Szenario 2000: Aspekte der wissenschaftlichen und technologischen Entwicklung unserer Zukunft

Autor(en): **Kroy, Walter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 32

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77148

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Zukunft is a nimma des,
wos se früher amoi g'wesen is.»
(Karl Valentin)

Szenario 2000

Aspekte der wissenschaftlichen und technologischen Entwicklung unserer Zukunft

Eine Eingrenzung des Zeitraums, in welchem Aussagen über die Zukunft noch sinnvoll erscheinen, erfolgt durch Einordnen der Gegenwart in langfristige Wirtschafts- und Innovationszyklen. Als eine Methode der Zukunftsforschung kommt dann die Szenario-Technik zur Anwendung. Abschätzbare Entwicklungen des Wissens, der Grundlagenwissenschaften und der Technologien werden zu einer zyklusgerechten Prognose zusammengeführt. Besonders ausführlich gelangen dabei Biologie, Bionik und Synergetik zur Darstellung, ebenso die Erwartungen bezüglich intelligenter Technologien, künstlicher Intelligenz und künftiger Computer-Generationen. Die Zukunftsentwicklung wird sich jedoch in Schranken bewegen müssen, die einerseits in Gesetzmässigkeiten des Wachstums im endlichen System begründet sind und anderseits im Menschen selber, der seine Denkweise nicht verzugslos auf eine immer schnellere Folge neuer Erkenntnisse auszurichten vermag. Mit allen Zukunftsvoraussagen sind deshalb Zukunftsforderungen an Bildung und Erziehung untrennbar verbunden.

Die Zukunft hat die Menschheit und den Menschen immer stark interessiert. Bereits in der Urzeit war es zum Über-

VON WALTER KROY, MÜNCHEN

leben in der kalten oder unwirtlichen Jahreszeit erforderlich vorauszuplanen, vorauszudenken, Vorräte anzulegen oder sich eine sichere Behausung zu schaffen. Selbst die ganz kurzfristige Vorherschau auf das Wetter des nächsten Tages konnte schon lebenswichtig sein. Dem Menschen ist es in der Zwischenzeit gelungen, einige der Unwägbarkeiten und andere negative Einflüsse auf unser Leben für die Zukunft mehr oder weniger in den Griff zu bekommen. Dennoch bleibt die Ungewissheit vor der Zukunft, eine gewisse Skepsis, wie es wohl weitergehen wird, manchmal auch Zukunftsangst.

Weil es eine Reihe von Möglichkeiten gibt, sie zu gestalten, soll unsere Zukunft unter ein Motto aus dem technisch-wirtschaftlichen Bereich gestellt werden: Um Erfolg zu haben, hat es in der Vergangenheit vielfach genügt, grobe Fehler zu vermeiden – in Zukunft wird es notwendig sein, aktiv das Richtige zu tun. Darin ist ein Teil der Problematik der Zukunft mit erfasst, und es kommt auch zum Ausdruck, dass sich tatsächlich unsere Umwelt und unsere Wertvorstellungen in verschiedener Weise geändert haben und weiter ändern werden.

Allgemeine Bedingungen

Wirtschafts- und Innovations-Zyklen

Für die Zukunft der Welt, wie sie hier von der Wissenschaft und Technologie her begründet sein möchte, sind Weltwirtschaftsmodelle und Weltwirtschaftszyklen von wesentlicher Bedeutung.

Das M.I.T.-Weltwirtschaftsmodell

Am Massachusett Institute of Technology (M.I.T) in Boston wurden von J. Forrester Weltwirtschaftsmodelle entwickelt. Die daraus errechneten theoretischen Zeitverläufe von Kapitalmarkt-Angebot (von Banken und anderen Geldgebern) sowie Kapital-Nachfrage (für Investitionen und Unternehmensaufbau) werden als Modellkurven mit der tatsächlich erfolgten Kapitalnutzung verglichen und mit dem Verlauf der Häufigkeit wichtiger Erfindungen in Bezug gebracht (Bild 1).

Wesentliche Übereinstimmungen der gemessenen Kapitalmarkt-Kurve mit den berechneten Kurven zeigten augenscheinlich einen gewissen Realitätscharakter des Modells – ein Unterschied zu vielen anderen Weltwirtschaftsmodellen, die wir bisher schon vorgestellt bekommen haben. Die gemessene Kurve zeigt ferner am Ende der 20er und zu Beginn der 30er Jahre unseres Jahrhunderts deutlich die Weltwirtschaftskrise, und der Blick auf die 80er Jahre signalisiert auch hier wieder einen gewissen Abschwung in der Wirtschaftsentwicklung.

Die Kapitalmarktumsätze in diesem Wirtschaftsmodell der Welt, zusammenmgebunden durch die Vernetzung vieler Wirtschaftszyklen, durch Angebot und Nachfrage, Investitionen usw. zeigen zyklische Schwankungen, die sogenannten Kondratieff-Zyklen (die ebenso bei Schumpeter beschrieben sind). Diese Zyklen dauern etwa 50 Jahre und entsprechen dem Auf und Ab eines Wirtschaftssystems [1, 2].

Der Verlauf der Häufigkeit von wichtigen Erfindungen, von sogenannten Basisinnovationen, z.B. die Erfindung des Transistors, des Elektromotors, der Dampfmaschine usw., unterliegt ganz ähnlichen Schwankungsformen wie die Kapitalmärkte. Allerdings fällt dabei auf, dass diese beiden Kurven gegeneinander phasenverschoben sind, d.h. immer dann, wenn die Wirtschaft in einer schwierigen Phase steckt, in einem Tief sozusagen, dann wird die Erfindungsrate hoch.

Erkennbar ist im Wechselspiel dieser zwei Komponenten der Erfindungen und der wirtschatlichen Wachstumsraten eine typische Erscheinung, nämlich das Verkoppeln von mehreren Parametern zu einem, sich gegenseitig beeinflussenden System. Und offensichtlich dauert es eben immer ca. 50 Jahre, bis ein neuer Schub von Technologie den jeweils vorhergehenden ablöst. Es ist aber nicht erkennbar, was Auslöser und Folge ist, sondern nur, dass diese beiden Grössen verkoppelt sind.

Es bleibt wenig Optimismus, dass es gelingen könnte, diesen Zyklus abzuschaffen, denn die Ursachen liegen tief im Menschen und den Grenzen seiner Lernfähigkeit verwurzelt und sind nicht so leicht zu ändern.

Der Kondratieff-Zyklus

In Bild 2 und in Tabelle 1 sind die Kennzeichen der einzelnen Phasen des Zyklus Wachstum – Stagnation – Abschwung – Neuorientierung zusammengestellt, und sie werden nachfolgend am Geschehen in der Wirtschaft Europas seit dem zweiten Weltkrieg reflektiert.

Für Europa lag das letzte Tief im Kondratieff-Zyklus in den späten 20er und den frühen 30er Jahren. Der Wiederaufschwung, verbunden mit einer ho-

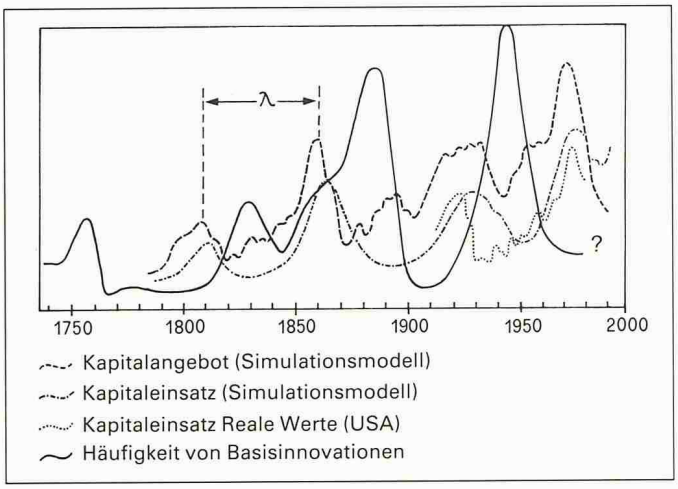

Bild 1. Zyklen im M.I.T.-Simulationsmodell

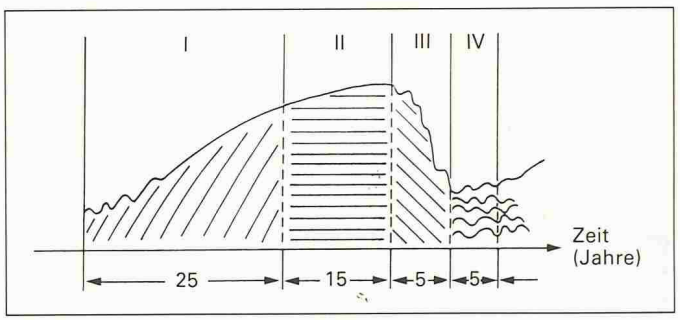

Bild 2. Der Kondratjeff-Zyklus

hen Innovationsrate, begann in den USA in den 30er Jahren; Europa folgte erst nach 1945.

Phase I: Aufschwung und Wachstum. Hier entstehen viele neue Produkte. Neue Technologie werden angeboten, schaffen neue Märkte und ermöglichen neues Wachstum. Dies bedeutet Investitionen und Erfolg für die Wirtschaft. Im ständigen Wechselspiel zwischen den Bereichen des Marktes und der Technologie ist dies also jene Phase, in welcher die Technologie stärker prägend wirkt als das Marktgeschehen. Die Zukunft in dieser Phase ist sehr stetig, d.h., die Prognosen sind einfach und durch Worte wie aufwärts, schneller, grösser usw. gekennzeichnet. Um zum Erfolg zu kommen, ist es wichtig, die richtigen, neuen Produkte auszuwählen, «die richtigen Dinge zu tun».

Phase II: Stabilität und Stagnation. Die Innovationsrate ist hier gesunken, es gibt kaum mehr radikal neue Erfindungen, man sieht alles unter dem Gesichtspunkt des Marktes. Der Market-Pull, also das, was der Markt verlangt, dominiert und gibt die entscheidenden Impulse für Produkte, wenn überhaupt noch neue Produkte entwickelt werden. In der Regel sind wirklich neue Dinge hier nicht gefragt, sie werden auch von den Benutzern nicht erwartet. Dies ist die Phase der Rationalisierer, der Optimierer, die aus einem Produkt und aus einem Herstellungsverfahren das letzte herausholen. Das Erfolgsrezept: «To do the things right», die Dinge richtig machen. Am Ende dieser Phase 2 setzt die Stagnation ein, die Zukunft fängt an ungewiss, unsicher zu werden.

Die Phase II erlebte Europa in den 70er Jahren. Mit dem Übergang in die Endphase der Stagnation ist in vielen Firmen auch ein Wechsel des Managements eingetreten. Waren in der Wirtschaft nach dem Kriege die Innovatoren, die grossen Beweger am Werk, die etwas Neues entwickelt haben, so sind diese Leute nun abgetreten, und die Bewahrer haben das Ruder übernommen. Durch Rationalisierung und Einsparungen, durch Optimierungen gelingt es, eine Zeitlang noch alles so zu erhalten, wie es zu Anfang war. Aber mit dem Anbruch eines neuen Kondratieff-Zyklus ist es notwendig, sich erneut umzustellen auf eine Phase der Innovation und des Bewegens der Dinge.

Phase III: Abschwung und Wandel des Denkens. Wenn wir diesen Zeitabschnitt betrachten, den Europa vielleicht gerade jetzt verlässt, so sehen wir folgendes: Neue Erfindungen werden zwar gemacht, aber noch nicht zu Innovationen umgesetzt. Wichtige Erfindungen, z.B. der optische Transistor oder Ideen in der Gentechnik, sind heute vorhanden, aber noch nicht zum Produkt geworden. Die Märkte sind weithin gesättigt. Der Ersatzbedarf ist viel geringer als etwa der Neubedarf in der Nachkriegszeit, als jedermann alles kaufen und haben wollte. Unternehmungen verschwinden vom Markt. Wir haben Degression, kein Wirtschaftswachstum, sondern Schrumpfung. Der Wandel des Denkens, den wir heute beobachten, setzt ein. Die Zukunft drängt sich besonders ins Bewusstsein, ist auch ein verunsichernder Faktor, und nie ist der Wunsch, die Zukunft zu kennen, höher als jetzt. Was ist in dieser Phase wichtig? «To stop the wrong things», d.h. mit den Dingen, die eben in der Zukunft nicht mehr sinnvoll, nicht mehr intelligent sind, aufzuhören.

Phase IV: Neuorientierung. In diese Phase treten wir eben ein. Die Erfindungsrate steigt weiterhin bis in die Anwendungen hinein, und erste Innovationen werden sichtbar. Die Märkte sind aber hier im Umbruch und unsicher, weil alte Produktmärkte auslaufen, neue Produktmärkte sich erst bilden müssen. Die Wirtschaft ist immer noch instabil. Die Zukunft ist dadurch gekennzeichnet, dass man in einem instabilen System steckt. Da gilt eine Regel: «kleine Ursache – grosse Wirkung». In der Technologie ist in dieser

Die Kennzeichen der Phasen eines Kondratjeff-Zyklus

Bereiche	*Phase I*	*Phase II*	*Phase III*	*Phase IV*
Neue Ideen	Hohe Innovationsrate Technologie-Push	Geringe Innovationsrate Kein Wunsch nach Neuem	Neue Erfindungen	Hohe Erfindungsrate
Märkte	Neue Märkte	Market Pull	Gesättigt Unsicherheit	Umbruch
Wirtschaft	Investitionen Wachstum	Beginnende Stagnation	Pleitewelle «Minus-Wachstum»	Instabil
Zukunft	Stetige Tendenz Prognose einfach	Stabil Wenig Änderung	Wandel des Denkens	Kleine Einflüsse können Zukunft prägen
Erfolgs-Rezept	To do the right things	To do things right	To stop the wrong things	To choose the right things

Tabelle 1. Die Kennzeichen der Phasen eines Kondratjeff-Zyklus

Phase die Zukunft besonders schwer vorherzusagen. Denn es können aus ganz kleinen Ansätzen, aus einer irgendwo, z.B. in einer kleinen Firma auftauchenden Erfindung, die zunächst kaum jemandem bekannt wird, Wirkungen hervorgehen, die dann die Zukunft in einer Art und Weise prägen, die wir uns heute gar nicht vorstellen können. In dieser Phase ist es wichtig, sich die Urteilsfähigkeit anzueignen, um die richtigen Dinge auszuwählen. «To choose the right things». Es geht dabei darum, möglichst früh das Potential der neuen Erfindungen und neuen Technologien zu erkennen, um für die Zukunft und ihre Anforderungen gewappnet zu sein.

Methoden der Zukunftsforschung

Propheten und Auguren

Früher und heute wurden und werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt, um die Zukunft vorherzusehen oder zu erforschen. Waren es im Altertum die Propheten, die aus einer geistigen Schau heraus versucht haben, Bilder der Zukunft zu entwerfen, so waren es später die Auguren, die Zeichendeuter, die immerhin schon den Versuch machten, aus konkreten Anzeichen, die sie erkannt hatten, die Zukunft vorherzusagen. Diese Methode wurde sozusagen wissenschaftlich weitergeführt bis zur heutigen Trendanalyse, die an das Heute ein Lineal anlegt, um das Morgen vorherzubestimmen.

Trend-Extrapolation

Die Trend-Extrapolation ist ein Verfahren, das immer noch sehr in Mode ist. Aber ein Beispiel verdeutlicht ihre Probleme: Ein Herr in Berlin hatte aufgrund der Ist-Werte 1850 errechnet, dass der Pferdemist in Berlin 1950 einen Meter hoch liegen müsste. Trends können also zuweilen zu ganz falschen Erwartungen führen, wenn wichtige neue Entwicklungen übersehen werden, die das Vorhersage-Gebiet beeinflussen.

Cross-Impact-Analyse

In Verfeinerung der Methoden der Trend-Extrapolation wurde z.B. die sogenannte Cross-Impact-Analyse entwikkelt. Dabei lässt man unterschiedliche Trends aufeinander einwirken und vergleicht die dabei erhaltenen Ergebnisse. Diese Verfahren werden häufig schon unter Einsatz von Computern durchgeführt. Die moderne Technologie mit ihren vielseitigen gegenseitigen Einflussfaktoren und ihren vielseitigen Auswirkungen ist ein Beispiel, wie komplex solche Cross-Impact-Analysen werden müssen. Ihre Aussagekraft ist beschränkt.

Delphi-Methoden

Bei der Delphi-Methode werden Experten auf einem bestimmten Gebiet zu ihrer Meinung befragt. Diese Meinungen werden gesammelt und anderen Experten zur Kenntnis gegeben. Im Wechselspiel dieser Meinungen, die nun vielfach hin und her zirkulieren, bildet sich langsam ein festes, stabiles Bild der Zukunft heraus. Diesen Methoden wird häufig entgegengehalten, dass sie dadurch, dass sie viele Experten nach und nach von einer bestimmten Meinung überzeugen, eigentlich zu den sogenannten «self-fulfilling prophecies», d.h. den sich selbst erfüllenden Vorhersagen führen müssten.

Szenario-Technik

Wir erkennen heute, dass Zukunft nicht, wie früher angenommen, prinzipiell berechenbar ist. Offensichtlich können wir den jetzigen Zustand nie vollständig genau erfassen.

Dies gilt besonders in jener Phase des Kondratieff-Zyklus, in der wir uns heute befinden, also etwa zwischen den Phasen 3 und 4, denn hier sind die Unsicherheiten ja besonders gross, so dass eine Umsetzung in die Zukunft relativ risikobehaftet erscheint. Der jetzt beginnende, neue Kondratieff-Zyklus muss ja ungefähr bis zum Jahre 2020 reichen. Wenn überhaupt, so haben Zukunftsschätzungen also allerhöchstens bis zu diesem Zeitpunkt einen Sinn. Wenn wir uns ein solches Szenarium und seine Entwicklung anschauen, so erkennen wir, dass eine Vielzahl sich gegenseitig widerstreitender Einflüsse zu seiner Bildung beitragen. Selten können wir sicher sein, alle Einflussfaktoren richtig erkannt und bewertet zu haben.

Das ganze hat also grosse Ähnlichkeit mit einer Wettervorhersage. Bei der Wettervorhersage ermöglicht die Kenntnis einer grossen Zahl von luftmeteorologischer Daten gerade eben die Vorhersage des Wetters für einen Tag oder für 2 Tage. Nicht einmal dies funktioniert immer gut. Theoretisch unmöglich ist es aber, etwa das Wetter für ein ganzes Jahr oder auch nur für 3 Monate vorherzusagen. Obwohl also alle einzelnen physikalischen Gesetzmässigkeiten des Wettergeschehens bekannt sind und die Erfassung der Messdaten ausreichend dicht erfolgen könnte, ist es nicht möglich, über einen langen Zeitraum das Wetter exakt vorherzusagen.

Wissenschaftlich wird eine solche Erscheinung mit dem Begriff des «deterministischen Chaos» bezeichnet, ein Begriff, der aus dem Wissenschaftsbereich der Synergetik stammt. Der Verlauf der Zukunft wäre genau unter demselben Begriff zu charakterisieren. Dabei sind wir demnach weit entfernt von der Idee der Descartschen Weltmaschine, denn dabei wären ja alle Zustände in der Zukunft aus dem bekannten Anfangszustand in vollständig determinierter Weise zu berechnen.

Die Synergetik entwirft heute ein neues Bild der Zukunft: Das komplexe, sich vernetzt entwickelnde Geschehen wird prinzipiell nicht voraus berechenbar. Winzige Fehler in den Anfangswerten verstärken sich zu 100 Prozent falschen Aussagen am Ende. Eine Halbierung der Anfangsfehler wirkt sich auf den Fehler des Resultates nicht aus.

Für solche Abläufe sind Szenarien eine adäquate Behandlungsweise. Szenarien sind quasi «Bühnenbilder der Zukunft». Da man diese aber nicht berechnen kann, entwirft man eine Reihe (mindestens zwei) stark unterschiedlicher «Möglichkeitsgemälde».

Der Versuch sei nun unternommen, ein solches Rahmenszenarium der Zukunft darzustellen mit seinen Bedingungen, seinen Möglichkeiten, aber auch seinen Grenzen. Es ist also eher im Sinne des Aufzeigens eines Freiraums aufzufassen, in den hinein sich die Zukunft entwickeln kann. Dieser Freiraum muss aber erobert werden mit Ideen, mit Konzepten und mit Entscheidungen, die es ermöglichen, diese Zukunft im gewünschten Sinne zu gestalten.

Allgemeine Entwicklungen

Die Zukunftsforschung geht von allgemeinen Entwicklungen aus, die alle Wissensbereiche betreffen.

Wissensmenge

Ein Kennzeichen der Zukunft ist ganz sicher, dass die Menge des Wissens weiterhin enorm zunehmen wird. Wird das heutige Wissen durch einen Kreis dargestellt, so arbeiten die einzelnen Wissenschaften nach aussen fortschreitend ins Neuland hinein (Bild 3). Die Vorstellung, dies geschehe wie bei Schrebergärten, ist von der Wirklichkeit oft nicht weit entfernt. Jeder achtet darauf, dass sein Zaun von den Kollegen nicht überschritten wird und dass jeder schön in seinem Gärtchen bleibt. Als Spezialist oder Fachmann gräbt er eingegrenzt nach den noch ungeborgenen Schätzen der Wissenschaft.

Virtuelle Unendlichkeit des Neuen

Das Bild zeigt aber noch etwas mehr. Die Peripherie, die Umfangslinie wird immer länger, d.h., die Menge dessen, was als erforschenswert erkennbar ist, wird immer grösser. Man spricht von der «virtuellen Unendlichkeit» des

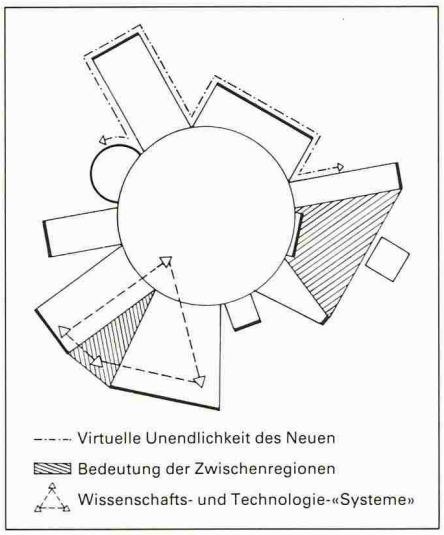

Bild 3. Vermehrung des Wissensumfangs

neuen Wissens. Dies kommt auch im Buch «The Encyclopedia of Ignorance» zum Ausdruck, das beschreibt, was wir alles noch nicht wissen und zeigt, dass die Menge des Wissens, dessen Fehlen uns bewusst wird, offensichtlich immer noch zunimmt [3].

Wissensdisziplinen klaffen auseinander

Weiter sehen wir in diesem Bild, dass die Zwischenregionen zwischen den etablierten Wissenschaften immer grösser werden. Sie klaffen immer mehr auseinander. Dieses Problem ist bekannt. Die Wissenschaftler verstehen sich nicht mehr. Der Biologe versteht den Linguisten nicht, der Musiker nicht den Naturwissenschaftler. Früher war das einmal ganz anders. An Lichtenberg in München darf erinnert werden, oder an Leonardo da Vinci und viele andere, die noch eine gewisse Einheit der Wissenschaften und Künste symbolisieren.

Diese Zwischenregionen werden in Zukunft sehr bedeutend werden, sie werden zu den eigentlich fruchtbaren Arbeitsgebieten, in denen neue Ergebnisse noch zu finden sind.

Wissenschafts- und Technologie-Systeme

Es wird auch nicht mehr möglich sein, bei der Menge des Wissens, alles oder auch nur einen einzelnen Bereich voll zu beherrschen und im Detail zu durchschauen. Man wird darauf angewiesen sein, sogenannte «Technologie-Systeme» und «Wissens-Verbund-Systeme», also Netzwerke mit Wissensstützpunkten, zu erarbeiten. Das Technology-Engineering wird zum Arbeitsfeld neuer Berufe wie z. B. des «Wissens-Ingenieurs». Ähnlich wie in den Ingenieur-Wissenschaften, wo Systeme aus Komponenten zusammengesetzt werden, baut man hier Technologiesysteme aus Technologiekomponenten zusammen.

Wissens-Umsetzung in Anwendungen

Ein weiteres Kennzeichen der Zukunft ist, dass sich das Wissen immer rascher umsetzt. Gemeint ist die Umsetzung von den Grundlagen-Wissenschaften in die Technologie und dann in die Anwendungen. Bei der Dampfmaschine hat das Ganze (von der Erfindung bis zur Anwendung als Dampflok) 70 Jahre gedauert. Bei der Laserstrahlung betrug der Zeitraum von der Erfindung bis zur Produktanwendung kaum 10 Jahre. Die Grundlagenwissenschaften setzen also immer rascher ihre neuen Ideen in Konzepte und neue Technologien um, bis in die Anwendung. Bei Rechnern und Mikroprozessoren geht dies heute ganz rasch.

Wissens-Entwertung

Bei der Mikroelektronik und Optronik muss man davon ausgehen, dass etwa alle drei Jahre die Hälfte des Anwendungswissens veraltet ist und durch neues Wissen ersetzt werden muss. In der Materialtechnologie liegen entsprechende Halbwertzeiten des Wissensverfalls bei sechs Jahren, in Maschinenbau und Mechanik bei zehn Jahren. Diese Fristen zeigen sinkende Tendenz.

Halbwertzeiten, in welchen Anwendungswissen, das man sich früher angeeignet hat, zur Hälfte veraltet ist, so dass es durch neues Wissen ersetzt werden muss, sind ein Mass zur Beurteilung der stetigen Wissensentwertung, die von allen zunehmend hohe Lernfähigkeit und Flexibilität fordert.

Entwicklung der Grundlagenwissenschaften und der Technologien

In Tabelle 2 ist für einige Grundlagengebiete wie die Physik und Chemie, die Biologie und die Kybernetik die erkennbare Tendenz bis etwa zum Jahre 2020 zusammengestellt. Auch hier wird die Vernetzung, die Bedeutung der Zwischengebiete der etablierten Wissenschaften wesentlich zunehmen. Bio-Physik, Bio-Chemie, Bio-Kybernetik; Linguistik-Informatik, Medizin-Informatik sind Beispiele solcher Zwischengebiete, Synergetik und Bionik für neue Wissensgebiete.

Biologie

Die wichtigsten Arbeitsgebiete in der Biologie der heutigen Zeit und der nahen Zukunft werden die Genetik und die Erforschung des Evolutionsprinzips sein. Aus den Ergebnissen der Genetik wird ein Arbeitsbereich hervorgehen, der heute schon vielfach als Biotechnik beschrieben wird.

Biotechnik

Die Biotechnik ist der Menschheit seit langem bekannt (Bierbrauen, Herstellung von Alkohol und Wein, Brotbakken). Dabei benützt der Mensch in der Natur vorkommende, von ihm dann später auch gezüchtete Kleinlebewesen. Mit Hilfe der Genetik wird es ihm aber möglich sein, ganz bestimmte Kleinlebewesen für besondere Aufgaben zu züchten bzw. mikrobiologische Prozesse in vorher gewünschter Weise ablaufen zu lassen. Die Herstellung von Impfstoffen und Arzneimitteln wird sich auf diese Weise in den kommenden Jahrzehnten grundlegend verändern. Aber auch in vielen anderen Lebensbereichen wird die Biotechnik eine wichtige Rolle spielen. So ist z.B. abzusehen, dass zur Aufbereitung von Abfallstoffen bzw. zum Abbau von Schadstoffen bestimmte Bakteriengruppen eingesetzt werden können. Bakterien könnten auch bei der Nutzung von Mineralien, etwa bei der Umwandlung von Kohle in Erdgas, eine wichtige Rolle spielen.

Biosensoren

Die Prozesskybernetik wird es ermöglichen, den Ablauf von komplexen biologischen Vorgängen - das sogenannte Systemgeschehen im Organ z.B. - besser als bisher zu verstehen und solches Wissen auch für technische Prozesse zu nutzen. Dieses Wissen wird auch für informationsverarbeitende Prozesse, durch sogenannte Biosensoren eingesetzt werden können, die in der Technik zunehmend an Bedeutung gewinnen. Meistens handelt es sich dabei nicht um einzelne und in ihrer Wirkungsweise hochgezüchtete Sensoren, sondern um eine Kombination mehrerer, in ihrer Art an das zu messende Signal in besonderer Weise angepasster Sensoren.

Nicht-Gleichgewichtssysteme

Aber noch andere Bereiche werden in der Biologie zukünftig bedeutsam sein. Bekannt ist, mit welchem Eifer die Biologen vor hundert Jahren versucht haben, das Gestaltphänomen zu erklären, indem man durch Sammlung einer Vielzahl biologischer Einzellebewesen und ihre Gliederung nach Gattungen und Arten diesem Prinzip der Gestalt näher kam. Nach der Klärung wesentlicher genetischer und evolutionstheoretischer Grundlagen wird sich dieses Phänomen neu und interessant stellen. Immer mehr wird dabei erkannt, dass die Biologie, anders als die klassischen thermodynamischen Probleme der Physik, mit Nicht-Gleichgewichtssyste-

men zusammenhängt. Nicht-Gleichgewichtssysteme werden daher in diesem Bereich ein bedeutender Forschungszweig werden. Speziell die Kybernetik von Nicht-Gleichgewichtssystemen, wie sie uns auch bei neurologischen Prozessen entgegentritt, wird eine Reihe neuer Denkansätze erfordern. Es kann darüber gerätselt werden, ob es dem Menschen je gelingen wird, sein eigenes Gehirn zu verstehen, aber auf jeden Fall wird dies immer eine sehr herausfordernde Aufgabe und Zielsetzung bleiben.

Die zukünftige Entwicklung der wichtigsten Grundlagenwissenschaften

	Physik	*Biologie*	*Kybernetik*
Heute	Bild der Materie: Vier Grundwechselwirkungen	Genetik	Bildverarbeitung
		Mikrobiologie	Bildsegmentierung
	Elementarteilchen: Quarks	Prozess-Kybernetik	Optical Processing
	Einheitliche Feldtheorie	Bio-Sensorprinzipien	Parallelverarbeitung
	Neuer Ansatz: Gravitation Kosmologie Zeitabhängigkeit der Fundamental-Konstanten	Evolutionsmechanismen	Komplexe Netzwerke und Systeme
	Weltformel		
	Vielteilchenphänomene	Gestaltkybernetik	Mustergenerierung
1900	Synergetik-«Weltformel»	Nichtgleichgewicht-Systeme	Selbststeuernde Prozesse
	Festkörper-	Biokybernetik	
2000	Berechenbarkeit von Materialeigenschaften und Reaktionen	Neurologische Prozesse verstehen	Stochastische Informationsverarbeitung
	Neue optronische thermische Effekte		
	Neue Sensor-Speicherprinzipien	Das Gehirn verstehen	Neue Rechner

Tabelle 2. Die zukünftige Entwicklung der wichtigsten Grundlagenwissenschaften

Kybernetik

Wichtige Ansätze für Veränderungen in unserer Zukunft werden auch aus der Kybernetik kommen. Die heute dort interessanten und schwerpunktmässig bearbeiteten Bereiche wie die Bildverarbeitung und die Mustererkennung werden sicher weiter ausgebaut. Hinzu kommt, dass neue Rechnerprinzipien untersucht werden, welche die Parallelverarbeitung grosser Informationsmengen ermöglichen. Dabei ist es notwendig, dass der sogenannte Steuerrechner, der die Aufteilung der Aufgaben auf die einzelnen Parallelrechner lenkt, vorangetrieben und in Zukunft automatisiert werden kann. Auch hier besteht eine hohe Parallelität und Überschneidung mit Nachbarbereichen, insbesondere auch mit der vorher besprochenen Biologie. Es wird also mit der Kybernetik die Biokybernetik eine wichtige Rolle spielen. Man wird selbststeuernde Prozesse untersuchen und auch in lebenden Systemen Nicht-Gleichgewichtssysteme kybernetisch betrachten.

Neue Arten von informationsverarbeitenden Systemen

Ziel ist es dabei, neue Arten von informationsverarbeitenden Systemen zu verstehen und eventuell auch für die Technik nutzbar zu machen. Ein neues Verständnis für die Begriffe Chaos und Ordnung, Rauschen und Information und die zugehörigen Energieumsetzungen, d.h. eine gewisse Dualität zwischen Energie und Information, werden hierfür wichtig sein.

Universum der «Ordnungsmaschinen»

Alle Rechner, die heute im Einsatz sind, gehören zum Universum der sogenannten «von Neumann»-Computer. Dies sind algorithmische Maschinen, die ein Überhirn benötigen. Dieses Überhirn muss ihnen über eine formale Sprache gewisse Befehlsketten eingeben. Es muss auch an möglichen Entscheidungsstellen Kriterien angeben, nach denen an diesen Stellen vom Rechner dann automatisch Entscheidungen zu treffen sind. Es gibt nun Gedanken, neue Computer zu bauen, die einem anderen Universum angehören, dem Universum der sogenannten «Ordnungsmaschinen». Dies wären Rechner, die sich selbst verändern können, die sich selbst steuern können, die ihre interne Vernetzung dem jeweils zu lösenden Problem anpassen können. Es ist eine sehr interessante Frage, ob es jemals gelingen wird, solche Rechner herzustellen.

Bionik

Ein neues Wissenschaftsgebiet ist hier vorzustellen, dem für die Zukunft einige Bedeutung zuzumessen ist: Die Bionik - Lernen von den optimierten Systemen der Natur. Die Natur hatte Millionen Jahre Zeit, um ihre Systeme zu optimieren, d.h. sie in günstigster Weise an die zu lösenden Aufgaben und Bedingungen der Umwelt anzupassen.

Optimieren nach der Natur

Wir ahmen heute dieses Optimieren von Systemen nach. Wir versuchen, die Systeme der Natur, ihre Strukturen, Formen, Verfahren und Prozesse zu verstehen, und wir versuchen, technische Prozesse in ähnlicher Weise zu regeln. Das Denken in biologischen Optimierungsverfahren würde uns sehr viele Fehler und Unzulänglichkeiten heutiger technischer Lösungen ersparen.

Beispiele von Optimierungs-Potentialen

Strukturen und Erfahrungen aus der Natur direkt in technische Strukturen und Konstruktionsweisen übertragen. Wenn etwa der Flug einer Möwe mit dem eines Flugzeuges verglichen wird, so fällt die vergleichsweise starre Struktur des Flugzeuges auf. Diese ist technisch notwendig. Sie hat aber gegenüber der «weichen» Struktur der Möwe erhebliche Nachteile. So muss z.B. die Struktur des Flugzeuges auf die maximal mögliche Belastung in der Start- oder Landephase bzw. für maximal vorkommende Windböen ausgelegt werden. Dadurch sind bestimmte Materialquerschnitte, Wandstärken usw. erforderlich. Da solche extremen Bedingungen nur sehr selten vorkommen, wird also in der Regel ein viel zu grosser Ballast mitgeführt. Vögeln hingegen gelingt es, die kurzzeitigen höheren Beanspruchungen in bestimmten Fluglagen durch entsprechende Veränderungen, z.B. durch Abspreizen oder Ausbeulen von Federn, durch veränderte Körperhaltung, durch veränderte Haltung der Flügel auszugleichen. In begrenzter Weise wird in der Technik versucht, diese Lösungen durch Anbringen von Landeklappen oder ausfahrbare Vorflügel nachzuahmen. Dies könnte jedoch noch viel weiter getrieben werden. Wenn es auch bei Flugzeugen gelingt, z.B. durch die Messung der vorhandenen Turbulenz oder Strömungsunterschiede bestimmte Flügelteile kurzzeitig auszufahren oder einzuziehen und damit die Fluglage augenblicklich in der richtigen Weise zu regeln, so würde dadurch die Masse eines Flugzeuges er-

heblich vermindert und das Nutzgewicht bei gleicher Motorleistung vergrössert. Dieses Beispiel zeigt, wie durch direkte Nachahmung von Elementen und Strukturen aus der Natur technische Lösungen verbessert werden können. Aus dem täglichen Leben oder aus technischen Bereichen könnten eine Vielzahl gleichartiger Beispiele genannt werden.

Regler mit Selbstanpassung an wechselnde Parameter. Das zweite Beispiel stellt eine Lösung dar, die über das hinausgeht, was direkt aus der Natur ablesbar ist. Von der Regelaufgabe, ein Flugzeug in der Start-, Flug- oder Landephase, also bei immer unterschiedlichen Bedingungen, auch unterschiedlichen Umweltbedingungen, in gleicher Weise zu steuern und zu lenken, wurde schon im vorigen Beispiel gesprochen. In technischen Systemen sind dazu Regler eingesetzt, welche die Umweltparameter messen und die einzelnen Teilsysteme eines Flugzeuges, also die Lenkanlage, die Klappen, die Vorflügel, die Ruder usw., in entsprechender Weise beeinflussen können. Natürlich können solche Regler nur für eine «durchschnittliche» Situation optimiert werden. Es können auch nicht alle beliebig möglichen Kombinationen der unterschiedlichen Parameter vorher durchgespielt und für den Einzelfall optimiert überlegt werden. Ein solcher Regler hat also quasi ein starres Verhalten, ein festes Verhaltensmuster, wie es manchmal auch an Menschen, die nicht mehr aus ihren eingefahrenen Denkweisen herauskommen, beobachtet werden kann. Vom Prinzip der biologischen Evolution her sind Regler vorstellbar, die während ihres Einsatzes sich selbständig in optimaler Weise dem zu regelnden Problem anpassen, sich in ihrem Regelverhalten also permanent verändern. Ein solcher Regler müsste naturgemäss eine sehr kurze «Generationsfolge» haben. Könnte man beispielsweise eine Generationsdauer von 1 Millisekunde erreichen, dann würden 100 Generationen etwa eine Zehntelsekunde dauern. In dieser Zeit könnte sich also ein Regler auf das zu regelnde Parametersystem optimal einstellen. Ein solcher Regler wäre also anders als die heute eingesetzten Systeme in der Lage, sich bei jeder Kombination von Parametern in günstigster Weise der Regelaufgabe anzupassen.

Ausnützen unterschiedlicher Sensorkanäle. Noch eindrucksvoller, wenngleich technisch schwieriger zu realisieren, ist ein Beispiel zur Nachahmung des Orientierungsvermögens von Vögeln. Im Frühjahr kommen die Stare aus Südfrankreich über Entfernungen von mehr als 1000 km und finden ihr Flugloch im Starenkobel mit einer Präzision von weniger als 1 cm. Wie erreicht ein Star diese Präszision? Zugvögel nützen, technisch gesprochen, unterschiedliche Sensorkanäle, die sich gegenseitig ergänzen und stützen. Das Magnetfeld der Erde wird von Zugvögeln sensiert, aber auch der Geruch der Landschaft dient zur Orientierung, ferner auch die Anordnung der Sterne in der Nacht und der Sonnenstand am Tage. In der Endphase des Fluges wird die sehr moderne Methode der Bildkorrelation eingesetzt. Wenn nun beispielsweise durch Nebel oder durch Wolken, in denen sich der Zugvogel bewegt, einige dieser Sensorsignale ausfallen, so kann er mit Hilfe der anderen seinen Weg immer noch mit ausreichender Sicherheit finden. Sind nach einer gewissen Flugstrecke Wolken oder Nebel verschwunden, so hilft die optische Navigation oder die Bildkorrelation wieder auf den richtigen Flugweg zurück. Diese geschickte Kombination mehrerer Sensoren, die in ihren einzelnen Eigenschaften gar nicht extrem hoch ausgebildet sein müssen, ist also etwas, das wir aus der Natur, aus der Biologie lernen können.

Elementare Ressourcen auswerten. Das letzte Beispiel betrifft das Sehvermögen und die daraus resultierenden Fähigkeiten der Stubenfliege. Eine Fliege kann Objekte, die sich nicht bewegen, überhaupt nicht sehen. Jeder, der schon einmal versucht hat, eine Fliege zu fangen weiss jedoch, wie hervorragend Fliegen in der Lage sind, ein herannahendes Objekt, wie etwa die Hand dessen, der sie fangen will, zu erkennen und ihr auszuweichen. Durch experimentelle Untersuchungen von Professor Reichard und durch viele theoretische Überlegungen und kybernetische Nachahmungen weiss man heute, wie das hochkompliziert gebaute Fliegenauge diese Aufgabe löst. Allein durch die Verarbeitung der bewegten Szene, die die Fliege über ihrem Auge wahrnimmt, kann sie sämtliche Parameter ihrer Fluglage und ihre Flugrichtung bestimmen. Wenn ein Insekt ein anderes Insekt verfolgt, ergeben sich aufgrund der Verarbeitung dieser Informationen komplizierte Flugbahnen. Und dieses Fliegenauge, dem die Fliege diese Fähigkeiten verdankt, entsteht alljährlich zu Millionen und Milliarden auf Abfallhaufen und im feuchten Wiesengrund. Zudem noch aus ganz einfachen Stoffen: aus Kohlenstoff, Wasserstoff und anderen Elementen, die billig und preiswert in der Natur überall vorhanden sind. Wir sind weit davon entfernt, das Fliegenauge in irgendeiner Weise technisch realisieren zu können. Aber selbst für die teilweise Nachahmung seiner Fähigkeiten benötigen wir teure und mit grossem Aufwand herzustellende Stoffe wie z.B. hochreines Silizium, Galliumarsenid oder gar Quecksilber-Cadmium-Tellurit. – Die Natur ist uns in vielen Lösungen noch sehr, sehr weit voraus.

Synergetik

Die Synergetik bedeutet die Lehre vom Zusammenwirken. Sie behandelt Systeme, bei welchen eine Vielzahl von gleichartigen Teilen oder Teilsystemen verkoppelt sind. Die wesentlichen Grundideen zu dieser Wissenschaft stammen von Prigogine [4], der hierfür auch den Nobelpreis bekommen hat, sowie von Professor Haken in Stuttgart [5].

Beschreibung von Ordnungsstrukturen

Zunächst ist zu fragen, ob die oben erwähnte einfache Voraussetzung schon als Grundlage eines Wissenschaftsgebietes ausreichen kann. Andererseits bedingen einfache und wenige Voraussetzungen natürlich eine fundamentelle Bedeutung eines solchen Gebietes und eine breite Anwendbarkeit. Die in der Synergetik verwendeten Begriffe deuten auf ein fundamentales Gebiet, denn es kommen Worte und Beziehungen vor, die einen an das erste Buch Mose erinnern. Die Synergetik behandelt nämlich die Bildung von Strukturen und Ordnungszuständen aus dem Chaos, die Übergänge zwischen einzelnen Strukturen, die wir heute nach den Methoden der Katastrophentheorie zu erklären versuchen, sowie den Verfall von Strukturen zum Chaos. Die Synergetik macht es zum erstenmal möglich, das Chaos auch qualitativ zu beschreiben und sozusagen mehrere Arten von Chaotizität zu unterscheiden. Es gibt auch neue Möglichkeiten, Ordnungsstrukturen zu beschreiben. Unterschiedliche Qualitäten von Ordnung und unterschiedliche Quantität von Ordnung sind mathematisch darstellbar, und es ist der Versuch abzusehen, auch die Informationen nach Qualitätsmerkmalen zu unterscheiden.

Qualität von Informationen

In der technischen Datenverarbeitung wird normalerweise Information nach Menge und nach Menge pro Zeiteinheit, also Informationsrate, unterschieden und nach diesen Kategorien auch berechnet. Es gibt jedoch noch kein sinnvolles Mass für die Qualität von Informationen und auch kein sinnvolles Mass für die Qualität von Informationsverarbeitung. Damit würde auch ein neues Verständnis des Begriffes der Intelligenz möglich, nicht nur der Intelligenz von Menschen, auch der Intelligenz in der Natur. Damit sind wir schon bei den möglichen Anwendungen der Synergetik, die insgesamt noch

in den Anfängen stecken. Zurzeit arbeiten etwa 60 Gruppen in der Welt daran, die Synergetik als Wissenschaft aufzubauen und Anwendungen für sie zu erarbeiten.

Physikalische Probleme

Viele festkörperphysikalische Probleme, z.B. die stimulierte Emission von Strahlung, besser unter dem Akronym Laser bekannt, bieten sich für eine synergetische Behandlung geradezu an. Denn hier hat man ja gerade die von der Synergetik geforderte Kopplung einer Vielzahl gleichartiger Systeme vorliegen. Darüber hinaus ist der ganze Bereich der Akustik und Aerodynamik sowie der Hydrodynamik für die Synergetik sicher noch sehr fruchtbar zu bearbeiten. Auch der Ablauf chemischer Reaktionen sowie die Formbildung in der Biologie, insbesondere bei selbstregulierenden Prozessen, scheinen vielversprechende Anwendungsgebiete zu sein.

Deterministisches Chaos

Häufig ergeben sich als mathematische Lösungen der synergetischen Betrachtungsweise nichtperiodische Schwankungsprozesse, z.B. in der Aerodynamik die Bildung und Ablösung von Wirbelstrukturen, genauso wie in der Hydrodynamik. Dabei ist es nicht möglich, über lange Zeit hinweg ein geschlossenes Entwicklungsbild deterministisch zu berechnen. Man kann jedoch aus ganz schwachen und kleinen Anzeichen die Entwicklung eines einzelnen Wirbels vorherbestimmen und seinen Ablauf beschreiben.

Diese Eigenschaft kann man mit dem janusköpfigen Begriff des deterministischen Chaos bezeichnen, d.h. vorherrechenbar in kleinen Schritten, über kleine Längen, aber nicht im grossen Stil. Genau von dieser Qualität ist auch die Zukunft, was ihre Vorhersage gerade in der heutigen Phase des Umbruches, der Instabilität so schwierig macht. Auch Kondratieff-Zyklen sind also etwas ähnliches wie ein aerodynamischer Wirbel und die Wirtschaftsprozesse, die in einem solchen Kondratieff-Zyklus ablaufen, zeigen eben dieses periodische Schwankungsverhalten, diesen Strukturwandel, der auch in solchen Wirbeln auftritt.

Wirtschaftsprozesse

Wendet man die Synergetik auf Wirtschaftsprozesse an, so kann man etwa die vielen Firmen in der Welt oder Firmenverbände als Einzelsysteme darstellen. Die Verkoppelung dieser Einzelsysteme erfolgt über die Mechanismen der Waren- und Kapitalmärkte sowie über den Austausch von Informationen. So sind Information und Wissen über neue Technologien und die Ausbreitung dieses Wissens durch technische oder elektronische Publikationen ein entscheidender Faktor, der den Fortgang der Kondratieff-Zyklen beeinflussen wird. Einige Fachleute sind daher der Meinung, dass durch die stürmische Entwicklung der Kommunikationstechnologie in der Zukunft die Kondratieff-Zyklen verkürzt werden könnten. Die Hoffnung besteht, dass dabei auch die Amplituden, d.h. die Unterschiede zwischen den Maxima und dem Minima des Zyklus kleiner werden und dadurch die Wirtschaft sich insgesamt weltweit stabilisieren könnte. Dieses Beispiel ist durchaus geeignet, die Bedeutung der Synergetik zu verdeutlichen.

	Informations-Technologie	*Mikro-Verfahren-Technologie*	*Material-Taloring*	*Bio-Technologie*	*Energie-Technologie*
Heute	CAD/CAM Büro-automation	Erhöhung von Verarbeitungs-geschwindigkeit, Packungs-dichte, Zuverlässigkeit	Verbesserte Werkstoff-Eigenschaften	Herstellung von Arzneimitteln Produktion organischer Rohstoffe	Energie-Spar-Technologien
	Telecom	Preis-reduktion	Werkstoffe mit neuen Eigenschaften		
	Nachrichten-technik	Multi-Layer	«Ersatz»	Nachahmung biolog. Prozesse und Strukturen	
	Komplexe Signalverarbeitung von Sensoren		«Künstliche» Organismen und Lebewesen		Gas-Netzen
	Programmierbare Schaltungen Roboter		Neuartige intelligente Sensoren «Sehen» «Hören» «Riechen» «Tasten» usw.		Gaserzeugung aus Sonnenenergie und Kohle
	Neue Rechner-Strukturen	3-D-Strukturen	Multifunktions-Werkstoffe		Solarenergienutzung
	Stochastische Rechentechnik?	Optische und optronische ICs «Photonics»		Klärung von informationsverarbeitenden biologischen Strukturen und Verfahren	Fusion??
	Rechner der «5.» Generation			Gehirnfunktionsnachahmung	Energie aus Elementarteilchenprozessen?
20XX?	Künstliche Intelligenz				

Tabelle 3. Die zukünftige Entwicklung der wichtigsten Technologien

Soziologie

Andere Beispiele des Einsatzes der Synergetik wären Probleme in soziologischen Gruppen, etwa in einer Firma, in einer Schule oder einem Ministerium; auch hier sind ja viele Einzelelemente, in diesem Fall Menschen, miteinander durch bestimmte Regeln und Beziehungen verkoppelt. Vielleicht ist es mit Hilfe der Synergetik möglich, für solche Organisationen adäquate Ordnungsstrukturen und Formen zu finden. Sie wären in einem gewissen Sinne «natürlicher» und daher womöglich reibungsfreier und zum Wohle aller besser strukturiert, wodurch die Zusammenarbeit gefördert würde.

Die Technologie-Gebiete

In Tabelle 3 wird versucht, die verschiedenen Technologiegebiete – also nicht die Grundlagenwissenschaften, sondern die Anwendungs- und Ingenieurwissenschaften – und ihre Beziehungen

untereinander aufzuzeigen. Kennzeichnend sind auch hier die immer zunehmende Komplexität, Vernetzung und gegenseitige Abhängigkeit der Teildisziplinen.

Wesentliche Wachstumsgebiete sind: Die Informationstechnologie, Mikroverfahrenstechnologie, Materialtechnologie, die Biotechnologie, die Gen-Technologie sowie die Kommunikationsbereiche.

Technologie-Systeme

Die Trends, viele Wissenschaftsgebiete zusammenzufassen, um zu Technologie-Systemen zu kommen, werden mit der Zusammenstellung einiger Sachdisziplinen erläutert (Kybernetik, Informatik, Festkörperphysik, Halbleitertechnologie, Quanten-Optik, Optronik, messtechnische Analytik, Mikroverfahrens-Technologie und, in der Zukunft, Biologie, Bionik, Synergetik, Systemarchitektur), die z.B. zur Schaffung des neuen Schlagwortbereiches «künstliche Intelligenz» wechselseitig zusammenwirken, aber durch diese Entwicklung selber auch beeinflusst werden.

Material Tayloring

Faszinierend ist der Ausblick auf das Fachgebiet des Material Tayloring, d.h. Zuschneidern von Material, Erzeugung von vorausbestimmbaren Stoffeigenschaften. Die Tendenz ist hier, jedem einzelnen Atom seinen Platz zuzuweisen. Die Chemie ist heute so weit, in bestimmten Fällen, etwa bei Umweltgiften, ein Giftmolekül auf ein Mol Untersuchungssubstanz zu finden, d.h. eine sehr grosse Genauigkeit zu erreichen. Bei der Herstellung von Material versucht man es ebenso zu machen, d.h. bis auf 1 Atom pro Mol genau zu werden. Da gibt es heute schon Kristalle, die auf eine Länge von einigen Zentimetern keinen einzigen Wachstumsfehler aufweisen, keine einzige Fehlstelle, kein einziges falsches Atom! Anwendungen werden sein: der Ersatz von knappen oder teuren oder giftigen Stoffen. Zum Beispiel wird es Keramik und Gläser oder Faserverbundwerkstoffe geben anstelle von teuren und schweren Baustoffen. Stahl, Titan, Chrom werden ersetzt, oder die elektrischen Leitungen, die heute aus Kupfer sind, könnten eines Tages aus Polyacryl, einem Kunststoff, hergestellt werden, sehr viel leichter, sehr viel flexibler als heute. Es wird auch ganz neue Materialien mit neuen Eigenschaften geben. Neue Halbleiter, sogenannte Supergitter oder Schichtverbindungen, und vor allem optische Mikrowerkstoffe.

Ähnlich wie in der Mikroelektronik wird sich in Zukunft eine Serie mikrooptischer, integrierter Bausteine entwickeln. Wesentliche neue Trends auf dem Gebiet der Parallelverarbeitung von Bilddaten werden sich nur mit optischen Rechnern verwirklichen lassen. Ohne das Material-Tailoring und den damit möglichen exakten und gesteuerten Aufbau von dreidimensionalen Strukturen wären die Sensoren und Datenverarbeitungsanlagen, was wir ja vor allem als «intelligente» Technologie bezeichnen können, nicht möglich.

Intelligente Technologien, künstliche Intelligenz

Definition

Intelligente Technologien umfassen Komponenten, Geräte, Systeme und Verfahren, bei welchen die maschinelle Verarbeitung von komplexen Informationen wesentlich für Funktion oder Wirkung ist. Die Komplexität der Information und die Qualität ihrer Verarbeitung sind dabei ein Mass für die «Intelligenz», die diesen Technologien und zum Teil auch ihren Erzeugnissen zugesprochen wird. Zur genauen Erläuterung fehlen Masse für Qualität oder Komplexität von Information.

Ebenso steht es mit dem Begriff der künstlichen Intelligenz, der wohl mit Absicht so «reisserisch» gewählt worden ist. Er ist unglücklich, da er bedrohlich wirkt. Er nährt die Angst des Menschen, dass ihn eine «Maschine» auf diesem Gebiet schlagen könnte. Deshalb wäre die Bezeichnung «Verhalten komplexer Informationssysteme» vorzuziehen.

Die Psychologie versucht immer wieder aufs neue, den Begriff der Intelligenz zu definieren. In einfachen Worten zusammengefasst, lautet die Erkenntnis: «Intelligenz ist, was sich mit Intelligenztests messen lässt.» Das ist etwas dünn, aber es zeigt auch, dass noch Massstäbe qualitativer und quantitativer Art fehlen, um Intelligenz wirklich zu verstehen. Es ist sinnvoll, den Begriff künstliche Intelligenz gegenüber der natürlichen Intelligenz abzugrenzen. Wenn Intelligenz etwas mit der Verarbeitung von Informationen und Informationsflüssen zu tun hat, so muss man auch vielen Bereichen der natürlichen Welt eine gewisse Intelligenz zuordnen. So ist etwa in der DNS-Doppelhelix im Zellkern Information gespeichert, die zum Aufbau der Proteine der Zelle benützt wird. Ein Atom, das ein Lichtsignal aussendet, kann nicht nur als energieabgebendes System, sondern auch als informationsabgebendes System interpretiert werden. Man kann im Prinzip alle energetisch ablaufenden Prozesse in der Natur auch unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung betrachten. Und ähnlich wie eine Dualität in der Physik zwischen dem Welt- und dem Teilchenbild der Elementarteilchen besteht, könnte man auch ein Dualitätsprinzip zwischen der Information und der Energie definieren.

Anwendungen der künstlichen Intelligenz

Zur Frage nach Anwendungsbereichen der künstlichen Intelligenz werden hier – ohne die Problematik der Definition zu vergessen – vier Gebiete behandelt: Expertensysteme, Mustererkennung, Robotics und Deduktionssysteme.

Expertensysteme. In Expertensystemen wird auf meistens schmal begrenzten Anwendungsgebieten das Wissen mehrerer menschlicher Experten zusammengefasst und in Form einer Datenbank inkl. Anwendungsregeln gespeichert. Die Daten können dann abgefragt werden, d.h. der Rechner kann in Frage- und Antwortspiel Probleme lösen, wie es ein menschlicher Experte auch tun würde. Entscheidend dabei ist, dass diese Expertensysteme so aufgebaut sind, dass man sie auch nach der Ursache fragen kann, aufgrund derer sie ihre Entscheidung in einer bestimmten Weise gefällt haben. So kann man Fehler dieser Systeme finden und sie überprüfen und ist ihnen nicht blind ausgeliefert. Solche Expertensysteme sind schon erfolgreich eingesetzt worden, z.B. für die Exploration von Erdöl oder von Erzlagerstätten, für die medizinische Diagnose von bestimmten Infektionskrankheiten, zur Reparatur von sehr komplizierten Elektroloks und seit einiger Zeit auch für die Konfiguration von Computern. Die bisherigen Anwendungsfälle haben gezeigt, dass solche Expertensysteme einem einzigen menschlichen Experten mindestens gleichwertig, in manchen Fällen sogar überlegen sind. Neuere Systeme können auch aus der hinzugewonnenen Erfahrung lernen und dieses Gelernte in ihren Erfahrungsschatz einbauen. Die Grenze der Fähigkeiten heutiger Expertensysteme und wahrscheinlich auch der zukünftigen liegt darin, dass sie die Regeln, nach denen sie entscheiden, nicht selbst verändern können. «Der Meister kann die Form zerbrechen, mit weiser Hand zur rechten Zeit», so heisst es bei Schiller, und das ist ja etwas bewusst menschliches, dass man aufgrund der Erfahrung, die man gemacht hat, die Regeln, die man in Zukunft anwenden will, wissentlich verändert. Das können diese Maschinen nicht.

Mustererkennung. Mustererkennende Systeme werden Sehen, Hören, Riechen, Tasten können, sie werden aber auch noch weitere physikalische Sinne benützen wie z.B. Sensoren für radioaktive Strahlung oder Ultraschall, also Be-

reiche, die unseren menschlichen Sinnesorganen verschlossen sind. Mustererkennung heisst aber auch, das Gesehene oder Gelesene zu «verstehen», verstehen in dem Sinn, dass dem aufgenommenen Muster bestimmte Symbole in immer gleicher Weise zugeordnet werden. Es erfolgt damit die Umkodierung in einen anderen Satz von Symbolen. Muster, die man erkennen oder interpretieren kann, können auch Verhaltensmuster sein. Und so gibt es einige Computerexperten, wie etwa den amerikanischen Psychologen Professor Simon [6], der glaubt, dass es gelingen wird, mit Hilfe von Mustererkennungsverfahren die menschliche Intelligenz besser zu verstehen und vielleicht sogar zu ergründen, wie man sie definieren kann. Auch für Mustererkennung gilt eine grundsätzliche Grenze. Kein Mustererkennungssystem, und sei es noch so komplex, wird sich je selbst analysieren können. Um ein System komplexer Zusammenhänge zu analysieren, d.h. zu verstehen, benötigt man ein System, welches noch komplexer ist. Natürlich trifft das auch auf uns Menschen zu. Auch wir werden wahrscheinlich mit unserem Verstand unser eigenes Gehirn nie ganz verstehen können.

Robotics. Robotics umfasst ein sehr weites Feld und ist nicht sehr genau gegen andere Bereiche abgrenzbar. Wir verstehen darunter ganz allgemein intelligente Maschinen, die in der Lage sind, eine Vielzahl von Aufgaben, zu deren Erledigung bisher Menschen eingesetzt waren, selbst zu übernehmen. Im Unterschied zu den bisherigen Automaten oder Fabrikationbsmaschinen ist bei den Robotics ein erheblicher Anteil von Informationsverarbeitung und «intelligenter» Entscheidung enthalten. Ein interessanter Ansatz zur Definition der Robotics geht aus vom Vergleich der Informationsflüsse zwischen Mensch, Maschine und Werkstück sowie zwischen Roboter und Werkstück. Ein Roboter würde dann vorliegen, wenn beide entsprechenden Informationsflüsse etwa gleich sind. Der Ehrlichkeit halber muss man sagen, dass es wahrscheinlich nicht reicht, die Informationsmengen zu messen, was heute sehr leicht geschehen kann, sondern dass es auch notwendig wäre, die Informationsqualität dabei zu erfassen. Wir sind damit auf einem sehr sensitiven Gebiet für uns Menschen, weil wir uns hier direkt mit einer Maschine vergleichen oder vergleichen lassen müssen.

Robotics werden zunächst in Bereichen eingesetzt, die für Menschen schwere Arbeitsbelastungen bedeuten, z.B. sich immer in gleicher Weise wiederholende Tätigkeiten, vor allem in lauter, gefährlicher oder insgesamt unangenehmer Arbeitsumgebung. Mit wachsender Intelligenzleistung dieser Maschinen wird dabei ihr Einsatz immer wirtschaftlicher werden. Nahm man z.B. zunächst an, dass Roboter in den Bereichen wirtschaftlich sind, in denen hohe Stückzahlen immer gleich hergestellt werden müssen, so zeichnen sich heute andere Tendenzen ab. Roboter werden immer anpassungsfähiger an die gestellte Aufgabe, d.h., es können solche Geräte auch für kleine Serien, kleinere Stückzahlen geeignet sein. Durch den Einsatz von Mustererkennungsverfahren oder gar den Einbau von Expertenwissen in Robotersysteme werden hier sicher Leistungen möglich sein, von denen wir uns heute kaum noch ein Bild machen können. Dennoch wird eine prinzipielle Grenze bleiben. Der Roboter wird nicht fähig sein, kreative Leistungen zu erbringen. Der Bereich der schöpferischen Phantasie wird also sehr lange noch ein Refugium des Menschen bleiben.

Deduktionssysteme. Deduktionssysteme ermöglichen es, von einer kleinen Zahl von Grundaxiomen ausgehend, logische Gebilde, wie wir sie auch z.B. in der Mathematik kennen, aufzubauen und darin durch deduktive Beweisführung neue Zusammenhänge zu finden. Mit solchen Systemen ist es beispielsweise gelungen, einige noch offene Probleme in der Zahlentheorie zu lösen.

Der vorher bereits erwähnte Computerexperte Simon aus den USA hat eine Maschine gebaut, die er GPS, «General Problem Solver», genannt hat [7]. Wie vieles aus dem Gebiet der künstlichen Intelligenz scheint auch dieser Begriff masslos überzogen, denn die Maschine hat bei weitem nicht das geleistet, was ihr Name vermuten lässt. Diese Maschine konnte nur auf einem engen, axiomatischen Feld bestimmte Probleme wirklich lösen. Ähnliche Systeme, wenn auch nicht mit so überzogenem Namen, werden in Heidelberg entwikkelt. Mit solchen Geräten könnte es auch gelingen, neue intelligente Systeme, also bessere Rechner als heute verfügbar, aufzubauen.

Solchen Maschinen kann man also die Fähigkeit zuschreiben, dass sie auf bekannten Grundtatsachen und Zusammenhängen aufbauend neue Systeme entwickeln, vielleicht sogar «erfinden» können, wenn dieses Erfinden im Sinne der «Kreativität zweiter Art», also der Kombination von Bekanntem, interpretiert wird. Die Grenzen solcher Systeme liegen darin, dass die Maschine, anders als der Mensch, nicht eigenes Interesse an neuen Aufgaben entwickeln kann. Sie wird im Gegenteil alle Ergebnisse, die sie aus ihren Schlüssen zieht, gleichermassen «interessiert» behandeln und auch keinen Antrieb entwikkeln, die Richtung ihrer Gedanken in einer bestimmten Weise zu vertiefen.

Einstellung des Menschen zur künstlichen Intelligenz

In Bild 4 sind einige typische Reaktionen von Menschen auf die heutigen Computersysteme zusammengestellt. Die Skala des Gradmessers der Zu- und Abneigung bzw. der Erwartungen reicht von Euphorie bis zu Ablehnung, Verweigerung und Bekämpfung. Darin bewegen sich Gruppen nach dem Mass ihres Informationszustandes über das neue Medium Computer, der sehr unterschiedlich ist.

Laien. Der wenig informierte Laie hat ein sehr weites Spektrum von Antwortreaktionen, es reicht von der Bekämpfung bis hin zu positiver Erwartung. Der Laienbenutzer hat schon erfahren, dass solche Rechner eigentlich nicht gefährlich sind und dass es ihm möglich ist, schon mit geringem Wissen sie das tun zu lassen, was er von ihnen haben möchte. So ist er schon wesentlich weniger ablehnend, aber doch auch nicht sehr euphorisch.

Profinutzer. Der typische Profinutzer arbeitet sehr viel mit Rechnern, doch ohne sie im Detail zu kennen. Mit der Erfahrung, dass er unglaubliche Dinge mit ihnen erreichen kann, steigert er sich teilweise bis zur Euphorie. Er sieht keine Schranken für die Anwendung, er erhofft sich die Lösung fast aller Probleme auf diesem Weg.

Systemphilosophen. Sie nehmen in diesem Schema einen festen Standpunkt ein. Diese Gruppe schätzt auch die Arbeit sehr realistisch ein, die in diese Verfahren noch zu stecken sein wird. Diese Gruppe ist es auch, die eine verbesserte Bildung und Ausbildung der Menschen fordert, um verantwortlich mit den kommenden Systemen umgehen zu können. Sowohl zum Bau solcher Anlagen als auch zur Entwicklung der Verfahren zu ihrem Einsatz werden eine grosse Zahl von Menschen benötigt, die ausreichende schöpferische Phantasie und Ideenreichtum mitbringen, um die damit verbundenen Probleme zu lösen, aber auch ausreichendes Verantwortungsgefühl, um Missbrauch zu verhindern.

Die zukünftige Entwicklung von Computern und ihre Grenzen

Die heutige Leistungsfähigkeit von Computern ist beeindruckend. Sie beherrschen Symbolsprachen mit Syntax, Rechen-Operationen, sie sortieren, ver-

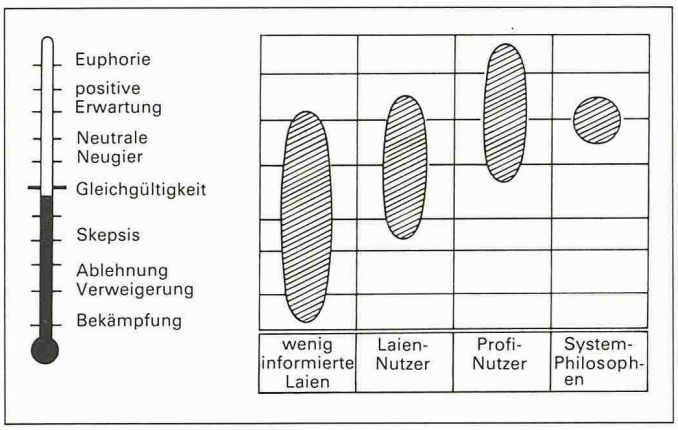

Bild 4. Reaktionen von Menschen auf Computer

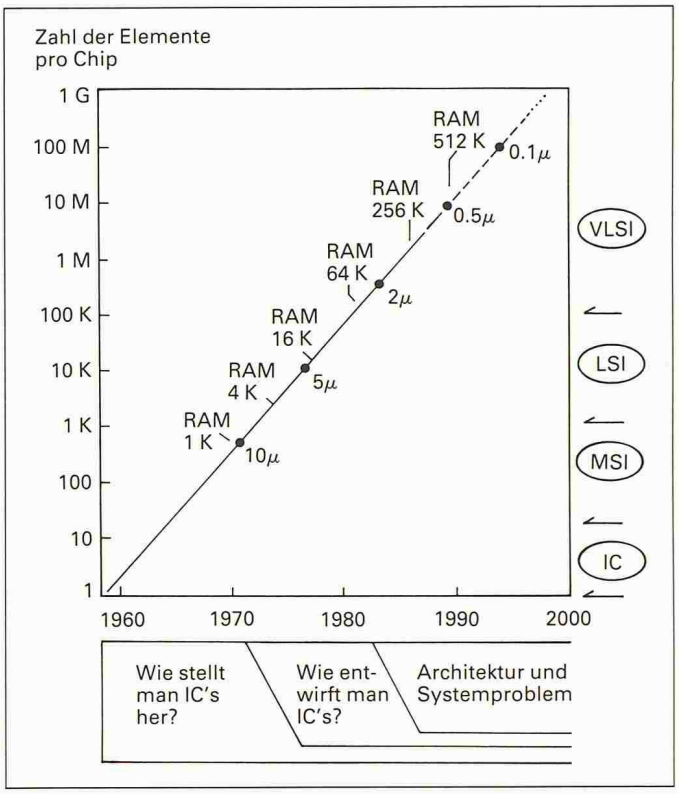

Bild 5. Komplexität integrierter Bausteine in der Mikroelektronik

gleichen und speichern in Datenbanken, sie führen bedingte Anweisungen und komplexe Prozeduren aus, sie leiten aus Daten Gesetze her, sie vollziehen schwierigste Simulationen, sie beweisen neue mathematische Gesetze. So vielfältig, erstaunlich und überraschend manche dieser Fähigkeiten auch erscheinen mögen, so sind sie doch vielfach beschränkt. Beschränkt z.B. durch die heutigen technologischen Parameter von Mikroprozessoren, Speicherelementen oder Bildschirmen. Die Frage ist, wie weit sich diese Grenzen in Zukunft werden hinausschieben lassen.

Chips-Entwicklung

Wie sich die Technologie bei der Herstellung und Verschaltung von logischen Elementen in Siliziumtechnik entwickelt hat, ist Exempel solcher Möglichkeiten (Bild 5). Silizium wird in grossen Einkristallen hergestellt und anschliessend in dünne Scheiben (wafer) zerschnitten. Diese Scheiben werden geätzt und poliert und anschliessend einer Vielzahl von physikalischen und chemischen Prozessen unterworfen. Die Scheiben werden dann in Teilstücke, sogenannte Chips, zerlegt. Auf jedem Chip befindet sich eine grössere Zahl logischer und speichernder Elemente, die man z.B. zu Rechnern zusammenschalten kann. Die Zahl der Elemente pro Chip ist eine Massgrösse für die Fähigkeiten der Technologie. Bei den vielen Schritten, die durchgeführt werden, lassen sich kleine Fehler, wie z.B. Verunreinigungen, niemals ganz vermeiden. Je mehr Elemente man auf einem Chip unterbringt, desto wahrscheinlicher ist also ein fehlerhafter Chip. Andererseits sinkt natürlich der Preis für jedes einzelne Bauelement, je mehr Bauelemente man auf einem einzigen Chip zusammenfassen kann. So waren die ersten Transistoren Einzelchips, d.h., es war eben ein logisches Element auf einem Chip. Heute liegen wir etwa bei einigen Millionen Elementen pro Chip, die man so beherrscht, dass in der Produktion ein ausreichender Anteil an funktionierenden Elementen erhalten wird. Wenn man diese Kurve, die am logarithmischen Massstab eine Gerade ist, weiter verlängert, so sieht man, dass man zu Ende dieses Jahrhunderts bei etwa 1 Milliarde Elemente pro Chip angekommen sein wird.

Trend-Extrapolation

Die Frage ist dabei, ob die Trend-Extrapolation in dieser einfachen Weise zulässig ist. Aus heutiger Sicht muss man dies mit ja beantworten. Auf dem Weg vom Transistor zum heutigen Chip ist man ja mehrfach an technologische Grenzen gestossen, die jedoch immer wieder überwunden wurden. Das heisst, der glatte Verlauf der dargestellten Kurve kam dadurch zustande, dass immer wieder neue Technologien die alten abgelöst haben und damit dieses stetige exponentielle Wachstum ermöglicht haben.

Zu den verschiedenen Zeiten ergaben sich sehr unterschiedliche Problemstellungen, und selbst der Wandel dieser Probleme hat auf den Verlauf der Kurve kaum einen Einfluss gehabt. Die Herstellungsprozesse für integrierte Schaltkreise stellten das wesentliche Problem bis etwa 1973 dar. Die nächste Grenze, an die man stiess, war nun die Komplexität der Schaltkreise. In solche Schaltkreise, von Menschen entworfen, schleichen sich naturgemäss einige Fehler ein, die dazu führen können, dass der Schaltkreis am Ende nicht funktioniert. Selbst wenn hier viele Kontrollen eingebaut werden, ergeben sich bei Korrektur früherer Fehler im Mittel wieder eine bestimmte Anzahl von neuen Fehlern. So werden heute zu diesem Zweck schnelle Rechnerprogramme eingesetzt, so dass der Rechner diese integrierten Schaltkreise entwirft. Auch dieses technologische Problem kann daher heute als weitgehend abgeschlossen betrachtet werden.

Chip-Architektur

Wenn nun ein derart komplexes Chip Millionen von Elementen enthält, so treten neue Probleme auf. Jetzt wird das Zusammenspiel der Teilelemente auf dem Chip (als System betrachtet) immer schwieriger. Man nennt dies die Chip-Architektur. Die Chip-Architektur muss ein Chip so aufbauen, dass die einzelnen Teile des Chips in vorgewünschter Weise zusammenspielen und als gesamtes die Funktion erreichen, die geplant ist. Früher hatte man einzelne Chips mit unterschiedlichen Eigenschaften, also z.B. ein Rechnerchip und ein Speicherchip, kombiniert und daraus etwa einen Mikroprozessor

aufgebaut. In Zukunft wird man solche Systemaufgaben – und sogar grössere – schon in das Chip hineinlegen müssen. Damit haben wir eine neue Qualitätsstufe bei den Problemen erreicht. Die zukünftige Aufgabe, die uns sicher einige Jahre beschäftigen wird, wird es also sein, komplexe Systemaufgaben auf einem einzigen Chip durch entsprechende Verdrahtungsprozeduren in richtiger Weise zu lösen. Auch hier besteht die Notwendigkeit oder manchmal auch die Hoffnung, dass Rechner helfen können, diese schwierige Aufgabe in den Griff zu bekommen (Konfigurationsproblem).

Grenzen der Chip-Entwicklung

Es stellt sich nun die Frage, ob diese Entwicklung immer so weitergehen wird oder ob es aus heutiger Sicht erkennbare Grenzen gibt, die nicht überstiegen werden können.

Stärker als der heutige Stand der Technologie schränkt sicher die Physik die weitere Entwicklungsmöglichkeit ein. Man kann Leiterbahnen nicht beliebig dünn machen, weil man irgendwann an die atomare Struktur der Materie anstösst. Ebensowenig ist es möglich, beliebig kleine Energiemengen zur Darstellung von Information einzusetzen. Das thermische Rauschen, d.h. die Eigenbewegung der Atome und Elektronen in der Materie, setzt dem eine Schranke. Man kann nun in sehr fundamentaler Weise im Rahmen der bekannten physikalischen Gesetze und mit Hilfe wichtiger Grundkonstanten der Materie eine Abschätzung hinsichtlich der physikalisch möglichen Grenzen vornehmen. Dazu werden ganz fundamentale Grössen verwendet wie etwa die Lichtgeschwindigkeit, das Plancksche Wirkungsquantum, die Elementarladung, die Masse und Ladung des Elektrons, der Boltzmannfaktor usw. Vergleicht man nun die mit diesen Werten errechenbaren absoluten Grenzwerte mit der Technologie heutiger Rechner, so ergibt sich, dass die absoluten physikalischen Grenzen mindestens um einen Faktor 100 Mio bis 1 Milliarde (10^9) über dem liegen, was wir heute an Fähigkeiten besitzen. Das heisst, wir leben in der Steinzeit der Computer. Die Möglichkeiten, die sich hier noch ergeben werden, sind erst ganz, ganz wenig an ihrer Oberfläche angekratzt. Man erkennt, welch weites Feld von Möglichkeiten und von Wachstum in diesem Sektor vor uns liegt.

Wachstum im endlichen System

Das Stichwort Wachstum führt zu einer weiteren Grenze, die heute in aller Munde ist: die Aussagen des Club of Rome in dem Buch «Grenzen des Wachstums» [8]. Dieses Buch soll uns auf ernste Gefahren der Zukunft aufmerksam machen, es soll nicht so sehr eine Anleitung zum konkreten technischen Handeln sein.

Kein dauerndes Wachstum

Eine Grundaussage dieses Buches muss jedoch mit Nachdruck unterstrichen werden. Unsere Welt ist ein endliches System. In einem solchen System ist unbeschränktes Wachstum in gar keiner Weise erträglich. Wenn also Politiker regelmässig ein jährliches Wachstum von zumindest vier Prozent fordern, so haben sie eventuell im Mathematikunterricht nicht richtig aufgepasst. Denn vier Prozent Wachstum jährlich heisst in 17 Jahren Verdoppelung aller Kenngrössen, die dieses Wachstum beschreiben. Jedes gleichmässige Wachstum dieser Art, und sei es noch so klein, führt mathematisch zu einer Exponentialfunktion, und diese wächst über alle Schranken. Es ist eine Binsenweisheit, dass so etwas auf die Dauer nicht gutgehen kann. Ein solches Verhalten wäre auch ganz und gar unbiologisch.

Dynamisches Wachstum in Selbsterneuerung

Kein Lebewesen, keine Pflanze, kein Baum z.B. zeigt uns ein solches unendliches Wachstumsverhalten. Exponentielles Wachstum findet nur in ganz bestimmten Zeitabschnitten, etwa in juvenilen Phasen, für kurze Zeit statt. Dann fallen die Wachstumsraten und man findet stationäres Verhalten. Das Beispiel ist gut, wonach Wachstum, wie es sein soll, etwa mit einem Wald zu vergleichen wäre. Der Wald muss sich in seiner Fläche nicht vergrössern, aber um seine Funktion zu erhalten, werden alte Bäume sterben müssen und junge Bäume ständig nachwachsen. Eine solche Art von dynamischen, in sich geschlossenen Wachstumsprozessen, bei denen eine ständige Ablösung des Alten durch das Junge stattfindet, das wieder wachsen kann, ist anzustreben.

Es ist also nicht ein ständiges Wachstum des Bruttosozialproduktes und damit ein Wachstum auch der Energieumsätze, der Menge der Abfallstoffe, des Verkehrsaufkommens usw., das wir anstreben sollten. Ein exponentielles Wachstum dieser Grössen ist für die Zukunft auch nicht wünschbar. Dynamische Wachstumsprozesse, wie wir sie in der Natur erleben, zeichnen sich dadurch aus, dass dieses Wachstum im komplexen Zusammenspiel einer grösseren funktionalen organischen Einheit erfolgt. Wie es Frederik Vester in seinem Buch «Neuland des Denkens, das kybernetische Zeitalter» [9] beschrieben hat, müssen wir lernen, in solchen grösseren funktionalen und organischen Zusammenhängen in komplexen Regelnetzwerken zu denken.

Der Mensch und die intelligente Technologie

Nun kommt das Verhältnis von Mensch und intelligenter Technologie noch einmal in seiner historischen Entwicklung zur Betrachtung, wie es auf Bild 6 dargestellt ist. Die Anthropologen meinen, dass der Mensch erst wirklich zum Menschen wurde, nachdem er Werkzeuge und das Feuer zu beherrschen gelernt hatte.

Werkzeug - Energiezeug - Denkzeug

In der vieltausendjährigen Entwicklungs- und Kulturgeschichte der Menschheit wurde aus dem einfachen Werkzeug ein Energiezeug, wie es uns etwa in der Erfindung von James Watt entgegentritt. Mit sehr geringem Muskelaufwand kann der Mensch hier grosse Energien steuern und umsetzen. Eine weitere wichtige Entwicklungsstufe stellt die Erschaffung von Denkzeugen dar, wie wir sie in der künstlichen Intelligenz beobachten können. Dabei steuert immer noch das menschliche Gehirn über die von ihm erdachten Algorithmen die informationsverarbeitenden, den Menschen in mancher Hinsicht imitierenden Maschinen (Bild 6).

Selbstorganisierte Maschine

Im Übergang von der algorithmischen Maschine zur selbstorganisierten Maschine wäre eine weitere Entwicklungsstufe denkbar, indem der Mensch Maschinen erfindet, die sich selbst zu einem höheren Komplexitätsgrad als heute vorstellbar organisieren können. Eine solche Maschine könnte vieles bieten: Licht und Wärme, Sicherheit, Information, Unterhaltung, Entspannung. Andererseits sind mit ihr viele Gefahren verbunden. Sie könnte die ganze Welt sozusagen «am Draht» halten. Was der Mensch in dieser Stufe tun wird, ist schwer voraussehbar, ist ambivalent. Freut er sich oder läuft er davon?

Es gibt eine kleine Zahl von Fachleuten, welche die Entwicklung einer solchen Maschine für möglich halten. Die grössere Zahl von Spezialisten ist der Meinung, dass es nicht möglich sein wird.

Wie auch immer: Die Zukunft auf diesem Felde ist nicht zu fürchten, vorausgesetzt, ein ausreichender Teil unserer Jugend entwickelt Interesse und die Fä-

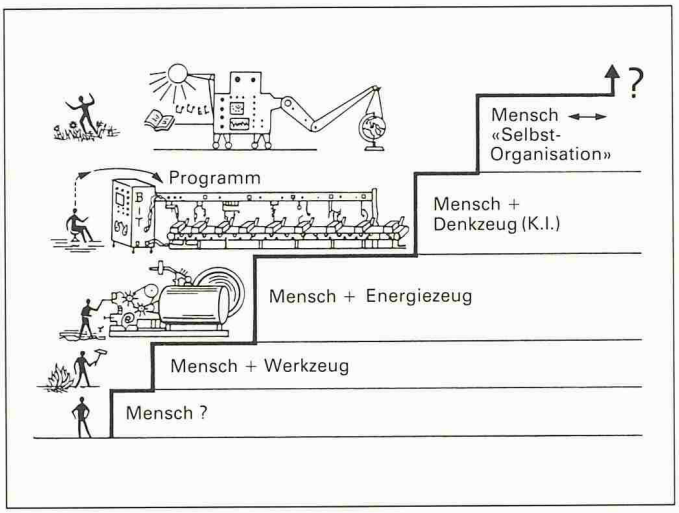

Bild 6. Historische Entwicklung des Verhältnisses des Menschen zu den Technologien

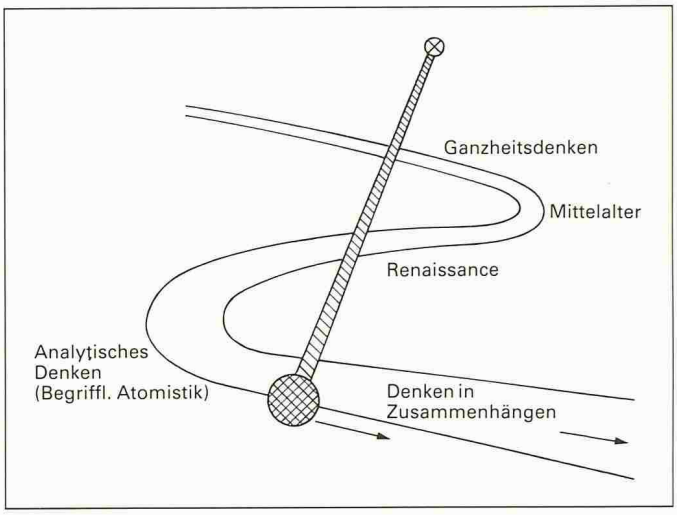

Bild 7. Paradigmen-Wechsel

higkeiten, sich mit diesem Problem auseinanderzusetzen. Weiter ist klarzustellen, dass intelligente Verhaltensweisen nur eine Facette des menschlichen Seins darstellen. Es gibt viele andere wichtige Bereiche des menschlichen Seins, der von noch so schnellen informationsverarbeitenden und kombinierenden Maschinen nicht erreicht werden wird, wie z.B. der Bereich der Phantasie und der Kreativität.

Menschliche Eigenschaften als Schranken der Entwicklung

Die Grenzen für die Entwicklung in der Zukunft liegen bei den technologischen Fähigkeiten, in der Komplexität der Zusammenhänge, in der Endlichkeit, den Wachstumsschranken und in den physikalischen Gesetzen.

Darüber hinaus gelten Schranken, die zutiefst mit dem Menschen und seinen Eigenschaften zusammenhängen: Der Zeitbedarf des Menschen, sein Weltbild zu ändern, und die Geschwindigkeit, mit der sich das menschliche Erkenntnisvermögen erweitern kann.

Der Mensch braucht Anpassungszeit

Durch Erziehung und Schule haben sich die Menschen eine bestimmte Denkweise, ein bestimmtes Weltbild zu eigen gemacht. Die Fähigkeit, diese Denkweise zu ändern und sich einer veränderten Wirklichkeit anzupassen, ist sehr beschränkt. Die Erfahrung zeigt, dass der Mensch etwa 20 Jahre braucht, also eine Generation, bis er sich einer neuen Lage anpasst. Häufig geschieht dieser Anpassungsprozess erst im Rahmen schmerzhafter Krisenerscheinungen, wie wir sie derzeit auch erleben. Mit physikalischen Begriffen beschrieben, könnte man dies als eine phasenverschobene Ankopplung an die geistigen und materiellen Veränderungsprozesse in unserer Umwelt bezeichnen. Der Mensch ist demnach den Kondratjeff-Zyklen nicht einfach ausgesetzt. Mit der Eigenschaft des langsamen Umdenkens gehört er vielmehr zu den Verursachern.

Die weitere und vielleicht noch stärker einschränkende Grenze für menschliches Erleben, die mögliche Geschwindigkeit, mit der sich Erkenntnisvermögen erweitert, lässt ja begründete Zweifel entstehen, ob sich überhaupt im Rahmen der geschriebenen und aufgezeichneten Geschichte ein Fortschritt in dieser Hinsicht erkennen lässt.

Grenzen der Erkenntnisfähigkeit

Die dem Menschen anerzogenen bzw. angeborenen Denk- und Betrachtungsweisen haben immerhin wesentlich dazu beigetragen, dass die Menschheit aus ihren Anfängen bis heute überlebt hat. Die dabei unmittelbar erfahrenen Anschauungsformen z.B. des Raumes und der Zeit haben sich tiefgreifend auf unsere Erkenntnisfähigkeit ausgewirkt. In diesem klassischen Weltbild ist daher auch kein Platz für den Dualismus zwischen Welle und Teilchen, den wir in der Atomphysik nachweisen können. Wenn sich etwa ein Elektron einmal so verhält, als sei es ein Teilchen mit Masse und Impuls, das andere Mal aber so, als sei es eine unendlich ausgedehnte Welle, dann versagt in diesem Fall die Kantsche Zuordnung von bestimmten Eigenschaften zu bestimmten Objekten. Wir erkennen, dass das Elektron etwas ganz anderes sein muss, weder Welle noch Teilchen, dass aber unsere Erkenntnisfähigkeit nicht genügt, um uns hiervon ein «Bild» zu machen. Dass wir aber über diese Grenze unserer Erkenntnisfähigkeit überhaupt reden, d.h. uns ihrer bewusst sind, zeigt auch, dass wir dabei sind, sie etwas hinauszuschieben. Dies sind jedoch, verglichen mit einem Menschenleben, sehr langsame Vorgänge und bei weitem langsamere als die eingangs besprochenen Kondratjeff-Zyklen.

Rückkehr zum ganzheitlichen Denken

In der Wissenschaft wird derzeit von einem Paradigmenwechsel gesprochen, indem ein früheres Weltbild langsam verlassen und ein neues Weltbild angestrebt wird (Bild 7). Das Mittelalter war durch das Ganzheitsdenken gekennzeichnet. Das ganzheitliche Weltbild war sehr stark religiös geprägt und alle Detailkenntnisse und -erkenntnisse, speziell auch in den Naturwissenschaften, hatten sich diesem Ganzheitsbild unterzuordnen. In den Fällen, in denen das nicht zusammenging, kam es zu Konflikten, wie der Fall Galilei zeigt. Mit dem Aufkommen der Renaissance wandte man sich einem anderen Paradigma zu. Eine andere Denk- und Schlussweise setzte ein. Das analytische Denken zerlegte das Ganze in einzelne Teile und versuchte, daraus die Ursachen des Geschehens zu ergründen. Dies führte dann zur physikalischen und später auch zur begrifflichen Atomistik und in der Hoch-Zeit der Aufklärung sogar zu dem Gedanken, man könne die ganze Welt als eine Maschine von ihren kleinsten Teilchen, den Atomen her, bis in alle Einzelheiten verstehen und vorausberechnen. Der Paradigmenwechsel, dessen Anfang wir derzeit erleben, scheint wieder zurückzugehen in Richtung des ganzheitlichen Denkens, natürlich auf der Basis des inzwischen wesentlich umfangreicheren Wissens im Detail. Das systemtheoretische Denken, die Synergetik, die Bionik, das ganzheitliche Denken, wie es Frederic Vester beschreibt, sind Beispiele für diese Richtung. Wir erkennen damit, dass unser Menschenbild

noch lange nicht abgeschlossen ist und weiter entwickelt werden muss.

Zukunftsforderungen an Bildung und Erziehung

Weil die Zukunft der Jugend gehört, beziehen sich die Schlussfolgerungen auf den aktuellen Lebensbereich eben dieser Jugend: Schule und Elternhaus.

Neue Ansprüche an die Schulen

Die Steigerung der Wissensmenge, die virtuelle Unendlichkeit von Wissen sowie die Entwicklung neuer Wissensgebiete erlauben es nicht, in den Schulen alles so zu lassen, wie es bisher war.

Zweifelsohne hat unser Bildungssystem, gemessen an den Schwierigkeiten der gestellten Aufgabe, einige Defizite. Man kann diese Mängel nicht allein der Schule oder gar den Lehrern anlasten, denn die Schule kann nicht besser sein als die Gesellschaft.

Natürlich gilt auch der umgekehrte Schluss. Es ist aber doch zu wünschen und vorstellbar, dass in der Schule die Phantasie und Kreativität besser als heute entwickelt und gefördert werden und dass vor allem mehr Zeit für die Charakterbildung bleibt, für das nicht Berechenbare, für das nicht Vorhersagbare, für das nicht Manipulierbare. Mehr Erziehung ist also notwendig.

Ausbildung der Lernfähigkeit

Sachbezogenes Detailwissen wird immer mehr aus Datenbanken für jeden verfügbar sein. Die Schule sollte sich daher stärker als bisher auf die Einübung des Grundwissens konzentrieren. Grundwissen ist immer dadurch gekennzeichnet, dass es sich in vielen Lebensbereichen und Wissensbereichen einsetzen lässt. Grundwissen muss auch verbunden sein mit der Beherrschung bestimmter Methoden und Vorgehensweisen, wir würden dafür kurz «Können» sagen. Zum Können gehört auch das Erkennen von Problemen, die Fähigkeit, Probleme zu strukturieren, oder anders ausgedrückt, die Fähigkeit, die richtigen Fragen zu stellen.

Die raschere Wissensumsetzung und die raschere Entwertung von Anwendungswissen würde bedeuten, dass die Lernfähigkeit gut ausgebildet und ein Leben lang aufrechterhalten werden muss.

Fachübergreifendes Verstehen als Ziel

Die Verkopplung bisheriger Wissenschaftsgebiete zu komplexen Wissenschaftssystemen erfordert ein Denken in Zusammenhängen, wie es sicher bisher nicht allgemein üblich war. Querschnittsdenken, Denken in Ähnlichkeitsstrukturen, in kybernetischen Regelnetzwerken verlangt andere Methodiken des Unterrichtens, der Aufbereitung und Zusammenstellung des Lehrstoffes.So spielen etwa periodische Vorgänge wie Schwingungen nicht nur in der gesamten Physik eine grosse Rolle, sondern auch in der Musik und, wie gezeigt wurde, in den Wirtschaftswissenschaften und in der Geschichte. Die Synergetik ist ein exzellentes Beispiel, wie man diese Zusammenhänge verstehen und sehen kann. Für die Schule heisst dies, dass das fachübergreifende Verstehen, der fachübergreifende Unterricht wichtiger werden als die heutige, etwas egoistische Einzelfächerkunde. Lehrplaninhalte sind demnach nicht nur danach zu beurteilen, was sie zu einem bestimmten Fach an wesentlichen Elementen beitragen, sondern auch danach, welchen Anteil sie am Grundlagenwissen anderer Fächer und Fachbereiche leisten.

Das Lernen vormachen

Dabei sollte der Lehrer einen festen, eigenen Standpunkt haben, der aber nicht starr fixiert sein darf. Er muss in der Lage sein, das, was in der Welt und in der Wissenschaft geschieht, zu reflektieren und mit in den Unterricht einzubeziehen. Er muss es auch mehr und mehr akzeptieren, dass bei der Komplexität des heutigen Wissens ein Schüler in Fachfragen mehr wissen kann als er selber. Das sollte ihn nicht stören. Er sollte aber in der Lage sein, dem Schüler zu vermitteln, wie er selber gelernt hat und wie er aber auch ständig weiterlernt. Er sollte zeigen, wie man an ungelöste Fragestellungen und Probleme herangeht und sich auf der Basis des vorhandenen Grundwissens in das Unbekannte hineintastet («Das Lernen vormachen»). Über solche Beispiele lassen sich auch der Wert der Phantasie, die Freude über eine kreative Idee und vor allem charakterliche Einstellungen vermitteln.

Entwickeln der Kommunikationsfähigkeit

Die fächerübergreifende Denkweise erfordert auch eine verbesserte Kommunikationsfähigkeit. Dies gilt sowohl für den sprachlichen Sektor als auch für aussersprachliche Kommunikationsmethoden. Es wird immer wichtiger, anderen Menschen Informationen, Gedanken und Gefühle zu übermitteln. Es wird wichtiger zu verstehen und zu sensieren, was andere meinen. Auch dies wäre eine wichtige Ergänzung für den Unterricht in der Schule der Zukunft.

Schlusswort

Schliesslich stellt der Paradigmenwechsel viele bisherige Gewohnheiten und überkommene Regelungen in Frage. Neue Aufgabenstellungen und neue Ziele müssen gefunden werden. Am Beginn eines neuen Zyklus steht ein vermehrtes Mass an Freiheit für den Einzelnen. Er kann aus einer grösseren Zahl von Möglichkeiten auswählen. Gleichzeitig müssen wir aber auch bereit sein, die Verantwortung für unsere Entscheidungen zu tragen, unter Umständen auch für Zeiträume, die über das menschliche Lebensmass hinausgehen. Der Mensch braucht dazu Phantasie, Kreativität, Charakterbildung.

Adresse des Verfassers: Dr. *Walter Kroy*, Leiter des Hauptbereiches Technologieforschung bei Messerschmitt-Bölkow-Blohm, Postfach 801 109, D-8000 München 80.
Lehrbeauftragter an der Hochschule St. Gallen.
Dozent ZfU (Zentrum für Unternehmensführung).

Literatur

[1] *S. Kuznets:* Economic Change, W. W. Norton & Co N.Y., 1953
[2] *J. A. Schumpeter:* Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie, Bern, 1950; Konjunkturzyklen II, Göttingen, 1961
[3] The Encyclopedia of Ignorance, Herausgeber Ronald Duncan, Miranda W. Smith, 1979, P.B.
[4] *I. Prigogne:* Vom Sein zum Werden, Piper, 1985; Die Herausforderung der Evolutionsbiologie; Die Welt als offenes System
[5] *H. Haken:* Erfolgsgeheimnisse der Natur, VVA, 1986; Advanced Synergetics, Springer
[6] *J. C. Simon:* Digital Pattern Recognition, K. S. Fu
[7] *Simon:* General Problem Solver, persönliche Mitteilung
[8] Club of Rome, Grenzen des Wachstums. H. Meadows et al, N.Y. Universe Book
[9] *F. Vester:* Die technische Herausforderung der achtziger Jahre, «Schweizer Ingenieur und Architekt» 33-34/1980, S. 731; Neuland des Denkens, 1984, DTV; Wege zum vernetzten Denken, «Schweizer Ingenieur und Architekt» 49, 1.12.1988, S. 1363