränkten“ Raum operieren, weil die *Zeitdimensionen* ökologischer, ökonomischer und politischer Prozesse stark voneinander abweichen. In der Ökologie haben wir es mit Zeitspannen von Hunderten und Tausenden von Jahren zu tun; in der Politik hängen die verfügbaren Zeitperioden von der Wiederwahl der Volksvertreter ab, während ökonomische Vorgänge in der Regel einen Zeithorizont von höchstens zehn Jahren aufweisen – Tendenz sinkend.

7. *Verzögerungsverhalten* (Hysterese): Wir haben es in der Umweltpolitik mit einer Kombination von drei Verzögerungen zu tun: mit dem Zeitbedarf der *Erkenntnis*, dem Zeitbedarf von *Handlungen* und dem Zeitbedarf von *Wirkungen*. Die Summe dieser drei Verzögerungen impliziert in der Regel einen Zeitbedarf, der größer ist als jene Zeitspanne, die für Korrekturen von Umweltstörungen tatsächlich zur Verfügung steht.

8. Da wir in der Regel nicht wissen, wann und wo ein wissenschaftlicher oder technischer Durchbruch kommt, ist eine optimale Anpassung der Politik im Hinblick auf die Schaffung von „win-win“ Situationen bislang weder auf nationaler noch – und da schon gar nicht – auf internationaler Ebene möglich.

9. Zur Beherrschung der Kreisläufe und insbesondere zur Schließung von Massenströmen – sofern und soweit eine solche Schließung nötig ist – bedarf es eines offenen Systems, dem von außen Energie zugeführt wird. Unsere Erde ist ein solches System. Energiezufuhr, Entfaltung des an Energieverfügbarkeit gebundenen Wissens sowie praktische Umsetzung dieses Wissens in Form von angewandter Technologie bilden das für eine erfolgreiche Umweltpolitik notwendige Potenzial. Die Industrieländer verfügen über dieses Potenzial – ganz im Gegensatz zu den Entwicklungsländern und den ehemals sozialistischen Planwirtschaften.

Dadurch entstehen automatisch zunehmende Ungleichheiten und Interessenskonflikte.

10. Irreversibilitäten: weil der Zeitpunkt des Eintritts einer Irreversibilität in der Regel nicht genau vorausgesagt werden kann, ist es schwierig, wenn nicht gar unmöglich, die Richtung der Prozesse zu bestimmen, die aus der Wechselwirkung von natürlichen und anthropogenen Faktoren resultiert. Eine Lenkung des Gesamtsystems ist deshalb nicht möglich.

Tinbergen hat im Zusammenhang mit der klassischen Wirtschaftspolitik bereits in den fünfziger Jahren darauf hingewiesen, dass kein Zusammenhang zwischen den Ursachen eines Zustandes und den Mitteln zu dessen Behebung bestehen muss.

Für die Umweltpolitik bedeutet dies: Man muss sich auf jene Ziele einigen, die Priorität haben, auch wenn sie mit der Erhaltung einer „wünschbaren“ Umwelt nicht immer kompatibel sind (Beispiel: Staudämme in China).

Zwischen der medial vermittelten Wahrnehmung über umweltrelevante Vorgänge und der wissenschaftlichen Evidenz herrscht häufig ein Gegensatz.

Die *Öffentlichkeit* perzipiert z.B. einen direkten Zusammenhang zwischen Bevölkerungszunahme und Hunger, das Vorhandensein von Energieknappheit, die Endlichkeit der Ölvorräte und aller übrigen Ressourcen, die großen Risiken der Kernenergie, die Zerstörung der Wälder durch Abgase und Abholzung sowie den durch anthropogene Faktoren (Erwärmung der Erdatmosphäre) verursachten Anstieg der Meeresspiegel.

Keine dieser Ansichten wird von der Wissenschaft ohne Vorbehalt gestützt. Das gilt für die Bevölkerungsfrage ebenso wie für die Energieknappheit, die Zukunft der Kernenergie sowie für alle übrigen oben erwähnten Problembereiche.

Die bisherige Umweltpolitik – insbesondere im Energiebereich – beruht nach wie vor auf dem Konzept von Ge- und Verboten bzw. Lenkungsmaßnahmen. Technische Lösungen, wie beispielsweise

die Sequestrierung von CO<sub>2</sub> oder die Reabsorption durch Aufforstungen bzw. technische Maßnahmen auf der globalen Ebene des sog. „Geoengineering“ liegen noch in weiter Ferne, obwohl es auf dem Gebiet der „Greenhouse Gas Control Technologies“ sehr viele Entwicklungen gibt, die ein großes Potenzial haben. (Siehe z.B. die Proceedings der im August 2000 in Cairns stattgefundenen fünften GHGT Konferenz).

Wie sollen die Politiker unter solchen Umständen „sachgemäß“ entscheiden? Umweltpolitik findet heute – und wohl auch in Zukunft – zwischen wissenschaftlich begründeter Unsicherheit und psychologisch erklärbarer Verängstigung der Öffentlichkeit statt. Obwohl man die am Rande von internationalen Konferenzen stattfindenden Proteste nicht überbewerten sollte, sind sie doch ein Zeichen dafür, dass die Kommunikation zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Öffentlichkeit nicht in ausreichendem Maße stattfindet.

Eine unter vielen anderen Möglichkeiten, Verunsicherungen abzubauen bestünde darin, eine „Ethik der Zurückhaltung“ zu üben. Dadurch würde sich das Tempo der Veränderungen verringern, so dass eine bessere Anpassung der gesellschaftlichen Lerngeschwindigkeit an den sich vollziehenden Wandel stattfinden könnte. Leider lässt sich eine solche Verlangsamung unter den heute gegebenen Bedingungen der internationalen Konkurrenz nicht realisieren.

### **Ausblick**

Eine lebenserhaltende Umwelt kann nicht nur genutzt und „verbraucht“, sondern – wie jedes andere Gut – auch erzeugt werden. Das können vor allem solche Gesellschaften, die die *Produktion von Wissen durch Wissen* am besten beherrschen. Nicht ohne Grund ist die Umwelt in den Entwicklungsländern stärker geschädigt als bei uns. Es werden weltweit „centers of excellence“ entstehen – nicht nur nach dem Vorbild des Silicon Valley – aber ähnlich. Solche Zentren wirken infolge von Synergien und Skaleneffekten wie Attraktoren. Dieser Prozess ist bereits heute in vollem Gang und beschleunigt sich zusehends. Obwohl die Versorgung mit materiellen Gütern in vielen

Ländern immer noch sehr schlecht ist, liegt das eigentliche Problem der sozialen Destabilisierung auf mittlere Sicht nicht bei der Versorgung mit materiellen Gütern, sondern auf dem Gebiet des *Wissenserwerbs* und der *Umsetzung des Wissens* in technische Anwendungen. Dieser Umsetzungsprozess beschleunigt sich und wird komplexer. Denjenigen, die diese sehr schnell ablaufenden, komplizierten Vorgänge der Wissenserlangung und -umsetzung am besten und schnellsten beherrschen, gehört die Zukunft.

Daraus folgt: das Konzept der Nachhaltigkeit des Gesamtsystems „Erde-Mensch“ kann infolge der fortlaufenden Bildung von Attraktoren weltweit nicht homogen verwirklicht werden. Die heute verfügbaren Informationstechnologien (z.B. das Internet) sind nicht nur weltweit ungleich verteilt, sondern auch innerhalb einzelner Nationalstaaten und Regionen bei weitem nicht allen gleichermaßen zugänglich. Technisch gibt es bei uns zwar eine beinahe flächendeckende Versorgung mit Informationen, doch ihr Abruf und ihre Nutzung sind ungleich verteilt. Auf der Ebene der Umsetzung von Information in Wissen sind die Ungleichheiten noch größer.

In dieser Situation sollten wir unsere Aufmerksamkeit auf die Gewährleistung von Bedingungen konzentrieren, die eine kontinuierliche und schnelle Erlangung von Wissen und dessen Umsetzung in die *Gestaltung von selbstbestimmten Lebensstilen* erlauben. Effiziente Energiesysteme bleiben weiterhin eine notwendige, wenn auch nicht hinreichende Bedingung für die Erhaltung einer intakten Umwelt. Es gilt jedoch zu bedenken: Die *Wissensproduktion* ist das „A“ und „O“ der Entfaltung des Menschen. Erst ein wissenschaftlich fundiertes und breit vermittelbares Wissen kann zu einer nachvollziehbaren Abwägung der Chancen und Risiken unterschiedlicher Energiepfade führen und *politisch realisierbare*, wie auch *ethisch verantwortbare* Wege zur Nachhaltigkeit anbieten. Es sind also nicht in erster Linie technische, sondern vor allem politische Probleme, die es zu lösen gilt.

Ungleichheiten im technischen Fortschritt erzeugen Spannungen zwischen Regionen, Ländern bzw. Ländergruppen. Deswegen ist die Umwelt- und insbesondere die Energiepolitik starken irrationalen, oft ideologischen Strömungen ausgesetzt. Technische Lösungen werden als technokratisch disqualifiziert und der Handel mit Emissionszertifikaten wird als Ausdruck einer unethischen Ökonomisierung verurteilt, obwohl dieses Verfahren wahrscheinlich auch im Sinne des Gerechtigkeitsprinzips die beste Lösung wäre.

Das Hauptproblem liegt in der internationalen *Koordination der Politikbereiche* (Sozialsysteme, Steuersysteme, Versicherungssysteme usw.) Daraus ergeben sich schwerwiegende *Verteilungsprobleme* zwischen den Staaten und den Regionen. Die wirtschaftlichen Vorteile der Nutzung des Internet in den technisch fortgeschrittenen Ländern sind um Faktoren größer als in den Entwicklungsländern. Der durch die elektronischen Medien mögliche Vergleich von virtuellen Wohlstandsbildern mit der real gelebten Armut erweckt unrealistische Erwartungen. So entsteht ein explosives Gemisch von Fehlinformation, Begehrlichkeit, Mobilität und Ideologien, teilweise gestützt durch klassenkämpferische Ideen, die in den armen Ländern noch als treffende Beschreibung der eigenen Lebenssituation erlebt werden.

Die explosionsartige Erhöhung von Effizienz und damit Produktivität in den Ländern der sog. „New Economy“ (ein sehr zwielichtiger Begriff) kann zu einer sozialen und damit auch ökologischen Destabilisierung des Gesamtsystems „Welt“ führen. Die Dringlichkeit der Schaffung von implementierbaren internationalen Regeln nimmt zu, die Bereitschaft und Fähigkeit der Nationalstaaten, sich auf eine „Weltinnenpolitik“ einzulassen, nimmt hingegen ab. Das wird vermutlich zu einem weiteren Anstieg der bewaffneten Konflikte führen – was bereits zu beobachten ist.

Das Wissen von dem Zusammenhang gegenwärtig verfügbarer wissenschaftlicher Evidenz und den Auswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen auf gegenwärtige und künftige Generationen ist

immer eine Sache der Politik. Wir können nicht wissen, welche Präferenzen künftige Generation der einst haben werden und ob sie jene Stoffkombinationen, die wir heute als Ressourcen betrachten auch brauchen werden. Was wir aber mit Sicherheit und auf Grundlage des *common sense* unterstellen dürfen, ist, dass auch künftige Generationen den Willen zum Leben haben werden und die Intelligenz, ihr eigenes Leben unabhängig von unseren Vorstellungen zu gestalten. Jenseits von wissenschaftlicher Evidenz und politischer Opportunität darf deshalb gesagt werden, dass die *Erhal-*

*tung der Bedingungen für eine schnelle und ideologiefreie Wissensaneignung* viel wichtiger sind als die Erhaltung materieller Ressourcen wie z.B. Kohle, Öl, Erze, usw., die uns heute wichtig erscheinen und deren Erschöpfung wir fürchten. Solow spricht in diesem Zusammenhang von der Erhaltung der „productive capacity for an indefinite future“. Die Fähigkeit, sowohl mit Wissen als auch mit Nichtwissen politisch umzugehen, müssen wir noch lernen. Sie könnte sich in Zukunft als wichtiger erweisen als manche *High-Tech*-Innovation.



# Das Zukunftspotenzial Baden-Württembergs

## Das Zukunftspotenzial Baden-Württembergs und seiner Regionen aus wirtschaftsgeographischer Sicht *Michael Thiess*

### *Michael Thiess*

Michael Thiess beschäftigt sich seit fast 20 Jahren als Unternehmensberater mit Top-Managementfragen zum internationalen Gesundheitswesen, zu Life Sciences und zu Biotechnologie sowie mit Fragen der Innovations- und Technologiepolitik insbesondere der öffentlichen Hand. Von 1989 bis 2002 leitete Thiess bei Roland Berger Strategy Consultants das internationale Competence Center Pharma / Medizintechnik bzw. Healthcare / Non-Profit-Organisationen. Er ist Mitglied im Beirat der BIOTEST AG, Dreieich, Aufsichtsvorsitzender der Antwerpes AG, Köln sowie im Advisory Council der Healthcare Management Initiative von INSEAD, Fontainebleau.



### **Nur Spitzentechnologie ermöglicht überdurchschnittliches Wachstum**

Aus meiner (volks- und betriebswirtschaftlichen) Sicht ist es nur zu begrüßen, dass die anhaltende Technische (R)Evolution sich mit großer Geschwindigkeit vollzieht. Nur Spitzentechnologie ermöglicht auch das von unserer Gesellschaft angestrebte überdurchschnittliche Wachstum.

Der gesellschaftliche Wohlstand in Deutschland insgesamt und in Baden-Württemberg im Besonderen ist nur durch weiteres kontinuierliches wirtschaftliches Wachstum aufrecht zu erhalten. Hierzu werden die neuen Technologien als Wachstumsmotor dringend benötigt.

Die Herausforderung liegt darin, die für Baden-Württemberg richtigen Technologie- und Wachstumsfelder zu identifizieren und im Zusammenspiel zwischen Wissenschaft, Bildung und Wirtschaft gezielt zu fördern.

Weltweit sind Cluster Beschäftigungsmotor und Aushängeschild für Standorte – Beispiele sind das Silicon Valley in den USA für die Computer und Mikroelektronik oder auch Baden-Württemberg für den Bereich der Automobilindustrie.

Baden-Württemberg nimmt heute nicht von ungefähr einen Spitzenplatz unter den internationalen Wirtschaftsregionen ein. Aufbauend auf einem leistungsfähigen Schulsystem hat sich eine blühende und vielfältig Forschungs- und Universitätslandschaft mit hohen Aufwendungen für den Bereich Forschung & Entwicklung gebildet. In enger Zusammenarbeit mit der Industrie werden Jahr für Jahr bezogen auf die Einwohnerzahl die meisten Patente in Deutschland angemeldet. Entsprechend hat sich zusätzlich zu den international starken und großen Unternehmen in Baden-Württemberg eine blühende Gründerszene entwickelt.

Dies alles kommt der wirtschaftlichen Entwicklung und damit insbesondere der Bevölkerung zu Gute: sowohl beim Wachstum des BIP in den letzten Jahren als auch bei der Zahl der Erwerbstätigen – um nur zwei Beispiele zu nennen – liegt Baden-Württemberg an der Spitze in Deutschland.

Um diese Entwicklung auch künftig fortschreiben zu können, sind vielfältige Anstrengungen erforderlich. Dies gilt zum einen für den Ausbau des Vorhandenen durch kurzfristig wirksame Maßnahmen, als auch durch das rechtzeitige Erkennen von Trends und notwendigen Weichenstellungen in neue Technolo-

giebereiche durch langfristige, eher strategische Maßnahmen. All die Maßnahmen dienen dem gleichen Ziel – der Sicherung des Wirtschaftsstandortes Baden-Württemberg.

### **Das Zukunftspotenzial Baden-Württembergs**

Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit ist der Schlüssel zum Wohlstand. Dies gilt nicht nur für Unternehmen, sondern besonders für einzelne Regionen, die verstärkt im globalen Wettbewerb stehen.

Die Landesstiftung Baden-Württemberg gGmbH gab daher die Studie „Zukunftsinvestitionen in Baden-Württemberg“ in Auftrag. Die Studie hatte zur Aufgabe – aufbauend auf einer sorgfältigen Analyse – Entwicklungstendenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen mit hohem Potenzial für die Sicherung der Zukunftsfähigkeit des Landes in den Bereichen Ausbildung, Forschungsinfrastruktur und Innovationsförderung zu geben.

Aufgrund des zugrunde gelegten ganzheitlichen Ansatzes wurden neben verschiedenen Clustern auch Technologien mit hoher Querschnittswirkung sowie strategisch wichtige Forschungsthemen und die Rahmenbedingungen in Baden-Württemberg untersucht.

Das zentrale Prinzip zur Stärkung der Wirtschaftskraft in global führenden Wirtschaftszweigen ist das Konzept der Cluster. Cluster sind thematisch orientierte Netzwerke von privaten und öffentlichen Akteuren in Forschung und Industrie, die gemeinsam Synergien nutzen und das wirtschaftliche Wachstum in ihrem Themengebiet vorantreiben. Cluster definieren sich nicht über ihre Grenze, sondern über ihre thematischen Zentren. Vollausgebildete Cluster decken die gesamte Wertschöpfungskette ab – von der Grundlagenforschung bis zur Vermarktung fertiger Produkte und Dienstleistungen. In ihnen herrscht ein offenes Kommunikationsmilieu, das die effektive Nutzung von Synergien ermöglicht. Zudem haben sie positive Auswirkungen auf andere Branchen und Bereiche.

Mehr als dreißig in Baden-Württemberg ansässige Branchen wurden auf ihre Cluster-Eignung nach zwei grundsätzlichen Kriterien identifiziert und bewertet: anhand der Stellung einer Branche, eines Bereiches oder eines Themas im globalen Wettbewerb und

anhand der wirtschaftlichen Bedeutung für Baden-Württemberg (Beitrag zum Sozialprodukt, kurz-, mittel- und langfristige Auswirkungen auf die Beschäftigung). Außerdem spielte das zu erwartende wirtschaftliche Potenzial und der derzeitige Entwicklungsstand eine Rolle.

Sechs Cluster kristallisierten sich als in unterschiedlicher Weise besonders relevant für Baden-Württemberg heraus:

- Automobil
- Produktionstechnik
- Unternehmenssoftware und -dienste
- Photonik
- Telemedia
- Gesundheit

Um die Wirtschaft Baden-Württembergs mittelfristig möglichst effektiv zu stärken, sollte der Schwerpunkt der Cluster-Entwicklung – gemäß dem Leitmotiv „Stärken stärken“ – auf die wachstumsstarken und bereits in ihren Grundstrukturen entwickelten Cluster Photonik sowie Unternehmenssoftware und -dienste gelegt werden.

Für den fest etablierten Automobilcluster, das wirtschaftliche Rückgrat Baden-Württembergs, sind die Sicherung der Standortbindung und des weiteren Wachstums – besonders für den Mittelstand Baden-Württembergs – von vorrangiger Bedeutung. Die Automobilhersteller werden sich immer stärker auf ihr Kerngeschäft konzentrieren und Produkt- sowie Prozessschnittstellen reduzieren. Durch wirtschaftliche Umbrüche wird sich der Wertschöpfungsanteil der Zulieferer erheblich erhöhen. Genau wie die Hersteller durchlaufen die Zulieferer eine ausgeprägte Konsolidierung. Mittelfristig werden das intelligente und umweltfreundliche (Stichwort: Brennstoffzelle) Auto zur Marktreife gelangen.

Standortbindung und Wachstum sind für die Zukunft des heute fest etablierten Clusters Produktionstechnik die wichtigsten Themen. Technologische Quantensprünge, Globalisierung und Zunahme der Serviceanteile bei den Leistungen und Produkten sind die wesentlichen Entwicklungen in diesem Cluster. Die Empfehlungen beziehen sich auf eine Verbesserung der Aus- und Fortbildungssituation, eine Imageverbesserung (durch intensive Vermarktung), und Verbesserung des Technologietransfers (z.B.

durch regelmäßige Innovationsrunden). Für die Produktionstechnik hat die Förderung der Querschnittstechnologien eine besonders wichtige Bedeutung.

Der Cluster Unternehmenssoftware und -dienste hat ein enormes Potenzial, da dieser Bereich u.a. durch das Internet derzeit einen enormen Wachstumsschub erfährt. Die Unternehmen Baden-Württembergs nehmen hier eine hervorragende Stellung im internationalen Umfeld ein. Der dominierende Schwerpunkt der meisten Akteure in Baden-Württemberg in diesem Sektor liegt in der Anwendung von Software in Unternehmen. Viele Unternehmen entwickeln auch zwischenbetriebliche Internetplattformen. Es fehlt allerdings eine Vernetzung der privaten und öffentlichen Akteure untereinander. Daher wurde empfohlen eine Task Force einzurichten, um eine Vision des Clusters zu entwickeln und die Kräfte in Wissenschaft und Wirtschaft zu mobilisieren. Die Chance besteht in der Ausrichtung auf eine internationale Führungsrolle im derzeitigen Kerngeschäft.

Der erst in Ansätzen ausgebildete, aber äußerst wachstumsstarke (weltweiter Umsatz 2013: rund 500 Mrd. US \$) Cluster der Photonik (Licht- und Lasertechnologien) bedarf einer intensiven Unterstützung durch das Land Baden-Württemberg und der Vernetzung seiner verschiedenen Akteure, um sein Potenzial mittelfristig frei zu setzen. Die Photonik ist Innovationsträger in Gebieten wie der Materialbearbeitung, der Mess- und Regeltechnik, der Sensorik und der Medizintechnik. Rund 30 Prozent der elektronischen Technologien dürften durch optische ersetzt werden. Die Photonik spielt oft die Rolle eines „Enablers“, d.h. sie ermöglicht die Entwicklung moderner Geräte und Anwendungen. In Baden-Württemberg wurde bereits der Verein „Photonics BW e.V.“ gegründet als Plattform für alle Unternehmen und universitären Forschungseinrichtungen, die auf diesem Gebiet bereits heute erfolgreich arbeiten.

Derzeit ist der Bereich Telemedia in Baden-Württemberg noch recht heterogen: elektronische Bildung, Entertainment, Medien, IT-Sicherheit, Telekommunikation und Hardware – alles findet sich unter diesem Dach. In anderen Regionen haben sich bereits deutlicher Telemedia-Cluster herausgebildet. Dieser Bereich ist aber sehr zukunftssträftig und weist entsprechendes Potenzial auf. Notwendig ist

die Schaffung eines Kristallisationskerns. Hierfür kommen die Telemedia-Zweige Wissensmanagement, mobile Datenanwendungen, Hochgeschwindigkeitsdatennetze oder die Forcierung von „Science-on-demand“ durch Fachverlage in Frage.

Baden-Württemberg bietet eine einzigartige Konzentration an Unternehmern und Dienstleistern, die auf dem Gebiet des Gesundheitswesens tätig sind. Große forschende Pharmaunternehmen, Großhändler, renommierte Kliniken und Rehabilitationseinrichtungen sowie Krankenkassen sind hier vertreten. Im Gesundheitssektor nimmt die Nachfrage nach immer stärker integrierten Angeboten zu: Wegen historisch bedingter Abgrenzungen werden potenzielle Synergien noch zu wenig genutzt. Ein übergreifende Gesundheitsforum nach amerikanischem Vorbild könnte die entsprechende Plattform in Baden-Württemberg schaffen, und für entsprechendes Wachstumspotenzial sorgen.

Querschnittstechnologien wirken als wichtige Wachstumstreiber und unterstützen die wirtschaftliche Entwicklung von Clustern. Von den Querschnittstechnologien gehen oftmals technologische Umbrüche aus. Der Erfolg eines Unternehmens hängt in großem Maße von der Anwendung moderner Technologien ab. Hierzu ist ein optimaler Technologietransfer notwendig.

Für die Industrie in Baden-Württembergs sind insbesondere fünf Querschnittstechnologien relevant:

- Embedded Systems (Kleinstcomputer für spezifische Aufgaben)
- Mess- und Regeltechnik
- Miniaturisierung / Nanotechnologie
- Neue Energieumwandlungs- und Antriebstechnologien (z.B. Brennstoffzelle)
- Neue Materialien (u.a. Verbundwerkstoffe, bioverträgliche Materialien)

Die Querschnittstechnologien und deren Durchdringung der Unternehmenslandschaft können durch spezifische und übergreifende Maßnahmen gefördert werden. Hierzu zählen beispielsweise die Bildung einer Kommunikationsplattform (zur Stärkung der Innenwahrnehmung), Lancierung von Imagekampagnen (zur Stärkung der Außenwahrnehmung), die Einrichtung von Nahtstellenworkshops (als Bindeglied zwischen Wissenschaft und

Wirtschaft) sowie die Intensivierung von Ausbildung und Forschung auf den genannten Gebieten. Denkbar wären auch gezielte Förderwettbewerbe oder die Einrichtung einer online-Datenbank für die verschiedenen Technologien und deren Einsetzmöglichkeiten.

Entscheidend für die langfristige wirtschaftliche Entwicklung Baden-Württembergs ist eine herausragende strategische Forschung (Grundlagenforschung), die insbesondere auf die Wachstumsfelder ausgerichtet ist. Hier werden Weichen gestellt, um eine internationale Spitzenposition nicht nur aufzubauen, sondern auch über Jahre zu halten.

In Baden-Württemberg sind bedeutende strategische Forschungsfelder (Grundlagenforschung) bereits weit entwickelt oder weisen zumindest ein beträchtliches Entwicklungspotenzial auf. Die Umsetzung in vermarktungsfähige Produkte und Technologien ist – im Gegensatz zur anwendungsorientierten Forschung – frühestens in zehn bis 15 Jahren zu erwarten.

Die wirtschaftliche Zukunft Baden-Württembergs wird geprägt von zehn strategischen Forschungsfeldern:

- Life Sciences
- Neue Materialien
- Informatik / Angewandte Mathematik
- Miniaturisierung / Nanotechnologie
- Optische Technologien
- Verfahrenstechnik
- Sensorik
- Kybernetik
- Energie- und Umweltforschung
- Schnittstelle Chemie/Physik/Biologie

Für die Auswahl der für Baden-Württemberg besonders bedeutsamen strategischen Forschungsfelder waren insbesondere die Kriterien hohe Ausstrahlungseffekte in andere Wissensbereiche, vorhandene Exzellenz in der Forschung, langfristig globales Wirtschaftspotenzial, hoher Beitrag zur Erweiterung des menschlichen Wissens und ein hoher Grad an Interdisziplinarität entscheidend. Die Selektion der Hauptforschungsfelder muss kontinuierlich überprüft und bei Bedarf über die Jahre hinweg rollierend weiterentwickelt werden.

Dabei muss eine konsequente Förderung durch das Land unter der Prämisse „Stärken stärken“ erfolgen, d.h. es müssen auch hier Schwerpunkte gesetzt werden um eine nachhaltige Wirkung zu erzielen. Die Grundlagenforschung muss im Verhältnis zur anwendungsorientierten Forschung gleichgewichtig ausgestaltet sein. Flexible Förderinstrumente müssen geschaffen werden. Die Berufungspolitik an den Hochschulen muss sich an den Prinzipien des „Stärken stärken“ – d.h. einer Bündelung der Ressourcen auf die aussichtsreichsten Felder – orientieren und konsequent nur die qualifiziertesten Professoren berufen.

### **Anforderungen an regionale Wirtschaftsförderung**

Eine wichtige Rolle für die wirtschaftliche Zukunft Baden-Württembergs spielen die strukturellen Rahmenbedingungen insgesamt sowie in den einzelnen Regionen im Besonderen. Hierzu zählen beispielsweise Finanzierungsmöglichkeiten, Zusammenarbeit mit der öffentlichen Verwaltung oder die Infrastruktur. Diese Standortbedingungen haben zentrale Bedeutung für die strategischen Entscheidungen von Unternehmen.

Von übergeordneter Bedeutung ist ein Umdenken hin zu einer verstärkten Branchenorientierung über einzelne Unternehmen und Teilregionen hinweg. Die Vernetzung von Unternehmen gleicher Themenbereiche muss stärker gefördert werden.

Dabei müssen die unterschiedlichen Phasen / Schlüsselsituationen in denen sich Unternehmen befinden, auch auf regionaler Ebene durch entsprechende Maßnahmen berücksichtigt werden: Unternehmensneugründungen, Ansiedlung von Unternehmen, Innovationen im Mittelstand und Standortbindung bei starkem Wachstum und fortschreitender Globalisierung.

Im Bereich der Unternehmensgründung ist ein auszubauender Bereich immer noch die Kommerzialisierung von Forschungsergebnissen. Die Hochschulen weisen hier zu wenig Kapazitäten auf und in den einzelnen Studienfächern kann und wird das notwendige Rüstzeug zur Gründung eines Unternehmens auch nicht vermittelt. Hier sind spezifische Zusatzangebote erforderlich.

Im Bereich der Unternehmensansiedlung sollte besonders auf den thematischen Bezug geachtet

werden. Die bereits in der Region ansässigen Unternehmen / Forschungseinrichtungen können leicht behilflich sein, interessante Ansiedlungskandidaten für die jeweilige Region zu identifizieren und direkt aktiv anzusprechen. Allgemeine eher passive Imagekampagnen für einzelne Region können hier nur unterstützend wirken.

Die Wirtschaftsförderungsinstitutionen müssen stets in engem Kontakt mit den ansässigen Unternehmen sein und diese aktiv in die Gestaltung der Region einbinden. So wird auch die emotionale Standortbindung gestärkt.

Das Angebot von Förderungsmaßnahmen ist auch in Baden-Württemberg sehr groß. Vielen Unternehmen fehlt jedoch der Überblick. Vielleicht könnte hier ein entsprechendes übergeordnetes (Internet-) Portal als Anlaufstelle geschaffen werden.

Vermarktung und nachhaltige Mobilisierung der Beteiligten ist schließlich ein besonderes Anliegen bei der Förderung von Spitzentechnologie.

Zielgruppen einer Vermarktungskampagne (Information über Spitzentechnologie, Profilierung der Region, Gewinnung von Akzeptanz) können die allgemeine Bevölkerung sein, aber auch regionale und internationale Forschungseinrichtungen sowie Investoren von innerhalb und außerhalb der jeweiligen Region. Ebenso sollen leistungsfähige Arbeitskräfte von innerhalb und außerhalb der Region mit den Maßnahmen konfrontiert werden, um sicher zu sein, dass sie sich für den richtigen Standort entscheiden. Schließlich müssen auch die handelnden Personen in der öffentlichen Verwaltung von der Vision einer zukunftsgerichteten Innovationspolitik überzeugt werden. Sie müssen das Vorhaben fördern selbst wenn Sie keinen direkten Bezug zu den einzelnen Maßnahmen haben.

Eine Mobilisierungskampagne richtet sich dagegen in besonderer Weise an die handelnden Personen innerhalb der einzelnen Cluster oder Themenbereiche. Sie sollen motiviert werden sich intensiv zu beteiligen und zu eigenem Engagement angeregt werden. Hierzu ist eine ausführliche fachorientierte Information über die einzelnen Technologiefelder und deren Potenziale erforderlich. Weitere Zielgruppen sind öffentliche Verwaltungen mit Bezug zu

Einzelmaßnahmen und Investitionen, Ausbildungs- und Forschungseinrichtungen, Unternehmen innerhalb und außerhalb der Region, Dienstleister sowie Verbände und Kammern mit Bezug zur jeweiligen Spitzentechnologie und Zukunftsinvestition.

### **Schlussbemerkungen**

Ob Bio- bzw. Gentechnologie, Nanotechnologie oder Künstliche Intelligenz – in unserer Gesellschaft spielen u.a. Ernährung, Gesundheit, wirtschaftliches Wachstum eine wichtige Rolle. Dafür ist ständiger Fortschritt erforderlich, der nur über Spitzentechnologie erreichbar ist.

Selbstverständlich müssen dabei Chancen und Risiken einzelner Technologien für die Menschheit und die Gesellschaft fortwährend sorgfältig abgewogen werden. Umweltgerechte Technologien haben sich dabei in der Vergangenheit ebenfalls als starke Wachstumsmotoren gerade in den Industrienationen erwiesen.

Baden-Württemberg hat in den letzten Jahrzehnten und bis heute bewiesen, dass es in der Lage ist, die Rahmenbedingungen für wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Fortschritt zu schaffen. Von daher ist es nicht verwunderlich, dass Baden-Württemberg – zum Wohle seiner Bewohner – heute einen Spitzenplatz nicht nur in Deutschland, sondern als Region auch international einnimmt.

Die Landesregierung muss gemeinsam mit Wissenschaft und Wirtschaft fortlaufend die richtigen Weichen durch Schwerpunktbildung in der Forschung, Konzentration im Bildungsangebot und Kompetenz-Center adäquater Ansiedlungs- und Industrieförderpolitik stellen.

Dabei muss die Bevölkerung selbstverständlich stets mit eingebunden werden, sei es um sie an einzelnen Aktivitäten gezielt zu beteiligen, sei es um Verständnis für einzelnen Maßnahmen zu erreichen. Insofern war die Zielsetzung und Ausrichtung der Tagung „Die Zukunft des Menschen?“ sehr zu begrüßen.

(vgl.: Broschüre mit den zusammengefassten Projektergebnissen zur Studie „Zukunftsinvestitionen in Baden-Württemberg“, Landesstiftung Baden-Württemberg gGmbH)

# Workshop: Gentechnologie

Gentechnologie für die Gesundheit des Menschen *Ernst-Dieter Jarasch*

## Dr. Ernst-Dieter Jarasch

ist Geschäftsführer des BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck e.V., eines Vereins von Forschungsinstitutionen, Unternehmen, Verbänden, Städten und Kreisen zur Förderung der Biotechnologie im Rhein-Neckar-Raum. Von 1996 bis 1997 war er zuständig für Technologietransfer- und Projektberatung in Biotechnologie und Biomedizin in Heidelberg. Jarasch studierte Biologie und Biochemie an den Universitäten Freiburg/Br. und Kiel sowie an der Purdue University, West Lafayette, IN, USA und promovierte an der Universität Freiburg. Anschließend war er Wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 1978 Forschungsgruppenleiter am Deutschen Krebsforschungszentrum Heidelberg.



Die Zukunft des Menschen  
Akademie für Technikfolgenabschätzung  
Stuttgart, 9. Juli 2002



**BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck**

**Gentechnologie  
für die Gesundheit des Menschen**

Dr. Ernst-Dieter Jarasch

BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck e.V.  
Im Neopohliner Feld 610 A  
69120 Heidelberg  
Tel. 062 21 / 6 49 32-0  
Fax 062 21 / 6 49 22 15  
email jarasch@bioregion-nd.de  
www.bioregion-nd.de

Die Zukunft des Menschen  
Akademie für Technikfolgenabschätzung  
Stuttgart, 9. Juli 2002

- Begriffsbestimmungen**
- Biotechnologie und Pharmaindustrie**
- Bedeutung und Größe der „roten“ Biotechnologie**
- BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck**
- Beispiele**

Die Zukunft des Menschen  
Akademie für Technikfolgenabschätzung  
Stuttgart, 9. Juli 2002

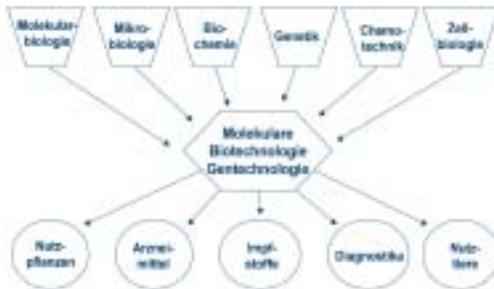
**Meilensteine in der Entwicklung der molekularen Biotechnologie**

1983	Die Doppelhelix (Watson & Crick)	Molekularbiologie
1961-66	Entzifferung des genetischen Codes (Nirenberg, Khorana, Ochoa, Matthaei)	
1973	Rekombinierte DNA-Technologie (Boyer & Coles)	
1975	Klonierte Antikörper (Köhler & Milstein)	Gentechnologie
1978/79	Retinoids Inhibin u. Wachstumshormone in E. coli (Brink, Sinsig, Gewirtz)	
1977-80	DNA-Sequenzierung (Sanger, Gilbert)	
2000	Sequenzierung des Humangenoms (Venter, Collins)	

**Arbeitsfelder der molekularen Biotechnologie**

Arbeitsfeld	Definition	Anzahl der Unternehmen in Deutschland 2001
„Rote“ Biotechnologie	Human- u. veterinärmedizinische sowie pharmazeutische Anwendungen	205
„Grüne“ Biotechnologie	Pflanzen- u. Labormittelbiologie	85
„Graue“ Biotechnologie	Bioverfahrenstechnik in Industrie und Umweltschutz	50

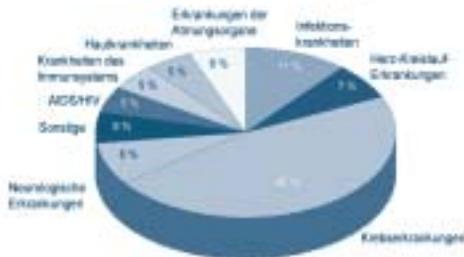
Quelle: Statistisches Bundesamt 2002



Quelle: Klotz & Hentschel, 1999

### Biotechnologie und Pharmaindustrie

### Gentechnologische Arzneimittel in der klinischen Forschung



2000: Insgesamt 70 gentechnologisch hergestellte Medikamente mit 89 verschiedenen Wirkstoffen  
1999: Anteil an den Neuzulassungen 33 %  
1998: Anteil an den Neuzulassungen 13 %

Quelle: HHS, May 2002, 1999

### Rollenwechsel in der Bereitstellung von Arzneimitteln



Quelle: J. Dronk, Die veränderte Zukunft, 1999 (modifiziert)

### Zusammenarbeit Biotechnologie und mittelständische Pharmaindustrie

**Zielsetzung:**  
Das Motivieren der mittelständischen Pharmaindustrie, sich mit den Chancen der Biotechnologie für ihre Firmen auszulenzusetzen

### Synergien zwischen Biotechnologie und mittelständischer Pharmaindustrie

#### Biotechnologie-Unternehmen:

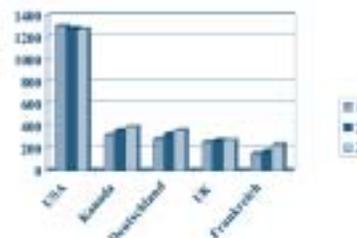
- Modernstes F&E - Know-how
- Kenntnis der Nischenindikationen
- Internationale Netzwerke

#### Mittelständische Pharma-Unternehmen:

- Klinische Erprobung
- Herstellung
- Zulassung
- Vertrieb

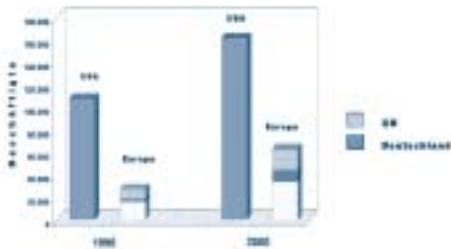
### Bedeutung und Größe der „roten“ Biotechnologie

### Anzahl der Unternehmen in der molekularen Biotechnologie



Quelle: Ernst & Young Report Europe 2001

### Beschäftigte in der Biotech-Industrie Vergleich USA - Europa



Oiewell: Größtstand und Europa insgesamt gegenüber den USA in der Biotechnologie aufgeholt haben, ist der Abstand immer noch sehr groß.

### Beschäftigte in Biotechnologie-Unternehmen Deutschland / USA

Jahr	1998	2000	2001
<b>Deutschland</b>			
Anzahl der Beschäftigten	8.124	10.673	14.408
Beschäftigte je Unternehmen	29	32	39
<b>USA</b>			
Anzahl der Beschäftigten	180.000	188.800	182.000
Beschäftigte je Unternehmen	426	118	127

Quelle: Frost & Young Report Europe 2001

### Finanzdaten in der Biotechnologie 2001 Deutschland - Europa - USA (in Mio. €)

	Umsatz	F&E-Ausgaben	Gewinn/Verlust
Deutschland	1.040	1.228	-411
Europa	8.676	4.877	-1.370
USA	25.780	11.400	-6.950
Zum Vergleich: Pharmaindustrie weltweit	273.500	44.000 (Schätzung)	

Quelle: Frost & Young/IFA

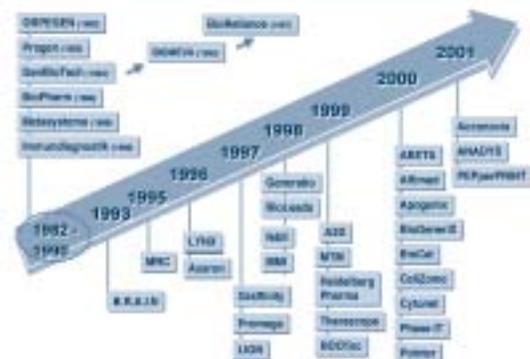
Die Zukunft des Menschen  
Akademie für Technikfolgenabschätzung  
Stuttgart, 9. Juli 2002

### BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck

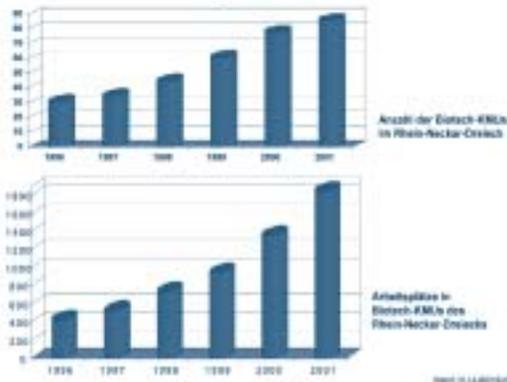
### BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck



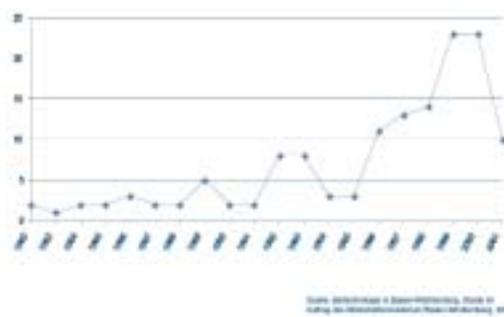
### Gründungsjahre



### Biotech-Unternehmen in der BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck



### Biotech-Gründungen pro Jahr in Baden-Württemberg 1982 - 2001 (139 Unternehmen)



Quelle: Unternehmens- & Exportentwicklung, Markt für Bildung- & Wissenschaftsinnovationen Baden-Württemberg, 2002

### BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck

**Schwerpunkte:**

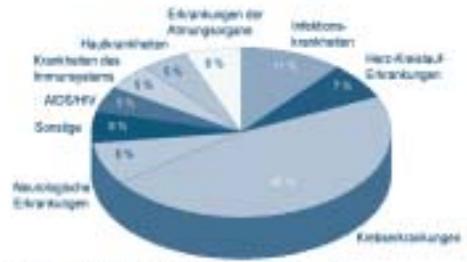
- Funktionelle Genomik, incl. Pharmakogenomik
- Proteomik
- Bioinformatik

in Anwendungsbereich von:  
Molekulare Medizin, besonders

- Krebsforschung
- Immunologie
- Virologie
- Neurobiologie

**Wirkstoff-Design  
und  
Medikamenten-  
entwicklung**

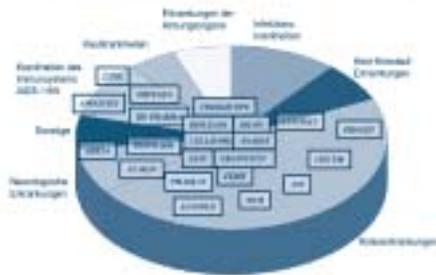
### Gentechnologische Arzneimittel in der klinischen Forschung



2000: Insgesamt 70 gentechnisch hergestellte Medikamente mit 93 verschiedenen Wirkstoffen  
 1990: Anteil an den Neuzulassungen 30 %  
 1980: Anteil an den Neuzulassungen 13 %

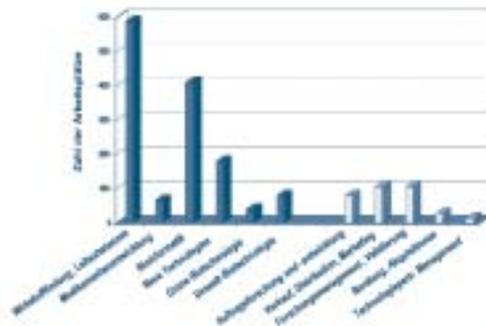
Quelle: VCI (http://vci.de)

### Tätigkeitsfelder für die Medikamentenentwicklung von Biotech-Unternehmen im Rhein-Neckar-Dreieck



© 2008/09

### Biotech-Unternehmen in der BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck - Aktivitätsfelder -



© 2008/09

# Workshop: Gentechnologie

**BioLeads – Berührungspunkte zur Gentechnologie** Friedrich G. Hansske

## Dr. Friedrich G. Hansske

arbeitet in dem von ihm 1998 gegründeten Unternehmen bioLeads mit derzeit 45 Mitarbeitern auf dem Gebiet der Wirkstoffsuche aus biologischen Quellen. Der Name bioLeads steht für biologische Leitstrukturen zur Herstellung von innovativen Wirkstoffen und Produkten aus Mikroorganismen. Hansske forschte auf dem Gebiet der totalen Synthese von krebs- und virushemmenden Nucleosiden an der Alberta Universität in Edmonton, Kanada. Seitdem hat sich seine Arbeit in der Industrie auf die Erforschung von natürlichen Verbindungen von Drogen verschiedener biologischer Herkunft konzentriert und Screening auf dem Gebiet der Ontologie, Diabetes, Neurodegeneration, Entzündungen und Allergien wie auch auf den Technologietransfer in diesen Prozessen.



**bioLeads**  
Unique biological sources and  
innovative lead discovery

### Biologischer Reduktionismus

Dieser besagt, dass alle Phänomene der Natur, von der Aktivität der Gene über das Funktionieren der Organe bis zum Selbstbewußtsein des Menschen, allein aus molekularen Vorgängen bestehen und letztlich aus biologischen Rechenoperationen zusammengesetzt sind.

Man muß also nur immer mehr Einzelteile und ihre Wechselwirkungen verstehen, um letztlich das Leben selbst und so rätselhafte Vorgänge wie das Ich des Menschen zu erklären. Alle Phänomene müssen sich dem Dogma zufolge letztlich modellieren lassen.

### Biotechnologie

Der Begriff Biotechnologie beschreibt ein ebenso schillerndes wie schwer abzugrenzendes Gebiet. Im weitesten Sinne umfasst er alle Verfahren, die biologische Prozesse und Organismen zur Herstellung oder Erforschung von Substanzen und Produktion nutzen.

### Genome and Proteome Research

Generation of new and disease relevant drug targets

Drug targets are believed to be the causative path-biochemical rational of a disease

These drug targets are today the starting point for most drug discovery strategies, particularly high throughput screening (HTS)

Increasing need for technologies to bridge the gap between validated drug targets and clinical candidates

There is no technology at the moment to generate large and diverse libraries to fulfil the need of HTS



Discovering drugs is a complex business. To bring a new drug to market requires many years of coordinated research across a staggering array of disciplines. Chemists and biologists, pharmacologists and toxicologists, clinicians and regulators, all have to get their contributions exactly right, and even then a good deal of luck is needed.

*Nature Reviews, Drug Discovery*  
Volume 1, January 2002

bioLeads

### One-Stop-Shop Solution: From Source to Drug Candidates



bioLeads

### Business Strategy



bioLeads

### How to solve the compound problem?

Creating a pipeline of biologically active compounds with the greatest chance of therapeutic efficacy and commercial success is the ultimate goal in drug discovery and development.

bioLeads

### Chemistry – The Bottleneck in Pharmaceutical Research

- New leads and drug candidates cannot be developed at the same rate as new targets are detected.
- The weak point: the fundamental lack of knowledge about the relationship between structure and function.
- Generation of small and smart collections of chemical and functional diverse compound libraries.
- The early euphoria of combinatorial chemistry has vanished into thin air.
- Diversity will play the major role in future drug discovery.

bioLeads

### Large and Functionally Diverse Compound Libraries

Natural products have a function in living organisms and the environment. Combinatorial chemistry has no functional filter. These molecules are randomly generated and synthesized.

bioLeads

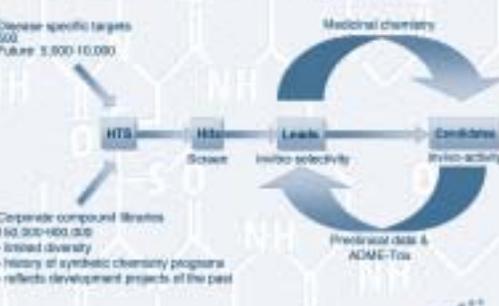
### Market Focus

bioLeads' technology platform offers excellent opportunities for lead discovery in:

- Pharma (all major diseases)
- Agrochem (insecticides, herbicides, fungicides)
- Animal health (parasitology)
- General health (life style indications)
- Food (nutraceuticals)

bioLeads

### First Important Steps in Drug Discovery



Decrease specific targets  
500  
Future 3,000-10,000

Compende compound libraries  
150,000-400,000  
- broad diversity  
- history of synthetic chemistry programs  
- reflects development projects of the past

bioLeads

# Workshop: Nanotechnologie

## Nanotechnologie für Hochleistungs-

## Baugruppen der Automobiltechnik *Christoph Treutler*

### *Dr. Christoph Treutler*

ist seit 1986 bei der Robert Bosch GmbH in Stuttgart beschäftigt mit den Arbeitsgebieten Dünnschichttechnologie für HF-Hybridschaltungen und Mikrosysteme/Sensoren einschließlich elektronischer Aufbau- und Verbindungstechnik. Seit 1996 ist er Abteilungsleiter „Physikalische Technologien“ im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung mit den Schwerpunkten Keramische Multilayer-Technologie, Magnetsensoren und Plasma-Beschichtungstechnik zur Verminderung von Reibung und Verschleiß. Treutler studierte Physik an der Technischen Universität Dresden mit Vertiefung in Oberflächen- und Elektronenphysik und promovierte an der Akademie der Wissenschaften der DDR 1981 über Ionenimplantation in Werkstoffe zur Oberflächenvergütung.



### **Einleitung**

Die Nanotechnologie rückt auch in der Entwicklung und Fertigung von Hochleistungsbaugruppen für die Automobiltechnik immer mehr in das Blickfeld des Interesses. Dabei ist die Nanotechnologie keine wirklich neue Disziplin, wohl aber hat sich infolge der technischen Entwicklungen das Spektrum zur Erzeugung und Anwendung von Nanostrukturen erheblich erweitert.

### **Sensoren für sichere, saubere und sparsame Kraftfahrzeuge**

Moderne Systeme wie die Fahrdynamikregelung mittels Electronic Stability Program (ESP) oder aktive Lenk- oder Bremshilfen ergänzen die bekannten Sicherheitseinrichtungen wie Airbag und Antiblockiersystem (ABS). Elektronische Motorsteuergeräte regeln die Verbrennungsprozesse im Motor trotz unterschiedlichster Belastungen so, dass die strengen Normen für ein schadstoffarmes Abgas eingehalten werden und der Kraftstoffverbrauch minimal ist. Alle diese Systeme erhalten die benötigten Informationen über die Fahrzustände und Belastungen von einer Vielzahl von Sensoren, die heute zu einem großen Teil mit Technologien der Mikrosystemtechnik kostengünstig gefertigt werden. Durch einen steigenden Ausstattungsgrad der Kraftfahrzeuge mit Systemen zur Unterstützung des Fahrers steigt der Markt für Sensoren überproportional zur Automobilproduktion.

### **Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie**

Besonders für intensive Größen wie Beschleunigung oder Druck lassen sich Sensoren sehr günstig miniaturisieren. Die Zusammenfassung von Einzel-funktionen der Sensoren mit der Auswerteelektronik auf einem Siliziumchip lässt Mikrosysteme entstehen, die eine hohe Zuverlässigkeit besitzen. Hohe Funktionalität einschließlich integriertem Selbsttest, kleiner Bauraum und geringes Gewicht sind Vorteile für den Einsatz im Kraftfahrzeug. Bei der Herstellung auf einem Silizium-Wafer als Basis-material wird in jedem Arbeitsgang eine Vielzahl von Sensorchips gleichzeitig bearbeitet. Diese „Batch“-Fertigung führt zu kostengünstigen Bauteilen. Je kleiner die Fläche des einzelnen Sensorchips, desto mehr Elemente können pro Wafer hergestellt werden und desto geringer sind die Kosten.

Wie in der Mikroelektronik findet sich in der Mikrosystemtechnik ebenfalls der Trend zur fortschreitenden Miniaturisierung. Während für elektronische Speicherbausteine mit immer höherer Speicherkapazität intensiv daran gearbeitet wird, auch Halbleiterstrukturen unter 100 nm in der Serienfertigung zu beherrschen, werden Mikrosysteme für das Kraftfahrzeug noch über längere Zeit mit lateralen Mikrometerdimensionen gefertigt werden können. Für viele Kfz-Sensorsysteme ist auch unter Berücksichtigung der Auswerteschaltung die Anzahl der zu integrierenden Einzelelemente im Vergleich zu Massenspeichern relativ klein, so dass der Aufwand für

den Vorstoß in eine laterale Nanostrukturierungstechnik kostenmäßig nicht gerechtfertigt ist. Eine Ausnahme stellen allerdings die bilderzeugenden Sensoren dar, die ein möglichst großes Array von Bildpunkten umfassen sollen.

Die große Bedeutung der Nanotechnologie für die Mikrosystemtechnik liegt in den „dünnen Schichten“ mit einer Dicke im Bereich von Nanometern. So werden über den elektrischen Widerstand von Platinschichten mit nur 150 nm Dicke die Temperaturen im Luftmassenmesser ermittelt, ohne für die mikromechanisch hergestellte Membran eine zu hohe Wärmekapazität aufzubauen. Ein Vielschichtsystem aus abwechselnd magnetischen und nichtmagnetischen Schichten wie Cobalt und Kupfer mit Einzelschichtdicken von nur wenigen Nanometern ist die Basis für den Giant-Magneto-Resistance (GMR) Effekt. Mit deutlich gesteigerter Sensitivität werden Änderungen eines Magnetfeldes in Änderungen des elektrischen Widerstandes des Sensorchips abgebildet. So lassen sich sehr einfach, robust und mit kostengünstiger Auswertelektronik Positionen, Wege und Winkel messen. Durch das berührungslose Messprinzip sind Magnetsensoren auf der Basis des GMR-Effektes sehr zuverlässig und können an vielen Stellen im Kfz eingesetzt werden, so in der Raddrehzahlmessung für ABS und ESP oder in der Winkelmessung für neuartige Lenksysteme wie „Steer-by-wire“.

#### **Dünne Schichten zur Minderung von Reibung und Verschleiß in modernen Systemen der Diesel-Einspritztechnik**

Um hochbelastete mechanische Werkzeuge oder Bauteile vor Reibung und Verschleiß zu schützen, werden diese mit dünnen Hartstoffschichten überzogen. Während bei Werkzeugen wie Bohrern oder Fräsern klassische Hartstoffschichten wie z.B. Titanitrid TiN zum Einsatz kommen, hat Bosch für Bauteilanwendungen verschiedene diamantartige Kohlenstoffbeschichtungen entwickelt (Diamond Like Carbon DLC). Diese besitzen den Vorteil eines sehr geringen Reibkoeffizienten und schützen in einer tribologischen Materialpaarung auch den unbeschichteten Gegenkörper. Neben Funktionsverbesserungen können in verschiedenen Anordnungen durch den Wegfall der Gegenkörper-Beschichtung auch Kosteneinsparungen erreicht werden. So wird z.B. in einer Hochdruckpumpe für die Dieseleinspritztechnik nur der Kolben in einem Vakuumverfahren mit der DLC-Verschleißschicht verse-

hen. Für die Erzeugung sehr hoher Drücke von bis zu 2000 bar muss die Kolbenpumpe mit sehr engen Passungen laufen. Die plasmagestützt im Vakuum abgeschiedenen, reibungs- und verschleißmindernden Schichten benötigen lediglich eine Dicke von 2 bis 3 Mikrometern und ermöglichen damit auch kleine Maßtoleranzen ohne eine aufwendige Nacharbeit an der harten Schicht. Moderne Diesel-Einspritz-Systeme mit hohen Einspritzdrücken wie Common-Rail oder Pumpe-Düse-Einheiten ermöglichen einen sparsamen Kraftstoffverbrauch, geringere Umweltbelastungen und eine bessere Laufruhe des Motors. Dank der Beschichtungstechnik erreichen auch die hochbelasteten Systeme eine hohe Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer.

#### **Nanostrukturierte Schichten für neue Anwendungsfelder**

Mit der Weiterentwicklung der Dieselmotortechnik und der Einführung der Benzin-Direkteinspritzung steigen die Anforderungen an die Werkstoffe weiter. Höhere Leistungen sollen von kleineren und leichteren Baugruppen erzeugt werden und es treten verstärkt Mehrfachbelastungen wie Gleit- und Schlagverschleiß oder Reibung und Korrosionsgefahr auf. Neue Schutzschichten, die intern Strukturen mit Dimensionen im Nanometerbereich besitzen, erschließen hier neue Möglichkeiten. Multischichten aus abwechselnd CrN und TiAlN mit jeweils nur einigen Nanometern Dicke zeigen einen Superhärteeffekt und ein günstiges Verschleißverhalten mit erschwerter Rissausbreitung. Ein anderer Forschungsschwerpunkt sind Schichten mit nanokristallinen Hartstoff-Körnern in einer amorphen Matrix. Freiheitsgrade im Schicht-design lassen unterschiedliche Verhältnisse von Härte zu Elastizitätsmodul zu, wodurch die Schichten gut an die Unterlage aus Stahl angepasst werden können.

Die Untersuchungen auf dem Gebiet der nanostrukturierten Schichten für den Verschleißschutz zeigen ein großes Potenzial für maßgeschneiderte Lösungen, offenbaren aber auch einen hohen Forschungsbedarf. Neue Ideen zur Erzeugung von Nanostrukturen legen die Grundlagen zur Entwicklung von wirtschaftlicheren Beschichtungsverfahren und bilden die Basis für einen breiten Einsatz von dünnen Schutzschichten gegen Verschleiß und Korrosion.

Nanotechnologien für Kfz-Sensoren und Verschleißschutzschichten unterstützen die Entwicklungen für ein sicheres, sauberes und sparsames Kraftfahrzeug.

# Workshop: Nanotechnologie

## Rastersondenmikroskope: Werkzeuge und Mess-Sonden

für die Nanotechnologie *Thomas Schimmel*

### *Prof. Dr. Thomas Schimmel*

ist seit 1995 Professor am Institut für Angewandte Physik der Universität Karlsruhe. Seit 1998 leitet er zudem eine Arbeitsgruppe im Institut für Nanotechnologie des Forschungszentrums Karlsruhe. Schimmel studierte Physik an der Universität Bayreuth, wo er auch promovierte. 1995 habilitierte er an der Universität Bayreuth. Im Zentrum seiner dortigen wissenschaftlichen Arbeit stand die Oberflächenphysik. 2000 erhielt Schimmel den baden-württembergischen Landesforschungspreis für seine Forschungsarbeiten im Bereich der Nanotechnologie.



### 1. Einführung und Motivation

Die Untersuchung von Werkstoffoberflächen und elektronischen Bauelementen auf der Mikrometer- und Nanometerskala ist von zunehmender technischer Bedeutung. Beispiele dafür sind heterogene Werkstoffe, Oberflächenrauhigkeitsmessungen oder die Untersuchung von mikro- und nanostrukturierten Systemen, etwa in der Halbleiterindustrie. Dabei gilt es, nicht nur die dreidimensionale Oberflächenstruktur mit hoher Auflösung abzubilden, sondern auch ortsaufgelöst lokale Materialeigenschaften zu untersuchen sowie Materialkontraste, Materialinhomogenitäten und chemische Kontraste zu erkennen.

Dabei stoßen konventionelle Untersuchungsverfahren zunehmend an ihre Grenzen. Hier erlauben es die Rastersondenverfahren, Materialien nicht nur mit einer räumlichen Auflösung bis hinab in den atomaren Bereich zu untersuchen [1-4]. Vielmehr bietet die Kombination unterschiedlicher Messmethoden wie etwa der Rasterkraftmikroskopie, der Elastizitätsmikroskopie sowie der Adhäsions- und der Reibungsmikroskopie in einem Messgerät zugleich die Möglichkeit, simultan unter-

schiedliche Informationen über die Probenoberfläche ortsaufgelöst mit Auflösungen im Nanometer-Bereich zu erfassen. Neben der Probentopographie können Struktur und Zusammensetzung von heterogenen Werkstoffen wie Polymer Blends und Komposit-Werkstoffen untersucht werden. Chemische Reaktionen können in situ und in Echtzeit verfolgt werden, und geringste chemische Veränderungen an Werkstoffoberflächen lassen sich mit neuen, in unserer Arbeitsgruppe entwickelten Verfahren ortsaufgelöst nachweisen.

Rastersondenverfahren eignen sich jedoch nicht nur zur Untersuchung von Strukturen, Oberflächen und Werkstoffen auf der Nanometerskala. Die idealerweise atomar feinen Abtastspitzen solcher Mikroskope stellen auch hochpräzise Werkzeuge dar, um Oberflächen gezielt zu modifizieren und zu strukturieren [5]. Auf Grund der Feinheit der Spitzen können in einem räumlich sehr eng begrenzten Bereich unter der Spitze extreme Bedingungen erzeugt werden. Wirkt etwa eine Kraft von 100 nN, wie sie problemlos von der Spitze eines Rasterkraftmikroskopes erzeugt werden kann, auf eine Fläche von 10 nm<sup>2</sup>, so übt die Spitze auf die Pro-

[1] S. Magonov und M. Whangbo, *Surface Analysis with STM and AFM*, VCH, Weinheim, 1996;  
[2] G. Binnig, C.F. Quate and C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 930;  
[3] O. Marti, J. Colchero and J. Mlynek, in : *Nanosources and Manipul. of Atoms under High Fields and Temperatures*, ed. by V.T. Binh, p. 253, Kluwer, Dordrecht, 1993;

[4] Th. Schimmel, K. Friemelt, M. Lux-Steiner and E. Bucher, *Surface and Interface Analysis* 23 (1995) 399;  
[5] C.F. Quate, *Manipulation and Modification of Nanometer-Scale Objects with the STM*, in L. Esaki (Hrsg.): *Highlights in Condensed Matter Physics and Future Prospects*, NATO Series, Plenum Press, New York, 1992, S. 573-630;

benoberfläche lokal einen Druck von 10 GPa (entspricht 100 kbar oder 100.000 Atmosphären) aus. Befindet sich die Spitze eines Rastertunnelmikroskopes einige Angstrom über der Probenoberfläche und wird zwischen Spitze und Probe eine Spannung von wenigen Volt angelegt, so bedeutet dies lokale elektrische Felder im Bereich von ca. 100 MV/cm. Die resultierenden Stromdichten liegen dabei typischerweise in der Größenordnung von  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>. Wie unten noch näher ausgeführt wird, können unter solchen Bedingungen nicht nur atomare Schaltprozesse ausgelöst [6] oder einzelne Atome oder Moleküle bewegt [7], sondern selbst stabile chemische Bindungen mit Hilfe der Spitze aufgebrochen werden.

Im Folgenden sollen zunächst am Beispiel des Rasterkraftmikroskopes das Funktionsprinzip sowie einige wichtige Messmodi erläutert werden. Anschließend wird anhand von ausgewählten Beispielen der Einsatz der Rastersondenmikroskopie in den Bereichen der Nanostrukturierung, der Nanoanalytik und Nano-Materialforschung sowie der Nanotribologie erläutert.

## 2. Rastersondenmikroskopie: Funktionsprinzip und Messmethoden

Rastersondenmikroskope funktionieren stets nach dem gleichen Prinzip. Eine sehr feine, lokal mit der Probenoberfläche wechselwirkende Meßsonde, die „Spitze“ des Rastersondenmikroskopes, tastet die Oberfläche in einem Rasterverfahren Zeile für Zeile ab. In der Regel wird die relative Bewegung zwischen Spitze und Probe über Piezo-Stellelemente realisiert. Die Punkt für Punkt von der Meßsonde aufgenommenen Daten werden als Funktion des Ortes von einem Rechner erfasst und als Farbwert am Monitor angezeigt. Man erhält auf diese Weise eine Art „Landkarte“ für die gemessene Größe. Je feiner die verwendete Meßsonde und je lokaler die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe ist, desto höher ist entsprechend die erzielbare Ortsauflösung. Im Falle des Rastertunnel-, des Rasterkraft- und des Lateralkraftmikroskopes etwa lassen sich selbst die einzelnen atomaren Positionen auf der Probenoberfläche auflösen.

Als in der Praxis wohl wichtigster Vertreter der Rastersondenmikroskope soll zunächst das Rasterkraftmikroskop oder AFM (für Atomic Force Microscope) vorgestellt werden. Im sog. Kontaktmodus

wird eine feine, wenige Mikrometer lange Spitze mit einer typischerweise 50 µm bis 500 µm langen Blattfeder, dem sog. Cantilever, elastisch an die Probenoberfläche gepresst. Bewegt man nun – wie in Abb. 1 skizziert – die Probe in einem Rasterverfahren Zeile für Zeile parallel zur Probenoberfläche, so tastet die Spitze als eine Art atomar feines Profilmeter die Probentopographie ab. Die z.B. mit Gold bedampfte Rückseite des Cantilevers (in Abb. 1 die Oberseite) wirkt als Spiegel, der sich bei vertikaler Auslenkung der Spitze verbiegt. Wird nun an der Rückseite des Cantilevers der Strahl eines Diodenlasers reflektiert, liefert die Strahlauslenkung als Funktion des Ortes auf der Probe die Information über die Probentopographie. Mittels einer Zweisegment-Photodiode wird die Auslenkung des Laserstrahles detektiert.



Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Rasterkraftmikroskopes

Ein entscheidender Vorteil des Rasterkraftmikroskopes besteht jedoch darin, dass man nicht nur die Probentopographie mit höchster Ortsauflösung erfassen kann, sondern dass sich durch Verwendung zusätzlicher Messmodi weitere Eigenschaften der Probenoberfläche ortsaufgelöst erfassen lassen. Bewegt man die Spitze beim Scanvorgang etwa senkrecht zur Cantileverachse über die Probe, so führen Reibungskräfte zwischen Spitze und Probe zu einer Torsion des Cantilevers. Während also die Cantileververbiegung nach wie vor die Information über die Probentopographie liefert, enthält die Torsion des Cantilevers die Reibungsinformation (sog. Reibungs- oder Lateralkraftmikroskopie). Verwendet man als Detektor für die Laserstrahlung statt einer Zweisegment- eine Viersegment-Photodiode, so lassen sich beide Informationen simultan erfassen.

[6] H. Fuchs und Th. Schimmel, Adv. Materials 3 (1991) 112;

[7] M.F. Crommie, C.P. Lutz und D.M. Eigler, Science 262 (1993) 218;

Moduliert man mit Hilfe eines Piezoelementes die vertikale Position der Probe mit kleiner Amplitude und einer Frequenz von einigen Kilohertz um ihre Ruhelage, so lassen sich Informationen über die lokale Steifigkeit der Probenoberfläche gewinnen. An Stellen mit hoher Steifigkeit der Probenoberfläche wird nämlich nahezu die volle Modulationsamplitude von der Probe auf den Cantilever übertragen. Ist die Probenoberfläche weniger steif, deformiert sich nicht nur der Cantilever, sondern auch die Probenoberfläche, und nur ein Teil der Höhenmodulation wird auf den Cantilever übertragen. Aus der dem eigentlichen AFM-Meßsignal überlagerten Modulationsamplitude lassen sich somit Rückschlüsse über die lokale Probensteifigkeit ziehen. Die Technik wird als Elastizitäts- oder Kraftmodulationsmikroskopie bezeichnet.

Daneben sind noch eine ganze Reihe weiterer Eigenschaften der Probenoberfläche mittels Rasterkraftmikroskopie erfassbar. Nähert man etwa an jedem Messpunkt die Spitze bis zum Berührungskontakt an die Probenoberfläche an und zieht sie anschließend wieder bis zum Kontaktabriss zurück, so lassen sich Punkt für Punkt die Adhäsionskräfte bestimmen (Adhäsionsmikroskopie). Bewegt man die Spitze berührungslos über die Oberfläche, so lassen sich elektrische und – bei Verwendung magnetischer Spitzen – auch magnetische Wechselwirkungen ortsaufgelöst abbilden. Lässt man die Spitze dicht über der Probenoberfläche nahe der Resonanzfrequenz des Cantilevers so schwingen, dass die Spitze pro Schwingungszyklus einmal kurz die Probenoberfläche berührt (sog. Intermittent Contact Mode), so lassen sich nicht nur sehr empfindliche Proben abbilden, die im Kontaktmodus auf Grund der zwischen Spitze und Probe wirkenden Reibungskräfte zerstört würden, sondern es lassen sich auch Dämpfungseigenschaften der Probenoberfläche untersuchen.

Durch die Kombination unterschiedlicher Rastersondentechniken ist es möglich, Proben auf der Nanometerskala umfassend zu charakterisieren und – etwa in der Materialforschung – mikroskopische Funktion und makroskopische Eigenschaften zu korrelieren.

### 3. Nanostrukturierung: Die kleinste Fräsmaschine der Welt

Die kontrollierte Herstellung künstlicher Nanostrukturen ist nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern auch von hoher technologischer Relevanz. Dabei ist etwa an künftige Datenspeicher mit extrem hohen Speicherdichten oder an Bauelemente für die Nanoelektronik zu denken, aber auch an Verfahren der Materialbearbeitung auf der Nanometerskala. Der Forschung kommen auf diesem Gebiet mehrere Aufgaben zu. Zum einen gilt es, physikalische und chemische Prozesse auf diesen Längenskalen zu verstehen und neue Verfahren zur Herstellung solcher Strukturen zu entwickeln. Zum anderen müssen Funktion und Eigenschaften dieser künstlichen Nanostrukturen untersucht und verstanden werden, um die Basis für zukünftige Technologien zu legen.

Die Spitze eines Rastersondenmikroskopes eignet sich dabei auf Grund ihrer sehr lokalen Spitze-Probe-Wechselwirkung sehr gut zur Herstellung neuartiger Nanostrukturen. Vorteil der Strukturierung mit Rastersondenverfahren ist es dabei, dass man die Spitze als eine Art „Schreib-Lese-Kopf“ einsetzen kann: die Spitze kann zunächst als Werkzeug eingesetzt werden, um eine Struktur zu schreiben, und nach erfolgter Strukturierung lässt sich ein und dieselbe Spitze zum Abbilden der erzeugten Struktur verwenden.

In unserer Arbeitsgruppe an der Universität Karlsruhe wurden Verfahren entwickelt, die es bereits jetzt erlauben, modifizierte Rasterkraftmikroskope als CNC-Fräsmaschinen auf der Nanometerskala einzusetzen, um computergestützt winzige Strukturen auf die Oberfläche zu schreiben. Dabei werden unter Ausnutzung lateraler Kräfte von der Größenordnung von ca.  $1\ \mu\text{N}$  zwischen AFM-Spitze und Probenoberfläche mechanisch chemische Bindungen aufgebrochen [8-12]. Das Verfahren arbeitet so präzise, dass es möglich ist, in einem Arbeitszyklus einen Materialabtrag von jeweils nur einem einzigen Atomdurchmesser (!) zu erzielen. Auf Grund der hohen Resonanzfrequenz der verwendeten AFM-Cantilever von typischerweise 60 - 150 kHz lassen sich dabei problemlos mehr als

[8] V. Popp, R. Kladny, Th. Schimmel und J. Küppers, Surf. Sci. 401 (1998) 105;

[9] Th. Schimmel, P. von Blanckenhagen und W. Schommers, Appl. Phys. A 68 (1999) 263;

[10] R. Kemnitz, Th. Koch, J. Küppers, M. Lux-Steiner und Th. Schimmel, Invited Article, in: B. Bushan (ed.) „Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between Macro- and Micro/Nanoscale Tribology“, NATO-ASI Series, Kluwer, Dordrecht, 2001, S. 495-502;

[11] M. Müller, Th. Fiedler und Th. Schimmel, Invited Article, in: B. Bushan (ed.) „Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between Macro- and Micro/Nanoscale Tribology“, NATO-ASI Series, Kluwer, Dordrecht, 2001, S. 487-494;

[12] Ch. Obermair und Th. Schimmel, unveröffentlichte Daten;



Abb. 2: Mit der Spitze eines Rasterkraftmikroskopes in Glimmer eingefräste Struktur. Die Linienbreite beträgt nur ca. 8 nm [10, 11, 12].

50.000 Arbeitszyklen pro Sekunde durchführen. Innerhalb weniger Sekunden kann so rechnergesteuert die vorprogrammierte Struktur an der gewünschten Stelle der Probenoberfläche erzeugt und Sekunden später mit derselben AFM-Spitze abgebildet werden. Abb. 2 zeigt ein Beispiel einer solchen, in das Mineral Glimmer eingefrästen Struktur. Die Breite der erzeugten Linie beträgt ca. 8 nm, was in etwa dem Durchmesser von 25-30 Goldatomen entspricht.

Ein wesentlicher Vorteil der Rastersondenmikroskopie besteht darin, dass man nicht nur an Luft oder unter Vakuum arbeiten kann, sondern auch unter Flüssigkeit oder in elektrochemischen Zellen. So ist es mit dem Rasterkraftmikroskop zum Beispiel möglich, in situ und in Echtzeit galvanische Prozesse auf der Nanometerskala zu studieren. Eine besondere Herausforderung besteht dabei darin, elektrochemische Prozesse mittels Rasterkraftmikroskopie nicht nur zu beobachten, sondern auch lokal auf der Nanometerskala gezielt zu beeinflussen [13, 14]. Auf diese Weise könnte es zum Beispiel möglich werden, feinste Leiterbahnen für die Nanoelektronik galvanisch abzuscheiden.

Abb. 3 zeigt erste Ergebnisse auf diesem Gebiet. Mit Hilfe einer AFM-Spitze wurde rechnergesteuert in einer elektrochemischen Zelle eine Nanostruktur aus Kupfer erzeugt. Die Struktur in Form einer „Blume“ wurde galvanisch aus einer Kupfersulfatlösung auf eine Goldoberfläche abgeschieden. Die Grundidee dieses Verfahrens beruht auf einer Weiterentwicklung des oben beschriebenen Nanofräsverfahrens. Die Oberfläche des Substrates wird mit der AFM-Spitze durch mechanische Modifizierung aktiviert, so dass eine Kupferabscheidung aus dem Elektrolyten selektiv an den von der AFM-Spitze

modifizierten Stellen stattfindet. Die Breite solcher „Nano-Leiterbahnen“ aus Kupfer liegt je nach den gewählten Abscheidparametern unter 15 nm. Zur Veranschaulichung: würde man eine Million solcher Kupferdrähte zu einem Bündel zusammenfassen, so hätte dieses Bündel immer noch einen weit geringeren Querschnitt als ein menschliches Haar.

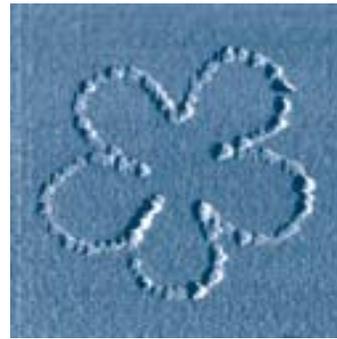


Abb. 3: AFM-Aufnahme einer mit der Spitze eines Rasterkraftmikroskopes elektrochemisch abgeschiedenen Kupfer-Nanostruktur („Blume“). Die Abscheidung wurde mit der AFM-Spitze lokal aktiviert. Die Linienbreite der Kupferlinie beträgt ca. 50 nm [13, 14].

#### 4. Nanoanalytik und Nanomaterialforschung: Der Blick in den Nanokosmos

Das Rasterkraftmikroskop ist aber nicht nur das geeignete Instrument, um feinste Strukturen zu erzeugen und die Strukturierungsergebnisse zu überwachen bzw. Funktionsanalysen an solchen Strukturen durchzuführen, beispielsweise beim elektrischen Ladungstransport in Nano-Drähten und -Bauelementen. Das Rasterkraftmikroskop kann auch auf dem Gebiet der Nanomaterialforschung, etwa bei der Entwicklung sog. intelligenter Werkstoffe, eingesetzt werden. Von Interesse sind hier alle Werkstoffe, deren Eigenschaften wesentlich durch Strukturelemente auf der Nanometerskala bestimmt sind. Solche Werkstoffe sind schon heute von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Allerdings ist deren Weiterentwicklung eng verknüpft mit der Entwicklung geeigneter Messtechniken, um solche Strukturen überhaupt untersuchen und quantitativ charakterisieren zu können. Hier spielt die Rasterkraftmikroskopie eine zentrale Rolle. Denn nicht nur die Topographie von Nanostrukturen kann mit solchen Methoden abgetastet werden. Auch elastische, tribologische, elektrische, magnetische oder Adhäsionseigenschaften lassen sich auf diese Weise untersuchen (s.o.). Da unterschiedliche Materialien sich meist auch in

[13] Ch. Obermair, Ch. Klink und Th. Schimmel, Invited Article, Acta Physica Sinica (Intl. Ed.) 10 (2001) S151-156;

[14] M. Kress, Ch. Obermair und Th. Schimmel, unveröffentlichte Daten;

ihren physikalischen Eigenschaften, beispielsweise in ihren Reibungskoeffizienten oder in ihrer Elastizität unterscheiden, bieten Messmodi wie Reibungs- oder Elastizitätsmikroskopie den zusätzlichen Vorteil des Materialkontrastes: unterschiedliche Materialien innerhalb eines Werkstoffes lassen sich so mit Ortsauflösung im Nanometerbereich unterscheiden. Als Anwendungsbeispiele seien Polymer Blends, Komposit-Werkstoffe, keramische Materialien oder Verbundwerkstoffe genannt.

Abb. 4 zeigt AFM-Topographiebilder von Polymerlatices nach dem Aufbringen und Trocknen einer Suspension auf einem Glassubstrat [15]. Die Latexpartikel sind wohl geordnet, wobei – abgesehen von einzelnen Fehlstellen – deutlich die dichteste Kugelpackung der Latexkugeln in der obersten Schicht zu erkennen ist, die sich auch in den unteren Kugellagen fortsetzt. Polymerlatices sind von großer industrieller Bedeutung z.B. durch ihre Verwendung bei der Herstellung lösungsmittelfreier Autolacke, und allein in Deutschland werden jährlich Umsätze in Milliardenhöhe getätigt.

Abb. 5 zeigt ein weiteres Beispiel für die Analyse von technologisch bedeutsamen Werkstoffen. Die rasterkraftmikroskopischen Aufnahmen zeigen einen Querschnitt von kohlenstofffaserverstärktem Kohlenstoff [16]. Links (Abb. 5a) ist die Topographie abgebildet. Die senkrecht zur Bildebene verlaufenden Kohlenstofffasern sind als kreisrunde dunkle Flächen erkennbar. Rechts daneben (Abb. 5b) ist die mit dem Rasterkraftmikroskop Punkt für Punkt gemessene Adhäsionskraft zwischen Abtastspitze und Werkstoffoberfläche dar-

gestellt. Deutlich heben sich die Faserquerschnitte als Bereiche hoher Adhäsionskraft (helle Bereiche in Abb. 5b) von der Kohlenstoffmatrix ab. Eine solche orts aufgelöste Analyse der Werkstoffeigenschaften stellt eine wesentliche Voraussetzung für die gezielte Weiterentwicklung von modernen Hochleistungswerkstoffen dar.

Die Beispiele zeigen, wie Materialien und Oberflächen auf der Nanometerskala sowohl hinsichtlich ihrer Topographie als auch hinsichtlich ihrer Zusammensetzung aus den einzelnen Komponenten charakterisiert und wie mit Rastersondenverfahren lokale Materialeigenschaften mit Ortsauflösung bis in den Nanometerbereich analysiert werden können.

Durch die in Karlsruhe erfolgte Weiterentwicklung der Messverfahren ist es sogar möglich, feinste chemische Veränderungen an Oberflächen im Bereich von weniger als ein Prozent einer Monolage orts aufgelöst nachzuweisen („chemischer Kontrast“). Einsatzgebiete für solche Verfahren sind etwa Untersuchungen von chemischen Oberflächenreaktionen, von Korrosion oder von katalytischen Prozessen.

### 5. Nanotribologie: Wie entsteht Reibung?

Die Frage nach der Entstehung und Vermeidung von Reibung und reibungsbedingtem Verschleiß ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Man denke dabei nur an die Entwicklung von verschleißarmen Materialien für Maschinen, Lager und Werkzeuge sowie an Verschleißschutzschichten. Ein zusätzliches Gewicht erhält die Erforschung der Reibung überall dort, wo konventionelle Schmiermittel nicht

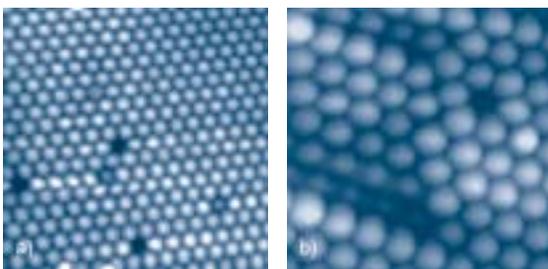


Abb. 4: Topographie von geordneten Polymerlatices, aufgenommen mit dem Rasterkraftmikroskop [15]. a) In der obersten Schicht ist eine dichte Kugelpackung mit wenigen lokalen Defekten zu erkennen (Bildfeld:  $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$ ). b) Abbildung einer Versetzung, wobei auch tieferliegende Kugelebenen sichtbar sind (Bildfeld:  $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ ).

[15] H. Richter, I. Deike, N. Dingenouts, M. Ballauff und Th. Schimmel, unveröffentlichte Daten;

[16] A. Pfrang, K.J. Hüttinger und Th. Schimmel, *Surface and Interface Analysis* 33 (2002), 96-99;

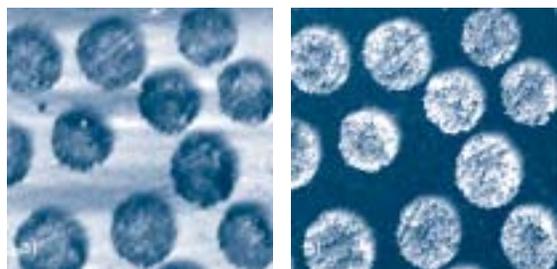


Abb. 5: Querschnitt durch einen kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoff [16]. Mit dem Rasterkraftmikroskop kann man nicht nur die Probentopographie (Abb. 5a), sondern auch lokale Materialeigenschaften wie etwa die Adhäsionskraft (Abb. 5b) orts aufgelöst abbilden (Bildfeld jeweils  $19\ \mu\text{m} \times 19\ \mu\text{m}$ ).

[17] B. Bushan (Hrsg.), *Handbook of Micro/Nanotribology and its Applications*, NATO ASI Series, Kluwer, Dordrecht, 1997;

mehr eingesetzt werden können, etwa in der Mikro-technik oder in der Festplatte des Computers zwischen der Plattenoberfläche und dem Schreib-Lese-Kopf [17]. Mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskopes können die winzigen Auflage-, Adhäsions- und Reibungskräfte zwischen der Abtastspitze des Mikroskops und der Probenoberfläche gemessen werden. Auf diese Weise lässt sich sowohl die Entstehung von Reibung als auch der reibungsbedingte Verschleiß sehr detailliert von der Mikrometerskala bis hinab zur Reibung zwischen einzelnen Atomen und Molekülen untersuchen. Solche Untersuchungen aber bilden die Basis für Verständnis und Entwicklung neuer verschleißarmer und reibungsoptimierter Werkstoffe und Schutzschichten.

Abb. 6 zeigt ein Beispiel für den direkten experimentellen Nachweis atomarer Reibung mit dem Rasterkraftmikroskop. Das Diagramm in Abb. 6a) zeigt die Lateralkraft („Reibungskraft“) zwischen der AFM-Spitze und der Oberfläche (Spaltfläche) eines Calcit-Kristalls während des Abtastprozesses als Funktion des Ortes längs einer Strecke, die zehn atomaren Gitterabständen entspricht. Man erkennt, wie die Lateralkraft periodisch zunächst linear zunimmt und anschließend wieder plötzlich abnimmt. Die Erklärung für dieses Verhalten sind atomare Reibungsprozesse [17-19]: die Lateralkraft steigt zunächst während des Scanvorschubs an, bis ein Schwellwert der Kraft erreicht wird, der erforderlich ist, mit der AFM-Spitze ein Atom der Probenoberfläche zu überqueren. Bei Erreichen dieses Schwellwertes wird die Position der Spitze instabil, die Spitze überquert sprunghaft das Atom und entspannt sich dabei teilweise, so dass die Lateralkraft sprunghaft zurückgeht. Bei diesem Prozess wird potentielle Energie in Wärmeenergie umgewandelt (Reibungsverlust). Untersucht man nun Lateralkraft-Hysteresen zwischen Vorlauf und Rücklauf der Spitze innerhalb einer Scanzeile des Rasterkraftmikroskopes, so stellt die von der Kurve eingeschlossene Fläche (gelb unterlegte Fläche in Abb. 6b) die durch atomare Reibung dissipierte Energie dar. Auf diese Weise können tribologische Elementarprozesse bis hinab zur atomaren Skala quantitativ analysiert werden.

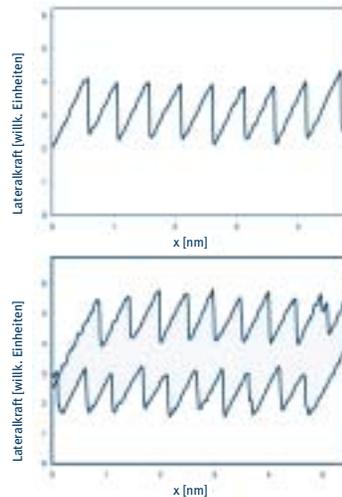


Abb. 6: Untersuchung atomarer Reibungsprozesse mittels Lateralkraftmikroskopie auf Calcit [18]. a) Lateralkraft bei Überqueren von neun atomaren Einheitszellen mit der AFM-Spitze. Deutlich sind die Unstetigkeiten beim Überspringen einzelner Atome erkennbar. b) Atomare Reibungshysterese (gelb unterlegte Fläche). Länge der Scanzeile: 5,5 nm.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Rastersondenmikroskope stellen wesentliche Mesinstrumente und Werkzeuge für die Nanotechnologie dar. Besondere Bedeutung im Bereich der Nanostrukturierung und Nano-Materialforschung kommt dabei der Rasterkraftmikroskopie zu. Mit den idealerweise atomar feinen Spitzen der Rasterkraftmikroskope lassen sich nicht nur Oberflächen abtasten und Materialien hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften auf der Nanometerskala umfassend untersuchen. Es lassen sich auch Materialkontraste und chemische Kontraste erzielen. Kristallwachstum, chemische und elektrochemische Prozesse lassen sich in situ und in Echtzeit auf der Nanometerskala verfolgen. Die Spitze des Rasterkraftmikroskopes stellt aber gleichzeitig auch ein geeignetes Instrument zur kontrollierten, rechnergesteuerten Herstellung von Nanostrukturen dar, sei es in Form mechanischen Fräsens auf atomarer Skala oder in Form elektrochemischer Abscheidung mittels AFM-Spitze. Nicht zuletzt erlaubt das AFM die quantitative Untersuchung von Wechselwirkungen auf atomarer Skala und kann deshalb einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der mikroskopischen Entstehung von Reibung leisten. Die Rastersondenmikroskopie stellt damit eines der grundlegenden Werkzeuge für Forschung und Entwicklung im Bereich neuartiger Strukturen, Bauelemente und Werkstoffe auf der Nanometerskala dar.

[18] M. Müller, J. Wagner und Th. Schimmel, unveröffentlichte Messdaten;

[19] U. von Toussaint, Th. Schimmel und J. Küppers Surface and Interface Analysis 25 (1997) 620.

# Workshop: Nanotechnologie

## Nanotechnologische Werkstoffe heute und morgen:

### Chemische Nanotechnologien *Helmut Schmidt*

#### *Prof. Dr. Helmut Schmidt*

leitet als geschäftsführender Direktor seit Januar 1990 das Institut für Neue Materialien GmbH in Saarbrücken und ist Professor für Werkstoffwissenschaften an der Universität des Saarlandes. Er begann am neu gegründeten INM vor zehn Jahren eine Technologie für Nanowerkstoffe aufzubauen, die auf chemischen Syntheseverfahren basieren. Über 90 Basiserfindungen der chemischen Nanotechnik haben Schmidt und seine Mitarbeiter am INM seither weltweit zum Patent angemeldet.



#### 1. Einleitung

Der Begriff Nanotechnologien umfasst ein breites Feld, angefangen von der Mikroelektronik über die Nanorobotik, die biomedizinische Technik und last but not least die Werkstoffe. Dabei werden alle Bereiche von Industrie, Technik und dem täglichen Leben erfasst. Die Frage stellt sich, in welcher Weise diese Technologien nutzbar gemacht werden, welche Gefahren eventuell auftreten können und wann sich die Umsetzung in Produkte und Technologien realisieren lassen wird. Im Bereich der Nanotechnologien kann man grob zwischen basistechnologischen Systemen und Produkten in der sogenannten Endanwendung unterscheiden. Während ein elektronisches Bauteil, z.B. in einer Kamera in einem Endanwendersystem integriert ist, ist ein Werkstoff, der die Grundlage für verschiedene Anwendungen bietet, eher ein Basissystem, das die Befähigung zu breiten Anwendungen in sich birgt (Enabling Technology).

Wegen dieser Eigenart von Werkstoffen kommt der Innovation im Werkstoffbereich eine hohe Bedeutung zu, da in den Industrienationen etwa 70 Prozent der Bruttosozialprodukte auf Werkstoffen direkt oder indirekt aufbauen. Bei der Herstellung

moderner Werkstoffe spielt die Chemie eine entscheidende Rolle, da über die chemische Prozesstechnik (Synthese und Verarbeitung) eine breite Fülle von Werkstoffen hergestellt werden kann. Desgleichen ist es über chemische Verfahren möglich, über Nukleations- und Wachstumsprozesse in Lösung (z. B. Fällungsprozesse) nanostrukturierte Materialien herzustellen. Dabei ist die nanoskalierte Dimension ein wichtiges Innovationsinstrument im Werkstoffbereich. Das heißt, über die Eigenart von Nanopartikeln lassen sich in Werkstoffen Eigenschaften erzeugen, die bisher in dieser Form nicht erreicht worden sind. Das Interessante ist nun, dass diese Werkstoffe nicht nur in den sogenannten High-Tech-Branchen wie Elektronik, Datenverarbeitung oder Nachrichtentechnik Verwendung finden können, sondern zusätzlich ein sehr breites Potenzial aufweisen. Über die Strategie „Low-Tech by High-Tech“, d.h. Einsatz von Hochleistungswerkstoffen zur Verbesserung existierender Produkte oder der Entwicklung neuer Produkte, wird der Zugang zu einem breiten Consumerbereich möglich. In Tabelle 1 sind einige Beispiele für die Wirkung und das Potenzial von Nanopartikeln aufgeführt, gleichzeitig ist das Potenzial der Chemie in diesem Zusammenhang aufgeführt. Erwäh-

nenswert ist, dass besonders vor dem Hintergrund der aufkommenden toxikologischen Fragen von Nanopartikeln im Bereich der Inhalationstoxikologie durch die Herstellung und die Prozesstechnik in der Lösungsphase in „closed systems“ (in der Chemie für praktisch alle Stoffe ein gängiges Prinzip) ein mögliches Gefahrenpotenzial ausgeschlossen wird. Sind Nanopartikel zu nanostrukturierten Werkstoffen verarbeitet, so ist es nicht mehr möglich, sie aus diesem Verbund herauszuholen, d.h. ein Gefahrenpotenzial ist dort nicht mehr erkennbar.

Als Pulver jedoch bei Gasphasenprozessen in die Atmosphäre gelangt, erscheint die Abtrennung wieder sehr schwer. Hinzu kommt, dass für eine Verarbeitung von Nanopulvern zu Werkstoffen und Bauteilen, flüssige oder pastöse Verarbeitungsprozesse herangezogen werden müssen. Der Weg von der chemischen Synthese bis zum Produkt kann auch als „chemische Nanotechnologie“ definiert werden.

**Nanopartikel-Eigenschaften:**

- „klein“: > keine Lichtstreuung  
> Optik-Werkstoffe in vivo Anwendungen
- Quanteneffekte: > Nachrichtentechnik, Datenspeicherung, NLO, spezielle magnetische Eigenschaften
- große Oberfläche: > Katalysatoren, Sensoren, Adsorbentien, Membranen, niedrig sinternde Keramiken
- große Grenzfläche: > neue Polymeranokomposite mit neuen Eigenschaften

**Die chemische Synthese als Werkzeug:**

- Potenzial zur preiswerten Herstellung und Verarbeitung durch die chemische Verfahrenstechnik
- rationelle Verarbeitung zu Werkstoffen in der Regel nur in flüssiger Phase möglich
- toxikologische Problematik bei „nasser“ Verarbeitung eliminierbar
- chemische Maßschneidung der Nanopartikel als Voraussetzung für eine rationelle Weiterverarbeitung auf breiter Basis möglich

Tabelle 1: Chemische Nanotechnologien zur Werkstoffherstellung

In Bild 1 ist diese Definition etwas anschaulicher erläutert und an einem Beispiel der Weg von der chemischen Synthese bis zu einer neuen umweltfreundlichen Beschichtung auf hochwertigen Leuchten aufgezeigt.



Bild 1: Definition und Beispiel für eine chemische Nanotechnologie vom Ausgangsprodukt zum Bauteil

Im Bild sind die drei wesentlichen Stufen, nämlich die Herstellung von Nanomaterialien über die chemische Synthese, die Verarbeitung zu Werkstoffen, in diesem Fall einem nanoskaligen Bindemittel und die Beschichtung einer Glasoberfläche, einer zylinderförmigen Leuchte skizziert. Das nanoskalige Bindemittel, in diesem Fall im Wesentlichen aus 6 nm SiO<sub>2</sub> bestehend, wird dazu verwendet, TiO<sub>2</sub> als Mattierungsmittel auf die Glasoberfläche zu binden. Durch einen Sinterprozess, dessen Temperatur unter dem Erweichungspunkt des Glases liegt (dies ist durch die nanoskaligen Partikel durch ihre hohe Oberflächenenthalpie möglich), wird die Sinter Temperatur von SiO<sub>2</sub> (1200 °C) auf Temperaturen auf 500 °C abgesenkt. Damit entsteht eine dicke glasartige Schicht, die den Leuchten ihr elegantes Aussehen und Lichtführung verleihen. Dieser Prozess war in der Lage, umweltbedenkliche Blei- und Fluorglasschmelzen durch einen einfachen Beschichtungsprozess der fertigen Glasröhre zu ersetzen. Dieses Beispiel zeigt deutlich, wie volkswirtschaftliche Effekte über die Strategie „Low-Tech by High-Tech“ über nanotechnologische Werkstoffe erzeugt werden können.

Es ist an der Zeit, derartige Strategien, für die es eine Fülle von Anwendungen gibt, in der Zukunft stärker zu nutzen, da die sonst sehr langen Umsetzungszeiten durch schon vorhandene oder „sichtbare“ Märkte deutlich reduziert werden können. Die Eroberung neuer Märkte mit neuen Technologien dauert erfahrungsgemäß extrem lang und verhin-

dert, dass Potenziale rasch genug genutzt werden, um die dringend notwendigen industriellen Innovationen zu erreichen.

## 2. Gezielte Werkstoff- und Technologieentwicklungen

Viele Bereiche der Nanotechnologie, wie sie heute verstanden wird, sind erst durch die „Sichtbarmachung“ von Nanostrukturen an Oberflächen durch die entsprechenden mikroskopischen Geräteentwicklungen möglich geworden. So ist durch die Rastertunnelmikroskopie und die Atomic-Force-Mikroskopie und die damit verbundene Sichtbarmachung gemäß der Devise „Seeing is Believing“ ein richtiger Nanoboom entstanden. Dass jedoch auch schon „in früheren Zeiten“ nanotechnologische Ansätze existiert haben und nutzbar gemacht worden sind, ohne selbstverständlich die physikalischen Hintergründe zu kennen, zeigt das Beispiel der Terra Siglata. In Ermangelung passender Glasurgläsern bei der Keramik ist man im alten Rom den Weg des Glasierens mit dem eigenen keramischen Material gegangen, indem man durch wiederholtes Aufschlemmen den Grobanteil so lange abgetrennt hat, bis eine kolloidale Suspension übrig blieb, die per Definition nanoskalige Partikel enthält. Eine daraus hergestellte Suspension (Engobe) wurde zum Beschichten der Tonscherben verwendet, und durch die wiederum niedrige Sintertemperatur der Nanopartikel war es möglich, eine Verdichtung der Glasur ohne Aufschmelzen des Scherbens zu realisieren. Dies ist in Bild 2 dargestellt.



Bild 2: Chemische Nanotechnologien im alten Rom: Glasieren von Terra Siglata

Neue chemische Synthesen ermöglichen nun die Herstellung von Nanopartikeln, wobei die wichtigste Maßgabe die sogenannte Agglomeratfreiheit ist. Dies ist deswegen wichtig, da aufgrund der großen Oberfläche Nanopartikel zum Zusammenwachsen neigen und damit ihre Eigenschaft als kleines Teilchen verlieren können. In Bild 3 sind einige Beispiele an agglomeratfreien Nanopartikeln gezeigt.

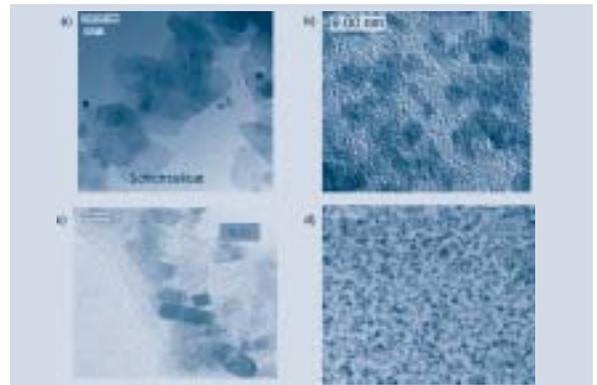


Bild 3: Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Nanopartikeln, a) das Schichtsilicat Talkum, b) Antimondotiertes Zinnoxid, c) Rutil und d) Zirkondioxid

Was lässt sich nun mit diesen Nanopartikeln anfangen? Man kann hier mehrere grundsätzliche Linien unterscheiden. Es ist einmal die Anwendung von Nanopartikeln zur Erfüllung bestimmter Funktionen oder zur Herstellung von Werkstoffen direkt oder ihre Nutzung in Kompositen, in denen sie der Matrix bestimmte neue Eigenschaften verleihen. Ein Beispiel für die Verwendung von Nanopartikeln direkt ist in Bild 4 gezeigt, bei der glasartige Korrosionsschutzschichten auf Stahl erzeugt werden, die gleichzeitig geprägte Hologramme enthalten. Diese Hologramme sind so hart, dass sie praktisch mit abrasiven Medien nicht mehr entfernt werden können. Man müsste sie schon wegschleifen. Grundprinzip dabei ist, dass wiederum Nanopartikel aus oberflächenmodifizierten  $\text{SiO}_2$  in einer dicken Schicht aufgetragen werden können. Voraussetzung dafür ist die Flexibilisierung dieses Nanopartikelschichtsystems durch die Reduzierung der Wechselwirkung untereinander, in die dann, da die Systeme in diesem Zustand weich genug sind, mit flexiblen Stempeln das Hologramm eingepreßt wird.



Absolut fälschungssichere Produktlabels  
Maschinenlesbare Informationen

Bild 4: Glasartige Korrosionsschutzschicht auf Stahl mit dauerhaftem Hologramm

Durch die schon oben erwähnte außerordentlich niedrige Sintertemperatur lässt sich eine solche Schicht „verglasen“, ohne dass ein Aufschmelzen eintritt. Dies ist die Voraussetzung für die Speicherung einer digitalen Information, da diese sehr scharfe Flanken benötigt. Dies zeigt den eigentlichen Trick. Hier können Gläser hergestellt werden, ohne zu schmelzen, und Mikrostrukturen behalten ihre Form. Eine andere Direktanwendung von Nanopartikeln ist im folgenden Bild 5 gezeigt. Hierbei wurde in der Zusammenarbeit mit der Charité, Dr. Jordan, in Berlin, Eisenoxidnanopartikel entwickelt, deren Oberfläche so gestaltet ist, dass sie selektiv in Tumorzellen eindringen können. Es konnte gezeigt werden, dass mehrere Millionen dieser Partikel pro Zelle aufgenommen werden. Über elektromagnetische Wechselfelder gelingt es nun, die Tumorzellen selektiv aufzuheizen und sie zu zerstören.

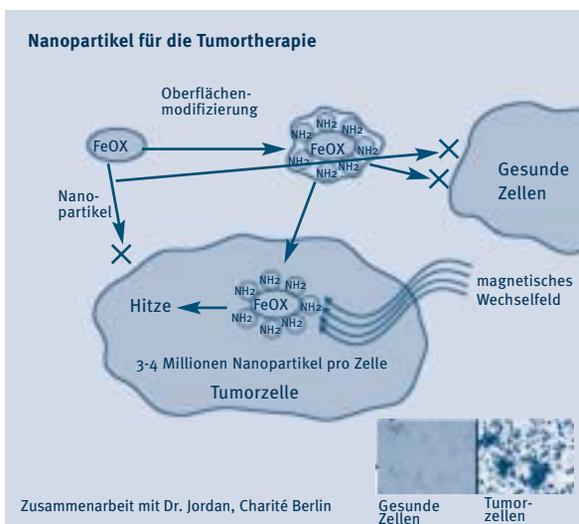


Bild 5: Nanopartikel für die Tumorthherapie

Das Bild zeigt neben dem Prinzip auch den Unterschied zwischen gesunden und Tumorzellen im Hinblick auf das Aufnahmeverhalten. Während die gesunden Zellen praktisch kein Eisenoxid aufnehmen, sind die Tumorzellen durch die hohe Dosis an Eisenoxid braun gefärbt. Die Systeme sind inzwischen so weit fortgeschritten, dass die klinischen Prüfungen demnächst angegangen werden. Das Grundprinzip des Energieeintrags liegt in der Teilchengröße: Superparamagnetische Eigenschaften (d. h. Magnetismus nur bei Anlegen eines Magnetfeldes) sind bei Eisenoxid an die Partikelgröße geknüpft. Sogenannte Eindomänenstrukturen sind erforderlich. Hätte man mehrere Domänen in einem Partikel, so würde ein Restmagnetismus verbleiben, der ein Zusammenklumpen der Eisennanoteilchen als Folge hätte.

Da die Partikel im Magnetfeld magnetisch werden, können sie auch zu Trennprozessen herangezogen werden. Es wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Roche Diagnostics ein Trennsystem für virale DNA entwickelt. Glimmerplättchen, die mit Eisenoxidnanopartikeln bestückt sind, werden mit einer Schicht überzogen, die selektiv virale DNA aus einem Gemisch von 200 biologischen Komponenten abtrennen kann. Durch einen Magneten lässt sich nun die virale DNA aus der Mischung herausfischen und gängigen Nachweisverfahren unterwerfen. Im folgenden Bild 6 ist in einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme der Aufbau eines solchen magnetischen Trennsystems gezeigt. Ein anderes Beispiel sind nanostrukturierte Beschichtungswerkstoffe für den Korrosionsschutz.

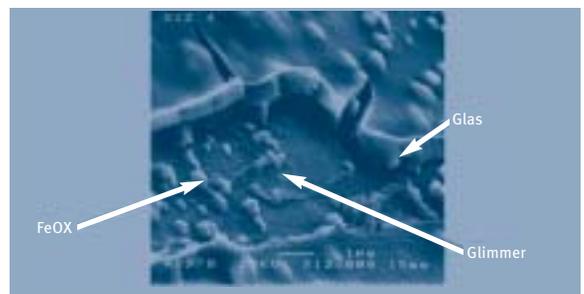


Bild 6: Die besondere Herausforderung: Beschichtung von Glimmerplättchen

Wie in [1] ausgeführt, lassen sich über einen dreifach gestalteten Ansatz neue Qualitäten im Korrosionsschutz auf Leichtmetallen wie Aluminium, Magnesium und dessen Legierungen erzielen.

[1] S. Langenfeld, G. Jonschker, H. Schmidt, Neue Sol-Gel-Beschichtungen als Korrosions- und Verschleißschutz für NE-Metalle, Mat.-wiss. u. Werkstoff techn. 29 (1998) 23-29

Durch die Stabilisierung der Grenzfläche Metall-Schutzschicht über thermodynamische Prinzipien und die Inkorporation von nanoskaligen Passivierungskomponenten als Controlled Release Reservoir ist es gelungen, eine Chromatierung als sonst notwendige Vorbehandlung vollkommen zu vermeiden und trotzdem Korrosionsschutzergebnisse erzielen, die spektakulär sind. Wie in Bild 7 dargestellt, ist selbst nach über 8000 Stunden (> 1 Jahr) permanenter Salzbesprühung eine Aluminium-Magnesium-Legierung, auf die vorher auch noch ein Kratzer durch die Schicht angebracht worden war, vollkommen korrosionsfrei.

Neues Prinzip:

- Thermodynamisch stabilisierte Grenzfläche
- Passivierende Additive in nanoskaliger Form
- Controlled Release Effekt

- Einkomponentensysteme, wasserbasiert
- Chromfrei, keine Vorbehandlung
- Schon in Dicken von wenigen  $\mu\text{m}$  wirksam
- „Easy to clean“ integrierbar

SalzSprühTest auf AlMg3



Nanomer, 8000 h mit Kratzer, angebracht vor Beginn des Tests, chromfrei



Herkömmliche Schutzbeschichtung: 3000 h, mit Chromatierung



Al-Druckgussteil

Bild 7: Chromfreier Korrosionsschutz auf Leichtmetallen

Nanopartikel lassen sich nicht nur thermisch verdichten oder in Polymermatrices dispergieren, sie lassen sich auch reaktiv verknüpfen, indem man sie mit entsprechenden Oberflächengruppen, wie z. B. polymerisierbaren Doppelbindungen ausrustet. Damit lassen sich UV-härtbare abriebsfeste Beschichtungen herstellen, die durch eine Strahlungshärtung (UV) zu transparenten Schichten umwandeln. Werden nanoskalige Partikel mit unterschiedlichen Brechzahlen verwendet, dann kann man auf diese Art und Weise sehr einfach und elegant Interferenzschichten erzeugen, die optische Wirkungen aufweisen, z. B. UV-reflektierend, Infrarotreflektierend oder Antireflexwirkung im sichtbaren Licht zeigen. Damit ist es zum ersten Mal gelungen, Automobilverschiebungen so reflexfrei

[2] H. Schmidt, R. Kasemann, S. Brück, Beschichtungszusammensetzungen auf der Basis von fluorhaltigen anorganischen Polykondensaten, deren Herstellung und deren Verwendung, Europäisches Patent Nr. o 587 667 B1 bewilligt am 13.09.1995, Priorität 06.06.1991

zu machen, dass man auf das Armaturenbrett ein weißes Blatt Papier legen kann, ohne dass dies gespiegelt wird. Das Heranziehen von elektrochemisch reduzierbaren und wieder oxidierbaren Nanopartikeln (z.B.  $\text{WO}_3$ ), bei denen der Redoxprozess mit einer Farbänderung einhergeht, lässt sich zur Herstellung von elektrochromen Verschiebungen verwenden, bei denen auf Knopfdruck die Lichttransmission herabgesetzt werden kann, ohne dass die Durchsicht beeinträchtigt wird. Solche voll über chemische Nanotechnologien hergestellte, inzwischen in Fensterscheibengröße als Prototyp vorliegenden Systeme haben zum ersten Mal das Potenzial, eine preisgünstige elektrochrome Verschiebung für den allgemeinen Bedarf in die Umsetzung gerückt zu haben. Das Potenzial solcher Systeme ist nicht nur bei der Verglasung nutzbar, sondern man kann sich durchaus vorstellen, dass – als intelligentes Fassadenelement geschaltet – auch der Energiedurchtritt durch eine Fassade steuerbar wird. Derartige Systeme sind sowohl im Sommer für das Fernhalten der Wärme in einem Haus als auch im Winter für eine hohe Isolierwirkung nutzbar und können essentiell zur Energiebilanz von Gebäuden beitragen.

Der Verbrauch von Waschmitteln und Detergenzien ist weltweit extrem hoch und abwasserbelastend. Die Reduzierung des Verbrauchs von Frischwasser, die Reduzierung von Abwasser und die Kontamination von Abwasser durch Detergenzien hat eine hohe Bedeutung im Hinblick auf Umwelt, aber auch im Hinblick auf die volkswirtschaftlichen Kosten. Leicht zu reinigende bzw. selbstreinigende Oberflächen sind daher von hoher Bedeutung. Die bisher entwickelten Systeme [2,3,4] haben in vielfachen Anwendungen schon ihre Wirksamkeit bewiesen (im Sanitärbereich, im Druckbereich, im Architekturbereich usw.). Bild 8 zeigt das Anwendungspotenzial von solchen Beschichtungen. Auch hier ist erst der Anfang gemacht. Das weltweite Potenzial dieser Technologien ist sehr groß und zeigt wie breit die Wirkung nanostrukturierter Werkstoffe sein kann.

[3] R. Kasemann, H. Schmidt, S. Brück, Functional coatings on glass surfaces by the sol gel process, Bol. Soc. Esp. Ceram. Vid. 31-C (1992) Vol. 7, 75 - 80

[4] S. Schmitz-Stöwe, S. Brück, H. Schmidt, Low surface free energy nano-composite-materials as anti graffiti coatings, In: Proc.European Coatings Conference 1999, 193 - 199

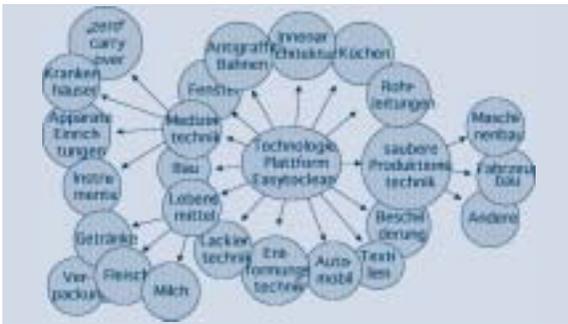


Bild 8: Anwendungsmöglichkeiten für Easy-to-clean-Beschichtungen

### 3. Engpässe

Die Engpässe bei der Realisierung des Potenzials liegen im Wesentlichen in der im Augenblick noch nicht gelösten Produktionstechnik von Nanopartikeln hoher Qualität (oberflächenmaßgeschneidert, agglomeratfrei) zu vertretbaren Preisen sowie in der maßgeschneiderten Werkstoffentwicklung. Der letztere Punkt ist deswegen ein ernst zu nehmender Engpass, weil für eine breite Nutzung nanostrukturierter Werkstoffe letztendlich nur „mass

commodities“ von den typischen Werkstoffherstellern entwickelt werden können. Gerade im Bereich der Oberflächentechnik jedoch ist ein hoher Bedarf an problemorientierten Technologien für das jeweilige Endprodukt vorhanden. Die dazu notwendigen Forschungs- und Entwicklungs- und Produktionsstrukturen in der Industrie sind erst im Aufbau begriffen, und im Moment kann keine Prognose gemacht werden, wann diese entlang den Wertschöpfungsketten arbeitenden Strukturen auf breiter Front zur Verfügung stehen. In der institutionellen Forschung und Entwicklung könnte ein entsprechender Schritt getan werden, wenn man auch hier von der Grundlage bis zum fertigen Produkt entsprechend gut organisierte Einheiten etabliert. Nur damit ist es möglich, bei Technologien, die über sehr verschiedene Disziplinen bis zum Markt ablaufen müssen, einen entsprechenden Technologietransfer zu realisieren. Geschieht das nicht, bleibt man wie bisher beim Wissenstransfer stehen, der in der Regel nur von sehr großen Unternehmen genutzt werden kann.



# Workshop: Künstliche Intelligenz

Workshop: Künstliche Intelligenz *Rüdiger Dillmann*

## *Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann*

lehrt an der Universität Karlsruhe am Institut für Prozesskontrolle und Robotik. Er ist Direktor der CAD / CAM / Robotics Gruppe am Institut für Real-Time Computer Control Systems und Robotik wie auch Leiter der Forschungsgruppe IDS (Interactive Planning Technology) am Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe. Dillmann studierte Elektrotechnik in der Fachrichtung Biokybernetik. Danach war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Computerwissenschaften an der Universität Karlsruhe. Sein Forschungsgebiet ist die Robotik mit Schwerpunkt auf künstlichen Intelligenzsystemen. Zusätzlich arbeitet Dillmann auf dem Gebiet der Integration von CAD/CAM und robotergesteuerten Simulationstechniken im Bereich der Medizin und des Informationsmanagements.



Ich möchte in meinem Vortrag eine Entwicklung oder vielmehr eine Entwicklungstendenz vorstellen und zwar den Weg zu sogenannten humanoiden Robotern. Bei der Diskussion die derzeit in Baden Württemberg geführt wird, stellte sich – als wir damit begonnen haben humanoide Roboter zu entwickeln – von vorn herein die Frage, wozu diese denn eigentlich gut sind. Können sie in der Produktion eingesetzt werden, oder was will man sonst damit machen? Wir hatten Schwierigkeiten, zu vermitteln, dass wir eine Technologie entwickeln, die mittelfristig – ich sag mal im Zeitrahmen von 10, 15 Jahren – zu informationsverarbeitenden Systemen führt, die zum einen Schnittstellen zur Umwelt und multimodale Schnittstellen zu den Menschen hat. Die Idee war, diese Systeme im Alltag einzusetzen, das heißt also, wir haben uns zum Ziel gesetzt, einen humanoiden Roboter zu entwickeln, der im Haus, in der Küche arbeitet. Das führte zu unserem Sonderforschungsbereich, der den Spitznamen „Küchen-SFB“ hat. Wir modellieren, beobachten und analysieren Handhabungen, Interaktionen im Alltag, wir bilden sie im Rechner ab und entwickeln dann Dialog- und Interaktionskomponenten, die es erlauben, mit dieser Technologie verschiedene Anwendungen zu erschließen.

Wenn man sich umschaute, wie weit der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der humanoiden Roboter ist, dann wird man in der Literatur schon solche Systeme finden: Das bekannteste sind die Systeme von Honda, das ist das System Asimov, dessen Roboter mit erheblichem finanziellem Aufwand entwickelt wurde. Es handelt sich dabei um eine menschenähnliche mechanische Struktur mit Extremitäten, der Roboter kann also laufen, hat Extremitäten an Stelle der menschlichen Arme, erste visuelle Sinne um die Umwelt zu erkennen, kann aber eigentlich noch nicht allzu viel Sinnvolles machen. Es ist ein Operator im Hintergrund der praktisch im Masters-Lay-Verfahren das System steuert. Die neueste Entwicklung aus Japan, aus Zuguka, ist eine sogenannte Research-Plattform. Das ist ein humanoider Roboter, der als offenes System konzipiert ist, der Schnittstellen beinhaltet, so dass man das System in Forschungslaboratorien installieren kann, aber auch eigene Dinge entwickeln und hinzusetzen kann. Das ist eine sehr interessante Entwicklung.

Was steckt dahinter? Das sind die Komponenten Mechatronik, das sind Antriebssysteme Steuerungs-Regelungstechnik und die entsprechende Datenverarbeitung, so dass diese Systeme arbeiten können. Ein anderes System von der Waseda-Universität

ist Vabian, ein Roboter, der inzwischen in der 3. Generation entwickelt wird. Humanoide Roboter haben in Japan eine lange Tradition, seit etwa 30 Jahren arbeitet man an solchen Systemen, zunächst an zweibeinigen Laufmaschinen.

Wie Ihnen sicherlich bekannt ist, wurde ein Keyboard spielender, menschenähnlicher Roboter bereits vor 17 Jahren in Japan vorgestellt, und die Mikro-mechatronik wird dort sehr gut gezeigt. Bei anderen Entwicklungen, beispielsweise am MIT, hat man visuelle Sinne gekoppelt mit Manipulatoren, also mit Händen, mit Extremitäten. Das System kann Auge-Hand-Koppelungen und Handhabungen durchführen aber auch die Umwelt erkennen. Es kann reagieren lernen und bestimmte Fähigkeiten, sogenannte „skills“ entwickeln.

Dann gibt es Systeme, auch wieder an der Waseda-Universität entwickelt, bei denen die Interaktion, die Multimodalität in den Vordergrund gestellt wird, das heißt also, die sprachliche Kommunikation. Es können also natürlich-sprachliche Dialoge geführt werden. Haptischer Kontakt ist möglich, es können Objekte manipuliert werden, der Roboter kann letztendlich auch mit dem Menschen direkt interagieren. Wir haben analysiert, was diese Systeme können und sind zum Schluss gekommen, dass die akustische Spracherkennung und die Dialoge doch noch sehr rudimentär sind in der Entwicklung. Wenn Sie genug Rechner im Hintergrund haben, dann lässt sich schon einiges machen, bei der Spracherkennung und der Dialogführung, aber schwierig wird es bei Spontandialogen. Man benötigt dynamische Vokabulare, man benötigt Grammatiken die hierzu erzeugt werden müssen, auch dynamisch, das heißt also, das Wissen und die Repräsentation der Umwelt wächst eigentlich im Alltagskontext. Das sind Gebiete, die in der KI in der Vergangenheit sehr intensiv untersucht wurden, es gibt bereits sehr viel Literatur dazu. Vielleicht kommen auch noch die Ingenieurwissenschaften dazu, wo wir eigentlich dann verzweifelt aufgegeben haben, weil hier einfach zu viele Theorien vorliegen, die sich sehr schlecht oder nur sehr schwer in technische Systeme umsetzen lassen. Das heißt, wir haben dann den Beschluss gefasst, auf der einen Seite zu untersuchen, welche

Systeme in der Natur vorliegen und auf der anderen Seite eben technische, ingenieurmäßige Ansätze zu entwickeln, um tatsächlich humanoide Roboter zu bauen.

Zu dem, was wir in der Vergangenheit gemacht haben: Wir haben sehr viele Laufmaschinen entwickelt. Vorbild war die Stabheuschrecke, die gut beobachtbar ist, weil sie sich sehr langsam bewegt. Man kann also mit der Videokamera die Bewegungen aufnehmen und Störungen mitbeobachten. Biologen klemmen manchmal die Beine bei den Tieren ab, um zu beobachten, wie das nervliche System reagiert. Man kann Messungen an den Neuronen durchführen, das wurde in Bielefeld gemacht, und die Beobachtungen, wie die Laufmaschinen eigentlich funktionieren, wie die Beine synchronisiert werden, wie sich das System verhält, haben wir dann in technische Systeme umgebaut. Wir haben einen Sechsbener der 3. Generation entwickelt, der vollkommen autonom ist. Oder einen Vierbener, bei dem wir die Bewegungen von Säugetieren beobachtet haben und verschiedene Gangarten modelliert haben. Das ist sehr schwierig, weil Säugetiere doch eine wesentlich größere Anzahl an Aktoren haben. Das ganze Muskelskelett ist technisch sehr schwierig nachzubilden. Aber es lohnt sich, ein Grundverständnis davon mitzubringen, wie biologische Systeme funktionieren, wenn man sich an humanoiden Robotern versucht. Wir haben in unserem Forschungsbereich einfach mal alle beteiligten Institute aufgelistet, um Ihnen zu illustrieren, was hier alles zusammenfließt, wenn man humanoide Roboter entwickeln möchte. An meiner Universität sind das vier Institute der unterschiedlichsten Fakultäten die mitwirken, ein Großteil wird von der Informatik geleistet, etwa die ganze Informationsaufnahme, Modellierung, Dialogfindung, Spracherkennung, Bildverarbeitung und so weiter. Dann ist der Maschinenbau beteiligt, der die mechatronischen Elemente, das heißt die maschinenbaulichen Elemente untersucht und entwickelt, dann die Elektrotechnik, die für Signalverarbeitung, Steuerung und Regelung zuständig ist und dann haben wir ein Sportinstitut dabei, das uns Grundlagen vor allem aus dem Bereich der Biomechanik und der Beobachtung des Menschen miteinbringt. Zum Beispiel kann ein Hochspringer beob-

achtet werden, man kann die Bewegung analysieren und das kann unter Umständen eben Hinweise geben, wie eine Optimierung stattfinden könnte. Wir interessieren uns dafür, was natürliche Bewegungen sind. Außer der Bewegung sollte der Roboter auch die Intension des Menschen wahrnehmen können, damit er weiß, wie er sich verhalten soll und er Verhaltensmuster daraus ableiten kann. Auch das sind Dinge, die Kenntnisse über die Bewegungsabläufe des Menschen voraussetzen.

Dann ist das Fraunhofer Institut, das IITB, Institut für Informationsverarbeitung und Technologie und Biologie mit dabei und das Forschungszentrum Karlsruhe. Hier wird vor allem Mikrosystemtechnik entwickelt, das heißt die miniaturisierten Komponenten, die als Voraussetzung für die Konstruktion solcher Systeme notwendig sind, insbesondere eine Hand, eine hochflexible Hand. Ebenfalls beteiligt ist das Forschungszentrum Informatik, ein assoziiertes Institut, ein Transferzentrum in Karlsruhe. Das gibt Ihnen einen Eindruck des Teams insgesamt, die Wissenschaftler, die beteiligt sind und die Studenten, die in Form von Studienarbeiten, Diplomarbeiten, Seminaren an der Entwicklung mitwirken.

Was macht eigentlich einen Roboter aus, der „humanoid“ ist? Nach meiner Meinung muss er zumindest eine Hülle haben, die menschenähnlich aussieht, nicht hochrealistisch, es kann auch angenähert sein, es kann eine Karikatur sein, aber der Roboter sollte ungefähr wie ein Mensch aussehen. Außerdem ist mit einem humanoiden Roboter die Erwartung verbunden, dass er Dinge macht, die man kennt, dass er zumindest ein einfaches Verhaltensrepertoire hat, das etwa unserem entspricht, also dass er berechenbar ist, nicht im formalen Sinne der Berechenbarkeit, sondern dass Sie erwarten können, er macht Dinge, die nicht gefährlich sind, er unterstützt die Wünsche und man kann ihm auch sukzessiv neue Aufgaben beibringen.

Was ist dazu nötig? Die Möglichkeit zur Kooperation mit dem System, das Handhabungen durchführt. Es ist erforderlich dass das System belehrt werden kann, dass es lernen kann durch Erklärung, durch Vormachen, durch Imitation, eventuell kann das System Analogieschlüsse ziehen, hier ist ein sehr

breites Spektrum an Lernverfahren da. Man könnte sich aber auch einen Internetanschluss vorstellen über den man sogenannte Skills in den privaten, humanoiden Roboter in einem Trainingszentrum lädt und mit diesen Skills dann eine Software erstellt, oder konfiguriert, ein Menü zusammenstellt, das die Möglichkeit die Flexibilität erhöht – das heißt also lernen. Wir haben uns Gedanken gemacht, wie das direkt passieren kann, denn in die zukünftigen Smart Houses wird kein Techniker mehr kommen, sondern die Skills werden über das Netz in das Gerät geladen.

Gestik und Mimik sind Forschungsgebiete, die in der KI seit langem sehr intensiv untersucht werden, in der Robotik kommt noch die Haptik dazu, das heißt also, das Kooperieren mit Kontakten, dass wir also Kontakte, Kräfte, Momente messen können und damit auch die Dynamik der Interaktion mit in die multimodale Interaktion bringen. Dann haben wir beim Lernen ein sehr breites Spektrum, wobei man zwischen Adaption und Lernen unterscheiden muss. Lernen bedeutet nach meiner Ansicht, dass man neue Wissensstrukturen und neue Fähigkeiten aufbaut in dem System und das geht am besten durch Belehren. Ein Roboter kann nicht alleine lernen, nach meiner Meinung.

Deswegen haben wir Techniken wie das Vormachen, dass man Dinge demonstriert, wie Objekte zu greifen sind, das kann gemessen, visuell beobachtet, aufgezeichnet, segmentiert und verarbeitet werden. Dann kann man Dialoge mit Demonstrationen koppeln, das heißt also, dass man nicht nur aus einem Stummfilm errät, was das war, sondern dass Kommentare hinzukommen und damit eben Erklärungen oder Hinweise gegeben werden oder auch Anweisungen, dann durch Dialoge und verschiedene Skills, Geschicklichkeiten, die abgeleitet werden, oder komplexere Handlungen werden mit Task-Wissen oder Task-Knowledge bezeichnet. Hier ist ein breites Spektrum, das allerdings sehr häufig überschätzt wird im Kontext von Robotern, denn es setzt in der Regel doch sehr viel technisches Hintergrundwissen voraus, was Kinematik, Dynamik betrifft, um das einigermaßen handhabbar für den Menschen zu machen.

Bei der Kooperation ist die Grundfrage, was der Mensch macht, was seine Intention ist. Es ist wichtig, dass man die Handlungen deutend beobachten kann, um gefährliche Situationen zu vermeiden, aber auch um ein sinnvolles Ziel erreichen zu können. Es gibt unbeteiligte Menschen, die sich in dem Haus aufhalten, es gibt Menschen, die direkt mit dem Roboter in Interaktion treten wollen und dann sind ja auch noch weitere Hausbewohner da, Tiere zum Beispiel, die müssen erkannt werden oder wenn Sie Kinder im Umfeld des Roboters haben, dann müssen die auch erkannt werden und ein entsprechendes Verhalten des Systems angestoßen werden. Und dann kommt eben die Kooperation selbst: Das sind Schlüsselgebiete auch in der KI, die wir jetzt im Zusammenhang mit Robotern in Alltagssituationen durchspielen. Es gibt viele Methoden, die wir wieder aufgreifen und aus meiner Sicht ist hier für die KI-Forschung durchaus eine Renaissance zu sehen. Es gilt, die Methoden zu erweitern, sie noch mal neu zu entwickeln und am Beispiel eines humanoiden Roboters zu erproben.

Auf die Technik möchte ich eigentlich im Einzelnen jetzt nicht eingehen, man kann das schalenmäßig aufbauen, Standardsteuerungen, dann mit Überwachungskomponenten und dann eben um die Gefühle selbst, eine sehr intelligente oder symbolische Schicht realisieren, bei der vor allem die Lernvorgänge mit unterstützt werden.

Sehr schwierig ist bei Robotern ein Kontextwechsel, das heißt, wenn die Situation sich plötzlich ändert, muss der Roboter das erkennen, das ist eine noch nicht gelöste Fragestellung. Vielleicht sagt man einfach dem Roboter, „jetzt machen wir was anderes“, dann kann er den Kontext einfacher wechseln, das heißt, man hat hier eine Dialogmöglichkeit, um mit dem System zu kommunizieren. Aber das Fernziel ist eigentlich, dass ein Roboter den Kontextwechsel selbst erkennen kann. Bei Repräsentationsfragen haben wir festgestellt, dass es äußerst komplexe Datenstrukturen sind, die hier auftreten. Dazu gibt es teilweise, kein sicheres Wissen.

Auf die Frage der Anwendbarkeit dieser Systeme, kann ich folgendes antworten: es wird viele Spin-offs geben, das heißt also Teilentwicklungen, die man in verschiedenen Formen im Automobil finden kann, wahrscheinlich auch zur Unterstützung von Piloten, dass wir Dialogschnittstellen haben, auch Bedienschnittstellen zu Geräten, die einfacher bedienbar sind und dann vor allem auch Komponenten in Smart-Houses, so dass Sie mit dem Haus sprechen können und bestimmte Funktionalitäten realisieren können. Es gibt verschiedene Industrien, die sich inzwischen dafür interessieren. Zunächst mal also die Weißware-Industrie. Die interessiert natürlich, was da passiert, und ob man das eventuell als Produkt realisieren kann. Dazu kommen sehr viele Anwendungen im Unterhaltungsbereich, also Anfragen, überwiegend aus Nachtclubs, die an einem humanoiden Roboter Interesse haben und hier der Phantasie freien Lauf lassen.



**Die TA-Akademie und die Landesstiftung Baden-Württemberg bedanken sich bei folgenden Partnern für ihre Unterstützung:**



- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- Wilhelm-Schickard-Institut, Lehrstuhl für Rechnerarchitektur
- Sony Europe GmbH
- Alfred Kärcher GmbH & Co.
- Lego GmbH
- fischertechnik – Artur Fischer GmbH & Co. KG
- Siemens AG

# Veröffentlichungen der TA-Akademie zu den Themen des Kongresses

## Allgemeine Veröffentlichungen über die TA-Akademie

**Die TA-Akademie.** Folder, hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg. Erhältlich in deutscher, englischer, französischer und spanischer Sprache.

**Arbeitsprogramm 2002,** hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart 2002

**Jahrbuch der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg 2001,** hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart 2002

**Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg. Ein gelungenes Experiment.** Jubiläumsausgabe der TA-Informationen (Nr. 2/2002) anlässlich des 10-jährigen Bestehens der TA-Akademie. Stuttgart 2002.

## Bücher ab 1999 (nur über den Buchhandel erhältlich)

*Barthel, J., Steffensen, B.: Koordination im Innovationsprozeß. Standardisierung als Motor des technischen Wandels.* Reihe Forum Kooperative Politik Band 3. Nomos Verlagsgesellschaft Baden-Baden 2000 (ISBN 3-7890-6502-1)

*Braczyk, H.-J., Fuchs, G., Wolf, H.-G. (Hrsg.): Multimedia and Regional Economic Restructuring.* Routledge London 1999 (Routledge Studies in the Modern World Economy v. 21) (ISBN 0-415-19857-7)

*Fuchs, G., Krauss, G., Wolf, H.-G. (Hrsg.): Die Bindungen der Globalisierung. Interorganisationsbeziehungen im regionalen und globalen Wirtschaftsraum.* Metropolis-Verlag Marburg 1999 (ISBN 3-89518-249-4)

*Fuchs, G., Wolf, H.-G.: Regionale Erneuerung durch Multimedia? Dokumentation.* Nomos Verlagsgesellschaft Baden-Baden 2000 (ISBN 3-7890-6545-5)

*Hampel, J., Renn, O. (Hrsg.): Gentechnik in der Öffentlichkeit. Wahrnehmung und Bewertung einer umstrittenen Technologie.* Campus Verlag Frankfurt/New York 1999 (ISBN 3-593-36348-8)

*Jaeger, C.; Renn, O.; Rosa, E.; Webler, Th.: Risk, Uncertainty, and Rational Action.* Earthscan-Verlag London and Sterling 2002 (ISBN 1-85383-770-9 paperback, ISBN 1-85383-762-8 hardcover)

*Renn, O., Rohrman, B. (Hrsg.): Cross-Cultural Risk Perception. A Survey of Empirical Studies.* Kluwer Academic Publishers Dordrecht/Boston/London 2000 (Technology, risk, and society, v. 13) (ISBN 0-7923-7747-8)

*Schallies, M., Wachlin, K.D. (Hrsg.): Biotechnologie und Gentechnik – Neue Technologien verstehen und beurteilen.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1999 (ISBN 3-540-65140-3)

*Schell, T. v., Seltz, R. (Hrsg.): Inszenierungen zur Gentechnik. Konflikte, Kommunikation und Kommerz.* Westdeutscher Verlag GmbH Wiesbaden 2000 (ISBN 3-531-13536-8)

## Lieferbare Arbeitsberichte ab 2000

Nr. 113 *Barthel, J., Fuchs, G., Wassermann, S., Wolf, H.-G.: Virtuelle Organisationen in regionalen Wirtschaftssystemen.* Workshopdokumentation. Stuttgart März 2000 (ISBN 3-932013-39-5), im Internet abrufbar

Nr. 156 *Renn, O.; Pfister, G.; Rau, M.: Nachhaltiges Baden-Württemberg – Strategien für eine umfassende Integration der Fachpolitiken.* Workshopdokumentation. Stuttgart April 2000 (ISBN 3-932013-98-0), im Internet abrufbar

Nr. 157 *Blancke, S., Roth, Ch., Schmid, J.: Employability („Beschäftigungsfähigkeit“) als Herausforderung für den Arbeitsmarkt – Auf dem Weg zur flexiblen Erwerbsgesellschaft – Eine Konzept- und Literaturstudie.* Stuttgart Mai 2000 (ISBN 3-934629-00-8), im Internet abrufbar

Nr. 158 *Krauss, G., Stahlecker, Th.: Die BioRegion Rhein-Neckar-Dreieck. Von der Grundlagenforschung zur wirtschaftlichen Verwertung?* Stuttgart Juni 2000 (ISBN 3-934629-01-6), im Internet abrufbar

Nr. 162 *Jedicke, E.: Biodiversitäts-Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeit in Baden-Württemberg. Studie im Rahmen des Projekts „Statusbericht Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg“.* Stuttgart Juli 2000 (ISBN 3-934629-06-7), im Internet abrufbar

Nr. 173 *Renn, O., Leon, C., Clar, G.: Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg. Statusbericht 2000 – Langfassung.* Stuttgart November 2000 (ISBN 3-934629-19-9), im Internet abrufbar

Nr. 175 *Töpsch, K., Malanowski, N.: Arbeitsregulation im Modernisierungsprozess. Neue Herausforderungen für Verbände und Gewerkschaften in Baden-Württemberg.* Stuttgart September 2000 (ISBN 3-934629-21-0), im Internet abrufbar

Nr. 178 *Baur, G., Müller, A., Renn, O., Mack, U. (Bearbeitung): Public Understanding of Sciences and Humanities. Initiativen, Optionen und Empfehlungen für Baden-Württemberg.* Stuttgart September 2000 (ISBN 3-934629-25-3), im Internet abrufbar

Nr. 197 *Siegrist, M.: Die Bedeutung von Vertrauen bei der Wahrnehmung und Bewertung von Risiken.* Stuttgart September 2001 (ISBN 3-934629-50-4), im Internet abrufbar

Nr. 198 *Bubeck, B.; Fuchs, G.: Auf dem Weg in die digitale Politik. Eine Untersuchung zum Virtuellen Parteitag von Bündnis 90/Die Grünen Baden-Württemberg.* Stuttgart Dezember 2001 (ISBN 3-934629-52-0), im Internet abrufbar

Nr. 202 *Zwick, M.; Renn, O. (Hrsg.): Wahrnehmung und Bewertung von Risiken. Ergebnisse des „Risikosurvey Baden-Württemberg 2001“.* Stuttgart Mai 2002 (ISBN 3-934629-56-3), im Internet abrufbar

Nr. 203 *Zwick, M.; Renn, O. (Eds.): Perception and Evaluation of Risks. Findings of the „Baden-Württemberg Risk Survey 2001“.* Stuttgart Mai 2002 (ISBN 3-934629-57-1), im Internet abrufbar

Nr. 216 *Pfister, G.: Indikatoren einer Nachhaltigen Entwicklung im Bereich „Wirtschaft“.* Stuttgart Juni 2002 (ISBN 3-934629-72-5), im Internet abrufbar

## lieferbare Bürgergutachten

**Bürgergutachten Biotechnologie/Gentechnik – eine Chance für die Zukunft?** Hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart November 1995 (ISBN 3-930241-52-X)

## Gutachten

*Rossnagel, A., Bizer, J.: Multimediadienste und Datenschutz.* Hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart 1995 (ISBN 3-930241-51-X)

*Schaefer, H.: Gefährdet Elektromog die Gesundheit?* Hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart 1995 (ISBN 3-930241-46-3)

## Dokumentationen

*Die Mitarbeiter des Bereichs „Technik, Funktionalität, Lebensqualität“ (Hrsg.): TA-Kontexte. Erfahrungsberichte zur Technikfolgenabschätzung.* Festschrift für Diethard Schade. Stuttgart Juni 2002 (ISBN 3-934629-70-9), im Internet abrufbar

*Fuchs, G.; Töpsch, K. (Hrsg.): Baden-Württemberg – Erneuerung einer Industrieregion. Kolloquium zum Andenken an Prof. Dr. Hans-Joachim Braczyk.* Stuttgart April 2001 (ISBN 3-934629-39-6) (nicht zum Verkauf bestimmt), im Internet abrufbar

*Rohr, M., Kaimer, M.: Technikfolgenforschung in Baden-Württemberg. TA-Net-BW 2002.* Stuttgart September 2002 (ISBN 3-934629-79-2), im Internet abrufbar

## lieferbare Präsentationen ab 1999

*Dayican, B.; Lehmann, I.; Müller, A.; Schell, T. v.; Tyroller, A.; Wachlin, K. D.: Pfade nach Utopia. Jugendforum „Neue Kommunikationstechnologien“.* Stuttgart 2001 (ISBN 3-934629-51-2), im Internet abrufbar

*Zwick, M.; Ruddat, M.: Wie akzeptabel ist der Mobilfunk?* Stuttgart November 2002 (ISBN 3-934629-82-2), im Internet abrufbar

### lieferbare Materialien

Hettinger, G.: **Grünes Gold der Zukunft?! Biotechnologie in der Pflanzenproduktion.** Hrsg. von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart 1996, im Internet abrufbar

### Zeitfragen

Hillebrand, I.; Lanzerath, D.; Wachlin, K. D. (Hrsg.): **Klonen. Stand der Forschung, ethische Diskussion, rechtliche Aspekte.** 2. aktualisierte Auflage. Stuttgart März 2002 (ISBN 3-934629-44-X), im Internet abrufbar

### CD-ROMs

**CD-ROM – Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg.** 1998

### lieferbare Kurzinfor (kostenfrei)

Lattewitz, F.: **Die öffentliche Wahrnehmung der Gentechnik in der Landwirtschaft und im Lebensmittelbereich.** Stuttgart Mai 1999, im Internet abrufbar

Fuchs, G.: **Multimedia-Unternehmen in Baden-Württemberg. Erfahrungen, Erfolgsbedingungen und Erwartungen.** Stuttgart Juni 1999, im Internet abrufbar

Blancke, S.; Roth, Ch.; Schmid, J.: **Employability – Herausforderung für den Arbeitsmarkt. Auf dem Weg zur flexiblen Erwerbsgesellschaft.** Stuttgart August 2000, im Internet abrufbar

Wachlin, K. D.; Wochner, M.; **Mitarbeiter des Deutschen Referenzzentrums für Ethik in den Biowissenschaften: Klonen. Stand der Forschung, ethische Diskussion, rechtliche Aspekte.** 2. aktualisierte Auflage. Stuttgart März 2002, im Internet abrufbar

Renn, O., Leon, C.: **Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg.** Statusbericht 2000. Stuttgart Dezember 2000, im Internet abrufbar

• Arbeitsberichte, Diskursberichte, Bürgergutachten, Ergebnisse, Leitfäden, Präsentationen, Materialien, Analysen und Zeitfragen je Euro **7,70**

• Gutachten je Euro **10,25**

• TA-Dokumentation (incl. CD-ROM) je Euro **15,35**

• Empfehlungen je Euro **5,15**

• CD-ROM je Euro **7,70**

• Ensys je Euro **13,85**

• Grünes Gold, Kurzinfor **kostenfrei**

Zzgl. Porto und Verpackung

**Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg**  
Industriestr. 5  
70565 Stuttgart  
Tel. 0711/9063-0  
Fax 0711/9063-299  
E-Mail: info@ta-akademie.de  
Internet: <http://www.ta-akademie.de>



### Bildnachweis:

(Fotos von oben nach unten, von links nach rechts)

Graffiti (J.E. Röttgers):

Titelleiste 1, 2, 5, 6; 7.1; 11.2; 14; 17; 20.1; 20.2; 22; 23; 25; 27; 29.1; 31; 32.1; 35; 38.1; 38.2; 42; 43; 53.1; 57; 64; 93; 96;

TA-Akademie (E. Cherki)

Titelleiste 3, 4, 8; 7.1; 11.1; 12; 29.2; 32.2; 48.1; 48.2; 49; 53.2; 58.1; 58.2; 70; 89; 90;

C-Lab: Titelbild; 59;

Stefan Hartmaier: Titelleiste 7;

Thomas Schimmel: 78-83;

Helmut Schmidt: 84-90;

### **Impressum**

Akademie für Technikfolgenabschätzung  
in Baden-Württemberg  
Industriestr. 5, 70565 Stuttgart  
Tel.: 0711/9063-0  
Fax: 0711/9063-299  
Internet: <http://www.ta-akademie.de>  
E-Mail: [info@ta-akademie.de](mailto:info@ta-akademie.de)

Redaktion:  
*Iris Lehmann*

Verantwortlich für den Inhalt:  
*Ulrich Mack*

Gestaltung:  
*Hartmaier & Mangold, Kirchentellinsfurt*

Bei Nachdruck und sonstiger Verbreitung  
bitten wir um Zusendung von zwei Belegexemplaren  
ISBN-Nr. 3-932013-05-0

