# SITZUNGSBERICHTE DER LEIBNIZ-SOZIETÄT

# Band 90 • Jahrgang 2007

# trafo Verlag Berlin

# ISSN 0947-5850 ISBN 978-3-89626-690-3

# Inhalt

01 Gert Wangermann: Theoria cum praxi – Quo vadis societas scientiarium?

02 Herrmann Scheer: Energie – Neu denken!

03 Gerhard Öhlmann: Solarzeitalter – Auf dem Weg zur Realität

04 Gert Blumenthal: Die Sonne und GAIA

05 Rainer Bitsch: Integration von erneuerbaren Energiequellen und dezentralen Erzeugungen in bestehende Elektro-Energiesysteme

06 Herwig Brunner, Walter Trösch, Ulrike Schmid-Staiger: Neue Ansätze zur Stoffproduktion mit Mikroalgen

07 Hermann G. Grimmeiss: Nanoscience: Vom Forschungsergebnis zum Industrieprodukt

08 Ulrich Wulf, Paul N. Racec, Hans Richter: Quantentransport in Nanotransistoren

09 J. Michael Köhler: Nanotechnologie im chemischen und im biotechnischen Labor: Mikrodurchflußreaktoren und Nanolitersegmenttechnik

10 Achim Weber, Carmen Gruber-Traub, Marc Herold, Kirsten Borchers, Günter E. M. Tovar and Herwig Brunne: Biomimesis by Nanoparticles: Concept, Design and Applications in Biotechnology and Biomedicine

11 Bernd Junghans: Sensorsysteme lösen eine neue Ära der Produktivitätsentwicklung aus

12 Hugo De Man: Ambient Intelligence: A Giga-Scale Dream Facing Nano-Scale Realities

13 Norbert Meyendorf: Neue Konzepte für Bauteil- und Materialüberwachung in der Verkehrstechnik, speziell Bahn und Flugzeug

14 Wolf-Joachim Fischer, Hans-Günter Despang, Hans-Jürgen Holland, Daniele Wiedemuth: Body Area Networks – Anwendung in telemedizinischen Systemen

15 Bernd Michel: Zuverlässigkeitsprobleme im Hightech-Bereich – Lösungsansätze und Konzepte

16 Gerhard Banse, Claudia Lorenz: Technikfolgenabschätzung und "Ubiquitous Computing" – Sensorsysteme im Spannungsfeld zwischen technischem Fortschritt und gesellschaftlicher Entwicklung

17 Uwe Meinberg: Intelligente und nachhaltige Logistik

18 Lutz-Günther Fleischer: Aus Partikularitäten soll wieder ein Ganzes entstehen

# Theoria cum praxi - Quo vadis societas scientiarium?

Am 3. Mai 2002 wurde das Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien (kurz LIFIS) gegründet – als Kind wie als Partner der Leibniz-Sozietät. Und eingedenk der Leibnizschen Devise, "man müsste gleich anfangs das Werck samt der Wissenschaft auf den Nuzen richten".

Weshalb diese erneute Symbiose zwischen einer Gelehrtengesellschaft und einer der Praxis zugewandten Institution? Weshalb, nachdem im Jahr 1990 die Gelehrtensozietät der Akademie der Wissenschaften der DDR durch politisch motivierte Entscheidungen von ihren Forschungsinstituten getrennt wurde und diese, dem Föderalprinzip folgend, in die Obhut der damals "neuen" Bundesländer gelangten? Zudem in einer Gegenwart, da öffentlich über den Nutzen von Wissenschaftsakademien für Staat und Gesellschaft gestritten wird. Freilich wiederum mit Argumenten, die intime Kenntnisse über das Wesen des Forschungsprozesses und dessen effektiver Organisation vermissen lassen.

Der Versuch einer Antwort muss dem Blick in die Wissenschaftsgeschichte der Neuzeit folgen.

## Leibniz und die Grundlegung der Interdisziplinarität

Die Genealogie wissenschaftlicher Akademien nach unserem heutigen Verständnis beginnt im 17. Jahrhundert, dem Zeitalter der Aufklärung, als Gegenentwurf zum scholastischen Wissenschaftsverständnis des Mittelalters. Zu den ersten Akademien jener Zeit zählen die 1630 in Rom gegründete Accademia dei Lincei, die 1645 in Oxford als Privatgesellschaft ins Leben gerufene Royal Society, später nach London verlegt und als Einrichtung des Staates eröffnet, sowie 1635 die Académie francaise. Mit Blick auf die vielseitig fortschreitende Wissenschaft gründete schließlich Colbert unter Ludwig XIV. eine Naturwissenschaftliche Gesellschaft, aus der 1666 die Académie des sciences hervorging. Nach dem Vorbild dieser Institutionen

wurden auch in anderen europäischen Ländern Akademien gebildet, von denen nicht wenige zu nationaler Größe erwuchsen.

Die Entwicklung in Deutschland verlief auf anderen Wegen. Hier war im wesentlichen den Universitäten – zugleich mit der Lehre – die Pflege und Fortentwicklung der Wissenschaften überlassen worden. Entscheidende Gründe lieferten dabei insbesondere der staatliche Partikularismus und eine ungenügende Konzentration wissenschaftlicher Potentiale. Versuche, gegen Ende des 17. Jahrhunderts beispielsweise ein Collegium artis consulterum von Reichs wegen durchzusetzen, endeten ohne Erfolg.

Unter derlei Voraussetzungen formulierte Gottfried Wilhelm Leibniz in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts erste Gedanken, Wissenschaft nicht als Selbstzweck, mithin bei mangelnder Achtung jeglichen praktischen Nutzens, zudem nicht in der strengen Trennung ihrer Teile zu betreiben. Vielmehr sollte a priori Wissenschaft in der Einheit ihrer Teile wirken und zudem nützlich sein

Mit der Ausformung seiner Gedanken ging die in Gewissheit endende Hoffnung einher, in Kurfürst Friedrich III. von Brandenburg – genauer wohl in Kurfürstin Sophie Charlotte, als verständnisvoller Fürsprecherin – einen Souverän gefunden zu haben, der den Leibnizschen Plänen, aus welchen Gründen auch immer, gewogen war.

In einer Denkschrift vom März 1700 "in Bezug auf die Einrichtung einer Societas Scientiarium et Artium in Berlin" fasst Leibniz seine Überlegungen zur Gründung einer angemessen erscheinenden Anstalt zusammen:

"Solche Churfürstliche Societät müste nicht auf blosse Curiosität oder Wissensbegierde und unfruchtbare Experimenta gerichtet seyn, oder bey der blossen Erfindung nützlicher Dinge ohne Application und Anbringung beruhen, wie etwa zu Paris, London oder Florenz geschehen...; sondern man müsste gleich anfangs das Werck samt der Wissenschaft auf den Nuzen richten, und auf solche Specimina dencken, davon der hohe Urheber Ehre und das gemeine Wesen ein Mehrers zu erwarten Ursache habe."

Aufschlussreich ist dabei, dass Leibniz dem Begriff der Sozietät gegenüber dem einer Academia den Vorzug gibt. In einem Brief an den Hofprediger Jablonski vom 26. März 1700, merkt Leibniz dazu an:

"Es wäre künftig der Name der Societät besser als der Academie. Denn in Teutschland Academie mehr von Lehr- und Lernenden verstanden zu werden pfleget; allhier auch wahrhaftig eine Societät vieler auch entfernter Personen dienlich." Neben der allbekannten Betonung des Nutzens der Wissenschaft durch Leibniz, nämlich "gleich anfangs theoriam cum praxi" zu verbinden, fällt auf, die Wissenschaft in aller Differenzierung an die Vielfalt einzelner Wissenschaftler fixiert und die Einheit der Wissenschaft als vom Zusammenwirken von Personen über deren fachliche Enge hinweg abhängig zu verstehen. Häufig wird übersehen oder verkannt, dass Leibniz einer jener Polyhistore seiner Zeit war, deren Wissenschaftsverständnis und dasjenige zur Wissenschaftsorganisation von der Ganzheit der Wissenschaft in ihren Teilen geprägt wurde – seinen Vorfahren und Vorbildern im Geiste gleich: Descartes und Bacon. Heute steht der uns längst geläufige Ausdruck der interdisziplinären Zusammenarbeit für sein Verlangen.

Das Zusammentreffen der verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen unter einem Dach sollte der gegenseitigen "Befruchtung" dienen und die Möglichkeiten der praktischen Verwertung vorgetragener und kritisch diskutierter Forschungsergebnisse, über die Grenzen der einen Disziplin ausgreifend, zum "allseitigen Nutzen vermehren". Eine Sozietät sollte die besonderen Bedingungen bieten, selbst erworbenes Wissen durch Austausch zu prüfen, in das Gebäude der Wissenschaft einzuordnen und von daher erst, nach gemeinsamer Anstrengung, praktisch wirken, d.h. nützlich werden zu lassen. Das Ganze sollte die Potenzierung der Teile sein.

Jenes "theoria cum praxi" wird für Leibniz nur praktikabel, wenn "Mathesis und Physica" und unter diesen – im Verständnis seiner Zeit – hie Geometria, Astronomia, Architectonica, Mechanica, da Chymia mit den drei Regna Minerale, Vegetabili et Animale zusammenwirken. Dabei wird seine Sicht auf das Gebäude der Wissenschaft gleichsam durch die Einheit von Theorie und Praxis jeder einzelnen Disziplin wie derjenigen aller Disziplinen bestimmt:

"Bei dem Regno Vegetabili ist Botanica, daraus die Agricultura neben der Gärtnerey und Forstwesen fließet. Und das Regnum Animale, dessen rechte Erkenntnis von den Anatomi dargegeben wird, hat Thierzucht, Waidwerk und viel Anders (der hohen Scienz der Medicin zu schweigen) in sich." schreibt Leibniz in einer Denkschrift an Kurfürst Friedrich III. vom 26. März 1700 und gibt darin zugleich seine Vorstellungen zur Struktur der geplanten Sozietät zu erkennen. Nicht zuletzt weist Leibniz bei dieser Gelegenheit auf die Notwendigkeit, die Sozietät mit Laboratorien und Instrumentarien, also Forschungspotentialen auszurüsten – eine Forderung, die erst in späterer Zeit und auf verschlungenen Pfaden ihre Erfüllung fand.

### Das Zeitalter der Diversifikation

Im Gegensatz zu den Gründungen in Paris und London, auch anders als bei der 1652 in Schweinfurt gegründeten Academia naturae curiosorum – der 1879 nach Halle verlegten heutigen Deutschen Akademie der Naturforscher (Leopoldina) – bei denen ein bereits tätiger Zirkel von Wissenschaftlern nachträglich in den Rang einer Akademie erhoben wurde, griff der Staat schon deutlich vor dem Stiftungsakt der Berliner Akademie prägend in den Vorgang des Organisierens und Strukturierens ein. Conrad Grau bemerkte dazu 1988 in seinem Werk "Berühmte Wissenschaftsakademien":

"Der Staat nutzte und entwickelte nicht mehr nur Bestehendes weiter, indem er es seinen Zwecken dienstbar machte. Nicht zuletzt die Académie des Sciences in Paris und die Royal Society in London hatten gezeigt, daß, ausgehend von den Bedürfnissen der Wissenschaftsentwicklung, die Existenz einer Akademie gleichsam zum Bestand eines Staates zu gehören begann. Immer mehr Fürsten sahen in der sichtbaren Förderung der Wissenschaft durch Akademien und Gesellschaften ein Mittel zur Erhöhung ihres Prestiges, aber auch zur Förderung der Wirtschaft im weitesten Sinne dieses Begriffs."

Unter den deutschen Fürstentümern des ausgehenden 17. Jahrhunderts konnte Brandenburg fraglos über innere und äußere Voraussetzungen verfügen, welche die Gründung einer Akademie zu solcherart Zwecken besonders begünstigte. Leibniz sah daher in Berlin die vergleichsweise größte Chance, seinen Plan zu verwirklichen.

An der Wende zum 18. Jahrhundert vollzogen sich im Heiligen Römischen Reich Deutscher Nation gravierende Veränderungen, die eine wachsende Unabhängigkeit der Fürstentümer von der sich abschwächenden Zentralgewalt zum Ziel, wenigstens aber zum Ergebnis hatten. Auf diesem beständig partikulären Boden entstanden – Leibnizens Plan oder dem Vorbild Preußens mehr oder weniger folgend – weitere Akademien besonderen Zuschnitts. So die Akademie der Wissenschaften in Göttingen 1751, die Bayerische Akademie der Wissenschaften München 1759, die Sächsische Akademie der Wissenschaften 1919, hervorgegangen aus der 1846 gegründeten Königlich Sächsischen Akademie der Wissenschaften und schließlich im 20. Jahrhundert die Heidelberger Akademie der Wissenschaften 1909, die Akademie der Wissenschaften und Literatur in Mainz 1949, die Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften in Düsseldorf 1963 und die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften in Berlin 1992. Als

Nachhut des 21. Jahrhunderts und vorläufig wohl letzte wurde im Jahr 2006 die Akademie der Wissenschaften in Hamburg eröffnet.

Während die Gründungen im 17. Jahrhundert notwendige und nützliche Reaktionen auf die scholastische Enge mittelalterlicher Universitäten waren, verloren Akademien im 18., mehr noch im 19. Jahrhundert zunehmend an Bedeutung. Die Fortschritte der Wissenschaft und die Bedürfnisse der Wirtschaft erzwangen eine schnelle Weitergabe soeben erworbener Erkenntnisse und führten zur Neubestimmung von Inhalt und Struktur der Wissensvermittlung – mithin der Universitäten.

In einer unvollendeten Denkschrift "Über die innere und äußere Organisation der höheren wissenschaftlichen Anstalten in Berlin" der Jahre 1809/10 stellt Wilhelm von Humboldt zu dieser Entwicklung fest:

"Geht man der Sache genauer nach, so haben Akademien vorzüglich im Auslande geblüht, wo man die Wohlthat deutscher Universitäten noch jetzt entbehrt, und kaum nur anerkennt, in Deutschland aber vorzugsweise an Orten, denen Universitäten mangelten, und in Zeiten, wo es diesen noch an einem liberaleren und vielseitigeren Geiste fehlte, In neueren Zeiten hat sich keine sonderlich ausgezeichnet, und an dem eigentlichen Emporkommen deutscher Wissenschaft und Kunst haben die Akademien wenig oder gar keinen Anteil gehabt."

Seither hat das Entstehen neuer Lehr- und Forschungsanstalten eine nahezu exzessiv zunehmende Produktion insbesondere naturwissenschaftlicher und technischer Forschungsergebnisse zur Folge – und umgekehrt. Die Anzahl deutscher Universitäten, Hochschulen und Technika, schließlich solcher Organisationen, wie der 1911 in Berlin gegründeten Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft e.V. – seit dem Jahr 1948 Max-Planck-Gesellschaft – oder der 1949 gegründeten Fraunhofer-Gesellschaft e.V., der im Jahr 1990 konfigurierten Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz e.V. sowie der 1995 gleichfalls aus einer Vorgängerinstitution hervorgegangenen Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V., die sich einerseits der Einheit von Forschung und Lehre bzw. in der Hauptsache der Grundlagenforschung, andererseits der Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft verschrieben haben, erhöhte sich im 20. Jahrhundert drastisch und erhöht sich noch immer. Und mit der Anzahl deren territoriale Verteilung.

Mit solcher Vermehrung, Differenzierung und Spezialisierung wissenschaftlicher Institutionen korrespondierte eine schier endlose Vervielfachung, Diversifikation und Verfeinerung des wissenschaftlichen Instrumentariums. Und mit dem mannigfaltigen Instrumentarium wuchs und wächst die Verfüh-

rung zur ausschließlichen Analyse des Forschungsgegenstandes, mithin der Welt. Die Gefahr des Verlustes synthetisierender und integrierender Fähigkeiten, des dialektischen, ganzheitlichen und damit hinreichend vorausschauenden Denkens und Handelns ist längst zum existentiellen Problem unserer Zeit geworden. Die Einheit der Wissenschaft ist in Frage gestellt. Und mit der Diversifikation des Gegenstandes zugleich dessen Beschreibung, die Sprache.

Auch die Sozietät des Gottfried Wilhelm Leibniz, seit dem Statut vom 24. Januar 1744 entgegen der Intention ihres Begründers "Akademie der Wissenschaften" genannt, hat in ihren einzelnen Entwicklungsstadien diese Diversifikation durch eine wechselnde und wachsende Teilung in Klassen zugelassen. Beschrieben beispielsweise die Statuten von 1744 und 1812 noch vier Klassen (Physic, Mathematic, Philosophie und Philologie) so waren in der Akademie ab 1949 sechs und seit 1969 bereits 11, zeitweise 12 Klassen tätig – eine Zersplitterung, die im Plenum, als der ursprünglich zur Integration bezweckten Versammlung aller Akademiemitglieder, schließlich gedanklich und sprachlich nur mühsam wieder aufgehoben werden konnte.

### Ignoranz als untaugliches Mittel zum Zweck

Die skizzierte Entwicklung endet also in einer eigenwillig angelegten bundesdeutschen Wissenschaftslandschaft. Hier eine Majorität von Universitäten, Hochschulen sowie außeruniversitären Forschungsinstitutionen, vergleichsweise gut gerüstet mit quantitativ wie qualitativ hochrangigen Forschungspotentialen. Dort eine Minorität einzelner Wissenschaftsakademien, kaum, zumindest nicht hinreichend mit adäquaten Forschungspotentialen ausgestattet. Die Akademie der Wissenschaften der DDR dürfte – nachträglich in diesen Kreis projiziert – eine der bemerkenswerten Ausnahmen gewesen sein.

Das Gleichgewicht zwischen beiden Organismen wird zusätzlich gestört, indem für die Majorität eine Bearbeitung ausgewählter Forschungsprobleme nicht zuletzt von der Finanzierung durch Wirtschaftsunternehmen, also von kurz- bzw. mittelfristigem Ertragsdenken abhängt – im Widerspruch zum Eigenauftrag der Minorität, der Akademien, weitgehend unabhängig von der Art und Weise ihrer Finanzierung, grundlegende Probleme über einen womöglich langfristig bemessenen Zeitraum bearbeiten zu wollen. Kurzum: Die "Stoffwechsel" beider Organismen sind nicht synchronisiert. Derlei Gleichgewichtsstörungen werden überdies durch die Unwägbarkeiten einer chaotischen Globalisierung der Wirtschaft noch verstärkt, einen Vorgang, den die Wissenschaft längst wesentlich harmonischer hinter sich gebracht hat.

Als offensichtlich einzigen Ausweg aus diesem scheinbaren Dilemma ungleicher Voraussetzungen wagte der bundesdeutsche Wissenschaftsrat nach peinlicher Prüfung der Delinquenten im Jahr 2004 die Empfehlung anzubieten, Wissenschaftsakademien mögen sich fortan allein geistes- und kulturwissenschaftlichen Projekten zuwenden und den Naturwissenschaften, ebenso der Politikberatung abschwören. Die ohnehin durch die Diversifikation der Wissenschaft selbst gefährdete Ganzheit der Wissenschaft solle nun also auch von Staats wegen aufgegeben und dem Zeitgeist geopfert werden.

Würde die Wissenschaftslandschaft weniger als anscheinend regellose Anhäufung einzelner Komponenten, sondern mehr als "virtuelles" Netzwerk erkannt worden sein, hätte eine sorgfältigere Analyse aller seiner Komponenten gewiss zu anderen Schlussfolgerungen führen können. Der Auftrag des Staates – genauer wohl: des jeweiligen Bundeslandes – an die Universitäten und Hochschulen besteht doch darin, Wissen an die Lernenden grundsätzlich disziplinär strukturiert zu vermitteln. Indes besteht der selbst gestellte Auftrag der Wissenschaftsakademien – sofern sich diese dem Leibnizschen Konzept verpflichtet fühlen – im Erkennen, Diskutieren und Bearbeiten interdisziplinärer Probleme, im Verknüpfen der gelehrten und praktizierten Disziplinen zum ganzen Gebäude der Wissenschaft. Hie das Ganze in seinen Teilen, da die Teile als Ganzes. Mithin folgen beide im Organisieren ihrer Tätigkeit sich gegenseitig ergänzenden und daher unverzichtbaren Strukturprinzipien. Also zwei eigenständige, zur Kooperation aufgeforderte Exzellenzen!

In einem Schreiben an Jablonski vom 12. März 1700 lässt Leibniz erkennen, dass es der Sozietät

"...neben dem Observatorio auch ein Laboratorium, samt allerhand Kunst-Wercken; zu geschweigen des übrigen physici apparatus, daran denn bey eines grossen Potentaten Hof nicht wohl ermangeln kann. Solte nun gleich anfangs die Sache nicht in dieser Extension zu exequiren seyn, so müste doch um der Reputation willen das Concept also gefasset werden, damit man sich vorsetze einen scopum dignum magnitudine & gloria fundatoris."

Dieses Ziel blieb jedoch langwährend gefälliges Hoffen – mehr oder minder für alle Wissenschaftsakademien deutscher Lande.

Ironie der Geschichte mag sein, dass das von Leibniz erdachte Organisationsideal einer Sozietät – gleichwohl Gelehrtengesellschaft und Forschungsstätte zu sein – in Europa erstmals mit der Eröffnung der Petersburger Akademie der Wissenschaften im Jahr 1725 durch Katharina I., der Vollstreckerin des Reformwillens Peter I., zur Realität erwuchs. A priori fiel dieser Akademie im Staate eine Monopolstellung zu, die mit der Gründung der

Sowjetunion, definitiv aber im Jahr 1925 auf die "Akademie der Wissenschaften der Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken" übertragen, nach dem Zweiten Weltkrieg in alle sozialistisch genannten Länder exportiert wurde und sich auf diesem Weg im Osten Deutschlands seit dem 7. Oktober 1972 als "Akademie der Wissenschaften der DDR" manifestierte.

Charakteristikum solcherart zentralstaatlicher Wissenschaftsakademien war deren Überfrachtung durch Aufträge unterschiedlichster Provenienz – nicht zuletzt aus der Industrie – mit einer disproportionalen Vergrößerung des Forschungspotentials unter einem Dach, also einer zunehmenden Verfremdung und Hypertrophierung des Leibnizschen Konzepts als Konsequenz. Beispielsweise verfügte die Akademie der Wissenschaften der DDR im Jahr 1990 – neben ihrer aus 250 Mitgliedern bestehenden Gelehrtensozietät – über einen Verbund von nahezu 100 Forschungsinstituten und Service-Einrichtungen mit insgesamt etwa 25.000 Mitarbeitern. Das Resultat: Hie Osten, da Westen – und Leibniz dazwischen.

Das Ende der DDR und die Bestimmungen des so genannten Einigungsvertrages vom 31. August 1990 trennte die seit 1700 tätige Gelehrtensozietät von diesem Verbund und reduzierte die Akademie der Wissenschaften der DDR per Gesetz vom 23. September 1990 auf einen Zustand, der dem der "alt"-bundesdeutschen, im öffentlichen Bewusstsein längst als reformbedürftig erkannten Wissenschaftsakademien entsprechen sollte. Artikel 38, Absatz 2 des Einigungsvertrages legte dazu fest:

"Mit dem Wirksamwerden des Beitritts wird die Akademie der Wissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik als Gelehrtensozietät von den Forschungsinstituten und sonstigen Einrichtungen getrennt. Die Entscheidung wie die Gelehrtensozietät der Akademie der Wissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik fortgeführt werden soll, wird landesrechtlich getroffen..."

Kein Zweifel: Nicht ob, sondern wie die Gelehrtensozietät fortgeführt wird, sollte landesrechtlich entschieden werden.

### Reformation als Alternative

Der damalige Berliner Senat glaubte indes über dem Gesetz stehen zu dürfen und entschied, die Gelehrtensozietät nicht fortzuführen. Vielmehr wurde auf der Grundlage eines zwischen den Bundesländern Berlin und Brandenburg abgeschlossenen Staatsvertrages am 1. August 1992 eine ausdrücklich als "neu" bezeichnete, vom Staat alimentierte Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften gegründet und in die Union der bundesdeutschen

Wissenschaftsakademien aufgenommen. Die "Neuheit" dieser Akademie bestand darin, die personelle Kontinuität und Tradition einer der ältesten deutschen Gelehrtengesellschaften aufzugeben sowie über deren Vermögen verfügen zu dürfen. Eine in der deutschen Wissenschaftslandschaft historisch einmalige Zäsur.

Anders als von der Landespolitik vorgesehen, hat sich jedoch ein Großteil der "alten" Gelehrtensozietät derlei Willkür widersetzt: Seit dem 15. April 1993 führt die Gelehrtensozietät der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR als "Leibniz-Sozietät e.V." im ausdrücklichen Bekennen zu ihrer ungebrochenen, wenngleich unsteten Geschichte die Arbeit fort – nunmehr als gemeinnütziger Verein juristisch neu verfasst. Die Anzahl der Klassen wurde auf zwei – eine mathematisch-naturwissenschaftliche sowie eine geistes- und sozialwissenschaftliche – begrenzt. Damit waren erste Voraussetzungen gegeben, wieder im Leibnizschen Sinne tätig werden zu können.

Diese Begrenzung war jedoch nur eine notwendige, keinesfalls hinreichende Voraussetzung für die deklarierte Verwandtschaft mit Leibniz. Entscheidende Voraussetzung für die Wahrung der aus jener Willkür geborenen Chance, eine Lücke in der bundesdeutschen Wissenschaftslandschaft schließen zu können, ist jedoch die Dominanz ganzheitlicher Denk- und Handlungsweisen, ist das Streben nach allgemeinverständlicher Darstellung selbst erworbener wissenschaftlicher Erkenntnisse über die Grenzen der eigenen Disziplin und Klasse hinweg und endlich – wegen der unverzichtbaren Rezeption und Reflexion fremder Erfahrungs- und Wissensareale – die Allgemeinbildung des Generalisten. Voraussetzung ist gleichwohl, die Selbstverständigung innerhalb der Leibniz-Sozietät als Mittel zu dem Zweck zu gebrauchen, mit neuen, praktisch verwertbaren Erkenntnissen aktiv auf die verschiedenen Bereiche der Gesellschaft hin- und rückwirken zu wollen.

"Wäre demnach der Zweck theoriam cum praxi zu vereinigen, und nicht allein die Künste und die Wissenschaften, sondern auch Land und Leute, Feldbau, Manufacturen und Commercien, und, mit einem Wort die Nahrungsmittel zu verbessern…"

fordert Leibniz in der bereits erwähnten Denkschrift vom März des Jahres 1700.

Einem solchen Zweck verpflichtet, hat sich die Leibniz-Sozietät den Umständen zu stellen, die ihr ein zeitgemäßes Wirken ermöglichen. Historische Bezüge dürfen sich dabei nicht selbst genügen, sondern müssen den Weg aus Vergangenheit und Gegenwart in eine bewusst zu gestaltende Zukunft weisen. Die Umstände werden heute durch regionale, nationale und globale Dis-

kussionen existentieller Probleme der Menschheit beschrieben, sind also extrem komplexen, d.h. disziplin- und raumzeitübergreifenden Charakters: Frieden, Klima, Energie, Wasser, Ernährung, Bevölkerung. Interdisziplinäre Konzepte, interinstitutionelles Handeln erwachsen daher einer Gelehrtengesellschaft zur Pflicht, spezifische Beiträge zur Bearbeitung und Lösung der genannten Probleme zu leisten.

Zu diesen Umständen zählt auch – und in besonderem Maße – dass die Leibniz-Sozietät, als gemeinnützige und deshalb nicht oder kaum alimentierte Institution, weitgehend vom Staat unabhängig agieren kann und damit der von Humboldt in seiner Denkschrift beschriebenen Stellung einer Akademie im Gefüge des Staates nahe kommt.

"Auf diese Weise muß die Idee einer Akademie als die höchste und letzte Freistätte der Wissenschaft und die vom Staate am meisten unabhängige Corporation festgehalten werden, und man muß es einmal auf die Gefahr ankommen lassen, ob eine solche Corporation durch zu geringe oder einseitige Thätigkeit beweisen wird, dass das Rechte nicht immer am leichtesten unter den günstigsten äußeren Bedingungen zu Stande kommt oder nicht."

Als solcherart Souverän ist die Leibniz-Sozietät in der – wenngleich finanziell ungewöhnlich kargen – so doch intellektuell komfortablen Situation, ausschließlich im Eigenauftrag tätig sein zu können. Diese Tätigkeit darf sich jedoch nicht in endlosen akademischen Diskussionen über eine beliebige Auswahl jener "Weltprobleme" innerhalb eines geschlossenen Zirkels erschöpfen, sondern muss – als notwendiges Korrektiv – den Austausch mit der gesellschaftlichen Praxis suchen und nutzen, beispielsweise mit der Wirtschaft, mit der Politik. Unter "Austausch" ist sowohl das metasprachlich verständlich formulierte Angebot im interdisziplinären Dialog entstandener neuer Erkenntnisse *an die Praxis*, wie umgekehrt die gleichermaßen verständliche Aufforderung zum interdisziplinären Dialog *aus der Praxis* gemeint. Dabei darf der Vielfalt zweckmäßiger Umgangsformen keine Grenze gesetzt sein.

Wegen des unbedingten Erhalts ihrer Unabhängigkeit, aber auch wegen der für eine Annäherung derart unterschiedlicher Herkunfts- und Erfahrungsbereiche zu schaffenden Voraussetzungen, bedarf die Leibniz-Sozietät (die im Jahr 2007 mehr als 300 Mitglieder nationaler und internationaler Reputation zählen und sich "Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V." nennen wird) eines Partners, der zwischen Wissenschaft und Praxis zu vermitteln vermag. Somit eines Treuhänders, der sich als Initiator, Organisator und Koordinator versteht.

### Das Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien (LIFIS)

Ausgehend von Diskussionen über die bis dato unzureichende Wahrnehmung und Wirkung der Leibniz-Sozietät in der Öffentlichkeit, empfahl das Präsidium der Sozietät am 10.05.2001, ein juristisch eigenständiges "Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien" zu projektieren, dessen wissenschaftliche Betreuung durch die Sozietät erfolgen solle. Mit der Ausarbeitung eines entscheidungsreifen Konzepts wurde eine Arbeitsgruppe beauftragt, die sich am 31.05.2001 konstituierte, zunächst aus Mitgliedern des Präsidiums bestand, aber im weiteren Verlauf durch Vertreter der Praxis erweitert wurde.

Bereits nach der 1. Sitzung kam die Arbeitsgruppe zum Schluss,

"dass die Gründung des Instituts ein wesentlicher Schritt zur Beteiligung der Leibniz-Sozietät an der Lösung praxisnaher wissenschaftlicher Probleme, zur Reaktivierung des erheblichen, in der Sozietät vorhandenen intellektuellen Potentials, zur Aktualisierung des von ihrem Gründer, Gottfried Wilhelm Leibniz, erstrebten Zieles "gleich anfangs theoria cum praxi zu verbinden", mithin zur Aufhellung der gegenwärtigen Diskussion um den Sinn einer Akademie sein könnte."

Wegen der im Vergleich zu anderen ostdeutschen Bundesländern im Freistaat Sachsen prosperierenden mittelständischen Wirtschaft wurde als Sitz des zukünftigen Instituts Schloss Augustusburg favorisiert. Für Augustusburg sprach darüber hinaus, die Jahre zuvor vom Mitglied der Leibniz-Sozietät, Gerd Laßner, initiierten "Augustusburg-Konferenzen" übernehmen und weiterentwickeln zu können, sowie eine für die erkennbare EU-Erweiterung (und damit zukünftig grenzüberschreitende Kooperation) geopolitisch günstige Lage im sächsisch-tschechisch-polnischen Länderdreieck.

In den folgenden drei Sitzungen wurden u.a. als eine der angemessenen Rechtsformen des Instituts die eines gemeinnützigen, von der Leibniz-Sozietät juristisch unabhängigen Vereins vorgeschlagen, erste Vorstellungen zur Aufgabenstellung sowie Entwürfe einer Satzung des Instituts beraten, Abstimmungen im Präsidium der Leibniz-Sozietät, mit Vertretern von Stadt und Region Augustusburg sowie der sächsischen Staatsregierung absolviert. Als Vorgriff auf zukünftige Vorhaben kamen Arbeitsgruppe und Leibniz- Sozietät überein, die zum Thema "Nanotechnologie" für September 2002 vorgesehene 7. Augustusburg-Konferenz bereits als gemeinsame Veranstaltung zu realisieren.

Am 3. Mai 2002 wurde dann – wie eingangs vermerkt – das Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e.V. von 12 anwesenden Personen in Berlin gegründet. Heute, im Jahr 2007, gehören dem Institut 20 Einzelpersönlichkei-

ten aus Wissenschaft und Wirtschaft an sowie, als sogenannte Netzwerkmitglieder, Korporationen wie BioCon Valley e.V., der Bundesverband Deutscher Innovations-, Technologie- und Gründerzentren e.V. (ADT), die Europäische Vereinigung für Erneuerbare Energien e.V. (EUROSOLAR) und die Gesellschaft zur Förderung von Wissenschaft und Wirtschaft e.V. (GFWW). Überdies besteht zwischen Leibniz-Sozietät und Leibniz-Institut seit dem 28. April 2005 eine Kooperationsvereinbarung, die das partnerschaftliche Zusammenwirken beider Einrichtungen formal regelt.

Hauptsächlicher Zweck des Instituts ist, zwischen der Leibniz-Sozietät, der Wissenschaft im allgemeinen sowie anderen Bereichen der Gesellschaft – im besonderen der Wirtschaft – praxisrelevante Beziehungen zu initiieren und zu fördern. Wegen der zunehmenden Komplexität der bereits zitierten "Weltprobleme" setzt dieser Zweck ausdrücklich die Initiierung und Förderung des interdisziplinären Dialogs innerhalb der Wissenschaft – d.h. von Natur-, Technik- und Geistes- sowie Sozialwissenschaften – voraus.

Das Institut ist keine Forschungseinrichtung im herkömmlichen Sinn, sondern will als "virtuelle" Institution anderen Orts verfügbare Potentiale motivieren, organisieren, koordinieren, also Netzwerke jeweils zweckentsprechender Kompetenz knüpfen. Diese Konstruktion mag eigenwillig erscheinen, weil sie weder den differenten Traditionen bundesdeutscher Wissenschaftsakademien entspricht, noch eine Restitution der überdimensionierten Forschungseinrichtungen der Akademie der Wissenschaften der DDR sein will – und nicht nur aus ökonomischen Gründen – sein kann.

Der Leser wird sich erinnern, dass – neben den Höheren Lehranstalten (gemeint sind hier die lehrenden Kompartiments der Universitäten und Hochschulen) und Akademien – von der Mannigfaltigkeit universitärer und außeruniversitärer Forschungseinrichtungen die Rede war. Deren Gesamtheit bildet in der deutschen Wissenschaftslandschaft ein Potential, das bei der Organisierung seiner Tätigkeit (beispielsweise zur Bearbeitung definierter Forschungsprojekte) eigenen, wegen der Heterogenität der Auftraggeber und Finanzierungsmodalitäten, vergleichsweise dynamischen Strukturprinzipien unterliegt und damit das System der Höheren Lehranstalten und Akademien als *dritte* Exzellenz auf besondere Weise komplettiert.

Ziel und gleichsam Methode des Leibniz-Instituts ist, diese vorzugsweise disziplinär ausgerichteten Forschungspotentiale in den interdisziplinären Dialog und die interdisziplinär ausgerichtete Bearbeitung komplexer Problemstellungen einzubeziehen. Dieser *erste* Schritt, ein *methodischer*, ist we-

sentliche Voraussetzung, den Leibnizschen Entwurf einer societas scientiarium für die Gegenwart und eine absehbare Zukunft zu adaptieren.

Seit Gründung hat sich das inzwischen mit der Kurzbezeichnung LIFIS eingeführte Institut auf diesem Weg folgenden Themenkomplexen zugewandt:

- Mikro- und Nanostrukturen und -systeme,
- Neue Materialien,
- Innovative Energiewandlung und -nutzung ("Solarzeitalter"),
- Innovative Stoffwandlung und -nutzung,
- Informatik/Logistik,
- Klima- und Umweltschutz.

Von den dabei bislang erprobten Kooperationsformen hat sich die Fortführung und der Ausbau der "Augustusburg-Konferenzen" als produktives Forum der gegenseitigen Verständigung und Problemdiskussion am ehesten bewährt. Fanden diese Konferenzen zunächst noch auf Schloss Augustusburg statt, genügte die dort vorhandene Infrastruktur bald nicht mehr dem wachsenden Zuspruch. Daher wurde der Sitz des LIFIS im Mai 2005 auf Schloss Lichtenwalde nahe Chemnitz und damit in die direkte Nachbarschaft einer modernen Tagungsstätte verlegt. Seither finden die Konferenzen unter der neuen Bezeichnung "Leibniz-Konferenzen" (Leibniz Conferences of Advanced Science) ihre Fortsetzung.

- 7. Augustusburg-Konferenz "Nanotechnologie" 05.–07. September 2002
- 8. Augustusburg-Konferenz "Solarzeitalter Vision oder Realität" 11.–13. September 2003
- 9. Augustusburg-Konferenz "Siliciumzeitalter Silicium für Mikroelektronik, Photovoltaik und Photonik"
  - 22.-25. September 2004
- 1. Leibniz-Konferenz "Nanoscience 2005" 06.–08. Oktober 2005
- 2. Leibniz-Konferenz "Solarzeitalter 2006 Stoffproduktion im Solarzeitalter"
  - 11.-13. Mai 2006
- 3. Leibniz-Konferenz "Sensorsysteme 2006 Stand der Forschung, Konsequenzen für die Gesellschaft"
  - 12.-14. Oktober 2006
- 4. Leibniz-Konferenz "Logistik 2007 Technik, Organisation und IT" 03.–05. Mai 2007.

Die Konferenzen haben sich zunehmend als geeignet erwiesen, über tradierte Grenzen hinweg, neue Allianzen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, aber auch innerhalb der Wissenschaft selbst zu bilden. Daher liegt nahe, in der Folge zukünftiger Konferenzen zu ausgewählten Problemen weiterführende Studien auszuarbeiten, die letztlich als Grundlagen für interdisziplinäre Gemeinschaftsprojekte dienen könnten.

In der nunmehr 5jährigen Tätigkeit des LIFIS wird allerdings deutlich, dass der Begriffsinhalt "Interdisziplinarität" nicht selten verkürzt verstanden und praktiziert wird. So fällt die Zurückhaltung der Geistes- und Sozialwissenschaftler auf, sich an rein naturwissenschaftlich oder technisch anmutenden Veranstaltungen – wie den oben genannten – aktiv zu beteiligen. Entweder wird die weitreichende Relevanz solcher Themen für die Zukunft der menschlichen Gesellschaft nicht erkannt, übersehen oder die von langjährigen Traditionen vorgezeichneten Spuren erscheinen als ungleich verlockender. Dieses Verhalten wird zudem durch die Wissenschaftspolitik – in einem Fall direkt (die Empfehlung des Wissenschaftsrates, die Akademien mögen sich der Naturwissenschaften entledigen), im anderen wohl eher indirekt (das für 2007 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ausgerufene "Jahr der Geisteswissenschaften") – kaum in Frage gestellt.

Wie aber kann über Forschung, Entwicklung, Herstellung, Anwendung und mögliche Konsequenzen von Nanostrukturen, Sensorsystemen diskutiert, wie über zukünftige Energiewandlung und -nutzung konstruktiv gestritten werden, ohne – und nicht nur ausnahmsweise – der Mitsprache von Philosophen, Ethikern, Soziologen, Psychologen, Wirtschafts-, Rechtswissenschaftlern und anderen gewiss zu sein?

Von "Interdisziplinarität" im Sinne einer ganzheitlichen Erkundung der Welt zu sprechen – und dies ist ja die vornehmste Aufgabe der Wissenschaft! – wird also erst dann berechtigt sein, wenn sich alle Zweige der Wissenschaft an der Suche nach Antworten beteiligen. Würde dieser Befund fortan die Tätigkeit aller "Akademiker" bestimmen, wäre der entscheidende *zweite*, ein *inhaltlicher* Schritt getan, den Leibnizschen Entwurf zu einer societas scientiarium den gegenwärtigen und absehbaren Existenzbedingungen anzupassen. Dann erst wäre eine Symbiose jener beiden Einrichtungen tatsächlich vollzogen und die Frage "Quo vadis?" erhielte eine (zunächst) gültige Antwort.

Die Wirtschaft interpretiert und praktiziert "Interdisziplinarität" nach den zunehmend irrationalen Regeln des "globalen" Marktes – bezogen auf Konkurrenzsituation, Bedarf, Produkt und Rentabilität, mit jeweils verfügbaren,

opportun oder adäquat erscheinenden Teilen des Großen und Ganzen, zudem befristet. Und damit ohne sich selbst Antworten auf die komplexen Fragen über die Folgen ihrer Geschäfte geben zu wollen oder geben zu können. Bliebe hier die Wissenschaft mit dem Blick auf das Ganze als kritisch-konstruktiver Partner vorausschauende Antworten schuldig, wäre der Leibnizsche Imperativ "Theoria cum praxi" alsbald zur Disposition gestellt.

### Literatur

- Conrad Grau, Berühmte Wissenschaftsakademien. Von ihrem Entstehen und ihrem weltweiten Erfolg. Leipzig 1988.
- Conrad Grau, Preußische Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Eine Deutsche Gelehrtengesellschaft in drei Jahrhunderten. Heidelberg-Berlin-Oxford 1993.
- Conrad Grau, Der Akademiegedanke in Berlin nach 1945 aus wissenschaftshistorischer Sicht. Erweiterte Fassung eines Vortrags vor dem Plenum der Gelehrtensozietät (der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR) am 17. Oktober 1991. Als Manuskript veröffentlicht.
- Werner Hartkopf und Gert Wangermann, Dokumente zur Geschichte der Berliner Akademie der Wissenschaften. Von 1700 bis 1990. Heidelberg-Berlin-New York 1991
- Herbert Hörz (Hrsg.), Akademien in Zeiten des Umbruchs. Wissenschaftliches Kolloquium aus Anlass des 70. Geburtstages von Horst Klinkmann. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Jahrgang 2005, Band 81. Berlin 2005.
- Horst Klinkmann und Herbert Wöltge (Hrsg.), 1992 Das verdrängte Jahr. Dokumente und Kommentare zur Geschichte der Gelehrtensozietät der Akademie der Wissenschaften für das Jahr 1992. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät, Band 2. Berlin 1999.
- Günter Kröber und Bernhard Lange (Hrsg.), Sowjetmacht und Wissenschaft. Dokumente zur Rolle Lenins bei der Entwicklung der Akademie der Wissenschaften. Dokumente Nr. 41 und 42, S. 135-142 und 399-402. Berlin 1975.
- Werner Scheler, Von der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin zur Akademie der Wissenschaften der DDR. Abriß zur Genese und Transformation der Akademie. Berlin 2000.
- Gert Wangermann, Zur Entwicklung der Akademie der Wissenschaften der DDR. Analysen und Vorschläge, unveröffentlichtes Manuskript, 1990, Archiv der BBAW, VA 13045
- Gert Wangermann, Wissenschaftsakademien im westöstlichen Europa. Spektrum der Wissenschaft. Januar 1992, S. 135 ff.

http://www.bmbf.de/de/7189.php

http://www.leibniz-institut.de

http://www.wissenschaftsrat.de/Aufgaben/texte/6129-04.pdf

### Hermann Scheer

### Energie - Neu denken!

Unter einem "Zeitalter" wird im allgemeinen etwas vorübergehendes – eine aufkommende und dann wieder vergehende Epoche – verstanden, die von einem besonderen Merkmal entscheidend geprägt ist. "Solarzeitalter" bedeutet demnach, dass der Ressourcenbedarf der Menschheit weit überwiegend von der Sonnenenergie gedeckt wird.

Wenn diese greifbare Option in ihrem vollen möglichen Umfang realisiert wird, spricht jedoch alles dafür, dass dies eine tatsächlich dauerhafte und damit endgültige Energiebereitstellung sein wird. Insofern ist der Begriff "Solarzeitalter" präzise in der Beschreibung seines Zielhorizonts, aber unpräzise in der Beschreibung seines Zeithorizonts. Einmal durchgesetzt, wird "Solarzeitalter" zum Synonym einer Wirtschaftsweise werden, die dem häufig missbrauchten Wort Nachhaltigkeit wirklich gerecht wird.

In der Geschichte wurde immer nur dann nach neuen Energiequellen gesucht, wenn die Verfügbarkeit der jeweils gerade genutzten Energiequellen absehbar nicht mehr zu gewährleisten war, sei es aus Kostengründen, aus prinzipiellen Potentialgründen oder wegen nicht tragbarer Risiken. Weil fossile Energien sich in naher Zukunft erschöpfen, wird das "fossile Zeitalter" zu Ende gehen, das sich im Laufe des 19. Jahrhunderts durchzusetzen begann. Aus Kostengründen wird es höchstwahrscheinlich spätestens dann zu Ende sein, wenn die konventionellen fossilen Energiequellen ausgebeutet sind gemessen am jeweils gegenwärtigen Verbrauch bei Erdöl in etwa 40, bei Erdgas in etwa 60 und bei Kohle in wenig mehr als in 100 Jahren. Die sogenannten nicht konventionellen fossilen Quellen – die Ölsände und -schiefer oder die Methanblasen in den Ozeantiefen - werden dermaßen kostspielig zu fördern sein, dass sie schon den wirtschaftlichen Vergleich mit den sich ständig verbilligenden solaren Energietechniken nicht bestehen würden. Wegen der eklatanten Gefahren für das Weltklima muss die Ablösung der konventionellen fossilen Energien früher erfolgen als es von der statistischen Reichweite her erforderlich wäre. Der Endverbrauch der fossilen Energiequellen ist ökologisch nicht zu verantworten.

24 Hermann Scheer

Das "Atomzeitalter" wurde in den 50er Jahren bereits ausgerufen, als gerade einmal einige Versuchsreaktoren in Betrieb waren. Die goldene Verhei-Bung: Energie für alle Zeiten. Ein halbes Jahrhundert später wissen wir, dass dieses Versprechen nicht nur verfrüht war, sondern auch kaum eingehalten werden kann, vor allem gar nicht eingehalten werden darf. Gedacht war daran, zunächst die Atomspaltungsreaktoren bereitzustellen, dann die Wiederaufarbeitungsanlagen und Schnellen Brüter, um die Verfügbarkeit des atomaren Spaltmaterials zu verlängern, und schließlich bei der Atomfusion zu landen, um in Reaktoren auf der Erde den Fusionsprozess im Sonnensvstem zu kopieren. Schon beim Einsatz der Atomspaltungsreaktoren ist diese Entwicklung abgebrochen worden, so dass schon wegen begrenzter Verfügbarkeit von Uranerz die Atomkraftwerke eine vorübergehende Erscheinung wären. Dass in den USA – auch ohne Ausstiegsbeschluss – seit 1973 kein neuer Atomreaktor mehr gebaut wurde und auch kein neuer in Sichtweite ist. indiziert noch deutlicher als das deutsche Ausstiegsziel das nahende "Aus" der Atomenergiewirtschaft. Selbst Frankreich hat seinen Schnellen Brutreaktor nach weniger als 200 Tagen Betriebszeit definitiv abgeschaltet. Und dass jahrzehntelang versucht wurde (und immer noch wird), Atomfusionsreaktoren zu entwickeln, statt die Fusionsenergie der Sonne in einem Sicherheitsabstand von 150 Millionen Kilometer von der Erde direkt zu nutzen, wird bei künftigen Rückbetrachtungen nur noch Kopfschütteln hervorrufen. Selbst für den höchst unwahrscheinlichen Fall, dass noch fünf weitere Jahrzehnte zweistellige Milliardenbeträge aus Staatshaushalten bereitgestellt würden und dann tatsächlich betriebsfähige Fusionsreaktoren bereitstünden, steht die Aussage von M. L. Lidsky im Raum, dem ehemaligen Leiter des Plasma-Fusions-Zentrums des MIT: "If the fusion program produces a reactor, no one will want it." Nur Traumtänzer oder betriebsblinde Wissenschaftler, die zu lange von und mit der Atomenergie lebten, haben noch nicht gemerkt, dass vom atomaren Traum nur noch ein Alptraum übrig geblieben ist.

Allein die direkte Nutzung der Sonnenenergie kann tatsächlich einlösen, was die Atomkraft versprochen hat – der Sonnenwärme, des Sonnenlichts und deren direkter Derivate der Wind- und Wellenkraft, der Biomasse, der Laufwasserkraft, der Luft-, Boden- und Wasserwärme. Sie ist unerschöpflich, solange das Sonnensystem existiert, also für den gesamten Zeithorizont unseres Planeten. Sie ist bei globaler Betrachtung risikofrei; höchstens können Großwasserkraftwerke Naturzerstörung und der Einsatz von Biomasse regional begrenzte Emissionen neu zur Folge haben. Wenn es um das solare Element der Biomasse als Energieträger geht, ist allerdings die zwingende Voraussetzung der Risikolosigkeit, dass diese mit ökologischen Anbau- und

Erntemethoden genutzt wird. Da alle Kosten, mit Ausnahme der Nutzung der Biomasse, durch die Bereitstellung der Energiewandlertechniken entstehen, werden die Kosten ständig sinken. Ein weiteres Entwicklungsmerkmal der Sonnenenergietechniken ist, dass sie für den Anwender – im Gegensatz zu den meisten konventionellen Energietechniken – laufend weniger komplex und damit einfacher handhabbar werden (siehe Tabelle).

	Fossile Energien	Nicht kon- ventionelle Energien	Atomspaltung	Atomfusion	Erneuer- bare Ener- gien
Potential	begrenzt	begrenzt	begrenzt	nahezu unbe- grenzt	unbegrenzt
Bereit- stellungs- kosten	relativ niedrig	hoch	relativ niedrig	extrem hoch	kontinuier- lich sinkend
Risiken	extrem (Klimaveränderungen, Gesundheitsschäden, Ressourcenkriege	sehr extrem (zusätzliches Risiko: schwere Abbauschä- den	sehr extrem (Unfallgefahren, atomare Müllhypo- thek, Verbrei- tung von Atomwaffen)	sehr extrem (atomare Müllhypo- thek, Super- zentralismus mit existenzi- ellen Abhän- gigkeiten)	keine

Deshalb wird das technische Solarzeitalter das atomare und das fossile Zeitalter ablösen, das einst das vortechnische Solarzeitalter abgelöst hat. Wegen der Eigenschaften der Erneuerbaren Energien – unbegrenzte und breit gestreute Verfügbarkeit eines Potentials, das jährlich dem 15.000fachen des atomar/fossilen Jahresverbrauchs entspricht, der relativen Risikolosigkeit und der laufend sinkenden Kosten – wird es dann keinen Bedarf nach weiteren Energieträgern mehr geben. Die bewusste und auf alle unterschiedlichen Energiebedürfnisse bezogene Sonnenenergienutzung wird also, einmal etabliert, keine vorübergehende Erscheinung sein. Der Zeithorizont des Solarzeitalters ist identisch mit der Existenz des Sonnenenergiesystems – also noch etwa fünf Milliarden Jahre – und damit mit dem Zeithorizont allen natürlichen Lebens auf der Erde oder aller anderen für uns erreichbaren Planeten.

Trotz dieses Zeithorizonts von erdgeschichtlichem Ausmaß befinden wir uns mittlerweile in einem Wettlauf mit der Zeit. Die Durchsetzung des Solarzeitalters ist *die* entscheidende Jahrhundertaufgabe. Wird sie weiter aufge26 Hermann Scheer

schoben, was im 20. Jahrhundert ein eher unbewusstes Jahrhundertversäumnis war, so drohen im 21. Jahrhundert bewusst in Kauf genommene Superkatastrophen. Die Gefahr existenzieller Energiekriegen wächst bereits in den nächsten Jahrzehnten dramatisch, ebenso wie die expandierender Sozialkatastrophen sowohl in den energiefressenden Megastädten wie in der energiebedürftigen Dritten Welt. Wer die Ablösung atomar/fossiler durch solare Energiequellen aufschiebt, der hat zu verantworten, dass ökologische Großkatastrophen (von denen allein im Jahr 1998 700 gezählt wurden, von denen die meisten ihre Ursache im Energieverbrauch haben) häufiger werden und immer mehr Opfer fordern.

Die Gegenwart ist jedoch immer noch geprägt von einem Bewusstsein politischer und wirtschaftlicher Entscheidungsträger und von wissenschaftlichen Experten, die den Verzicht auf die atomar/fossilen Energieträger für "nicht machbar" erklären und diese Vorbehalte in die Medien und ins öffentliche Bewusstsein streuen. Für "machbar" halten sie zwar den Bau von Fusionsreaktoren, die Urbarmachung des Mars, die gezielte Ausschaltung anfliegender Raketen im Weltraum, das Klonen oder die Implantierung der Mikroelektronik in das Gehirn von Menschen, die Ausbeutung von Rohstoffen unter den Ozeangründen, aber nicht die Mobilisierung der bereits funktionsfähigen Solartechniken für alle Energiebedürfnisse der Menschen. Schon dies zeigt: Die Vorbehalte gegen die Machbarkeit des Solarzeitalters sind kultivierte Vorurteile. Dabei kann die Solartechnik schon heute die Energiebedürfnisse vollständig abdecken:

- Bekanntlich werden in Deutschland 40 Prozent der Energie in Gebäuden verbraucht. Häuser, die ohne Mehrkosten allein mit Sonnenenergie versorgt werden können, gibt es bereits. Es sprechen also weder Potentialnoch Wirtschaftlichkeitsgründe dagegen, im Laufe der nächsten Jahrzehnte 40 Prozent des konventionellen Energieverbrauchs durch solares Bauen zu ersetzen.
- Die Stromerzeugungskapazitäten Chinas liegen bei knapp 300.000 Megawatt, davon etwa zwei Drittel Kohlekraftwerke und ein Drittel Wasserkraftwerke. Allein die Ersetzung von 200.000 MW Kohlekraftkapazität durch Windkraft erfordert die Installation von 300.000 MW Windkraft, was ungefähr 450.000 Anlagen mit einer Kapazität von je 1,5 MW voraussetzt. Es entspräche der Installation von einer Windkraftanlage pro 20 qkm auf dem chinesischen Territorium. Die dafür erforderlichen Produktionskapazitäten für Windgeneratoren würden der deutschen Jahresproduktion für Automotoren entsprechen. Ein unlösbares Problem in den

nächsten Jahrzehnten ist das nicht. Da der Energiebedarf Chinas steigt, wäre es auch ohne weiteres denkbar, das Windenergiepotential noch weiter auszubauen. Ebenso selbstverständlich ließen sich dort auch die anderen solaren Optionen praktisch verfolgen – von der Photovoltaik bis zur solarthermischen Stromerzeugung oder der Elektrifizierung der Biomasse und der Mobilisierung der Nutzung der Kleinwasserkraft.

• Neben dem Bedarf an Elektrizität wächst weltweit auch der Bedarf an Treibstoffen. Gerade auf diesem Gebiet gibt es vielfältige Alternativoptionen aus solaren Energiequellen: Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff (nicht unbedingt mit dem Strom aus solaren Großkraftwerken, sondern aus zahlreichen dezentralen Stromerzeugungsanlagen), aus der Synthetisierung von Wasserstoff und pflanzlichen Kohlenstoffen zu leicht handhabbarem Biobenzin, aus vergaster Biomasse (Methanol) oder aus Bio-Alkohol (Ethanol). Die photosynthetische Jahresproduktion der globalen Flora beträgt gegenwärtig 220 Millionen Tonnen Trockenmasse, also dem etwa 60fachen der Jahreserdölförderung.

Diese groben Hinweise zeigen lediglich einen Teil der solaren Potentiale auf. Sie sind schon deshalb nicht zu verwechseln mit einem realen Durchführungsprogramm, das sehr viel differenzierter wäre und selbstverständlich die Sparpotentiale durch Effizienzsteigerung und veränderte Energienutzungskulturen einbeziehen müsste – was die Durchsetzung des Solarzeitalters noch beschleunigen würde. Die Hindernisse gegen die Realisierung liegen weder in der Verfügbarkeit der Energiequellen noch in einer der Techniken. Sie sind ausschließlich mentaler Art, weswegen es noch an ausreichender Information und Ausbildung und damit Gestaltungsfantasie der dazu notwendigen Produktionskraft Mensch mangelt. Und sie sind struktureller Art, weil mit der Durchsetzung des Solarzeitalters das gesamte gegenwärtige globale Energieversorgungssystem mit seinen Infrastrukturen und Unternehmensformen zur Disposition stünde.

Die Energiewirtschaftsformen von heute sind nicht neutral gegenüber den verschiedenen Energieträgern. Sie sind zugeschnitten auf die Bereitstellung der fossilen und der atomaren Energie in deren spezifischen Energieflüssen, von den Bergwerken, den Erdöl- und Gasfeldern an relativ wenigen großen Fundstellen bis hin zu dem stets dezentralen Energieverbrauch. Sie schufen eine Weltzivilisation in konventionellen Energieketten und sind selbst deren Gefangene.

Die Energieflüsse der solaren Energien sind, außer im Fall der nahtlos in die etablierten Energieketten integrierten Großkraftpotentiale, völlig andere.

28 Hermann Scheer

Photovoltaische Stromerzeugung bedeutet zum Beispiel: Photonen kommen an der Solarzelle an, Strom verlässt sie – keine Bergwerke sind notwendig, kein Primärenergietransport, kein Energielager, keine Entsorgung von atomaren Brennstoffen oder Asche, und unter der Voraussetzung künftig verfügbarer neuer dezentraler Stromspeicher entfällt auch die Notwendigkeit des Stromtransports. Sie machen die gesamte Primärenergiewirtschaft der Erdöl-, Erdgas-, Kohle- und Uranförderer und deren Transporteure tendenziell überflüssig. Mit der Durchsetzung des Solarzeitalters wird atomar/fossile Primärenergie durch Technik ersetzt. Diese machen es möglich, auf die herkömmliche Energiebereitstellung mehr und mehr zu verzichten und die Energiegewinnung unmittelbar zu integrieren in die Räume der Energienutzung.

Industrielle Mobilisierung und Einführung Erneuerbarer Energien bedeutet, dass die konventionelle Energiebereitstellung laufend teurer werden muss, weil mit der dafür unabdingbar notwendigen Infrastruktur immer weniger Umsätze erzielt werden können – während die Erneuerbaren Energien durch Massenerzeugung der dafür notwendigen Techniken laufend kostengünstiger werden. Die Durchsetzung des Solarzeitalters ist also gleichbedeutend mit einer strukturellen Revolutionierung der Energiebereitstellung, die weit über die Transformation der Strukturen von industrieller Produktion und gewerblicher Dienstleistungen durch Mikroelektronik und Digitalisierung hinausgeht. Deshalb ist der Widerstand der etablierten Strukturen auch so viel hartnäckiger. Es bedeutet mehr als nur die Substituierung emissionsträchtiger konventioneller durch solare Energieträger.

Um die Chancen zu erkennen, muss deshalb über partielle Substitutionsvorgänge hinausgedacht werden. Die zahlreichen möglichen Zugänge und Einzelschritte ins Solarzeitalter habe ich in den Büchern "Sonnenstrategie" (1993) und "Solare Weltwirtschaft" (1999) zusammengefasst. Der generelle Weg ist der von wenigen Großanlagen zur Energiebereitstellung zu zahllosen Kleinanlagen und damit von wenigen Großinvestitionen zu zahllosen Kleininvestitionen, von der Fremdversorgung zu immer mehr Eigenversorgung, von Energieimporten zur Nutzung heimischer Energien. Im Feld der Wirtschaft ist es der Weg von der bisherigen Arbeitsteilung zwischen Energielieferant und technischer Energieumwandlung zu einer integrierten solaren Energiebereitstellung in entsprechend multifunktional gestalteten und operierenden Gebäuden, Produktionsanlagen und landwirtschaftlichen Produktion und Dienstleistungen, z.B. durch energetische Verwertung von Reststoffen und organischen Abfällen.

### Energie – Neu denken!

Statt die vielen Einzelschritte aufzuzeigen, nenne ich im folgenden die handlungsleitenden Maximen. Deren gemeinsame Prämisse ist, mit den Erneuerbaren Energien die Energiefrage neu denken zu müssen, um sie neu beantworten zu können.

#### Maxime 1:

Die Dimension einer vollständigen, nicht nur teilweisen Ablösung atomarer und fossiler Energien anvisieren

Die Möglichkeit der vollständigen Deckung der Energiebedürfnisse mit solaren Energiequellen ergibt sich aus dem überwältigend reichen und vielfältigen natürlichen Angebot und einem diesbezüglichen Technikoptimismus. Neben den vielen bereits angewandten Energiewandler- und Energienutzungstechniken für Erneuerbare Energien, wird es desto mehr weitere geben, je mehr Konstrukteure und Firmen sich damit beschäftigen. Schon mit den jetzt bekannten lässt sich ein voller solarer Deckungsbeitrag hochrechnen, mit einer simplen input-output-Rechnung bezüglich der Anlagenproduktion im Verhältnis zum Energiebedarf und zu den jeweiligen natürlichen regionalen Angebotsbedingungen. Gesamtrechnungen über die Kosten sind dabei eher ein Glasperlenspiel: Kein Ökonom ist in der Lage, die künftigen Kosten etwa der photovoltaischen Stromerzeugung vorauszusagen, weil er weder die unterschiedlich kostenwirksamen Anwendungen noch die Geschwindigkeit der Kostensenkungsschritte voraussehen kann, die durch Massenproduktion eintreten. Wenn die Gesellschaft und ihre Akteure die Möglichkeit eines vollen solaren Deckungsbeitrags im Auge hat, werden sich ihre politischen Akteure von der Zwangsvorstellung verabschieden, sie brauche auch auf lange Sicht weitere Großinvestitionen mit langer Kapitalbindung für konventionelle Energieanlagen. Je mehr unser Denken von dieser Vorstellung befreit ist, desto mehr Fantasie und Kreativität wird für die Durchsetzung des Solarzeitalters entstehen.

### Maxime 2:

Die geistige Beschränkung der Energiestatistiken aufbrechen

Die Energiestatistik, mit der der Rahmen der Energieversorgung abgesteckt wird und in der Alternativen großenteils ignoriert werden, ist prinzipiell unvollständig und deshalb wissenschaftlich höchst fragwürdig. Denn sie erfasst nur die kommerziellen Energieströme. Stromerzeugung, die nicht durch Stromnetze geht, wird damit z.B. ebenso wenig erfasst wie die gezielte Nut-

30 Hermann Scheer

zung der Solarwärme in Gebäuden, denen keine Öl- oder Gaslieferung vorausgeht. Selbst wenn der gesamte Gebäudebestand auf direkte Solarwärmenutzung umgestellt wäre, würde nach den heute üblichen Statistiken der absolute statistische Anteil der Sonnenenergienutzung nicht steigen. Sonnenenergienutzung basiert auf nicht kommerzialisierbaren solaren Energieströmen.

### Maxime 3:

Energiesysteme statt Energienanlagen kalkulieren

Der übliche energieökonomische Vergleich zwischen den Investitionskosten pro installierter Kilowattstunde ist analytisch ungenügend. Es ist stattdessen nötig, Energiesysteme miteinander zu vergleichen, also die gesamten Kosten für konventionelle Energie in ihrer langen Bereitstellungskette mit den Kosten für solare Energiebereitstellung ohne oder nur mit kurzer Bereitstellungskette. Daraus ergibt sich z.B., dass solare Inselversorgung in den Räumen der Dritten Welt, die keinen Anschluss an ein Stromnetz haben, heute schon selbst bei noch hohen Kosten der Photovoltaik-Technik weniger kosten als die konventionelle Stromversorgung, für die mit immensem Aufwand Überlandleitungen gelegt werden müssen. 70-80 Prozent der Kosten herkömmlicher Stromversorgung liegen außerhalb der eigentlichen Stromerzeugungskosten. In der Verdrängung dieser 70-80 Prozent liegt das Wirtschaftlichkeitspotential solarer Stromnutzung. Eine Photovoltaikfassade, die eine herkömmliche Fassade ersetzt, wird nicht mehr nach Kilowattstundenpreis richtig kalkuliert, sondern nach dem Quadratmeterpreis im Verhältnis zu konventionellen Fassadenkosten zuzüglich der solaren Stromgewinne.

#### Maxime 4:

Die Arbeitsteilung bisheriger Versorgungsbereiche überwinden

Die Vorstellung einer Substituierung konventioneller Energieträger durch Erneuerbare Energien muss über die bisher voneinander unabhängig betrachteten Versorgungsbereiche Wärme, Strom, Treibstoff und industrielle Prozessenergie hinaus denken. Die neuen Substitutionsvorgänge operieren anders, sie integrieren alle Felder der Energienutzung: Immer mehr Strom verbrauchende Geräte können künftig ihren Strombedarf durch integrierte Photovoltaik-Technik und Stromspeicher ohne Kabelanschluss selbst dekken, immer mehr Gebäude funktionieren ohne Netzanschluss. Aus Strom wird Treibstoff gewonnen mit Hilfe der Wasserstofftechnik, aus gespeicherter Solarwärme Strom mit Stirlingmotoren, aus Treibstoffderivaten Erneuerbare Energien wie Biogas oder Bioethanol wird Strom erzeugt mittels

Brennstoffzellen. Die Solarenergienutzung wird wirtschaftlich multifunktional und erschließt völlig neue Energiekalkulationen, weit über die verdrängten Infrastrukturkosten konventioneller Energien hinaus.

#### Maxime 5:

Das einzigartige Effizienzpotential der Erneuerbaren Energien nutzen

Dezentrale Anwendung und Nutzung Erneuerbarer Energien bedeutet, dass es immer weniger Überkapazitäten gibt. Die Energiebereitstellung erfolgt modular und ist à la carte möglich. Überschussenergie wird durch Dezentralität nutzbar. Mit neuen dezentralen Speichertechniken, insbesondere für Strom, entfällt die Notwendigkeit von Reservekapazitäten. Das dezentrale All-Lasten-Kleinkraftwerk ist keine Utopie mehr, es kann alle Lastgänge so bedienen wie ein Motor, der vom Leerlauf bis in den fünften Gang geschaltet wird. Mit der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien entfallen Kondensationskraftwerke, was deren gigantischen Wasserverbrauch gegenstandslos macht und die immer knapper werdende Ressource Wasser spart.

#### Maxime 6.

Für Erneuerbare Energien neue wirtschaftliche Träger motivieren

Da Erneuerbare Energien die Substitution atomar/fossiler Primärenergien durch solare Umwandlungstechniken bedeuten, ist die hoch konzentrierte Energiewirtschaft als Partner für den Wandel eher ein ungeeigneter als ein geeigneter Partner. Auch die Energiewirtschaft kann von der Rolle des Energiezu der des Techniklieferanten wechseln. Sie wird dies aber kaum mit der gebotenen Verve tun, um ihren Strukturen und Investitionen keine unliebsame Konkurrenz entstehen zu lassen. Prädestiniert sind daher vor allem die Industrien, die mit ihrem bisherigen Tätigkeitsprofil relativ nahe an den solaren Umwandlungstechniken sind: Die Motorenindustrie, die Glasindustrie, die Elektrogeräteindustrie, die Elektronikindustrie, die Maschinen- und Anlagenbauer, die landwirtschaftliche Geräteindustrie (für die Biomasse-Erntegeräte), und nicht zuletzt die Land- und Forstwirtschaft.

### Maxime 7:

Den Vorrang von Naturgesetzen vor Marktgesetzen respektieren

Die Liberalisierung der Energiemärkte bezieht sich auf die Überwindung der bisherigen Gebietsmonopolstrukturen. Obwohl die konventionellen Gebietsmonopole mit ihrem Anschluss- und Benutzungszwang ein zentrales Hindernis zur Einführung Erneuerbarer Energien durch die dafür notwendigen unabhängigen Betreiber waren, darf für diese nicht nur an freie Energiemärk-

32 Hermann Scheer

te gedacht werden. Erneuerbare Energien haben selbst dann, wenn überall die gleiche jeweils optimale Technik zur Energieumwandlung eingesetzt wird, immer unterschiedliche Kosten. Ihre Produktivität hängt von den jeweils unterschiedlich natürlichen Energieangeboten ab. Um ihr Potential im Bereich kommerzieller Energieangebote in voller Breite nutzen zu können, brauchen sie deshalb eine politisch zu definierende und zu legitimierende Preisfestsetzung, die im Zuge ihrer Einführung degressiv gestaltet, nach ihren unterschiedlich technischen Energieträgern und nach Regionen differenziert wird. Der Vorrang von unabänderlichen Naturgesetzen vor Markt- oder Plangesetzen ist zwingend. Für Erneuerbare Energien dürfen wir nicht in der Kategorie von Energiemärkten, sondern von Technikmärkten denken.

### Maxime 8:

In schnellerer Entwicklungsdynamik denken

Die bisherige Erfahrung, dass ein neuer Energieträger viele Jahrzehnte braucht, bis er sich durchgesetzt hat, gilt nicht für Erneuerbare Energien. Deren Bereitstellung braucht zwar viel neues Humankapital, aber sie erfordert nicht den Infrastrukturaufwand, der für die atomar/fossilen Energieketten nötig ist. Dies bedeutet: Die Durchsetzung Erneuerbarer Energien kann viel schneller erfolgen, als es die konventionellen Energieexperten annehmen. Es muss auch schneller gehen, um der Jahrhundertaufgabe gerecht zu werden. Sie werden, je unabhängiger sie von der überkommenen Energieinfrastruktur sind, auch aufgrund des niedrigen Bereitstellungsaufwands und ihrer Multifunktionalität schnell zu Kostenvorteilen gegenüber konventionellen Energieangeboten kommen.

### Literatur

Barry Commoner, Energieeinsatz und Wirtschaftskrise. Reinbek bei Hamburg 1977. Jean-Claude Debeir, Jean-Paul Deleage, Daniel Hémery, Prometheus auf der Titanic. Geschichte der Energiesysteme. Frankfurt 1989.

Walt Patterson, Transforming Electricity. London 1999.

Hermann Scheer, Sonnen-Strategie. Politik ohne Alternative. München 1993, 8. Auflage 1999.

Hermann Scheer, Solare Weltwirtschaft. Strategie für die ökologische Moderne. München 1999, 4. Auflage 2000.

Vaclav Smil, Energy in World History. Boulder/Colorado 1994.

Klaus Traube/Hermann Scheer, Kernspaltung, Kernfusion, Sonnenenergie – Stadien eines Lernprozesses. Solarzeitalter Nr. 2/1998, S. 22 ff.

### Gerhard Öhlmann

### Solarzeitalter - Auf dem Weg zur Realität

Unter dem Titel "Solarzeitalter – Vision oder Realität" initiierte die Leibniz-Sozietät im Jahre 2003 eine Konferenz, die im September des gleichen Jahres auf Schloss Augustusburg stattfand. Ihr Erfolg und die wachsende Aktualität der auf ihr diskutierten Probleme veranlasste den Vorstand des Leibniz Instituts für interdisziplinäre Studien e.V., das Thema Solarzeitalter mit einer zweiten Konferenz im Mai 2006 in Lichtenwalde fortzusetzen. Das Institut beabsichtigt hieraus eine Konferenz-Reihe entstehen zu lassen, mit der es unter Nutzung des Potenzials der Wissenschaftler der Leibniz-Sozietät und darüber hinaus einen Beitrag zur Bewältigung der großen Herausforderungen auf diesem Gebiet zu leisten hofft.

### Klimawandel und Klimaschutz

Beginnender Klimawandel als Folge anthropogen verursachter Zunahme der Konzentration der Treibhausgase (THG) in der Atmosphäre, die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartende Ressourcenerschöpfung, sowie der Verzicht auf Nutzung der zu risikoreichen Atomenergie, das sind die Kernprobleme, an denen sich die seit Jahren anhaltende, weltweite Diskussion über die Zukunft der Energieversorgung der Menschheit entzündete. Sie mündete schließlich in der von einer Mehrheit getragenen Erkenntnis, dass die menschliche Zivilisation nur dann Aussicht auf weitere Existenz und Entwicklung hat, wenn sie in den nächsten Jahrzehnten den notwendigen Wandel von der fossil-atomaren energetischen Basis zur umfassenden Nutzung erneuerbarer Energiequellen, und hierunter vor allem der Sonnenenergie in direkter oder indirekter Form vollzieht und ein neues Verhältnis zur Effizienz der Energieumwandlung und -Nutzung entwickelt.

Auf dem Wege dahin gab es und gibt es weltweit, in der Europäischen Union, in Deutschland viele Aktivitäten, kaum noch zu überblickende Konzeptionen und Szenarien der verschiedensten Institutionen und Räte, mehr oder weniger langfristige Pläne, Selbstverpflichtungen der Industrie, staatli-

34 Gerhard Öhlmann

che Verordnungen und Gesetze und dennoch ist festzustellen, dass der Fortschritt gemessen am Tempo der klimatischen Veränderungen nicht groß genug ist, ja in einigen Sektoren sogar Rückschritte in der Reduktion von THG zu verzeichnen sind.

Das gilt auch für Deutschland, das sich in der Öffentlichkeit gern als Vorreiter bei der Nutzung der erneuerbaren Energien sieht, und es zum Teil auch war und auch z.T. noch ist. Heute jedoch scheinen die Vertreter der fossil-atomaren Energiebasis wieder die Oberhand zu gewinnen. Die neuesten Ergebnisse der modernen Klimaforschung machen es jedoch immer deutlicher, dass in erster Linie der Klimawandel das erforderliche Tempo der Energiewende bestimmen muss. Wenn heute wieder von den drei Begriffen, die unser Energiesystem charakterisieren sollen, Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltgerechtigkeit die Wirtschaftlichkeit an erster Stelle genannt wird, so soll das wohl die Vorstellung nahe legen, dass die Kostenfrage, noch dazu in herkömmlicher Handhabung, bei der Entscheidung über den einzuschlagenden Weg der Entwicklung unserer Energiesysteme den Vorrang hat.

In ihrem dritten Wissensstandsbericht haben die Arbeitsgruppen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1] die bis 2001 verfügbaren Forschungsergebnisse und Informationen zum Charakter der Veränderungen des Klimas, ihren Auswirkungen sowie zu den Kosten und zu Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen zusammengefasst. Damit wurde ein entscheidender Beitrag zur Beantwortung der Frage geleistet, was wissenschaftliche, technische und soziökonomische Analysen zur Definition der in Artikel 2 der "UN-Rahmenkonvention über Klimaänderungen" beschriebenen "gefährlichen anthropogenen Störungen des Klimasystems" leisten können.

Aus verschiedenen globalen Emissionsszenarien der Treibhausgase in einer Auswahl von Klimamodellen errechnete Projektionen (ohne klimapolitische Eingriffe) ergaben für den Zeitraum von 1990 bis 2100 eine Erhöhung der mittleren globalen Erdoberflächen-Temperatur von 1,4 bis 5,8 °C. Im gerade erst erschienenen Bericht der Arbeitsgruppe 1 des vierten Sachstandsberichts des IPCC Climate Change 2007 wird die obere Grenze für ein hohes Szenario auf Grund neuester Erkenntnisse sogar noch um 0,6 °C höher angesetzt [2].

Zu den Wirkungen derartiger Veränderungen heißt es im Synthesebericht des IPCC von 2001: "Die Wirkung der Treibhausgase im 21. Jahrhundert könnte in den kommenden Jahrzehnten bis Jahrtausenden weiträumige, hochwirksame, nicht-lineare und vielleicht abrupte Änderungen in physikalischen

und biologischen Systemen in Gang setzen; die diesbezüglichen Wahrscheinlich-keiten weisen eine große Spannweite auf."

Zugleich stellt der Bericht fest, dass das Ausmaß der Erwärmung durch die Reduktion von Treibhausgasen vermindert werden kann, und die Verminderung ihrer Emissionen mit dem Ziel der Stabilisierung ihrer Konzentrationen auf genügend niedrigem Niveau würde Schäden, die durch den Klimawandel entstehen, verzögern und verringern.

Trotz ausführlicher Diskussion der Auswirkungen verschiedener Stabilisierungsniveaus der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zwischen 450 ppm und 1000 ppm (heute 380 ppm) auf die jeweiligen zeitlichen Änderungen der CO<sub>2</sub>-Emission, der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Temperatur, enthält sich der IPCC einer definitiven Aussage darüber, auf welchem stabilisierten Niveau der CO2-Konzentration die Vermeidung gefährlicher anthropogener Störungen des Klimasystems noch möglich ist. Der Grund hierfür liegt in dem großen Unsicherheitsbereich des Ausmaßes der Erwärmung, das sich aus einer stabilisierten Treibhausgaskonzentration ergeben würde. Dieser hängt ursächlich mit der unzureichenden Kenntnis der Größe der Rückkopplungseffekte zusammen, die vor allem vom Wasserdampfpartialdruck, den Wolken und der Albedo ausgehen. Im Bericht Climate Change 2007 ist von der Wechselwirkung Klima-Kohlenstoffkreislauf die Rede, der zufolge die Erwärmung eine Abgabe von Kohlendioxid in die Atmosphäre induziert, deren Ausmaß aber ungewiss ist. Ausgehend vom gegenwärtigen Verständnis der Klima-Kohlenstoffkreislauf-Rückkopplung deuten Modelle darauf hin, dass die Stabilisierung des CO<sub>2</sub>-Gehalts auf dem Niveau von 450 ppm bedeuten könnte, die kumulativen Emissionen über das 21. Jahrhundert von einem Mittelwert von 2460 Gt CO<sub>2</sub> auf einen Mittelwert von 1800 Gt CO<sub>2</sub> zu senken.

Der dritte Wissensstandbericht des IPCC ist ein wesentlicher Ausgangspunkt für die Untersuchung des "Wissenschaftlichen Rates der Bundesregierung für globale Umweltveränderungen" (WBGU), deren Ergebnisse unter dem Titel "Energiewende zur Nachhaltigkeit" mit Stand vom März 2003 veröffentlicht wurden. Der Rat behandelt hierin erstmals gleichgewichtig die beiden übergreifenden Ziele, Klimaschutz und Energiearmut in den Entwicklungsländern und entwickelt sein Konzept der Leitplanken, mit dem er innerhalb eines durch Leitplanken begrenzten Handlungsraumes einen Weg zur Transformation der globalen Energiesysteme weist und einen Fahrplan für die globale Energiewende zur Nachhaltigkeit bis 2050 unterbreitet. Die Leitplanken beziehen sich sowohl auf ökologische wie auch sozioökonomische Aspekte. Unter den ökologischen Leitplanken besitzt die Klimaleitplanke erstrangige Bedeutung. Danach, sind eine Änderungsrate der Temperatur

36 Gerhard Öhlmann

über 0,2 °C pro Jahrzehnt und eine mittlere globale Temperaturänderung über 2 °C gegenüber dem Wert vor der Industrialisierung intolerable Werte einer globalen Klimaänderung.

Die Frage, welches Konzentrationsniveau der Treibhausgase diesem Klimafenster als Stabilisierungsniveau zu zuordnen ist, hängt von der Klimasensitivität ab. Darunter versteht man die Temperaturerhöhung, die mit einer Verdopplung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre verbunden ist. Vorwiegend wegen der bereits oben erwähnten Rückkopplungseffekte, die mit der Temperaturerhöhung verbunden sind, ist diese, für die Klimaproblematik sehr zentrale Größe, leider sehr schwer abzuschätzen.

Der WBGU hat jedoch auf Basis eines modifizierten Emissionsszenarios des IPCC-Szenario A1T-450, das eine künftige Welt, sehr raschen Wirtschaftswachstums, intensiver Nutzung nichtfossiler Energiequellen und schneller Einführung neuer, effizienterer Technologien beschreibt, einen exemplarischen Transformationspfad modelliert, der von einem Stabilisierungsniveau der Treibhausgase bei 450 ppm ausgeht und die Leitplanken der Nachhaltigkeit nicht beschädigt.

In dem mit Stand vom November 2003 veröffentlichten Sondergutachten des WBGU, "Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert", das zum einen die ökonomischen und technologischen Minderungspotenziale von CO<sub>2</sub>-Emissionen, zum anderen die Bedeutung biologischer Kohlenstoffsenken und die Möglichkeit ihres Erhalts untersucht, diskutiert der Rat erneut die Frage der zulässigen Emissionen mit denen ein gefährlicher Klimawandel vermeidbar ist. Er empfiehlt angesichts der Unsicherheiten in unserer Kenntnis des Klimasystems, gewissermaßen als Absicherungsstrategie, von einem CO<sub>2</sub>-Konzentrationsziel *unterhalb* von 450 ppm auszugehen. Möglich ist das nur, wenn bis 2050 eine Reduktion der globalen, *energiebedingten* CO<sub>2</sub>-Emissionen um 45–60% durchgesetzt wird. Die Industrieländer hätten dabei ihre Treibhausgas-Emissionen bis 2020 um mindestens 20% gegenüber 1990 zu vermindern.

In der bereits erwähnten WGBU Ausarbeitung vom März 2003 wird weltweit bis 2050 eine  $\mathrm{CO}_2$ -Emissionsreduktion von mindestens 30% gefordert. Für die Industrieländer bedeutet das eine Reduktion um etwa 80%. Die Entwicklungs- und Schwellenländer dürften nach dieser Empfehlung ihre Emissionen dagegen noch um maximal 30% steigern.

Der kürzlich erschienene Stern Review [3] untersucht und diskutiert ebenfalls die Möglichkeiten der Stabilisierung des Niveaus der Treibhausgase bis 2050, betrachtet aber im Unterschied zum WBGU alle Treibhausgase und nicht nur das CO<sub>2</sub>. Der Review veranschlagt die jährlichen Stabilisierungsko-

sten auf dem Niveau bei oder unter 500–550 ppm CO<sub>2</sub>eq (etwa 440–500 ppm nur CO<sub>2</sub>) auf ca. 1% des Bruttoinlandsprodukts, eine Größe, die zwar signifikant ist, aber im Bereich des Machbaren liegt. Das anzustrebende Stabilisierungsniveau würde verlangen, dass die globalen Emissionen innerhalb der nächsten 10–20 Jahre ihre Spitzenwerte erreichen und danach nur noch abnehmen dürften und zwar mit einer Rate von 1–3% pro Jahr. Diese Rate würde sich allerdings verdoppeln und damit schon nicht mehr praktikabel werden, wenn man mit der Gegensteuerung noch ein weiteres Jahrzehnt warten würde.

Einerseits haben sich also die wissenschaftlichen Erkenntnisse für eine so konsequente und schnelle Handlungsweise im letzten Jahr immer mehr verdichtet, andererseits hat H. J. Schellnhuber, z.Zt. stellvertretender Vorsitzender des WBGU, in einer neuerlichen Äußerung [4] darauf verwiesen, dass es unsere erste Aufgabe sei, dies mit hinreichender Sicherheit zu wissen, denn andernfalls "sollte die Menschheit ihre Anstrengungen besser auf Armutsbekämpfung oder Ausbildungskampagnen konzentrieren und die Anpassung an die Klimaerwärmung den Marktkräften und kreativen sozialen Akteuren überlassen". Aus diesen Worten spricht wohl kaum der Zweifel an dem zu erwartenden Ausmaß der Folgen des Klimawandels als viel mehr die Sorge des Naturwissenschaftlers, der befürchtet, die tiefere wissenschaftliche Analyse der Anfälligkeiten des Ökosystems könnte nicht schnell genug vorankommen. An gleicher Stelle formuliert er dann weiter: "zweitens müssen wir sicherstellen, dass wir die bestmöglichen Strategien zur Lösung, oder zumindest Abschwächung, des Problems verfolgen – andernfalls geht die Menschheit das Risiko ein, zu wenig, zu spät und an den falschen Orten zu tun. Politische und betriebswirtschaftliche Entscheidungen, die in den nächsten Jahrzehnten gefällt werden, werden in der Tat die Umweltbedingungen des Planeten für die nächsten Jahrtausende bestimmen."

Das erste Abkommen mit quantifizierten Beschränkungs- und Reduktionsverpflichtungen für Treibhausgas Emissionen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) der Unterzeichner-Staaten ist das Protokoll von Kioto von 1997 zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, das seit dem 16. Februar 2005 völkerrechtlich verbindlich ist. Im Mittel wollen die Unterzeichner-Staaten damit eine Reduzierung der Treibhausgas- Emissionen um mindestens 5% bis 2012 erreichen, ein Betrag, der den heutigen Anforderungen in keiner Weise gerecht wird. Darüber hinaus bestehen berechtigte Zweifel an einer positiven Wirksamkeit des Handels mit Emissionszertifikaten, einem der flexiblen Instrumente zur Durchsetzung der Klimaziele [5].

38 Gerhard Öhlmann

Im Rahmen der Lastenverteilung innerhalb der EU, die sich insgesamt zu einer Minderung der Treibhausgas-Emissionen von 8% verpflichtet hat, will Deutschland im Mittel der Jahre 2008 bis 2012 seine Treibhausgasemissionen um 21% senken. Noch im nationalen Klimaschutzprogramm vom Oktober 2000 hatte sich die Bundesregierung eine Senkung aller Treibhausgase bis 2005 um 25,9% und für CO<sub>2</sub> allein eine Minderung um 25% gegenüber 1990 vorgenommen, die aber nicht erreicht wurden. Bis 1999 zeigten die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen eine fallende Tendenz auf 79,6% des Bezugswertes von 1990. Ende des Jahres 2003 waren es nur noch 87,2%. Dagegen konnte die Industrie ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990 auf ca. 67% in 2003 vermindern. Problematisch bleibt der Verkehrssektor, dessen CO<sub>2</sub>-Emissionen zwar seit 1999 eine leicht fallende Tendenz aufweisen, der aber mit dem bis 2003 erreichten Wert immer noch deutlich (um 5,3%) über dem Wert von 1990 liegt.

Nach Aussagen des BMU [6] ist die erneute Erhöhung der Emission von CO<sub>2</sub> im Energiesektor u.a. auf das neue RWE Power-Braunkohlekraftwerk (3900 MW) in Niederaußem bei Köln zurückzuführen, das zwar nach neuer optimierter Anlagentechnik (BoA) arbeitet und einen Wirkungsgrad von 43% erreicht, dessen Inbetriebnahme 2003 jedoch nicht mit der Stilllegung älterer Kraftwerke verbunden war. RWE Power hat im Januar 2006 die Bauarbeiten für den 2. und 3. BoA-Block mit einer Netto-Leistung von 2400 MW am Standort Neurath begonnen und will mit der Fertigstellung in 2010 alte Kraftwerke stilllegen. Außerdem soll die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus den Rauchgasen zur Baureife gebracht werden und alle Voraussetzungen für den Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub> geschaffen sein. Der Konzern hat nach eigenen Angaben [7] bereits mit der Erstellung eines Katasters von geologisch geeigneten Formationen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung begonnen und bereitet Erkundungsmaßnahmen (u.a. in der norddeutschen Tiefebene) vor.

Abgesehen davon, dass zur Verwirklichung dieser Vorhaben keine Zeitangaben gemacht werden, stellt sich die Frage, warum bei einer Senkung des spezifischen CO<sub>2</sub>-Anfalls von 1200 g/kWh in den alten Anlagen aus den sechziger Jahren auf 900 g/kWh in den neuen BoA-Blöcken dieser Weg gegenüber dem Bau von modernen Gas- und Dampf-Kraftwerken mit einem spezifischen CO<sub>2</sub>-Anfall von 365g/kWh vorgezogen wird.

Die vom WBGU untersuchten nachhaltigen CO<sub>2</sub>-stabilisierenden Szenarios [8] sehen zwar auch eine Kohlenstoffspeicherung (CO<sub>2</sub>-Sequestierung) vor, diese ist aber zu wesentlichen Teilen mit der Nutzung von Erdgas und Biomasse verbunden und nicht mit Technologien, die auf Kohle beruhen. Im Falle der Biomasse bedeutet das sogar eine Netto-Reduzierung des CO<sub>2</sub>. Es

muss daher bezweifelt werden, dass der hier geplante Primärenergiemix für die Stromerzeugung den Anforderungen des Klimaschutzes gerecht wird. Im Teil III des bereits erwähnten Stern- Reviews heißt es zur Problematik der Investitionen: "Energy systems are subject to very significant inertia. It is important to avoid getting "locked into" long-lived high carbon technologies, and to invest early in low carbon alternatives."

In dem Zuteilungsplan für die zweite Phase des Emissionshandels (2008-2010) hatte die Bundesrepublik zunächst eine Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes (ausgehend von 637 Mio t in 1990) im Energiesektor und in der Industrie auf 482 Mio t/a (im nationalen Klimaschutzprogramm 2005 sogar noch 495 Mio t/a) geplant, diesen Wert dann aber auf 465 Mio t herabgesetzt. Die EU Kommission forderte jedoch eine Senkung auf 453 Mio t/a. Der deutsche Umweltminister warnte, der Emissionshandel dürfe nicht zu einem Investitionskiller werden, womit deutlich wird, wie sehr die Bundesregierung hier unter dem Druck der Elektrizitätswirtschaft steht. Unabhängig vom Ausgang des darüber entbrannten Streits, wird deutlich, wie sehr der gesamte Kioto-Prozess von Gruppeninteressen innerhalb der Staaten und der Frage der Wettbewerbsfähigkeit auf dem globalen Markt dominiert wird. Ohne verbindliche Übereinkommen zwischen den EU-Mitgliedsstaaten und darüber hinaus wird es wohl hier kaum die notwendigen Fortschritte geben.

Deutschland jedenfalls bleibt bei einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Rahmen des Kioto-Protokolls für die Zeit von 2008 bis 2012 um 21% gegenüber 1990 und glaubt damit ein gutes Fundament für eine weitere anspruchsvolle Klimaschutzpolitik auch nach 2012 zu legen. Die Bundesregierung hat erklärt, bis 2020 die Klimagasemissionen um 40% gegenüber 1990 senken zu wollen, wenn die übrigen EU-Mitgliedsländer sich ihrerseits zu einer Senkung um 30% verpflichten. Die aktuellen Beschlüsse des EU-Rats und des EU-Umweltrates orientieren die Industriestaaten auf eine Minderung der Emissionen im Bereich von 15–30% bis 2020 und 60–80% bis 2050.

Erfreulich kritisch hat der Bundestag in der Entschließung 16/3293 vom 9. November 2006 auf die sehr dramatischen neuen Zahlen der Internationalen Energieagentur (IEA) reagiert, aus denen eine Steigerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 25,3% in den OECD-Ländern im Verpflichtungszeitraum des Kioto-Protokolls von 1990 bis 2010/12 hervorgeht. Bei den Entwicklungsund Schwellenländern wäre es im gleichen Zeitraum sogar ein Plus von 103,4%. Bis 2050 käme so anstatt einer Verminderung der Treibhausgasemissionen um 60% eine Verdopplung oder gar eine Verdreifachung heraus. Die Entschließung fordert angesichts dieser Zahlen, die Ableitung von Kon-

40 Gerhard Öhlmann

sequenzen für die Weiterentwicklung des Kioto-Protokolls und benennt dafür eine Reihe von Eckpunkten, wie z.B. die Prüfung einer Zuordnung von Emissionsrechten nach gleichen Pro-Kopf-Anteilen im Interesse einer gerechteren Gestaltung der Reduktionsverpflichtungen. Zu solchen Einsichten hat sicher auch der bereits erwähnte Stern-Report beigetragen.

Eine der Aufgaben der Weltklimakonferenz im November dieses Jahres in Nairobi hätte darin bestanden, einen Arbeitsplan für den Klimagipfel im kommenden Jahr zu verabschieden, damit rechtzeitig eine Kioto-Nachfolgeregelung zustande kommt, die den Erkenntnisstand der Klimaforschung zur Notwendigkeit einer globalen Senkung der Treibhausgasemissionen um 50% bis 2050 gegenüber 1990 in konkrete Maßnahmen umsetzt. Leider hat die Konferenz diese Aufgabe nicht gelöst. Zu groß sind offenbar noch die Interessenunterschiede zwischen den OECD-Ländern und den Entwicklungs- und Schwellenländern

### Globale Lösungsansätze

Die entscheidende Frage auf dem Wege zu einem wirksamen Klimaschutz ist die nach dem Charakter der Energiewende, die derartige Reduzierungen der Klimagase ermöglicht.

Der vom WBGU zur Illustration der technologischen und ökonomischen Machbarkeit entwickelte, weiter oben bereits erwähnte exemplarische Pfad einer nachhaltigen Transformation der Energiesysteme beinhaltet ein starke Verminderung der Nutzung fossiler Energieträger, das Auslaufen der Nutzung nuklearer Energieträger, den erheblichen Ausbau erneuerbarer Energien, insbesondere der Solarenergie und die Steigerung der Energieproduktivität weit über historische Vorbilder.

Angenommen wird eine Verdreifachung des Energieeinsatzes bis 2050 bei einer Erhöhung des globalen Wirtschaftswachstums um das Sechsfache. In dem Ausgangsmodell des IPCC (A1T-450) sind die Grundannahmen Wirtschaftswachstum, Investitionen, technischer Fortschritt, Verhältnis Industrieländer und Entwicklungsländer, internationale Kooperation und Bevölkerungswachstum exogen vorgegeben und nicht verändert worden. Außerdem wurden die Verhältnisse Elektrizität/Wärme/Wasserstoff und fossiler/nichtfossiler Anteil des Energieeinsatzes möglichst identisch beibehalten. Veränderungen beschränken sich im Wesentlichen auf den technologischen Bereich. Unter anderem sind das vor allem das Auslaufen der Kernenergienutzung bis 2050, die Wahl der realen Daten für das Startjahr 2000 in den einzelnen Technologien, niedrigere Begrenzung der Endwerte im Jahr 2100 bei

Wasserkraft (von 35 EJ/a auf 15 EJ/a) und Biomasse (von 260 EJ/a auf 100 EJ/a), andererseits aber ein deutlich stärkerer Ausbau der Windkraft (135 EJ/a), der schnelle und starke Ausbau sowohl der netzunabhängigen als auch der netzabhängigen photovoltaischen und solarthermischen Kraftwerke, und ein größerer Stellenwert der Geothermie und anderer, noch nicht kommerzialisierter, erneuerbarer Energie-Technologien.

Was die Steigerung der Energieproduktivität anbetrifft, so geht das IPCC-Szenario von einer jährlichen Steigerung um etwa 1,3% aus, im exemplarischen Pfad jedoch werden ab 2040 1,6% Steigerung pro Jahr angenommen. Der WBGU sieht mehrere Möglichkeiten diese Steigerung herbeizuführen z.B. durch eine "preisinduzierte Minderung der Energienachfrage, die zur Effizienzsteigerung sowohl bei der Energiekonversion als auch bei der Endenergienutzung führt, aber auch beispielsweise durch sektoralen Strukturwandel und veränderte Siedlungs- und Verkehrsstrukturen sowie verändertes Konsumverhalten"

Sowohl das IPCC-Szenario (A1T-450) als auch der exemplarische Pfad sehen eine geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung vor, die vom WBGU hinsichtlich der sicheren Speicher-Kapazitäten aber mit Recht kritischer gesehen wird (der WBGU sieht eine tolerable Obergrenze bei 300 Gt C oder 1100 GtCO<sub>2</sub>). Deshalb ist im exemplarischen Pfad im Unterschied zum IPCC-Szenario ein Auslaufen der Speicherung zum Ende des 21. Jahrhunderts vorgegeben.

Grundsätzlich ist die CO<sub>2</sub>-Speicherung sowohl unter dem Aspekt des Energieaufwandes für Abscheidung und Verflüssigung des CO2, als auch im Hinblick auf die sichere unterirdische Speicherung sehr problematisch. Weltweit mag es in erschöpften Gas- und Erdölfeldern genügend sichere Speichermöglichkeiten geben, um die oben genannten 300 Gt C unterzubringen, in Deutschland jedoch haben erschöpfte Erdgaslagerstätten oder wirtschaftlich nicht abbaubare Kohleflöze nur eine geringe Speicherkapazität (Schätzungen besagen ca. 1,2 Gt CO<sub>2</sub>). Außerdem ist selbst hier die veränderte Chemie der Gas/Gesteinswechselwirkung hinsichtlich der Langzeit-Dichtigkeit der Deckschicht zu berücksichtigen und noch ungeklärt. Die größte Speicherkapazität wäre in Deutschland aber ohnehin in unterirdischen Grundwasserleitern (Aquiferen) zu erwarten (nach Schätzungen der BA für Geowissenschaften und Rohstoffe 23 bis 43 Gt CO<sub>2</sub>). Wissenschaftliche Untersuchungen zu deren Speichereigenschaften und Sicherheit sind aber gerade erst begonnen worden (Arbeiten des GFZ Potsdam in Ketzin bei Berlin). Sehr wahrscheinlich mit Recht weist der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) in seiner kritischen Bewertung der Vattenfall-Pilotan42 Gerhard Öhlmann

lage zur  $\mathrm{CO}_2$ -Abscheidung in Schwarze Pumpe darauf hin, dass diese Wasserschichten, dann nicht mehr zur Energieerzeugung aus Erdwärme genutzt werden können [9]. Darüber hinaus ist die Abtrennung und Speicherung des  $\mathrm{CO}_2$  ohne den Einsatz von Energie nicht zu haben, wodurch zusätzliche Primärenergieträger einzusetzen sind und dadurch nicht nur die mühsam gewonnene Wirkungsgraderhöhung der Kohlekraftwerke de facto zunichte gemacht wird, sondern außerdem der Anfall von abzutrennendem  $\mathrm{CO}_2$  zusätzlich steigt.

	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2100
	[EJ]						
Öl	164	171	187	210	195	159	52
Kohle	98	111	138	164	126	84	4
Gas	96	138	196	258	310	306	165
Kernenergie	9	12	12	6	3	0	0
Wasserkraft	9	10	11	12	12	12	15
Biomasse, traditionell	20	17	12	8	7	5	5
Biomasse, modern	20	48	75	87	100	100	100
Wind	0,13	1,3	13	70	135	135	135
Solarstrom	0,01	0,06	0,6	6	63	288	1.040
Solarwärme	3,8	9	17	25	42	43	45
Andere erneuer- bare Energien Geothermie	0 0,3	0	2	4	10 20	15 22	30 30
Gesamt	420	519	667	861	1.023	1.169	1.620

Tab. 1: Globale Energienachfrage im exemplarischen Pfad des WBGU, aufgeschlüsselt nach Energieträgern [11] (berechnet nach der Direktäquivalentmethode).

Für den exemplarischen Pfad des WBGU ergeben sich insgesamt gesehen die in Tabelle 1 enthaltenen Werte für die globale Energienachfrage, aufgeschlüsselt nach Energieträgern, die den Anforderungen der Nachhaltigkeit gerecht werden [10], womit der WBGU unterstreicht, dass mit einem derartigen oder ähnlichen Energiemix die globale Energiewende möglich ist. Herausragendes

Kennzeichen dieses möglichen Entwicklungspfades ist die enorme Steigerung der Erzeugung von Solarstrom, die ihrerseits Voraussetzung für die Wasserstoffwirtschaft ist.

Zur makroökonomischen Fundierung der Aussagen zum exemplarischen Pfad verwendet der WBGU ein endogenes Energiesystemmodell, das mit einem Klimamodell gekoppelt ist (MIND: Model of investment and Technological Development). Es erlaubt eine Bewertung langfristiger Optionen zu erforderlichen Investitionen und zur Dynamik der notwendigen technologischen Entwicklung. Verglichen wird wieder ein business-as-usual Modell mit einem Modell, das die Klimaleitplanken beachtet. Es kommt zu ähnlichen Entwicklungen des Energiebedarfs bei fossilen und erneuerbaren Energien, wie sie sich im exemplarischen Pfad ergeben haben.

Diese Modellsimulationen bestätigen also die Realisierbarkeit des exemplarischen Pfads, sie machen aber auch deutlich, dass die Klimaleitplanke nur dann eingehalten werden kann, wenn in den nächsten einhundert Jahren ca. 200 Gt C in sicheren geologischen Formationen gespeichert werden können. Die Abschätzungen der erforderlichen Investitionen ergaben für beide Modelle nur geringfügige Unterschiede, weisen aber große Unsicherheiten auf. Unabhängig davon lassen sie erkennen, dass im Business-as-usual Fall in erneuerbare Energien erst investiert wird, wenn die fossilen Ressourcen versiegen, während im Modell mit eingehaltener Klimaleitplanke schon frühzeitig ein Wandel im Verhalten der Investoren eintritt. Die Einhaltung der Klimaleitplanke ist hiernach ohne schwerwiegende volkswirtschaftliche Verluste möglich und die Transformation der globalen Energiesysteme kann wesentlich beschleunigt werden. Der WGBU betont allerdings auch, dass die Investoren mit langfristig angekündigten Emissionszielen und langfristig durch die Politik zu verknappenden Emissionslizenzen zuverlässig rechnen können müssen

#### **Zur Situation in Deutschland**

In Deutschland ist in den letzten Jahren durch eine Reihe von Studien der Nachweis geführt worden, dass der Wandel des Energiesystems von der fossilatomaren Basis zu den nachhaltigen Technologien der erneuerbaren Energien möglich und machbar ist. Mehr noch, wegen der in diesem Jahrzehnt erforderlichen Kraftwerks-Ersatzinvestitionen im Umfang von 40 bis 60 Mrd  $\varepsilon$  sind die Bedingungen für diesen Wandel sogar besonders günstig. Zugleich ist er auch besonders dringend, denn mit diesen Investitionen werden die Weichen für die nächsten Jahrzehnte gestellt [12].

44 Gerhard Öhlmann

Unter den Studien verdienen die Empfehlungen der Enquete-Kommission des 14. Bundestages zur "nachhaltigen Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung" besonderes Interesse [13]. Trotz einer nicht geringen Zahl von Minderheitsvoten kommt die Kommission in ihrer Mehrheit zu den eindeutigen Feststellungen, dass das gegenwärtige Energiesystem in Deutschland nicht nachhaltig ist, eine nachhaltigzukunftsfähige Energieversorgung aber sowohl technisch machbar als auch wirtschaftlich vorteilhaft gestaltet werden kann, auch unter den Bedingungen des vereinbarten Ausstiegs aus der Kernenergie.

Diese Aussagen basieren auf einer Reihe von Szenarien, deren Berechnung von der Kommission dem Wuppertal-Institut für Umwelt, Klima und Energie (WI), sowie dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart unter Federführung der Prognos AG, Basel, in Auftrag gegeben wurde [14].

Neben einem Business-as-usual-Szenario liegen der Analyse drei Hauptszenarien zugrunde, die alle bis 2050 eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80% zum Ziel haben. Das Erste von ihnen (Umwandlungseffizienz) setzt auf eine forcierte Effizienzsteigerung bei der Nutzung fossiler Energieträger, verschärfte Energiepolitik ohne Fortsetzung der Nutzung der Atomenergie, kontinuierliches Anwachsen der Energiesteuern und eine CO2-Abtrennung und Deponierung. Das zweite Szenario verlangt ebenfalls eine forcierte Effizienzsteigerung in allen Anwendungsbereichen und das Auslaufen der Kernenergie-Nutzung, setzt dann aber auf den konsequenten Ausbau der erneuerbaren Energien mit einem Anteil von 50% an der gesamten Energieversorgung im Jahre 2050. Das dritte Szenario schließlich, erlaubt den Neubau von Atomkraftwerken nach 2010 und verlangt eine moderate Umsetzung der Energiesparpolitik. Ausgehend von diesen Hauptszenarien untersuchen die beauftragten Institute insgesamt 14 abgeleitete, modifizierte Einzelszenarien und liefern der Kommission damit die Grundlage für ihre Empfehlungen. Bei allen Unterschieden der untersuchten Szenarien zeigt sich, dass Szenarien, die zu einer Stabilisierung der Treibhausgas-Emissionen auf einem akzeptablen Niveau (450-500 ppm) führen, charakterisiert sind durch einen Bedeutungsverlust fossiler Brennstoffe, durch eine verstärkte Nutzung kohlenstoffarmer Energieträger, durch die massive Verbesserung der Energieeffizienz im globalen Mittel um das 2,3 bis 3,1 fache bis 2050 und durch die Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen um den Faktor 7 bis 8.

Die Mehrheit der Kommission kommt daher zu dem Schluss, dass eine Strategie der Entwicklung des Energiesystems in Deutschland, die konsequent auf Energieeinsparung, Effizienzerhöhung und erneuerbare Energien ausgerichtet ist, am zuverlässigsten die angestrebten Ziele einer nachhaltigzukunftssicheren Energieversorgung gewährleisten kann. Diese Ziele sind in drei Dimensionen, der ökologischen, der sozialen und der ökonomischen Dimension zu sehen, wobei die gewählte Rangfolge zwingend ist, denn eine intakte Natur bildet die Grundvoraussetzung für eine langfristig stabile, wirtschaftliche und soziale Entwicklung. Diese Erkenntnis, zu der sich viele offenbar erst noch durchringen müssen, ist vielleicht das wirklich neue, heute zwingend zu berücksichtigende, zentrale Element jeglicher politischer Konzeption gesellschaftlicher Entwicklung.

Das Kernstück der Herausbildung eines nachhaltigen Energiesystems ist ohne Zweifel die konsequente Nutzung der erneuerbaren Energien in Gestalt der solaren Strahlung, der Geothermie und der Gezeitenkraft. Ihre globalen Potenziale sind in menschlichen Begriffen unerschöpflich und sie sind auch in ihrer technischen und umweltgerechten Nutzbarkeit groß genug [15], um den wachsenden Energiebedarf der Menschheit zu befriedigen. Hinzu kommt ihre im Vergleich zu den fossilen Energieträgerreserven wesentlich homogenere Verteilung über die Länder der Erde, wodurch von vorn herein eine größere Verteilungsgerechtigkeit natürlicher Ressourcen-Nutzung begünstigt wird. Die geringe Leistungsdichte und das zeitlich und räumlich fluktuierende Energiedargebot eines Teils der erneuerbaren Energien müssen keine Nachteile für eine sichere Energieversorgung bedeuten, wenn ihre Entwicklung in großflächig dezentralen Erzeugereinheiten systemintegriert erfolgt, und in wachsendem Maße Energie aus Sonne und Wind durch moderne Biomassenutzung und Geothermie ergänzt wird und Systeme einer kostengünstigen Speichertechnik eingeführt werden.

Für Deutschland gelten die in Tabelle 2 wiedergegebenen Nutzungs-Potenziale und ihre bisherige Nutzung. Zwar ist der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch mit 7,7% noch immer relativ gering, es beeindruckt aber das schnelle Wachstum um 75% in den letzten drei Jahren. Dasselbe trifft auch zu für den Anteil der Erneuerbaren am Bruttostromverbrauch, der Ende des vergangenen Jahres mit 11,6% bereits sehr nahe an die von der EU für 2010 für Deutschland vorgegebenen 12,5% heranreicht und es gilt ebenfalls für die große Steigerung des Anteils der Biokraftstoffe am Kraftstoffverbrauch, der mit 5,4% Ende des vergangenen Jahres den durch die EU vorgegebenen Wert von 5,75% für 2010 schon fast erreicht. Allerdings dürfte hier das vorhandene Potenzial, ausgehend von den zugrunde gelegten 4,2 Mio ha Anbaufläche, bald erschöpft sein.

46 Gerhard Öhlmann

	Nutzung		Potenzi		
	2003	2005	2006	Ertrag	Leistung
Stromerzeugung	[TWh]	[TWh]	[TWh]	[TWh/a]	[MW]
Wasserkraft	20,4	21,4		24	5.2001
Windenergie, an Land auf See	18,5	26,5		55	25.000
	-	-		110	30.000
Biomasse	7,1	13,4		60	$10.000^2$
Fotovoltaik	0,32	1,0		105	115.000 <sup>3</sup>
Geothermie	-	0,0002		200	$30.000^4$
Summe	46,3	62,5		554	
Anteil am Bruttostromverbrauch	7,9 %	10,2%	11,6%	94 (91)%	
Wärmeerzeugung	[TWh]			[TWh/a]	
Biomasse	57	76,0		200	
Geothermie	2	1,6		330	
Solarthermie	2	3,0		290	
Summe	61	80,6		820	
Anteil am Endenergieverbrauch Wärme, 2002/3	4,1%	5,3%	6,2%	55(54)%	
Kraftstoffe	[TWh]	[TWh]		[TWh/a]	
Biomasse	7	22,3		60	
Summe	7	22,3		60	
Anteil am Kraftstverbr. 2003/4	0,9	3,6	5,4%	8(10)%	
Anteil am gesamten End- energieverbrauch 2002/4/6	4,4%	6,4%	7,7%	56%	

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Laufwasser und natürlicher Zufluss zu Speichern; <sup>2</sup> Erzeugung teilweise in Kraftwärmekopplung; <sup>3</sup> nur geeignete Dach-, Fassaden- und Siedlungsflächen, Leistungsangabe bezogen auf Modulleistung (MWp), entsprechende Wechselstromleistung beträgt 106.000 MW. <sup>4</sup>Bandbreite 66-290 TWh/a je nach Anforderungen an eine Wärmenutzung (Kraft-Wärme-Kopplung)

Tab. 2: Langfristige Nutzungspotenziale für die Endenergieerzeugung von Strom und Wärme sowie für den Kraftstoffverbrauch [16].

Trotz der ebenfalls deutlichen Steigerung sind im Wärmesektor, gemessen an den ausgewiesenen Nutzungspotenzialen, sehr große Reserven bei der Solar- und Geothermie noch kaum erschlossen. Um auch in diesem Sektor schneller voran zu kommen, bedarf es wahrscheinlich einer ähnlichen Förderung wie im Stromsektor durch das EEG, das sich als außerordentlich wirksam erwiesen hat und für bisher 44 Länder zum Vorbild für eigene Gesetze auf diesem Gebiet geworden ist.

Ganz in den Anfängen steckt noch die Nutzung der Windenergie auf See und die Nutzung des großen Potenzials der Geothermie. Zur Windenergiegewinnung auf See ist die Entwicklung offenbar langsamer verlaufen als ursprünglich gedacht.

Ende 2004 waren in Deutschland insgesamt 37 Offshore-Anlagen in Planung, davon 29 in der Nordsee und 8 in der Ostsee. Eines der ersten Offshore-Windräder in Deutschland ist im Frühjahr 2006 im Breitling ca. 500 m vom Rostocker Überseehafen entfernt in Betrieb genommen worden. Es hat eine Nennleistung von 2,5 MW und erreichte in den ersten Monaten eine Verfügbarkeit von 98%. Die Anlage dient vor allem der Gewinnung neuer Erkenntnisse zur Betreibung von Küsten-Windanlagen.

Mitte des vergangenen Jahres hat das BMU eine gemeinsame Erklärung mit der Stiftung Off-shore-Windenergie, einer Reihe von Energiewirschafts-unternehmen und niedersächsischen Landesministerien sowie der Stadt Norderney unterschrieben, in der die Unterzeichner ihre Absicht darlegen, im Jahr 2008 ein Testfeld für Offshore-Windanlagen der 5-Megawatt-Klasse in der Nordsee (ca. 45 km vor der Insel Borkum) als Forschungs- und Demonstrationsobjekt für die deutsche Wirtschaft zu errichten, um eine "Initialzündung für die Nutzung der Windenergie in der deutschen Nord- und Ostsee zu bewirken." Bis zur Nutzbarmachung des gesamten Potenzials wird es also noch einige Jahre dauern.

Ähnlich ist die Lage bei der Erschließung des Potenzials der Geothermie, die aber für den Stromsektor wegen ihrer Grundlastfähigkeit besonderes Interesse besitzt. Die natürlichen Voraussetzungen dafür sind in Deutschland weniger gut als in Ländern in geologisch begünstigten, heißen Gebieten der Erde. Erst bei Bohrtiefen von mindestens 3000 m werden die Temperaturen erreicht, die für einen wirtschaftlich akzeptablen, elektrischen Wirkungsgrad erforderlich sind. Ziel der Forschung ist es, die Erdwärme auch in solchen Gebieten, die kaum wasserführend sind, mit Hilfe der Hot-Dry-Rock-Technologie (HDR) nutzbar zu machen. Das betrifft in Deutschland fast 95% des gesamten Potenzials. Bei diesem Verfahren wird das in der Tiefe vorhandene

48 Gerhard Öhlmann

heiße Gestein durch Bohrungen zugänglich gemacht und zwischen den Bohrungen durch eingepresstes Wasser ein System von Fließwegen aufgebrochen (sog. Stimulationstechnologie), das insgesamt einen unterirdischen Wärmeaustauscher bildet. Die grundsätzliche Eignung des Verfahrens konnte im Europäischen HDR Forschungsprojekt in Soultz-sous-Forêts im französischen Teil des Oberrheingrabens (Elsaß) nachgewiesen werden. Aber auch 2006 wurde noch an der Verbesserung der Wasserzirkulation innerhalb dieses Wärmespeichers in 5000 m Tiefe gearbeitet.

Neben diesem europäischen Projekt unterstützt das BMU andere Projekte im Oberrheingraben, im süddeutschen Molassebecken und im norddeutschen Becken (Landau in der Pfalz, Unterhachingen, "GeneSys" in Hannover-Lahe, Groß Schönebeck bei Berlin) [17]. Alle diese Projekte haben noch Forschungs- und Demonstrationscharakter. Nicht zu übersehen ist, dass auch für solche Probleme wie z.B. genauere geophysikalische Methoden der Lagerstättenerkundung oder die hinreichende Zuverlässlichkeit und Stabilität der einzusetzenden Tiefpumpen noch Forschungsbedarf existiert. Hohe Bohrkosten und nicht ausreichende Sicherheit bezüglich der Fündigkeit erschweren noch den Prozess der Nutzbarmachung der Geothermie.

Wichtiger Maßstab für den Erfolg der erneuerbaren Energien ist natürlich der mit ihrer Nutzung verbundene Effekt der  $\mathrm{CO_2}$ -Vermeidung, der 2006 eine Größe von 99 Mio t erreicht hat. Allein die 2006 durch den Ausbau der erneuerbaren Energien zusätzlich vermiedenen 10 Mio t  $\mathrm{CO_2}$  sind das Fünffache der im Rahmen des Emissionshandels zwischen 2005 bis 2007 von der deutschen Industrie angestrebten  $\mathrm{CO_2}$ -Reduktion (BEE, Jahresrückblick 2006).

In diesem Zusammenhang darf nicht unerwähnt bleiben, dass der Verkehrssektor als einer der größten Erzeuger von CO<sub>2</sub> bisher von keiner staatlichen Verpflichtung zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes betroffen ist. Der Übergang zu Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien allein löst das Problem nicht, wenn die Automobilindustrie die Kraftstoffverbrauchswerte ihrer Neuwagen nicht deutlich senkt. Selbstverpflichtungen haben hier offensichtlich keinen Durchbruch gebracht. Mit Recht fordert daher der Verkehrsclub Deutschland eine Halbierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in den nächsten 10 Jahren und fordert die Bundesregierung dazu auf ihre EU-Ratspräsidentschaft zu nutzen, um ein EU-Gesetzgebungsverfahren über verbindliche Verbrauchsgrenzwerte in Gang zu setzen [18].

Noch nicht ausreichend ist ebenfalls der Fortschritt bei der effizienten und sparsamen Nutzung und Umwandlung von Energie in allen Bereichen. Die Energieproduktivität stieg zwar in Deutschland im Schnitt jährlich um 1,8%,

der Anstieg hat sich aber in den letzten Jahren deutlich verlangsamt. Die angestrebte Verdopplung der Energieproduktivität bis 2020 im Vergleich zu 1990 verlangt aber eine jährliche Steigerung um 3%.

Insgesamt gesehen ist jedoch der Fortschritt auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien in Deutschland nicht zu verkennen. Hemmnisse, die durch Wissenslücken, ungenügende Entschlossenheit staatlicher Einrichtungen bei der Durchsetzung als richtig erkannter Maßnahmen, oder aus einer mehr oder weniger aktiven Verweigerungshaltung einzelner Wirtschaftssektoren resultieren, können diesen Prozess des Wandels des Energiesystems verzögern, aber wohl nicht mehr grundsätzlich gefährden, denn diese Entwicklung hat durch ihr Ausmaß bereits eine Eigendynamik entwickelt, die von einer großen Zahl leistungsfähiger, moderner und innovativer Unternehmen und vom zunehmenden Klimabewusstsein großer Teile der Bevölkerung und der verantwortungsvollen Einmischung vieler Wissenschaftler getragen wird. Verzögerung aber ist, wie zu zeigen beabsichtigt war, angesichts der Klimaentwicklung gefährlich und teuer.

#### Literatur

- [1] IPCC, Third Assessment Report; http://www.ipcc.ch/pub/online.htm
- [2] IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers
- [3] Nicholas Stern Review: The Economics of Climate Change, Part III, The challenge of stabilisation, 30.10.2006
- [4] H. J. Schellnhuber, C. Jäger: "Gefährlichen Klimawandel abwenden", Carbon Disclosure Project; Bericht 2006, Bundesverband Investment und Asset Management e.V.
- [5] H. Scheer: "Das Kyoto-Syndrom und das Elend der Energie- und Umweltökonomie"; Solarzeitalter 1/2005
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Umwelt Nr. 9/2006, S. 445
- [7] RWE, Unsere Verantwortung; Bericht 2005
- [8] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, "Über Kioto hinaus denken Klimaschutz für das 21. Jahrhundert", S. 36
- [9] BUND, Feigenblatt "Saubere Kohle"; Internet, Abscheidung
- [10]WBGU, Welt im Wandel, Energiewende zur Nachhaltigkeit; Springer 2003, S. 138
- [11]WBGU, Welt im Wandel, Energiewende zur Nachhaltigkeit; Springer 2003, Tabelle 4.4-1

50 Gerhard Öhlmann

[12]S. Peter, H. Lehmann: "Erneuerbare Energien und Kraft-Wärme-Kopplung für den Ersatz überalterter Kraftwerke in Deutschland", Institute for Sustainable Solutions and Innovations, 12.12.2004

- [13]Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung; Zusammenfassung des Berichts, 02.07.2002
- [14]IER/WI prognos, Bericht Szenarienerstellung für die Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung" des 14. Dt. Bundestages, 17.06.2002
- [15]J. Nitsch et al.: "Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland"; DLR, Institut für technische Thermodynamik, Ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung, WI, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie; Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal, Februar 2004
- [16]Umweltpolitik, Erneuerbare Energien in Zahlen nationale und internationale Entwicklung. BMU, März 2003, S. 24; Mai 2006 englische Ausgabe, S. 26; BEE; Jahresrückblick EE in 2006, Internet
- [17]BMU, Jahresbericht 2005 zur Forschungsförderung im Bereich der erneuerbaren Energien, Juli 2006
- [18]http://www.CO2-handel.de/archive\_306.html

# Die Sonne und GAIA<sup>1</sup>

### 1. Einführung

GAIA – die göttliche Urmutter Erde der griechischen Mythologie – nannte James Lovelock die in ständiger Selbstorganisation befindliche Ökosphäre [1]. Fasziniert von GAIA, unterschätzte er wohl etwas, daß diese nicht leben kann ohne RA, denn noch im 1. Jh. n. Chr. wußte man: "Omnium causa sol" [2], und Friedrich Engels notierte: "Alle Energie, die jetzt auf der Erde tätig, verwandelte Sonnenwärme" [3]. Dementsprechend will der vorliegende Text ergänzen. Außerdem sollen die vor zwei Jahren erschienenen Thesen "Zur ökologischen Transformation" [4] – seinerzeit mehrheitlich zustimmend aufgenommen – hier tiefer und umfassender begründet werden.

Will man das Wesen der solaren Einwirkung auf den Erdball verstehen, kann das nur auf der Grundlage der komplexen Systeme geschehen.

# 2. Komplexe Systeme – die ökologische Sicht

# 2.1 Merkmale komplexer Systeme

Es ist noch immer schwierig, "Komplexität" (lat. Verflochtenheit) zu definieren. Werner Ebeling et al. formulieren: "Als komplex bezeichnen wir (aus vielen Teilen zusammengesetzte) ganzheitliche Strukturen, die durch viele (hierarchisch geordnete) Relationen bzw. Operationen verknüpft sind....Die Komplexität einer Struktur spiegelt sich in der Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen Elemente, in der Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen Relationen und Operationen sowie in der Anzahl der Hierarchie-Ebenen wider. Im strengeren Sinne liegt Komplexität dann vor, wenn die Anzahl der Ebenen

<sup>1</sup> Erweiterte Fassung eines Vortrags auf der 3. Leibniz-Konferenz "Solarzeitalter 2006", Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien, Lichtenwalde, 11.–13. Mai 2006. Eine ausführlichere Darstellung dieser Thematik wurde veröffentlicht unter www.leibniz-institut.de. Für Hinweise und Diskussionen dankt der Autor den Herren Prof. Dr. Gerhard Öhlmann und Dr. Peter Starke.

sehr groß (unendlich) ist....Wir halten den Begriff der Emergenz für so zentral, daß wir die Forderung "Entstehung emergenter Eigenschaften" mit in die Begriffsbildung für "komplexe Strukturen" aufnehmen möchten." [5]

Jean-Marie Lehn, Chemienobelpreisträger 1987, komprimiert seine Beschreibung komplexer Systeme zu einer Gleichung [6], die der folgenden Einführung zugrunde gelegt wird:

Complexity = (Multiplicity) (Interaction) (Integration)

#### 2.1.1 Vielfalt

Unter "Vielfalt" ist nicht die Vielfalt des Uniformen zu verstehen. Ein komplexes System muß eine Vielfalt der Variabilität aufweisen. Wesentlich für ein komplexes System ist also nicht vorrangig die Vielfalt der Objekte, sondern vielmehr die der Beziehungen zwischen diesen. Vielfalt ist als eine Ressource in der Entwicklungsgeschichte aufzufassen. Biodiversität trägt auch das menschliche Dasein. Wo Vielfalt vernichtet wird, werden Wege in die Zukunft versperrt. Vielfalt verleiht Flexibilität und dadurch Stabilität.

In der Realität jedoch geht ein katastrophales Artensterben vor sich. Von den 40.000 Tier- und Pflanzenarten der Roten Liste sind 16.000 Arten vom Aussterben bedroht, darunter Eisbären, Nilpferde und Süßwasserfische. Damit stieg die Anzahl der bedrohten Arten in den letzten zwei Jahren um 500 – das Tempo der Artengefährdung nimmt zu [7]. Es ist das schnellste Artensterben, das auf dem Globus je stattgefunden hat, und es ist das erste in Anwesenheit des Menschen. Die Folgenschwere dieser sechsten Extinktion wird meist unterbewertet, weil sie nahezu unmerklich, meist nur von Fachleuten beobachtet, vor sich geht. Vielleicht jedoch ist diese durch den Menschen verursachte Extinktion überhaupt die gefährlichste Bedrohung der Gesellschaft.

### 2.1.2 Wechselwirkungen

Komplexe Systeme sind meist netzartig aufgebaut, und es scheint, daß das Netz das allgemeine und skaleninvariante Bauprinzip natürlicher Systeme ist. Vermutlich prägt das Netz des Universums seine Organisationsprinzipien allen anderen evolvierenden Systemen auf. "Wenn es also schon gelungen ist, solche Eigenschaften des Raumes wie Inhalt, Krümmung, Verschlingung usw. mit Netzwerken und den Knoten auf ihnen zu verknüpfen, woher kommen dann die Netzwerke. Sie kommen aus dem Beziehungsgefüge der wirklich existierenden Dinge in ihrer Evolution" [8]. Cyanobakterien, die Erbauer der Stromatolithen, sollen schon vor vier Milliarden Jahren derartige Netze

hervorgebracht haben. Diese Netze seien kommunikativ, adaptiv und kreativ und hätten das Potential eines kollektiven Gehirns [9]. "Der weltweite Neokortex ist…eine Stufe in der fortwährenden Evolution einer vernetzten Intelligenz, die bereits seit langer Zeit existiert. Und sie beschränkt sich weder auf den Menschen, noch ist sie ein Produkt der Technologie." [10]

Die Betonung der Wechselwirkung verschiebt allgemein die Bedeutung vom einzelnen "Objekt" zu den "Zusammenhängen". Nach G. Bateson sollte jedes Ding nicht durch das definiert werden, was es an sich ist, sondern durch seine Zusammenhänge mit anderen Dingen – eine Denkweise, die ein neues wissenschaftliches Paradigma widerspiegelt.

Wechselwirkung in natürlichen Systemen heißt, daß sich in ihnen alles ständig verändert. Das ist das "panta rhei" des Heraklit. Immerwährende Bewegung ist eine existentielle Bedingung für komplexe Systeme. Die ewige Bewegung ist auch das Grundelement der "Autopoiese" des Humberto Maturana. Bewegung sei das Wesen des Lebens: Ständige Selbsterschaffung durch stabile Kreisprozesse in relativ autonomen Kompartimenten [11] – eine verblüffende Konvergenz von moderner Wissenschaft und alter östlicher Philosophie: Der ewige Kreislauf als die Grundanschauung des Buddhismus. Das allgegenwärtige Fließen – die Auswirkung ganzer Felder von Nichtgleichgewichtszuständen. Und wiederum erschafft das Fließen neue Nichtgleichgewichtszustände - eine ewige Dynamik, auf unserem Planeten in Gang gehalten durch die Sonne. Dabei erscheint als vorherrschende Art der Bewegung das Pulsieren. Netze pulsieren in Rhythmen auf der ganzen Zeitskala von Millisekunden bis zu Äonen, von Herzschlägen bis zur Sternenbildung. Zu tieferen Einsichten hat die Chaosforschung verholfen, die viele derartiger Rhythmen als chaotisch erkannte, z.B. den Herzschlag, die Frequenz der Tropfen aus einem Wasserhahn u.a.m.

Komplexe Systeme, also auch solche der Technik, weisen als ein zentrales Charakteristikum Historizität auf. Das bedeutet, daß die Zukunft nicht nur mit der unmittelbaren, sondern auch mit der ferneren Vergangenheit korreliert ist. Damit ist die "Offenheit der Zukunft" relativiert und die politische Zweckthese vom "Ende der Geschichte" auch wissenschaftlich widerlegt.

Komplexe Systeme können in der Dynamik ihrer Selbstorganisation das qualitativ Neue hervorbringen – die sogenannte Emergenz. Emergenz ist ein weiterer für die Charakterisierung komplexer Systeme zentraler Begriff. Er taucht in Systemen unterschiedlichster Natur und Dimension auf, z.B. in den funktionalen Zusammenhängen von Lawinenabgängen, Erdbeben und Aktienmärkten, aber auch in der Informationstheorie und der Ästhetik – ein Be-

griff also von hoher Allgemeinheit, folgend aus einem noch nicht erkannten universellen Prinzip. Emergenz kann auch relativ sprunghaft auftauchen, wenn sich nämlich zwei Subsysteme vereinigen – so, wie es die Symbiogenese für die Entstehung einer neuen Art postuliert [21-18]<sup>2</sup>.

Die Auffassungen zweier Physiker widerspiegeln die Dynamik in der Erforschung komplexer Systeme:

Peter Kafka: Ein komplexes System tendiere dazu, stets eine noch höhere Komplexität zu erreichen, damit "alles immer ein wenig besser zusammenpaßt", das System also immer etwas stabiler, d.h. immer besser überlebensfähig wird. Das ist die Tendenz der Selbststabilisierung.

Per Bak: Komplexität und Kritikalität seien identisch. Unvorhersehbare katastrophale Ereignisse seien komplexen Systemen immanent und darum grundsätzlich unvermeidbar. Das ist die Tendenz der Selbstzerstörung.

Aus derartigen Feststellungen sollten Entscheidungskriterien für die Entwicklung jeglicher Großtechnik abgeleitet werden: Komplexe Systeme sind auf lange Sicht grundsätzlich nicht beherrschbar. Wenn ein Naturwissenschaftler angesichts dieser systemtheoretischen Erkenntnisse sowie der seit etwa einem halben Jahrhundert vorliegenden einschlägigen Negativerfahrungen eine Sicherheitsgarantie für die Kernenergietechnik von mindestens 1.500 Jahren ausstellt, verrät das eine statische Denkweise, die den Realitäten eines komplexen Systems nicht adäquat ist.

## Ursache und Wirkung

Es gibt in Natur und Gesellschaft kaum eine einzelne Ursache, die, in klassischer Determiniertheit, nur eine einzige Wirkung zur Folge hat. Nachdem man eine Wirkung beobachtet hat, muß man nach den "Geschwisterwirkungen" suchen. Manche von denen können erst mit Verzögerung eintreten, so daß man den Zusammenhang gar nicht mehr erkennt.

Andererseits ist fast jede Wirkung in komplexen Systemen die Resultante mehrerer Ursachen. Derart vernetzte Ursachen können zeitlich weit auseinander liegen. Es entstehen dann gleichsam aufgeladene Spannungszustände, die sich zu einem unvorhersehbaren Zeitpunkt durch einen "Trigger", entladen können.

Die disziplinübergreifende Wirkmächtigkeit systemtheoretischen Denkens läßt sich in einer neueren Arbeit von Stiehler erkennen: "Eine gesellschaftliche Erscheinung, ein historisches Ereignis ist nie Resultat nur einer

<sup>2</sup> Das bedeutet: [Nummer der Literaturstelle-Nummer der Seite in der Literaturstelle]

Ursache, sondern eines Komplexes bewirkender Faktoren, die ihrerseits einen Raum von Möglichkeiten bilden, innerhalb dessen Wechselwirkungen unterschiedlicher und gegensätzlicher Momente stattfinden." [12]

### Komplexität und Entropie

Der Entropiebegriff hat längst seinen Ursprungsbereich, die Gleichgewichts-Thermodynamik, verlassen und wird heute nicht nur in der Molekularstatistik, sondern auch in der Informationstheorie, der Chaosforschung, der Theorie komplexer Systeme, der Sprachwissenschaft, der Ästhetik und in der Ökonomie angewendet.

Die statistische Entropie wird häufig als das Maß der Unordnung bezeichnet [5-16]. Obwohl eher qualitativ, ist diese Definition doch brauchbar, um das "Vorher – Nachher" makroskopischer Abläufe zu vergleichen.

Komplexe Systeme befinden sich *zwischen* den Zuständen der extremen Ordnung (Idealkristall) und der extremen Unordnung (Gas). Es überrascht schon, wenn ein Dichter bereits vor sechzig Jahren einen Schluß zog, der heutigen Erkenntnissen der Systemtheorie entnommen sein könnte: "Zwei Gefahren bedrohen beständig die Welt, die Ordnung und die Unordnung." [13]

Schon aus der oben erwähnten Beziehung zwischen Entropie und Komplexität wird ersichtlich, daß die Boltzmann-Entropie S = k·ln W nicht direkt als Maß der Komplexität übernommen werden kann, sondern eine Verallgemeinerung des Entropiebegriffs vorzunehmen ist [14] [5-24]. Hatte Robert Havemann derartiges im Sinn, als er schrieb: "Ganz offensichtlich ist der Entropiesatz innerhalb einer noch allgemeineren Gesetzmäßigkeit der Natur – im dialektischen Sinne – aufgehoben,…" [15]?

Wenn es zutrifft, daß der allgemeine Attraktor der Evolution die Komplexität ist, dann ist die thermodynamische Entropie in ihrer richtungsweisenden Bedeutung für komplexe Systeme zu relativieren. Das heißt nicht, daß die Entropie in komplexen Systemen nicht gelte. Es existiert aber zwischen den Gesetzen des Elementaren und denen des Komplexen ein nicht triviales Verhältnis [5-21].

# 2.1.3 Integration

In dem Faktor "Integration" kommt zunächst einmal die Ganzheit des Systems zum Ausdruck. Jedes Element beeinflußt alle anderen, wenn auch meist nur indirekt. Kein Bestandteil des Systems kann entfernt oder verändert

werden, ohne das System zu verändern. Für ein holistisches System gibt es kein "Außerhalb".

Ein komplexes System ist mehr als die Summe seiner Elemente. Dieses "Mehr" resultiert aus der Struktur, der Organisation sowie vor allem aus dem Netz der Wechselwirkungen. Einer der Gründe für die Schwierigkeiten im Umgang mit komplexen Systemen besteht darin, daß man sie nicht dadurch verstehen kann, daß man ihre Einzelteile studiert. Die Analyse ist untauglich für die Untersuchung komplexer Systeme. Die gesamte bisherige Naturwissenschaft aber beruht auf der Analyse. Diese hat damit eine fast unerschütterliche Autorität erworben. Ein komplexes System mit nichtkomplexen Denkweisen verstehen zu wollen, führt zu Resultaten begrenzter Aussagekraft oder zu Fehlaussagen. Es scheint, daß manche aktuellen Meinungsverschiedenheiten in der Wissenschaft auch aus Betrachtungsweisen unterschiedlichen Komplexitätsgrades herrühren.

Andererseits bezeichnet der Faktor "Integration" die relativen Begrenzungen des Systems, die dessen Individualität ausmachen. Gemäß der Dynamik komplexer Systeme verändern sich auch die Grenzen unaufhörlich. Hier kommt die Dialektik ins Bild: Einerseits wird die Ganzheit betont, der allseitige Zusammenhang, andererseits werden die Grenzen hervorgehoben, die Membran, die relative Autonomie der Subsysteme. Es wurde von der "Janusköpfigkeit" der Evolution gesprochen [16].

Gemäß den Gesetzen komplexer Systeme entwickelt sich die Struktur des Universums, das Netz der Galaxien von der Singularität bis in alle Zukunft, und ebenso die Selbstorganisation des Lebens im Universum.

Die Wahrnehmung der komplexen Systeme wird unser Verständnis der Wirklichkeit, der Wissenschaft, der Gesellschaft und insbesondere unsere Vorstellungen von der Zukunft umwälzend verändern. Die Theorie komplexer Systeme wird voraussichtlich einen mächtigen Impuls auch auf die Weiterentwicklung des Marxismus ausüben [17].

Das historische Gewicht der Theorie komplexer Systeme entspricht dem Wort Albert Einsteins: "Die Welt, die wir geschaffen haben, ist das Resultat einer überholten Denkweise. Die Probleme, die sich daraus ergeben, können nicht mit der gleichen Denkweise gelöst werden."

# 2.2 Die systemische Ökologie

Als ein praxiswirksames Ergebnis systemtheoretischen Denkens entstand die systemische Ökologie. Eine neuere Definition berücksichtigt systemtheoretische Termini und die Stellung des Menschen: "Ökologie ist das Studium

von Struktur und Funktion der Natur. Der Mensch ist Teil dieser Natur" [18]. Die Wissenschaft hat sich in den letzten fünfzig Jahren der ökologischen Weltsicht stufenweise angenähert [19], deren Kern die Idee der allseitigen, universalen Vernetzung ist – die Idee der Ko-Evolution. Deren Wesen ist das Miteinander, die Kooperation, der Synergismus, die Symbiose – im Widerspruch zu den kapitalismus-adäquaten Begriffen "Konkurrenz", "Kampf ums Dasein" und "Recht des Stärkeren". "Die Organismen und ihre Umwelt evolvieren in so enger Kopplung, daß man von einem einzigen Evolutionsprozeß sprechen muß" [1-68]. Es wird für wahrscheinlich gehalten, daß die weitere Entwicklung des Internets zur Ausdifferenzierung eines "globalen Gehirns" führt – die nächste Stufe der Ko-Evolution von GAIA [20].

Daß die evolutive Kooperation nicht ein Traum von Romantikern, sondern naturwissenschaftlich fundiert ist – dafür steht vor allem die inzwischen akzeptierte "Serielle Endosymbiose-Theorie" (SET) [21]. Sie sieht in der Symbiogenese nicht einen zufälligen, unikalen Schritt in der Entwicklung der Bakterien, sondern ein allgemeines, bisher vernachlässigtes Wirkprinzip für die Entstehung neuer Arten. Expressis verbis wird hier die Position eines Neo-Lamarckismus vertreten: "Symbiogenese ist entwicklungsgeschichtlicher Wandel durch die Vererbung erworbener Genausstattungen"[21-18].

Die systemische Ökologie beeinflußt alle Ebenen menschlichen Daseins durch neue Fragestellungen und Forderungen – widergespiegelt im tiefenökologischen Wertekanon, eine grundsätzliche Kritik an dem bestehenden Gesellschaftssytem [22].

#### 3. Sonne und Erde

Die Sonne ist der Motor fast aller Vorgänge in der Biosphäre. Wahrscheinlich reichen die solaren Wirkungen auf unserem Globus tiefer, als wir schon wissen. Versuche, die Lebensfrage "Energieversorgung der Erdbevölkerung" unter Abkopplung von der Sonne – quasi geo-autark – zu lösen, entspringen einer überholten Philosophie.

#### 3.1 Das solare Potential

Die Systeme der Natur und der Gesellschaft sind offene Systeme, solche also, die dauernd Stoff, Energie, Syntropie und Information austauschen in ihrem unaufhörlichen Prozeß der Selbstorganisation.

Es gibt auf der Erde nur drei voneinander unabhängige und damit wirklich *primäre* Energiequellen: Die *Sonnenstrahlung*, die *Geothermie* und die *Gra-*

vitation (einschließlich der von Sonne und Mond). Daneben gibt es fünf Sekundärenergien, die überwiegend von der Sonnenstrahlung herrühren: Wind, Wasserkraft, Umgebungswärme, Meeresenergien (thermisch und kinetisch) und Biomasse.

Zu der Größenordnung dieser Energien existieren die folgenden Abschätzungen:

"In einem Jahr verbraucht die Menschheit so viel Energie, wie in 20 min von der Sonne auf der Erde ankommt." [23]

"Das gesamte jemals vorhandene Weltvorkommen an fossilen Brennstoffen…entspricht energiemäßig nur der Sonneneinstrahlung von etwa zwei Wochen" [24].

"Das global insgesamt technisch nutzbare Potenzial der erneuerbaren Energien liegt aber selbst bei strengen Restriktionen in der Größenordnung des Sechsfachen des derzeitigen weltweiten Bedarfs an Endenergie." [25]

Es ist zu erwarten, daß allein schon dieser industriell-energetische Pfad in das Ökozeitalter sich für die Gesellschaft und die Wissenschaft als umwälzend erweisen wird – fundamentaler als die bisherige wissenschaftlich-technische Revolution. Nimmt man jedoch die schon heute weltweit verbreiteten, unübersehbaren Realitäten der Solartechnik, einschließlich ihrer enormen Wachstumsraten und absehbaren Entwicklungspotentiale [26], vorurteilsfrei zur Kenntnis und billigt man den künftigen Generationen ebensoviel Kreativität zu, wie sie die Menschheit in ihrer bisherigen Geschichte bewiesen hat, müßte jeder Zweifel an der technischen Möglichkeit einer künftigen Vollversorgung mit ökologischen Energien als nicht wissenschaftlich begründbar verstummen

# 3.2 Irdische Wirkungen der Sonne

# 3.2.1 Strukturbildung

#### Sonne und Chemie

Seit der Agglomeration des kosmischen Materials zur Protoerde läuft hier eine vielfältige Chemie ab – die sogenannte Paläochemie. In folgendem wird eine auf einfachen physikalisch-chemischen Erwägungen beruhende Einteilung des Zeitraums von der Formierung des Erdballs bis zur Entstehung des Lebens vorgestellt. Naturgemäß sind diese Betrachtungen unscharf und gehen von einer relativen Kontinuität aus, die in der Wirklichkeit sicher nicht gegeben war (Polumkehr, Meteoritenimpacte, Vulkanismus, Kaltzeiten).

Die Sonne und GAIA 59

Die vorgeschlagenen vier Phasen können als Stadien der Selbstorganisation der Geosphäre aufgefaßt werden. Der Entropieexport erfolgt in den Weltraum. Jedes Stadium wird kontrolliert durch ein komplexes System von Bedingungen. Dabei wird das Geschehen innerhalb des selbstorganisierenden Systems nicht einfach durch das Bedingungsfeld direkt determiniert, sondern es ko-evolviert ein einheitliches System mit höchster Wechselwirkung und großer Aktivität – das komplexe System ist kreativ.

#### Phase I: Oberflächentemperatur 1500 °C bis 300 °C

Darunter soll der Zeitraum verstanden werden zwischen der überwiegend noch glutflüssigen Erdoberfläche (900–1500 °C) und deren Abkühlung auf etwa 300 °C. Die für die Bildung endothermer chemischer Verbindungen erforderlichen Energiequellen waren in dieser Ära sehr vielfältig:

- Sonnenstrahlung, chemisch besonders wirksam deren noch ungefilterter UV-Anteil,
- elektrische Entladungen (Blitze), wesentlich häufiger und energiereicher als heute,
- Wärme vulkanischer Laven mit Temperaturen bis schätzungsweise 1500
  °C.
- Meteoriten-Impacte, die die Erdkruste lokal immer wieder aufschmolzen [27] und dort Temperaturen noch über 1500 °C erzeugten.
- Radioaktivität, die in der Urzeit dreimal so viel Energie als Wärme sowie ionisierende Strahlung übertrug wie heute, darunter auch die atmosphärische Radioaktivität des Radons, sowie Herde von natürlichen Kernspaltungsreaktionen [28].

Die Gesteinsschmelzen bilden dynamische chemische Systeme, die im wesentlichen Minerale sowie leichtflüchtige, niedermolekulare Verbindungen entstehen lassen, die zu einem großen Teil die primordiale (erste stabile) Atmosphäre bildeten. Deren Hauptbestandteile waren wahrscheinlich: Wasserdampf (ca. 80%), Kohlenstoffdioxid (ca. 17%), Chlorwasserstoff HCl (um 1,5%), ihre Nebenbestandteile Stickstoff, Schwefelwasserstoff H<sub>2</sub>S, Schwefeldioxid SO<sub>2</sub>, Fluorwasserstoff HF, Kohlenstoffmonoxid CO, Methan CH<sub>4</sub>, Ammoniak NH<sub>3</sub>, Wasserstoff H<sub>2</sub> und Argon Ar. Vielfältig waren die Reaktionen zwischen Gasen und Schmelze, z.B. mit der Bildung

- von Alkalimetall- und Erdalkalimetallhalogeniden aus entsprechenden Silicaten und den Halogenwasserstoffen der Atmosphäre,
- von Stickstoffmonoxid NO infolge der Hochtemperatur-Oxidation von Stickstoff durch höherwertige Metalloxide, die selbstverständlich auch weitere Verbindungen zu oxidieren vermochten.

oxidierter Verbindungen durch Reaktion mit Wasserdampf unter Freisetzung von Wasserstoff.

Diese Atmosphäre war reduzierend und hätte Spuren freien Sauerstoffs, gebildet durch die Photolyse und Radiolyse des Wassermoleküls, sofort gebunden. Unter diesen Bedingungen waren also thermisch, photo- und strahlenchemisch getriebene Oxidationsreaktionen, mit Wasser, CO<sub>2</sub> und Metalloxiden als Oxidatoren, über Jahrmillionen möglich, ohne daß freier Sauerstoff existierte. Der Urey-Effekt (die Abschirmung der solaren UV-Strahlung durch O<sub>2</sub>-Moleküle) hätte in diesem Zeitabschnitt also gar nicht wirksam werden können.

Eine analoge Annahme liegt auch den vor etwa fünfzig Jahren durchgeführten Versuchen von Stanley L. Miller zugrunde, in denen ein gasförmiges Ausgangsgemisch von Wasser, Ammoniak NH<sub>3</sub>, Methan CH<sub>4</sub> und Wasserstoff H<sub>2</sub> elektrischen Entladungen ausgesetzt wurde [23-23]. In derartigen Versuchen mehrerer Autoren wurde eine beträchtliche Anzahl auch komplizierter organischer Moleküle nachgewiesen – möglicherweise Vormaterial für die Entstehung des Lebens, darunter nicht nur Carbonsäuren und Aminosäuren, sondern auch Purine, Zucker, Nucleotide und Porphyrine.

Obwohl in dieser Phase die natürlichen Reaktionsbedingungen wesentlich härter waren als in den erwähnten Laborversuchen, gibt es dennoch hinreichend Gründe anzunehmen, daß schon in dieser ersten, abiotischen Periode mit ihren unphysiologischen Verhältnissen (z.B. den sehr hohen Temperaturen, der Abwesenheit von freiem Sauerstoff und flüssigem Wasser, der hochenergetischen Strahlung) eine Vielfalt auch organischer Verbindungen entstanden ist, zu denen primär die einfachen Moleküle Formaldehyd HCHO und Cyanwasserstoff HCN zählten. Die Bedeutung des Cyanwasserstoffs zeigt eventuell die stöchiometrische Entsprechung 5 HCN = Adenin  $C_5N_5H_5$  – selbstverständlich nicht beweisend für diese Genese.

Dieser primären chemischen Welt haftet hinsichtlich ihrer Entwicklungspotenz allerdings ein Nachteil an: All diese Moleküle liegen verdünnt in der Gasphase vor, eine wässrig-flüssige Phase existiert noch nicht, und die Festkörpergrenzflächen sind noch so heiß, daß sie nur wenige Umsetzungen robuster Moleküle katalysieren können. In den oberen, kälteren "Stockwerken" der Atmosphäre werden photochemische Umsetzungen zu endothermen Reaktionsprodukten überwiegen. In derartigen Molekülen ist Sonnenenergie fixiert. Also: Schon lange vor Erscheinen flüssigen Wassers auf der Erdoberfläche beginnt die Sonne ihre strukturbildende Wirkung in der irdischen Atmosphäre. Mit zahlreichen chemischen Reaktionen in dem Tempe-

Die Sonne und GAIA 61

raturgefälle zwischen der noch jungen, instabilen, heißen Kruste und dem kalten Weltraum bereiten sich schrittweise die Bedingungen für eine komplexere Chemie vor.

Obwohl über die quantitative Zusammensetzung der primordialen Atmosphäre bis jetzt keine zuverlässigen Aussagen möglich sind, ist eine Tatsache unabweisbar: Diese Atmosphäre enthält Wasserdampfmengen, die Millionen Jahre später, nach dem Abregnen, den gesamten Vorrat an Wasser für die Hydrosphäre liefern. Nach neueren Abschätzungen ist ein großer Anteil der irdischen Wasservorräte extraterrestrischen Ursprungs.

### Phase II: Oberflächentemperatur 300 °C bis 150 °C

Die zeitlichen Übergänge zwischen den beiden Phasen sind fließend und umfassen riesige Zeiträume. Die lokale Temperaturverteilung auf der Erdoberfläche ist ungleichmäßig, weil schon abgekühlte Regionen, aktive Vulkanzonen und partielle impactbedingte Auf-schmelzungen über lange Zeiten koexistieren.

Bestimmend für diese Phase ist ein lokaler, intermittierender Ur-Regen. Aus massiven Wolkenschichten fällt CO<sub>2</sub>-gesättigter saurer Regen, und ein Teil davon erreicht erstmalig den noch heißen Boden. Das Wasser verdampft sofort wieder. Über hunderttausende von Jahren benetzt dieser Primärregen immer wieder die Erdoberfläche, je kühler diese, desto häufiger, und desto länger auch sind die Verweilzeiten der warmen flüssigen Phase, bevor sie wieder verdampft. Dieser intermittierende Ur-Regen sollte schon eine erste Auflockerung der ansonsten reaktionsträgen Mineraloberflächen bewirkt haben – erste Verwitterungsfolgen durch korrosive Einwirkungen von z.T. überhitztem Wasserdampf, Halogenwasserstoffen und Kohlenstoffdioxid.

An den immer noch oberhalb 100 °C befindlichen Gesteinen der Oberfläche laufen chemische Reaktionen unter annähernden Hydrothermalbedingungen ab, z.B. Pyrohydrolysen (an Si–O–Si-, Al–O–Al- und Si–O–Al-Gruppen), Umsetzungen des CO<sub>2</sub> mit Calciumsilicaten unter Bildung von Calciumcarbonat sowie metasomatische Umwandlungen (z.B. Kaolinitisierungen) bis hin zur Hydrothermalsynthese sowie zur partiellen Amorphisierung von Mineralen.

Phase III: Oberflächentemperatur 150 °C bis < 100 °C

Das ist der Zeitraum bis zur dauerhaften Existenz flüssigen Wassers. Kontinente und Ozeane existieren bereits 100-200 Millionen Jahre nach Formierung des Erdballs [29].

In dieser Phase III werden in den oberflächennahen Bereichen Temperaturen um 100 °C immer häufiger und schließlich endgültig unterschritten, so

daß der Niederschlag nicht mehr vollständig verdampft. Langsam kühlt die Atmosphäre ab, und über zehntausende von Jahren geht ein Dauerregen nieder. Unter den heutigen meteorologischen Bedingungen brauchte der Regen 60.000 Jahre, um alle Ozeanbecken zu füllen (s. 3.2.2). Seinerzeit aber bestand die Atmosphäre anfänglich zu 80% aus Wasserdampf.

Der Regen und das sich ansammelnde Wasser bewirkten zumindest folgendes:

- Die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre ändert sich durchgreifend: Zur Hauptkomponente wird Kohlenstoffdioxid (etwa 75–80%). Die wasserlöslichen Verbindungen, wie Halogenwasserstoffe, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid, sind mit dem Regen aus der Atmosphäre entfernt worden, die Gehalte an Methan, Stickstoff und Kohlenstoffmonoxid entsprechend angestiegen. Die so entstandene Atmosphäre enthält nun kaum mehr Wasserdampf der Treibhauseffekt und damit die Temperatur der Atmosphäre gehen weiter zurück.
- Geologische Mengen lockeren Gesteins werden in die Ozeanbecken und hier vor allem in die Geosynklinalen transportiert. Niemals enthielten die sich füllenden Becken reines Wasser, denn eine Vielzahl wasserlöslicher Verbindungen, vor allem der Alkali- und Erdalkali-, aber auch vieler Schwermetalle, werden in die Ozeane gespült. Mit dem Regen gelangen auch die in der Atmosphäre entstandenen chemischen Verbindungen hauptsächlich in die Ozeane. Deren Wasser ist reduzierend und sauer.
- Der Säuregrad wird durch Umsetzungen mit Metalloxiden sowie durch unterseeische alkalische Quellen vulkanischen Charakters allmählich verringert bis zur schwachen Alkalität der Lösung. Nun setzt ein Vorgang von geologischer Bedeutung ein: Atmosphärisches Kohlenstoffdioxid wird von der wäßrigen Phase absorbiert und reagiert teilweise zu Hydrogencarbonat- und Carbonat-Ionen, HCO<sub>3</sub>– bzw. CO<sub>3</sub><sup>2</sup>–, die mit Calciumund Magnesium-Ionen schwerlösliche Carbonate bilden. Diese setzen sich als Sedimente ab.
- Die jungen Ozeane waren zunächst noch nahezu siedeheiß und kühlten nur allmählich ab günstig für relativ hohe Reaktionsgeschwindigkeiten, insbesondere von Redoxreaktionen und organischen Umsetzungen.

Nun steht ein neues Reaktionsmedium zur Verfügung: Die "Wunderphase" Wasser mit ihrer einmaligen Kombination physikalischer und chemischer Eigenschaften. Sie ermöglicht in der Geschichte des Erdballs eine neue Art von Chemie – weitaus komplexer und, infolge der nun höheren Konzentrationen, umsatzstärker als in den vorangegangenen Gasreaktionen der Atmosphäre.

Eine Mannigfaltigkeit neuer Reaktionswege öffnet sich: Hydratisierungsund Hydrolysereaktionen erzeugen reaktive OH-Gruppen an Molekülen wie auch als Liganden von Metallkationen, Säure-Base-, Redox-, Komplexbildungs- und Fällungsreaktionen, Homogenkatalysen sowie heterogenkatalytische Umsetzungen an den Grenzflächen verschiedener Festkörper, z.B. von Oxiden, Sulfiden (Pyrit) und Tonmineralen (Montmorillonit, Kaolinit). Die chemische Reaktivität erobert über die homogene Phase des Ozeans hinaus neue Kompartimente: Feuchtgebiete, Küstenstreifen und die Meeresböden.

Die Sonne rückt an die erste Stelle als Spender für Wärme und Photonen. Gegenwärtig beträgt die Energie des geothermischen Stroms nur noch ein Hundertstel der Sonnenenergie. Die strukturbildende Rolle der Sonne tritt immer deutlicher hervor. Seit der Entstehung der Erde bis heute ist die von der alternden Sonne abgestrahlte Energie um 25% angewachsen. Die neugebildeten chemischen Verbindungen werden immer energiereicher und komplizierter, sie entfernen sich immer weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht und enthalten zunehmend kinetische Hemmungen, sie werden metastabil. Der wachsende Energieinhalt der photochemisch entstandenen Verbindungen geht ausschließlich auf die Sonne zurück.

Über hunderte von Millionen Jahren nähert sich diese chemische Welt allmählich einer Produktivitätsgrenze, die ein Fortschreiten zu einem höheren Komplexitätsniveau behindert. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich darin, daß der Stoffnachschub nicht gesteigert werden kann und sich ein bestimmtes Gleichgewicht zwischen Bildung und Zerfall einstellt. Außerdem sind die Konzentrationen in den Ozeanen und auf dem Land für einen höheren Stoffumsatz nicht ausreichend. Einer der Wege, Moleküle auf Reaktionsdistanz anzunähern, die Adsorption an katalysierenden Festkörperoberflächen, unterliegt gewissen Einschränkungen: In manchen Fällen werden die Reaktionsteilnehmer so stark adsorbiert, daß sie den Katalysator blockieren.

#### Phase IV. Die Membran

Da beschreitet die Evolution einen anderen Weg, um die Stoffkonzentration zu erhöhen und bringt die wichtigste Errungenschaft der präbiotischen Ära hervor – die selektiv-permeable Membran. Diese umschließt einen blasenförmigen, der Umgebung gegenüber relativ autonomen Raum (Vesikel, Lipidtropfen [21-99], Koazervattropfen [30]). Leichter verständlich wird die Bildung der Membran, wenn als deren evolutives "Vorbild" (als "template") Gesteins-Poren und -blasen, vor allem in Eisensulfiden und Schwermetallsilicaten und/oder auch Schichtzwischenräume in Tonmineralen angenommen werden. Derartige, für die Chemie der abiotischen Phase neuartige "Mikrore-

aktoren" bieten, verglichen mit dem membranlosen Zustand, den chemischen Umsetzungen für die Selbstorganisation eine Vielfalt neuer Möglichkeiten:

- Die chemischen Bedingungen (Reaktionsvolumen, pH-Wert) bleiben über längere Zeit nahezu unverändert und die Konzentrationen können sich auf eine nicht zu niedrige Größe einpegeln.
- Homogenkatalysen unter Beteiligung von Wasserstoff- und Schwermetall-Ionen kommen ins Spiel, was zu höheren Reaktionsgeschwindigkeiten und zu einer größeren Vielfalt an Reaktionswegen führt.
- Höhermolekulare Verbindungen in größeren Konzentrationen können entstehen; eventuell schon Supramoleküle<sup>3</sup>.

Die ersten Vesikeln haben sich vermutlich vorrangig in den Flachwasser-, Brandungs- und Wattbereichen entwickelt, da die inzwischen komplexen Moleküle in diesen Zonen infolge adsorptiver Fixierung besonders günstige Reaktionsmöglichkeiten vorfanden und die Vesikeln, zwecks schnelleren Informationsaustauschs (mittels Molekülen und Ionen), leicht Kolonien bilden konnten. Andererseits mußte die Membran besonders hier die chemischen Komponenten vor zu intensiver Sonnenstrahlung (mutagene Strahlenschäden) wie auch vor Austrocknung schützen. Die Membran schirmte auch die harte UV-Strahlung ab – und das schon Milliarden Jahre vor der Existenz der Ozonschicht. Dadurch konnten innerhalb der Vesikeln wesentlich empfindlichere Moleküle entstehen als im membranlosen Zustand.

Möglicherweise waren es autokatalytische Umsetzungen, eventuell vom Typ der oszillierenden Reaktionen (ähnlich der Bjelousow-Shabotinski-Reaktion), dissipative Systeme, die in den Vesikeln die präbiotische Selbstorganisation komplexer Moleküle, einen relativ schnellen Vorgang, vorangetrieben haben. Ein stochastischer Prozeß hätte dafür mehr Zeit benötigt als das Weltalter.

Es könnte sein, daß auf diesem Niveau das "Supermolekül" Ribonucleinsäure (RNA) abiotisch entsteht und damit die "RNA-Welt" vorbereitet wird. [21-104]

Hilfreich für das Verständnis dieser Vorgänge ist die Emergenz einer abiotisch-chemischen Selbstorganisation, einer adaptiv-evolutionären Chemie, ein Bild, gewonnen aus der Forschung zur Supramolekularen Chemie. [31]

-

<sup>3</sup> Hochkomplexe chemische Systeme (jenseits der molekularen Chemie) aus Komponenten, die über nicht-koyalente intermolekulare Kräfte wechselwirken.

#### Das Leben

Die leistungsfähiger gewordenen chemischen Umsetzungen beanspruchen nun immer mehr Kohlenstoffdioxid, wodurch dessen atmosphärische Komzentration weiter absinkt.

Zumindest seit der Existenz flüssigen Wassers auf der Erdoberfläche und noch lange vor Geburt des Lebens, wird das chemische Geschehen zu immer höherer Komplexität getrieben, bis eine Kolonie von Vesikeln mit dauerhafter selbstschöpferischer Zyklizität von Reaktionsketten chiraler Moleküle zu dem ersten lebenden Zellverband wurde – etwa 0,8 Milliarden Jahre nach Entstehen des Planeten. Es handelt sich um die Vorläufer von Bakteria und Archaea (Carl Woese [32]) – um Prokarioten mit vermutlich chemoheterotrophem Metabolismus, die ihre Energie durch Gärung gewinnen und Methan abgeben.

Das Leben nun ist ein Prozeß vorher nicht erreichter Komplexität, weit entfernt vom thermodynamischen Gleichgewicht, ein offenes System auf hohem Energieniveau, das nur durch ständige Energiezufuhr erhalten werden kann. Entropieexport und Informationsaustausch sind weitere existentielle Eigenschaften des Lebens. Dieses erzwingt eine durchgreifende Reorganisierung aller Verhältnisse in der Geosphäre.

Die Übertragung des Informationsbegriffs auf die Naturwissenschaft und auf das Leben eröffnet unserem Verständnis neue Räume. Information sei das Typische des Lebens [33]:

Leben = Materie + Information.

Und: "And supramolecular chemistry is paving the way towards comprehending chemistry as an information science....The outlook of supramolecular chemistry is toward a general science of informed matter, bringing forward in chemistry the third component of the basic trilogy matter-energy-information." [6-199].

John A. Wheeler prognostizierte, daß Information die Grundlage einer universellen Physik bilden werde [34]. Ob die Informationstheorie zu einer neuen integrierenden, übergeordneten Wissenschaftstheorie wird, die die hemmende Fragmentierung der gegenwärtigen Wissenschaft aufheben könnte?

Charakteristisch für hochorganisierte, offene Systeme (komplexe Fließgleichgewichte) ist der Trend zur Minimierung ihrer Entropie, im Gegensatz zum abgeschlossenen System mit seinem Trend zur Maximierung der Entropie. Auch für die in der Zelle ablaufenden Reaktionen sind die Gesetze der Gleichgewichts-Thermodynamik zwar notwendig, aber nicht hinreichend.

Deren Aussagen sind zeitinvariant [35] [36]. Die chemischen Umsetzungen sind im wesentlichen nun nicht mehr thermodynamisch, sondern kinetisch kontrolliert. "Die Ergebnisse thermodynamischer Betrachtungen nützen in der chemischen Kinetik nicht viel." [35-487]. Die Reaktionsrichtung wird nicht mehr diktiert durch die Abgabe freier Energie, also durch die Bildung energieärmerer Verbindungen, sondern durch die Tendenz zu energiereicheren Verbindungen und zu einer damit verbundenen höheren Komplexität der Chemie.

Schon die ersten Zellen müssen viel Energie dafür aufwenden, einen Konzentrations-gradienten zwischen den membranseparierten Bereichen von Innen- und Außenwelt aufrechtzuerhalten [37]. Bemerkenswert ist, daß schon die Archaea Reparaturenzyme für die von der harten UV-Strahlung an der DNA verursachten Strahlenschäden entwickelten.

Die Hauptquelle von Energie und Syntropie für das gesamte irdische Leben im oberflächennahen Bereich ist die Sonne. An unterseeischen Hydrothermalquellen allerdings entdeckte man 1985 eine neue Lebensform: Röhrenwürmer und Muscheln in Endosymbiose mit chemoautotrophen Bakterien, die ihre Energie für die Reduktion des Kohlenstoffdioxids aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff oder Methan – letztlich also nicht aus solaren, sondern aus geothermischen Quellen – gewinnen [32-462].

Als ein weiteres Feld der Lebensentstehung wurden abiogene Kohlenwasserstoffvorkommen angenommen [38]. Dabei kam wahrscheinlich auch eine der "anaeroben Atmung" ähnliche Umsetzung geologische Bedeutung zu [(CH<sub>2</sub>) = Kohlenwasserstoffe]:

$$CaSO_4 + (CH_2) \longrightarrow S + CaCO_3 + H_2O.$$

Es scheint, als trage die Evolution fraktale Züge, denn Selbstähnlichkeit fällt auf: Die ersten Einzeller, Heterotrophe, verbrauchten die ihnen zugänglichen Kohlenstoffreservoire. Deren Erschöpfung erzwang vor etwa 3,5 Milliarden Jahren die Entstehung der Autotrophen, die später die benötigten Kohlenstoffverbindungen photoautotroph aus CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und Sonnenlicht aufbauten. In ähnlicher Weise ist die Menschheit heute dabei, die Kohlenstoffressourcen des Globus, die fossilen Vorkommen und die Wälder, aufzubrauchen und steht nun vor derselben Aufgabe wie seinerzeit die Photoautotrophen: Sie muß Energie und Stoff aus Kohlenstoffdioxid, Wasser und Sonnenenergie gewinnen.

#### Die Photosynthese

Mit der Photosynthese "explodiert" das Leben. Mit ihr wurde, nachdem sich zunächst die porphinoiden Metallkomplexe gebildet hatten ("Katalysatoren der ersten Stunde" [37-27]) und dadurch die verschiedenen Chlorophylle verfügbar waren, eine entscheidende Stufe erreicht – eine hochendotherme biochemische Redoxreaktion, getrieben durch die Energie der Sonne.

Die anoxygene Photosynthese. In dieser Reaktion wird CO<sub>2</sub> (meist) durch Schwefel-wasserstoff reduziert, wobei Schwefel freigesetzt wird, der in Form von Schwefellagern (z. B. in Texas) eine unverzichtbare Säule unserer Technik darstellt.

Die oxygene Photosynthese. Diese Reaktion entwickelt sich 1,7 Milliarden Jahre nach Erdentstehung und wird von einigen Bakterienstämme, den Algen und den Pflanzen betrieben – erstmals wahrscheinlich durch Cyanobakterien:

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow 1/n (CH_2O)_n + O_2$$
  $\Delta H = +470 \text{ kJ/mol}$ 

In der Bilanz werden die Kohlenstoffatome des Kohlenstoffdioxids  $\mathrm{CO}_2$  zu Glucose  $\mathrm{C}_6\mathrm{H}_{12}\mathrm{O}_6$  reduziert und die Oxid-Ionen des Wasser zu Sauerstoff oxidiert, der die Zelle verläßt in Form zweiatomiger Moleküle  $\mathrm{O}_2$  – zunächst eine starkes Zellgift für nahezu das gesamte damalige Leben. In Wirklichkeit ist die Photosynthese ein hochkomplexes Reaktionsgeschehen unter Beteiligung auch zahlreicher anorganischer Komponenten.

Die oxygene Photosynthese der Bakterien bedeutet einen weiteren qualitativen Sprung mit tiefgreifenden Folgen in der Ko-Evolution:

- Die Phototrophen entwickeln sich sprunghaft, wodurch der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Atmosphäre weiter abnimmt und große Mengen Sauerstoff freigesetzt werden. Trotzdem verbleibt die atmosphärische O<sub>2</sub>-Konzentration über 800 Millionen Jahre hinweg (bis 2 Milliarden Jahre nach Erdentstehung) unter 1%, was auf den O<sub>2</sub>-Verbrauch durch das reduzierende Milieu in den Ozeanen und der Atmosphäre zurückgeht. Nahezu eine Milliarde Jahre lang enthält die Atmosphäre nur sehr geringe Konzentrationen an CO<sub>2</sub> und Sauerstoff. Dessen Konzentration erreicht das heutige Niveau erst vor 1 Milliarde Jahre.
- Ein Großteil der Anaerobier in der Nachbarschaft zu den Phototrophen stirbt aus durch Vergiftung mit Sauerstoff. Die Biomasse sinkt ab und wird vergoren – die Hauptquelle für die ansteigende atmosphärische Methankonzentration.
- In den Ozeanen werden zahlreiche Verbindungen durch den Sauerstoff oxidiert, was neue Randbedingungen für die Chemie des Lebens schafft.

So entstehen Kupfer(II)-Verbindungen aus Kupfer(I), Sulfate aus Sulfiden (wie Pyrit) und Nitrate, Nitrite und NO aus Ammoniak – überwiegend wasserlöslich Verbindungen, die von den Zellen leicht aufgenommen werden können. Weitreichende Folgen hat die (überwiegend biogene) Oxidation hochkonzentrierter, löslicher Eisen(II)-Verbindungen (mit bis zu 10 g Fe/m³ Meerwasser) zu den unlöslichen, über eine Milliarde Jahre hinweg sedimentierenden "Bändereisenerzen", im wesentlichen Hämatit Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Magnetit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Auf diese Weise entstehen in dieser Zeit etwa 90% der irdischen Eisenerze.

In den Ozeanen hat sich neben einer hohen  ${\rm Ca^{2^+}}$ -Konzentration das  ${\rm CO_2}/{\rm HCO_3}$ -Gleichgewicht eingestellt:

$$2 \text{ HCO}_{3-} \leftarrow \text{CO}_{2} + \text{CO}_{3}^{2-} + \text{H}_{2}\text{O}$$

Entnehmen nun CO<sub>2</sub>-assimilierende Organismen Kohlenstoffdioxid, wächst die Carbonatkonzentration, und Calciumcarbonat fällt aus. So sind die Stromatolithen der Cyanobakterien wie auch die späteren biogenen Kalkvorkommen, z.B. Korallenriffe und Muschelkalke, entstanden.

Etwa 0,8 Milliarden Jahre nach Beginn der oxygenen Photosynthese tritt der Sauerstoff in die Atmosphäre ein und bewirkt Entscheidendes für die Evolution:

- Die Bildung von Ozon und damit eines atmosphärischen Schirms gegen die energiereichen UV-Anteilen der Sonnenstrahlung.
- Die Oxidation des atmosphärischen Methans zu Kohlenstoffdioxid und Wasser und damit den allmählichen Übergang von einem reduzierenden zu einem oxidierenden Milieu.
- Die Oxidation reduzierender anorganischer und organischer Stoffe nun auch auf den Kontinenten.

Nach der Ausbreitung der aeroben Phototrophen verschwanden die Anaerobier nicht vollständig. Vielmehr bildeten beide unter geeigneten Bedingungen Symbiosen, z.B. in den "Mikrobenmatten" [32-479] – ein beeindruckendes Beispiel für ein biochemisches Recycling.

Die Chemie in den Organismen erreicht eine verwirrende Vielfalt: "Möglicherweise hat sich im Verlauf der Evolution für *alle* natürlich vorkommenden Elemente eine – wenn auch nicht immer essentielle – physiologische Funktion herausgebildet" [37-8].

Die skizzierten Vorstellungen bleiben vermutlich weit hinter der realen Vielfalt zurück, denn unser Wissen über den Bakterien-Metabolismus steckt noch in den Anfängen, weil von dem geschätzten Gesamtumfang des Bakterienreiches höchstens ein Prozent bekannt ist.

Die Sonne und GAIA 69

Der Energieaspekt. Verglichen mit dem ursprünglich leblosen Planeten, ist in der photosynthetisch entstandenen Biosphäre ein solarer Energiebetrag geologischer Größenordnung fixiert worden. Man schätzt die Masse der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) auf  $2\cdot10^{16}$  kg. Heute entnimmt die Biosphäre in der Gesamtbilanz keine Energie mehr aus der Sonne, denn es herrscht nahezu energetisches Gleichgewicht zwischen Einstrahlung und Ausstrahlung.

Der Entropieaspekt. Die Entstehung des Lebens ist ein Prozeß der Strukturbildung, also der Entropieverminderung. Die Sonne hat neben der Energie noch negative Entropie, also Syntropie, auf den Erdball übertragen.

Grundsätzlich anders sieht die Panspermie-Hypothese von Svante Arrhenius die Entstehung irdischen Lebens. Sie wird heute auch von Francis Crick vertreten, und Fred Hoyle schuf eine moderne Version und gründete ein "Zentrum für Astrobiologie" [39]. Sollte die extraterrestrische Evolution bis zu "Lebenskeimen", wie Bakterien, Sporen und Eiern, vorgedrungen sein, hätten diese auf der erkalteten Erdoberfläche mit ihren Flüssigwasser-Reservoiren günstige Bedingungen vorgefunden. Bis zum heutigen Tag nimmt die Erde jährlich 11.000–16.000 t extraterrestrisches Material aus Meteoritenschauern auf [40].

### Stickstoffixierung

Unter der natürlichen Stickstoffixierung versteht man die biochemische Umwandlung des atmosphärischen Stickstoffs  $N_2$  in wasserlösliche Stickstoffverbindungen, nämlich Ammonium-, Nitrit- und Nitrat-Ionen. Daraus bauen die stickstoffixierenden Organismen ihre Stickstoffverbindungen, z.B. die Eiweiße, auf.

Eine Bilanzgleichung der Stickstoffixierung läßt sich als Hydrolyse des Stickstoffmoleküls formulieren – eine endotherme Reaktion:

 $N_2(g) + 2 H_2O(g) \longrightarrow NH_4^+(aq) + NO_2^-(aq)$   $\Delta H = +244 \text{ kJ/mol}$  Ähnlich wie bei der Photosynthese sagt diese Gleichung nur wenig über die real ablaufenden Reaktionen aus.

Die Stickstoffixierung bedarf direkt nicht der Sonnenstrahlung. Die die Umsetzungen vollbringenden Bakterien entnehmen die dafür erforderliche Energie photosynthetisch entstandenen Energieträgern und damit indirekt ebenfalls der Sonnenenergie [32-471].

Auch die in "Blitzen" bewirkte Oxidation des Luftstickstoffs zu Stickstoffmonoxid NO geht letztlich auf die Sonne zurück, denn Blitze sind über mehrere Stufen sich konzentrierende Sonnenenergie. Die Temperaturen im Blitzkanal betragen ca. 30.000 K.

Überraschend wurde gefunden, daß Blitze den horizontalen Gentransfer von Bakterien stimulieren – wahrscheinlich ein die Evolution beschleunigender Mechanismus [41].

#### 3.2.2 Verwitterung

Mit Recht wird heute die strukturbildende Rolle der Sonne betont. Jedoch, ist damit schon die solare Einwirkung auf den Erdball vollständig erfaßt? Es gibt einen weiteren, ebenso wichtigen und tiefgreifenden Prozeß, dessen Sonnenbedingtheit und energetische Dimension bisher aber nicht beschrieben wurden: Seit der Existenz flüssigen Wassers auf der Erde betreibt hier die Sonne andauernd auch einen tiefgehend zerstörerischen, entropieerhöhenden Prozeß: Die Verwitterung – mit ihren physikalischen, glazialen, chemischen und biologischen Teilwirkungen sowie der Erosion.

### Auswirkungen der Verwitterung

Die Verwitterung hat Gestein in geologischem Ausmaß zerkleinert. Dieses Material wird durch Wasser und Wind weithin transportiert. Ein Teil dieses Verwitterungsprodukts bildet den Sand der Wüsten und vieler Küstenregionen. Große Mengen Wasser, ca. 3,7·10<sup>4</sup> km³/Jahr [23-275], fließen von den Kontinenten in die Ozeane und bewegen dabei Gesteins- und Erdmassen in einem Umfang, daß alle Meeresbecken in 17 Millionen Jahren voller Verwitterungsschutt wären. Regen brauchte heutzutage 60.000 Jahre, um alle Ozeanbecken zu füllen.

Nach einer weitgehenden Hypothese könnten diese Ablagerungen durch ihren Bodendruck, durch die von ihnen bewirkten Veränderungen der Temperaturverhältnisse sowie durch chemische Wechselwirkungen die Plattentektonik ausgelöst haben [1-131]. Sollte sich diese Annahme bestätigen, würde das eine bisher nicht wahrgenommene Tiefe solarer Einwirkung enthüllen. Die Sonne wäre auch die Mutter der Plattentektonik

# Aspekte der Verwitterung

Der Energieaspekt. Die Abtragung der Gebirge – das ist eine Umwandlung potentieller Energie, die ursprünglich einmal aus dem Energievorrat des Erdinneren für die Gebirgsbildung aufgewandt worden ist. Anders als die von außen kommende Sonnenenergie ist dieser Energiebetrag quasi geo-immanent.

Die Verwitterung übt auf der Erde ihre Wirkungen solange aus, wie es hier flüssiges Wasser gibt. Dabei wird ständig solare Energie auf dem Globus gespeichert, denn der Verwitterungsprozeß wirkt durch Regen, Wasserströme, Wind, durch die Mechanik der Gletscher, durch chemische Reaktionen sowie durch die mechanische und biochemische Kraft des Lebens – alles solarogene, dispergierende Einflüsse.

Die durch die Verwitterung gespeicherte Energie ist aber nichtthermischer Art, sie existiert als Oberflächenenergie (in kJ/m²) der feinteiligen Verwitterungsprodukte – Phasen, deren spezifische Oberfläche (in m²/g) groß ist gegenüber der des ursprünglichen Gesteins.

Die Oberflächenenergie in den Verwitterungsprodukten kann über Milliarden Jahre stabil, genauer: "metastabil", gespeichert bleiben.

Die Verwitterung hobelt die Erdoberfläche allmählich glatt, weil die seismisch bedingten Aktivitäten der Gebirgsbildung infolge der allmählichen Abkühlung des Erdinneren langsam abflauen. GAIA war in ihrer Jugend heiß, grob, schroff, kantig und faltig und wird in ihrem Alter kalt, glatt und faltenlos – ähnlich, aber auch umgekehrt wie beim Menschen.

Die Verwitterung könnte aber auf eine noch andere, indirekte Weise den geologischen Energiehaushalt beeinflussen: In den Subduktionszonen werden Randteile der Kontinentalplatten in den Erdmantel gedrückt und dort im Magma wieder aufgeschmolzen. Die in den feindispersen Gesteinen gespeicherte Oberflächenenergie wird beim Aufschmelzvorgang wieder abgegeben und vermindert dadurch den für das Schmelzen der festen Phase naturgemäß erforderlichen Energieaufwand. Dadurch sollte die ständig vor sich gehende Abkühlung des Magmareservoirs geringfügig verlangsamt werden. Treffen diese Annahmen zu, heißt das: Die eingestrahlte Sonnenenergie ist derart wirkmächtig, daß sie indirekt auch die energetischen Verhältnisse im Erdmantel beeinflußt.

Der Entropieaspekt. Beide solarogenen Prozesse – der aufbauende und der abbauende – sind eng miteinander gekoppelt. Der Verwitterungprozeß, der die hohe, meist sogar kristalline Ordnung des Felsgesteins zerstört und dieses umwandelt in weniger geordnete, feinteilige, z.T. amorphe Gesteinsphasen, ist ein enorm entropieerhöhender Vorgang. Dabei ist bemerkenswert: Das Leben erhöht die Verwitterungsgeschwindigkeit um Größenordnungen. Beispielsweise verwittert Basaltgestein unter der Mitwirkung von Organismen tausendmal schneller als im sterilen Zustand [1-111]. Auch hier wieder sind zwei scheinbar gegensätzliche Prozesse dialektisch miteinander verflochten: Die hochorganisierten Lebewesen, deren Entstehung eine Strukturbildung, also eine Entropieabsenkung relativ zum unbelebten Planeten darstellte, begünstigen einen destruierenden, entropieerhöhenden Vorgang, eben die Verwitterung.

### **Bodenbildung**

Eine der für die Ausbreitung des irdischen Lebens wichtigsten Verwitterungsfolgen ist die Bildung der Böden. Sie sind die substantiellen Träger des Lebens. Eine besondere Stellung bei der Bodenbildung kommt den Tonmineralen zu – als feinteilige Substanzen Hauptbestandteil vieler Böden. Die äußeren Oberflächen und die Schichtzwischenräume der Tonminerale sind chemisch reaktiv. Das läßt verstehen, warum eine Hypothese in den Tonen das anorganische Substrat für die Entstehung des Lebens auf der Erde sieht. [42]

Die zerstörerische, entropieerhöhende Wirkung der Sonne in Verbindung mit Wasser – nämlich der Verwitterungsprozeß – war die Voraussetzung dafür, daß auf dem Erdball Leben entstehen konnte – ein strukturbildender, entropiesenkender Prozeß. Es scheint so, als sei diese Vernetzung von Destruktion und Konstruktion ein allgemeines Gesetz.

Ilya Prigogine habe beobachtet, daß der Zusammenbruch des Fortschritts oft nur eine Illusion sei. Unter den Fragmenten, meinte er, bildeten sich neue Strukturen und Prozesse [43]. In der Natur herrscht das ewige Stirb und Werde, chemisch formuliert: Das ewige Recycling der Elemente – kulturell ist das die Überzeugung von der Wiedergeburt – eine östliche, buddhistische Vorstellung zyklischen Charakters.

## Chemie und Verwitterung

Die Vorgänge der physikalischen und der chemischen Verwitterung verlaufen nahezu synchron und synergistisch. Hat die physikalische Verwitterung durch Gesteinsspaltung und Zerkleinerung erst einmal reduzierte Verbindungen enthaltende jungfräuliche Oberflächen geschaffen, können daran chemische Umsetzungen besonders schnell ablaufen. Beispiele: Bindung von Kohlenstoffdioxid durch das Calcium der Silicate, Bindung von Sauerstoff durch reduzierende Verbindungen sowie Bindung von Wasser durch Löseprozesse, Hydratisierungen und Hydrolysen.

Mechanochemie [44]<sup>4</sup>. Der Einfluß der Mechanochemie auf Verwitterungsvorgänge ist bisher nicht beschrieben. Diese sollten aber durch mechanochemische Anregung beschleunigt werden. Unter derartigen Bedingungen werden sogar thermodynamisch verbotene Reaktionen möglich, was durch die Theorie des Triboplasmas verständlich wird [45]. Sand- und Staubstürme können infolge tribochemischer Beanspruchungen starke elektrische Felder

<sup>4</sup> Unter einer mechanochemischen Reaktion versteht man eine chemische Umsetzung infolge mechanischer Energieübertragung primär auf Festkörper, z.B. durch Stoß, Spaltung oder Reibung, wobei auch Komponenten der umgebenden fluiden Phasen einbezogen sein können.

erzeugen, die dann ihrerseits chemisch wirksam werden. Derartige Prozesse könnten auf der Marsoberfläche, ausgehend von Kohlenstoffdioxid und Wasser, zu größeren Ansammlungen festen Wasserstoffperoxids H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> geführt haben [46].

## 4. Ökologische Wechselwirkungen

GAIA reagiert vielfältig, unvorhersehbar und zuweilen katastrophisch. Die Menschheit sollte eine zu schaffende Welt-Ethik verinnerlichen und demgemäß ihre immens gewachsene technische Macht äußerst behutsam handhaben, wenn sie in dieses Netz einzugreifen gezwungen ist. Wir beginnen gerade erst, GAIA zu verstehen. Die Ökologie lenkt uns dabei auf überraschende, häufig lebenswichtige Zusammenhänge, die uns die Gesetze komplexer Systeme andeutungsweise erkennen lassen.

## 4.1 Ökologische Überraschungen

Kohlenstoffdioxid: In der gegenwärtigen Klimadebatte erscheint Kohlenstoffdioxid fast ausschließlich als der Hauptverursacher des Treibhauseffekts. Schon allein aus systemtheoretischen Erwägungen ist aber für ein derart hochkomplexes System die Annahme einer eindimensionalen Ursache/Wirkungs-Beziehung untauglich. Weitere Auswirkungen der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden beobachtet:

- Beschleunigung der Zersetzung von Calciumsilicaten durch die Einwirkung von CO<sub>2</sub> und Wasser unter Bildung von Calciumcarbonat sowie calciumärmeren Silicaten und SiO<sub>2</sub> eine Reaktion, deren Geschwindigkeit durch die erhöhten Temperaturen noch vergrößert wird.
- Aufnahme größerer Mengen von CO<sub>2</sub> durch die Ozeane, was einerseits zu intensiverem Biomassewachstum, andererseits aber durch Bildung von Calciumhydrogencarbonat Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> zur Auflösung von Calciumcarbonat der Kalkschalen, Kalkskelette und Sedimente führen kann. Gegenläufig dazu wirkt die Erwärmung der Ozeane, weil damit die Gaslöslichkeit abnimmt.
- Verengung der Stomata (Spaltöffnungen der Blätter), wodurch diese nicht mehr die normalen Mengen Wasserdampf abgeben. Das dadurch im Boden zurückgehaltene Wasser führt zu einer vergrößerten Wasserführung der Flüsse, dadurch eventuell zu einer Veränderung von Meeresströmungen und, weil die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens vermindert ist, zu Überschwemmungen. Wird weniger Wasser verdunstet, geht auch die

entsprechende Kühlwirkung zurück – eine der wichtigsten Leistungen der Wälder für das irdische Ökosystem.

Es ist damit zu rechnen, daß mit der zunehmenden  $\mathrm{CO}_2$ -Konzentration auch die Chemie der Atmosphäre sich zu ändern beginnt. Denkbar erscheint, daß die Oxidation von Methan zurückgedrängt wird, Methanemissionen aus Gärungsprozessen und Methanhydratzerfall zunehmen, die dadurch weiter erwärmte Atmosphäre noch größere Wasserdampfmengen aufnimmt und sich eine positive Rückkopplung entwickelt – der Treibhauseffekt also verstärkt wird.

Methan: Kürzlich wurde entdeckt, daß lebende Pflanzen (Mais, Weidelgras) Methan emittieren, und zwar 10–100mal mehr als durch natürliche Gärungen entsteht. Sonnenbestrahlung verstärke diese Emission. Die Physiochemie dieses Pfades ist unbekannt. Sollte dieser Befund auf alle Landpflanzen zutreffen, würden durch diese schätzungsweise 60–240 Mt Methan pro Jahr emittiert, das wären etwa 10–40% der Gesamt-Methanemission – eine Entdeckung von Gewicht für die Planung von Groß-Aufforstungen und Energieplantagen.

Methylbromid: Methylbromid, CH<sub>3</sub>Br, ein Nervengift und Carcinogen, wird weltweit als Herbizid eingesetzt, soll aber wegen seiner ozonschädigenden Wirkung verboten werden. Etwa 80% des atmosphärischen Methylbromids stammt aus biogenen und geologischen, 20% aus anthropogenen Quellen. Große Mengen Methylbromid werden, neben Methylchlorid, bei Verbrennung von Biomasse freigesetzt, vor allem bei Wald- und Graslandbränden. Vor einigen Jahren wurde festgestellt, daß lebende Pflanzen von Kohl, Broccoli, weißen Rüben und Raps Methylbromid freisetzen. Allein die von Raps emittierte Menge soll etwa 15% der industriellen Methylbromidproduktion betragen. Sollte dieses Ergebnis sich verallgemeinern lassen, wäre es bei einer eventuellen Ausweitung des Rapsanbaus für Motorentreibstoffe zu berücksichtigen.

*Erosion:* Der Wind transportiert Sand-Feinstkorn aus der Sahara in die Regenwälder Südamerikas. Dieser Sand mit seinem Eisenoxidgehalt sei als Mineraldünger für den Regenwald unverzichtbar. Würde nun die Sahara aufgeforstet – die Sand-Injektionen blieben dann aus – könnte der Regenwald Schaden nehmen. Also: Selbst vor großflächigen Aufforstungen sind die ökologischen Netze aufmerksam zu studieren.

China ist weltweit das Land mit den größten Aufforstungsleistungen. Trotzdem werden in den nordwestlichen Wüstengebieten immer mehr Dörfer vor den andrängenden Sandmassen geräumt. Der Grundwasserspiegel in Chi-

na, wie auch in Indien, ist in den letzten Jahren weit abgesunken. Dazu trug bei, daß immer leistungsfähigere Wasserpumpen verfügbar wurden. Ein chinesischer Ökologe bezweifelte, daß die Schutzwaldstreifen den Sand stoppen würden und befürchtete, daß die neu gepflanzten Bäume den Grundwasserspiegel eher weiter absenken könnten. Kommen wir schon zu spät mit unseren Reparaturversuchen?

In seinem neuen Buch [47] kommt Lovelock zu diesem Ergebnis. Es ist jedoch traurig, wenn er durch die von ihm angepriesene Rettungsstrategie, nämlich unter Mißachtung der Sonne die Kernenergietechnik über den Erdball zu verbreiten, seine einmal errungene Autorität als "Planetenarzt" beschädigt [48] und darüber hinaus sich nun von den Kernenergiekonzernen als deren Protagonist feiern lassen muß.

#### 4.2 Grenzen

Die ökologische Denkweise bereitet die Menschheit auf eine Zukunft vor, in der sie, wie nie zuvor im Industriezeitalter, mit den Grenzen ihres Handelns konfrontiert wird. Sie muß lernen, diese Grenzen anzuerkennen und sich innerhalb ihrer nachhaltig einzurichten. Systemgrenzen sollten nicht als Einengung, sondern als Provokation von Kreativität und als Erkenntnisquell aufgefaßt werden. Dieser Zusammenhang müßte dem Naturwissenschaftler besonders leicht einsichtig sein, denn die Naturkonstanten sind quasi "Grenzsteine". "Mit der Perspektive der Komplexität wird die Grenze an sich zum Phänomen und gerät in den Mittelpunkt der Betrachtung" [14-120]. In einem komplexen System verändern sich, wie all dessen Komponenten, auch die Grenzen ständig. Das wirft die Frage auf, ob es eine ewige Unveränderlichkeit der Naturkonstanten überhaupt geben kann.

Vielleicht ist das Respektieren von Endlichkeiten erst die Voraussetzung dafür, daß die Menschheit befähigt wird, andererseits die echten Unendlichkeiten zu erkennen, wie etwa das Potential brüderlicher Kooperation, den Reichtum an neuen Gedichten, Symphonien, Gemälden und an neuen chemischen Verbindungen, die Unendlichkeit in der Evolution des Geistes.

Wir sind heute dabei, einige existentielle Grenzen zu erkennen: Die Grenzen des Wachstums allgemein, konkret die Grenzen der Quellen und der Senken [49].

Eine Begrenzung akzeptieren wir am schwersten: Wir dürfen in Forschung und Technik nicht mehr alles tun, was wir können. Was für jeden normal veranlagten Menschen im Alltag selbstverständlich ist, muß gerade in diesen gesellschaftlichen Bereichen zu strenger Gültigkeit gebracht werden.

Aus diesen übergeordneten Prinzipien läßt sich eine weitere allgemeine Schlußfolgerung ableiten: Jegliche Produktion von Überfluß widerspricht diesen Prinzipien, weil es bedeutet, Systemgrenzen zu überschreiten. Folglich ist in der Installierung einer Kernfusions-Energetik, neben all ihren schon heute absehbaren technischen und volkswirtschaftlichen Nachteilen, eine eventuell gefährliche Verletzung ökologischer Grundsätze zu sehen. Das ist keine Prinzipienreiterei, sondern die Schlußfolgerung aus der Erkenntnis, daß die Biosphäre nur eine bestimmte Maximalgröße eines anthropogenen Energiestroms ertragen kann (s. 4.3.3). Bernal, der große britische Physiker – überzeugt von der Zukunftsbedeutung der Kernfusion – propagierte die Energieversorgung der Menschheit mit 10–20 Kernfusions-Großkraftwerken. Trotzdem bewahrte er sich den kritischen Blick für Grenzen und schrieb 1958 hinsichtlich der Kernfusion [50]:

"Nur eine Überlegung wird den Umfang ihrer Anwendung beschränken, und zwar die Gefahr, daß die Oberfläche der Erde zu sehr erwärmt wird. Eine jährliche Steigerung der Energieerzeugung um 5 Prozent – ein keineswegs schwer erreichbares Ziel – hätte nach etwas mehr als zwei Jahrhunderten zur Folge, daß fast genau so viel Wärme erzeugt wird, wie die Erdatmosphäre durch das auf die Erde fallende Sonnenlicht erhält. Die entstehende Wärme würde schon lange vorher unerträglich werden, wenn die Erde nicht mit einer Kühlvorrichtung ausgestattet werden könnte, die die Wärme ableitet."

# 4.3 Anthropogene Entropieerhöhung

Vor etwa 300 Jahren begann der Mensch in einem vorher noch nie dagewesenen Tempo, die Entropie auf dem Erdball zu erhöhen. Die nachteiligen Folgen derartiger Denaturierungen werden meist erst nach längerer Zeit spürbar, so daß dann die Ursachen gar nicht mehr auszumachen sind. Ergo: Jeder Eingriff in die natürliche Ordnung, also auch jede beliebige Technik, erhöht die Entropie. Es ist darum stets nur so viel an Technik aufzuwenden, wie unumgänglich notwendig. Das gilt selbstverständlich auch für jede Ökoenergietechnik. Das ist notwendig zu betonen, denn manche "Solarier" unterliegen dem Irrtum, daß angesichts des praktisch unendlich großen solaren Energievorrats der technische Wirkungsgrad für die Solartechnik sekundär geworden sei. Würde jedoch der Wirkungsgrad der Solarzellen verdoppelt, könnte die erforderliche Zellenfläche halbiert und damit die gesamte Produktion verringert werden.

Um die fossilen Brennstoffe hervorzubringen, hat die Natur über Millionen Jahre die Konzentrierung vorgenommen, in der solaren Ära ist das aber

die ständige Aufgabe der Gesellschaft. Das Fossil-Zeitalter war hinsichtlich der Energie- und Rohstofftechnik die Epoche der *Dispergierung*, das Ökozeitalter wird die Epoche der *Konzentrierung*.

### 4.3.1 Verletzungen der Erdkruste

Ein fruchtbarer Boden enthält als wesentlichen Bestandteil Tonmineral-Huminstoff-Komplexe. Huminstoffe üben ihre Wirkung vorwiegend über aromatische Radikale, Carboxyl- sowie OH-Gruppen aus. Anaerobier im Erdreich und in den Ozeanen sondern u.a. flüchtige Schwefelverbindungen ab, wie Kohlenstoffdisulfid CS2, Kohlenstoffoxidsulfid COS, Schwefelwasserstoff H<sub>2</sub>S, Methylhydrogensulfid CH<sub>3</sub>SH und Dimethylsulfid (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S. All diese Verbindungen sind leicht oxidierbar. Wird nun die Erdkruste verletzt, z.B. bei Aufschluß von Erzgruben, beim Abteufen von Bergwerken, durch Tiefbauarbeiten, Straßenbau oder Pflügen, so dringt freier Sauerstoff in diese bisher weitgehend anaeroben Bereiche und oxidiert die reduzierenden Substanzen. Werden aber Huminstoffe chemisch abgebaut, verlieren sie ihr Wasserspeichervermögen, und die von ihnen vorher gebundenen Kationen, vor allem des Kaliums, werden ausgewaschen und stehen der Pflanzenernährung nicht mehr zur Verfügung. Insgesamt wird der Boden geschädigt, als Ackerboden unbrauchbar und ist zudem nun der Verwitterung und Erosion ausgesetzt. Boden ist aber eine nichtregenierbare Ressource. "Als durchschnittliche rechnerische Bodenbildungsrate wird 0,1...0,5 mm/a angegeben..." [23-339] – eine Größe, die die Erosionsverluste nicht annähernd wettzumachen vermag.

Als weitere Folge des oxidierenden Abbaus werden gasförmige Oxidationsprodukte freigesetzt, vor allem Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid. Dadurch gelangen u.a. große Mengen SO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Diese SO<sub>2</sub>-Emissionen seien in unseren Breiten größer als die aller *industriellen* Verbrennungsprozesse zusammengenommen, und es wiegt schwer, daß seit etwa zwanzig Jahren mehr Erdmassen von der Technik bewegt werden als durch Vulkanausbrüche oder klimabedingte Erosion [51].

#### 4.3.2 Sonne und Mensch

Der Mensch kann jede der beiden Wirkungen der Sonne verstärken – die aufbauenden und die zerstörenden, das Leben oder die Verwüstung. Wo Leben sich entfalten kann, vielleicht sogar mit menschlicher Unterstützung, werden Verwitterung und Erosion verlangsamt oder gestoppt. Wo Natur geschädigt,

78 Gert Blumenthal

Leben vernichtet wird, gewinnt die Verwüstung. Seit Jahren überwiegt die Wüstenbildung. Nach einer Schätzung der FAO werden jährlich weltweit 150.000 km² Wald illegal gerodet [52].

Offensichtlich ist der Natur eine Tendenz immanent, trotz aller Naturkatastrophen die Komplexität zu erhöhen, d.h. Leben zu schaffen, gedeihen zu lassen und zu verbreiten. Sich darin bewußt einzuordnen, das ist der Sinn menschlichen Lebens. "Das Wesen des Guten ist: Leben erhalten, Leben fördern, Leben auf seinen höchsten Weg bringen...Das Grundprinzip der Ethik ist also Ehrfurcht vor dem Leben." [53]

## 4.3.3 Der anthropogene Energiestrom

Alle fossil-nuklearen Energieflüsse führen direkt oder indirekt, also nicht allein infolge der  $\mathrm{CO}_2$ -Emissionen, zu mehr oder weniger großen Störungen des irdischen Ökosystems.

Der anthropogene durchschnittliche Wärmeenergiefluß<sup>5</sup> scheint sich als Kausal- und Kenngröße für die technisch-zivilisatorische Überbelastung der natürlichen Systeme herauszustellen. Für Mitteleuropa wurde eine diesbezügliche Grenzbelastung von 0,16 W/m² empirisch ermittelt – ein erstaunlich niedriger Wert, denn die in Deutschland im Mittel am Boden auftreffende Sonnenstrahlung entspricht 116 W/m², und die in Biomasse fixierte Sonnenenergie beträgt 0,65 W/m². Der anthropogene, ökologisch maximal verträgliche Wärmestrom darf also schätzungsweise ein Viertel der in der Biomasse fixierten Sonnenenergie nicht übersteigen. Daraus läßt sich eine Grenzbelastung für die globale anthropogene Energieeinspeisung von 8 TW extrapolieren [54]. Der Welt-Primärenergieverbrauch betrug 2002 aber bereits 13,6 TW [55].

## 4.4 Die Technik des Ökozeitalters

Die Menschheit braucht eine Technik, die weitgehend nach den Prinzipien der Natur aufgebaut und menschengemäß ist. Heute wird der Mensch immer häufiger ungewollt und unvorhersehbar zum Opfer seiner Eingriffe.

Die Forderungen an die chemische Industrie der Zukunft verdeutlichen, was gemeint ist: Die Arbeitstemperatur sollte nahe der Umgebungstemperatur liegen, organische Lösungsmittel wären zu ersetzen durch wäßrige Reaktionsmedien, die Verfahren sollten drucklos, geräuscharm, frei von stofflichem

<sup>5</sup> Energie/(Zeit·Fläche) = Leistung/Fläche

und energetischem Abfall, fehlertolerant, ungefährlich und resilient sein.

Unter Resilienz wird in der Systemtheorie die robuste Flexibilität gegen Störungen verstanden. Als Metapher dafür wird das Stehaufmännchen bemüht, das nach einem äußeren Anstoß die Störung auspendelt und dann seine Ausgangslage wieder einnimmt. Ein Kernkraftwerk mit seinen latenten Verstärkungsfaktoren jedoch verhält sich ähnlich einem mit "Nitroglycerin" gefüllten Stehaufmännchen.

Die obigen Richtlinien sind sinngemäß auf die gesamte Technik anzuwenden. Die Stoffproduktion des Ökozeitalters wird durch eine solargestützte, intelligente Biotechnologie charakterisiert sein, die dann von sich aus weitgehend ökologischen Vorgaben entspricht [56].

Vorgaben dieser Art gelten selbstverständlich auch für jegliche Ökotechnik. Es ist ein Hohn, "Bio"-Kraftstoffe zu feiern, wenn für die Produktion ihrer Rohstoffe (Palmöl, Sojaöl) Regenwald vernichtet wird – ein international expandierendes Geschäft – und steigende Preise für das Hauptnahrungsmittel Lateinamerikas, Mais<sup>6</sup>, die Armen in den Hunger treiben [57].

## 5. Gegenwartsaufgaben

"In der Zeit der industriellen Revolution war die vielleicht wichtigste Katastrophe die enorme Zunahme an wissenschaftlicher Arroganz" (Gregory Bateson).

Es ist hohe Zeit zu erkennen, daß die Philosophie des autarken Erdballs, daß die Überheblichkeit gegenüber der Natur und die daraus resultierende Technik in eine Sackgasse geführt haben. Dieser Weg muß verlassen werden, anstatt sich an ihn zu gewöhnen. Die gesellschaftliche Schöpferkraft ist auf den Aufbau eines ökologischen Sozialismus zu konzentrieren. Nur dann, wenn wir bewußt Sonne und Erde für uns wirken lassen, wenn alle Menschen dieser Welt sich Brüder und Schwestern sind und Ehrfurcht vor dem Leben die denk- und verhaltensbestimmende Maxime ist, haben wir die Aussicht, die Geschwindigkeit der anthropogenen Entropieerhöhung auf das unvermeidliche Mindestmaß zu drosseln.

#### Was tun?

Das gegenwärtige Gesellschaftssystem ist erwiesenermaßen nicht in der Lage, die sich verschärfenden ökologischen Gefahren zu bannen. Der Weg in

<sup>6</sup> Rohstoff für Bioethanol, hauptsächlich gefragt von den USA für die dortigen Kraftfahrzeuge.

80 Gert Blumenthal

das nichtkapitalistische Übermorgen ist selbst bei denen, die eine andere Welt wollen, umstritten – aber in einem sollte Einvernehmen herrschen: Nur die fließenden Quellen der Natur können der Menschheit eine nachhaltige Energieversorgung gewährleisten, weil allein sie unerschöpflich und menschengemäß sind und zugleich die Grundlagen für ein dezentral-demokratisches Leben mitbringen. Die dementsprechende Forderung von Wilhelm Ostwald von 1906 ist heute Tagesaufgabe, und die Tätigkeit auf diesem Feld ist Arbeit an der Zukunft.

Die "Solarier" versprechen damit nicht das Paradies. Unter den Bedingungen einer weiter wachsender Erdbevölkerung eine grundsätzlich neuartige, nachhaltige Energie- und Produktionstechnologie einzuführen – das läßt auch neue Widersprüche erwarten, die nur durch die kooperative Konstruktivität der Menschheit zu lösen sind. Eine Jahrhundertaufgabe (H. Scheer) – integrierend, mobilisierend und human, aber, und das darf nicht verschwiegen werden: Es "…ist das Einfache, das schwer zu machen ist" (Bertolt Brecht). Gerade die Komplexität der gesellschaftlichen Systeme verbietet, diese Aufgabe allein "Experten" zu überlassen. Die Vielfalt der Gesellschaft, ihre "kollektive Weisheit", muß zum Zuge kommen.

Voraussetzung allerdings für den Erfolg einer Weltökologie ist Weltfrieden. Der verdeckte und der offene Krieg des Nordens gegen den Süden ist zu beenden, und den Menschen in der "Dritten Welt" sind ihre sozialökonomischen Menschenrechte zu garantieren. Eine Politik "Ökologie für den Norden – irakische Verhältnisse für den Süden" ist unmoralisch. Sie würde "Ökologie" als ein neokolonialistisches Projekt in Verruf bringen. Die seit Jahrzehnten wachsende Spaltung der Menschheit muß gestoppt und Solidarität der Leitfaden internationaler Politik werden. Dabei stehen die reichen Industriestaaten unter dem moralischen Druck einer jahrhundertealten Bringeschuld. Die Politik der großen Machtblöcke bewegt sich allerdings in die entgegengesetzte Richtung. 1999 verhungerten 36 Millionen Menschen, etwa 100.000 pro Tag. "Kaum jemand spricht über diesen Völkermord" [58].

Abschließend zwei Versuche einer Antwort auf die oben gestellte Frage: "Ein Regime erneuerbarer Ressourcen mit den dazu passenden sozialen Formen bedeutet auf jeden Fall das Ende des Kapitalismus wie wir ihn kennen." [59]

"Insgesamt ergibt sich aus dem entfesselten globalen Kapitalismus, daß bei ungebrochener Fortführung der gegenwärtig dominierenden Tendenzen die für die Zukunft der Menschheit wichtigsten Probleme und Herausforderungen ungelöst bleiben, sich noch mehr zuspitzen und letztlich die Zukunft der

Die Sonne und GAIA 81

Menschheit gefährden. Damit erhalten Alternativen zu den gegenwärtig dominierenden Entwicklungstendenzen eine wachsende Bedeutung." [60]

#### Literatur

- James Lovelock, "GAIA: Die Erde ist ein Lebewesen", Wilhelm Heyne Verlag München, 1996, 191 S.
- [2] Plinius der Ältere (24–79).
- [3] Friedrich Engels, "Dialektik der Natur", Dietz Verlag Berlin 1952, S. 264.
- [4] Gert Blumenthal, Dietrich Spänkuch, Stellungnahme "Zur ökologischen Transformation", SOLARZEITALTER 16, 3 (2004), 6-9 und Thesen "Zur ökologischen Transformation", Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 68 (2004) 165-173.
- [5] Werner Ebeling, Jan Freund und Frank Schweitzer, "Komplexe Strukturen: Entropie und Information", B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig 1998, S. 18/19.
- [6] Jean-Marie Lehn, "Supramolecular Chemistry Concepts and Perspectives", VCH Weinheim 1995, S. 202.
- [7] DIE WELT.de, 2. Mai 2006.
- [8] Gerd Lassner, "Gott würfelt nicht", Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien e. V., Schloß Augustusburg, September 2003, S.8.
- [9] Eshel Ben-Jacob, "Die Klugheit der Bakterien, Gödels Theorem und kreative genomische Netze", 01.06.1998, http://www.telepolis.de/r4/artikel/2/2364/1.html, 12 S.
- [10]Howard Bloom, "Bakterienkolonien und kollektives Gehirn", 04.03.1997, http://www.telepolis.de/r4/artikel/2/2115/1.html, 4 S.
- [11]Humberto R. Maturana und Bernhard Poerksen, "The second creation", 24.10.2004, http://www.telepolis.de/english/inhalt/co/18611/1.html
- $[12] Gottfried\ Stiehler, "Felder\ von\ M\"{o}glichkeiten", junge\ Welt\ 20./21.\ Mai\ 2006,\ S.\ 10.$
- [13] Paul Ambroise Valéry, zitiert in [14], Umschlagseite.
- [14]Klaus Richter und Jan-Michael Rost, "Komplexe Systeme", Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main 2002, S. 27.
- [15]Robert Havemann, "Einführung in die chemische Thermodynamik", VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957, S. 164.
- [16] Arthur Koestler, "Janus", Pergamon, Oxford 1978.
- [17]Gottfried Stiehler, "Macht und Grenzen des Subjekts. Politisch-philosophische Essays", PapyRossa Hochschulschriften 65, Köln 2006, 153 S.
- [18]Eugen Peter Odum, "Ökologie Grundlagen, Standorte, Anwendung", Georg Thieme Verlag Stuttgart-New York 1999, S.1.
- [19]Geseko von Lüpke, "Das systemische Weltbild", in: "Tiefenökologie", Eugen Diederichs Verlag, München 1995, 85-95.
- [20]Francis Heylighen, "Vom World Wide Web zum globalen Gehirn", 12.08.1996, http://www.telepolis.de/r4/artikel/6/6060/1.html

82 Gert Blumenthal

[21]Lynn Margulis, "Die andere Evolution", Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin 1999, 180 S.

- Die Autorin war an der Ausarbeitung der GAIA-Hypothese maßgeblich beteiligt.
- [22]Franz-Theo Gottwald, "Zur Geschichte der Tiefenökologie" in "Tiefenökologie", Eugen Diederichs Verlag, München 1995, S. 22.
- [23] Claus Bliefert, "Umweltchemie", Wiley-VCH, Weinheim 2002, S. 132.
- [24] Hans-Peter Dürr, "Die Zukunft ist ein unbetretener Pfad", Verlag Herder, Freiburg im Breisgau 1995, S. 160.
- [25], Erneuerbare Energien Innovationen für die Zukunft", Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrg.), Berlin 2006, S. 24.
- [26]Gerd Stadermann (Hrg.), "Wärme und Kälte Energie aus Sonne und Erde", Jahrestagung des Forschungs Verbunds Sonnenenergie, 22.-23. 09.2005 in Köln, 167 S. Einen stets aktuellen Überblick gewährt http://www.FV-Sonnenenergie.de.
- [27] Felix R. Paturi, "Die Chronik der Erde", Chronik Verlag, Gütersloh 1996, S. 16.
- [28]N. N. Greenwood, A. Earnshaw, "Chemie der Elemente", VCH Verlagsgesellschaft Weinheim 1990, "Das Oklo-Phänomen", S. 1609.
- [29] Nach einer neueren Hypothese ist diese Formierung mit der Bildung des Mondes abgeschlossen. Dessen Alter wurde in der bisher genauesten Messung zu (4.527 ± 10) 106 Jahre bestimmt. Thorsten Kleine et al., Science, doi 10.1126/science.1118842; zitiert in Neues Deutschland, 03./04.12.05, S.23.
- [30]A. J. Oparin, "Die Entstehung des Lebens auf der Erde", VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957, S. 256 ff.
- [31]Jean-Marie Lehn, "Supramolecular Chemistry: from molecular information towards self-organisation and complex matter", Reports on Progress in Physics 67 (2004) 249-265.
- [32]Wolfgang Fritsche, "Mikrobiologie", Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin 1999, S. 81.
- [33]Gottfried Anger und Helmut Moritz, "Inverse Problems and Uncertainties in Science and Medicine", schriftliche Privatmitteilung 2003.
- [34]Zitiert in: David J. Chalmers, "Das Rätsel des bewußten Erlebens", Spektrum der Wissenschaft, Digest "Rätsel Gehirn", 3/2002, 19.
- [35] Kurt Schwabe, Physikalische Chemie, Bd. 1, Akademie-Verlag, Berlin 1975, S. 427.
- [36] Gustav Kortüm, "Einführung in die Chemische Thermodynamik", Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1949, S. 3.
- [37] Wolfgang Kaim, "Bioanorganische Chemie", B. G. Teubner Stuttgart 1995, S. 10.
- [38]Thomas Gold, "Das Jahrtausend des Methans", ECON Verlag, Düsseldorf 1988, S. 33, 193, 205.
- [39]The Cardiff Centre for Astrobiology, http://www.astrobiology.cf.ac.uk Florian Rötzer, "Die Ausbreitung des Lebens im Weltraum", http://www.telepolis.de/r4/artikel/16/16726/1.html
- [40] Jürgen Oberst, DLR, mündliche Mitteilung 2006.

Die Sonne und GAIA 83

[41] Timothy Vogel und Pascal Simonet, "New Scientist", (2004) Nr. 2469, S. 17; Susanne Härpfer, "Blitze schaffen neues Leben", Neues Deutschland, 23./24. September 2006, S. 23.

- [42], Aus Lehm geformt...", Nachrichten aus der Chemie 51, Dezember 2003.
- [43]Howard Bloom, "Vernetzung im "finsteren Mittelalter" der Paläontologie"; 14.04.1997, S. 5.
  - http://www.heise.de/tp/r4/html/result.xhtml?url=/tp/r4/artikel/2/2126/1.html&words=Howard%20Bloom
- [44]Klaus Meyer, "Physikalisch-chemische Kristallographie", VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977, 324-345.
- [45]Peter-Adolf Thiessen, Klaus Meyer und Gerhard Heinicke, "Grundlagen der Tribochemie", Abhandl. Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Akademie-Verlag Berlin 1967.
- [46] Harald Zaun, "Mars Planet des Todes", 14.08.2006, http://www.telepolis.de/r4/artikel/23/23321/1.html
- [47] James Lovelock, "Gaias Rache. Warum die Erde sich wehrt", List-Verlag 2007.
- [48]Hermann Scheer, "Atomenergie oder Erneuerbare Energien? Oder: Wer ist Godot?", Solarzeitalter 4/2006, 3-8.
- [49] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, "Die neuen Grenzen des Wachstums", Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart 1992, 319 S.
- [50]John Desmond Bernal, "Welt ohne Krieg", VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1960, S. 86.
- [51]Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B. Lovins und L. Hunter Lovins, "FAKTOR VIER", Droemersche Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf., München 1997, S. 267 und 263.
- [52], Isotopenanalyse erkennt illegal gerodetes Holz", www.News-Report.de, 24.03.06. http://www.news-report.de/nachricht/Umwelt/1143215483/ Isotopenanalyse erkennt illegal gerodetes Holz.html
- [53] Albert Schweitzer, "Die Lehre der Ehrfurcht vor dem Leben", Union Verlag Berlin 1963, S. 30.
- [54] Wolfram Ziegler, zitiert in: Hans-Peter Dürr, S. 161.
- [55]BMU "Umweltpolitik" Juni 2005, S. 33 und 43.
- [56] http://www.weisse-biotechnologie.net
- [57]Ralf Streck, "Tortilla-Krise in Mexiko", 29.01.2007, http://www.heise.de/tp/r4/artikel/24/24543/1.html
- [58] Jean Ziegler, Berliner Urania, Neues Deutschland 26. Oktober 2000.
- [59] Elmar Altvater, "Ende des Kapitalismus, wie wir ihn kennen", Verlag Westfälisches Dampfboot, Münster 2006.
- [60]Klaus Steinitz, "Chancen für eine alternative Entwicklung", VSA-Verlag Hamburg 2005, 82.

# Integration von erneuerbaren Energiequellen und dezentralen Erzeugungen in bestehende Elektro-Energiesysteme

## Einleitung

Als Folge von Deregulierung und Liberalisierung des Energiemarktes, Streben nach Umwelt- und Ressourcenschonung sowie Effizienzsteigerung und insbesondere auch unter dem Eindruck zunehmender Problematik einer langfristigen Sicherung ausreichender Energieversorgung vollzieht sich ein Wandel in der Energieversorgung: Aus einer bisher weitgehend zentral geführten Versorgung wird zukünftig durch zahlreichen und vielfältigen dezentralen Zubau eine

zentrale + dezentrale = integrale Versorgung,

die eine besondere Herausforderung hinsichtlich optimaler Systemintegration darstellt (Abb. 1). Trend und Ziel zugleich sind eine integrierte geregelte Energieoptimierung "von unten" an Stelle einer gesteuerten Verteilung einzelner Energieformen "von oben".

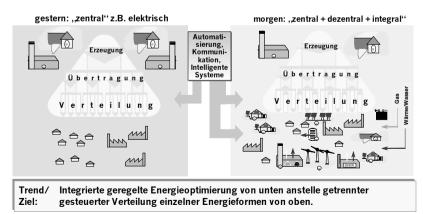


Abb. 1: Wandel in der Energieversorgung

Zur Realisierung der auf europäischer Ebene formulierten Zielsetzung von rd. 22% regenerativen Anteils am Bruttostromverbrauch bis 2010 sowie genereller Steigerung der Energieeffizienz bzw. einem noch deutlich höheren regenerativen Anteil von vielleicht sogar 60% im Jahre 2050 sind u. a. große Mengen verteilter Kleinerzeugungen mit unterschiedlichsten Charakteristiken im MW- und kW-Bereich in Form von z.B. zig-tausend Windenergiebzw. Millionen verteilter KWK- oder PV-Anlagen in das Energiesystem zu integrieren. Neben unumgänglichem klassischen Netzausbau und Anpassung des Großkraftwerkparks sind dabei auch innovative Ansätze auf Basis neuer Technologien (Automation, Information, Kommunikation) sowie angepasste Betriebsführungskonzepte und Zuständigkeiten erforderlich, um zu durchgängig technologisch optimierten als auch wirtschaftlich vertretbaren Lösungen zu gelangen [1-3].

## Intelligente dezentrale Energieversorgungssysteme

Ausgangspunkt dieser innovativen Ansätze zur technisch/wirtschaftlich optimalen Systemintegration großflächig verteilter dezentraler Energieerzeugungen ist das intelligente dezentrale Energieversorgungssystem. Es besteht aus verschiedenen kleinen Erzeugereinheiten auf regenerativer oder fossiler Basis und unterschiedlich strukturierten industriellen und privaten Verbrauchern sowie auch aus Speichern.

Neben der elektrischen Energie fällt bei Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK) auch Wärme an, die den Verbrauchern für Produktionsprozesse bzw. Heizung zugeleitet wird.

Ziel eines ganzheitlichen dezentralen Energieversorgungskonzeptes ist es nun,

- die Energie möglichst dort zu bereitzustellen, wo sie gebraucht wird bzw. zu verwenden, wo sie bereitgestellt wird,
- die verfügbare Energie insbesondere dargebotsabhängige regenerative Energie – der Last zuzuführen, die im Augenblick des Dargebots den dringendsten Bedarf bzw. die beste Verwendung hat,
- ggf. erforderlichen überregionalen Energieaustausch mit dem Netz zu optimieren und so
- die Versorgung des Gebietes energetisch, ökonomisch und/oder ökologisch nach vorzugebenden Kriterien zu optimieren.

Dabei wird von einer netztopologisch orientierten Definition des dezentralen Systems und einem zunächst restriktionsfreien Netz – d.h. keine Netzengpässe – ausgegangen.

Voraussetzung für die angestrebte Optimierung ist eine ausreichende Kommunikation zwischen Erzeugung, Speicher, Verbraucher und Leitstelle sowie ein innovatives Dezentrales Energiemanagementsystem (DEMS) mit Prognose, Einsatzplanung sowie Prozessankopplung und Online-Optimierung. Dadurch wird es ermöglicht, dezentrale Erzeugungen und Lasten in Clustern mit gleichen Einflussgrößen planbar zu machen, im Kurzfrist-Bereich optimiert einzusetzen, Speicher zu bewirtschaften und damit sowohl größere Windenergieeinspeisungen als auch verteilte kleine KWK-Anlagen zu höherer Energieeffizienz und vertragsbasierter Vermarktbarkeit zu führen. Daraus ergibt sich eine Steigerung des energiewirtschaftlichen Nutzens durch intelligentes Zusammenfassen auf Basis beeinflussbarer vertragsfähiger Profile [4-6].

Der Ausgangspunkt für ein Dezentrales Energiemanagementsystem ist die Prognose, die bereits mit dem Wetter als einer wesentlichen Einflussgröße beginnt und die Gesamtheit aller dargebotsabhängigen Erzeugungen und Lasten ermittelt. Daraus wird eine Einsatzplanung unter Berücksichtigung von Verträgen und Reserven im Viertel-Stunden-Raster abgeleitet, auf deren Basis eine Online-Optimierung mit Zugriff auf das Erzeugungsmanagement und das Lastmanagement den aktuellen Abgleich vornimmt (Abb. 2). Die aus dem Fahrplan hervorgehenden Sollwerte werden über eine Prozessschnittstelle an die Erzeuger-, Last- und Speicherelemente weitergegeben und die Ist-Werte oder auch Estimationen an die Online-Optimierung zurückgemeldet.

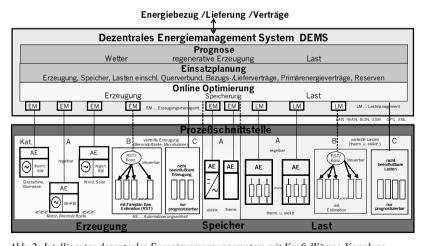


Abb. 2: Intelligentes dezentrales Energieversorgungssystem mit Kraft-Wärme-Kopplung

Der Optimierungsprozess für ein derartiges intelligentes dezentrales Energie-versorgungssystem mit Kraft-Wärme-Kopplung und evtl. Rückspeisung verläuft kommunikativ über entsprechende Netze, an die die einzelnen Elemente von Erzeugung, Speicherung und Last aufwand-/nutzengerecht angeschlossen sind. In Frage kommen dabei z.B. LAN/WAN, ISDN, GSM mit Schnittstellen wie z.B. OPC bzw. XML mit Stand- bzw. Wählverbindungen oder auch nur statistischer Erfassung.

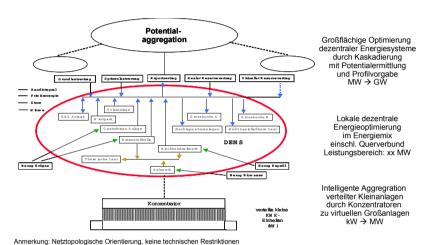


Abb. 3: Großflächige Optimierung dezentraler Energiesysteme

Die hinterlegte Modellierung (Abb. 3) umfasst dementsprechend z.B. eine elektrische und eine thermische Sammelschiene, an die die einzelnen Objekte des dezentralen Systems – Erzeugungen, Speicher, Lasten und Verträge ihrer Funktion und Wirkung – entsprechend angebunden sind. Auch unterschiedliche Primärenergieträger können berücksichtigt werden. Nach außen hin erhält das Energiemanagement Vorgaben zu Bezug, Lieferung bzw. entsprechenden Verträgen.

Unabdingbare Voraussetzung für eine Optimierung sind ein klar definierter Optimierungsraum ("Randintegral"), ein Optimierungspotenzial – d.h. beeinflussbare Objekte – entsprechende Zuständigkeit und Zugriffsmöglichkeit sowie ein Optimierungsziel sowie eine Optimierungsstrategie, z.B. ökonomische und/oder ökologische Optimierung durch optimalen Betriebsmittelbzw. Vertragseinsatz.

## Virtuelle Großanlagen

Von dem oben beschriebenen dezentralen Konzept mit seinen anwendungsspezifischen Ausprägungen lassen sich auch die besonderen Ausführungen ableiten, die für die Erschließung des liberalisierten Energiemarktes zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Wird z.B. ein Mix unterschiedlichster verteilter Erzeugereinheiten (Abb. 2 unten links), die sich in einer Zuständigkeit befinden, in zuvor beschriebener Weise zusammengefasst und durch Funktionen des Bedienens und Beobachtens ergänzt, so ergibt sich ein virtuelles großes Kraftwerk. Dieses bietet dem überlagerten Energiemanagementsystem einer Erzeugungs- bzw. Handelsgesellschaft Tagesprognosen seiner Erzeugung im Verrechnungs-Raster an und bekommt auf dieser Basis von dort nach Abschluss eines Liefervertrages einen entsprechenden Leistungsfahrplan vorgegeben, der durch die Online-Optimierung so exakt wie möglich abgefahren wird. Damit kann dieser verteilte Erzeugungsmix als virtuelle große Erzeugungseinheit mit ergänzendem Kurzfrist-Energieaustausch über den Energiemarkt in vergleichbarer Weise zur allgemeinen Energieversorgung beitragen wie sonstige "klassische" Kraftwerke.

Reduziert sich der Energiemix auf nur eine Primärenergie, z.B. Wind, so wird aus dem virtuellen großen Kraftwerk eine virtuelle große Windanlage, die ihrerseits je nach Typ und kommunikativer Anbindung aus einem Mix regelbarer, zu- und abschaltbarer sowie nicht beeinflussbarer, d.h. nur prognostizierbarer Windkraftanlagen besteht.

Darüber hinaus können auch kleine verteilte KWK-Anlagen mit elektrischer Rückspeisung zu einer virtuellen großen KWK-Anlage zusammengefasst werden. Bei entsprechender Zugriffsmöglichkeit durch die bisherigen Energieversorger oder auch neue – evtl. konkurrierende – Energiedienstleister können diese virtuelle Großanlagen auf Basis des prognostizierten Wärmebedarfs und optimierter Lieferplanung vertragsfähige profilbasierte Stromeinspeisung ins Verteilnetz anbieten und zur Optimierung des Energie-Gesamtsystems beitragen. Dabei ist aber z.B. hinsichtlich der Wirkung auf das elektrische Netz entscheidend, welche Geschäftsinteressen die Zugriffsberechtigten verfolgen: Ein Stadtwerk wird eher die Auslastung seines Netzes und das Ausregeln eines Bezugsprofiles vom übergeordneten Vorlieferanten im Auge haben, ein unabhängiger Energiedienstleister dagegen mehr die Erlösmöglichkeiten am Strommarkt.

Es kann darüber hinaus analog zu den virtuellen großen Erzeugungsanlagen eine virtuelle große Lastmaschine definiert werden, die durch Bereitstel-

lung einer Aggregation dynamisch regelbarer Lasten auch "Regelleistung" – allerdings mit umgekehrten Vorzeichen – liefern könnte.

# Großflächige Optimierung

Im Hinblick auf eine großflächige Optimierung ist zunächst festzustellen, dass Effizienzsteigerung und damit auch Ressourcenschonung auf allen Ebenen des Energieversorgungssystems erfolgen kann und muss: In Kraftwerken, in den Übertragungs- und Verteilungssystemen sowie vor allem im verbrauchsnahen dezentralen Bereich. Die unumgängliche Koordinierung der Vielzahl vielfältigster dezentraler Elemente kann grundsätzlich zentral und dezentral erfolgen. Im Hinblick auf die mit steigender Zahl der Elemente zunehmenden Datenmengen, die Potenziale der verbrauchsnahen dezentralen Energieeinsatzoptimierung – insbesondere im Bereich der Kraft-Wärme/Kälte-Kopplung – sowie in Erwartung zukünftig marktorientierten Agierens eigenverantwortlicher Energieunternehmer aus dem dezentralen Bereich (IPP: Independent Power Producer) ist ein konsequent dezentraler Ansatz unter Verzicht auf großräumige Ausgleichseffekte bei fluktuierender Einspeisung nahe liegend. So wird – im Endverbrauchsbereich beginnend - im Sinne einer von unten geregelten integrierten Energieoptimierung nachhaltig zur Steigerung der Energieeffizienz beigetragen.

Die Herausforderung einer großflächigen Optimierung dezentraler Energieversorgungssysteme kann z.B. durch Kaskadierung mit Potenzialermittlung und Profilvorgabe realsiert werden (Abb. 3). Dieser Ansatz setzt zunächst einfache Netzstrukturen – z.B. Strahlennetze – bzw. Engpassfreiheit voraus. Falls etwaige Netzrestriktionen – z.B. begrenzte Leitungskapazität – vorhanden sind, könnten diese in den Übergabeverträgen berücksichtigt werden. Bei komplexeren Netzstrukturen – z.B. vermaschten Netzen – werden die optimierten dezentralen Versorgungssysteme direkt an ein Verteilnetzmanagementsystem DMS mit Lastflussanalyse angekoppelt. Auf diese Weise werden dezentral optimierte MW zu dezentral optimierten GW.

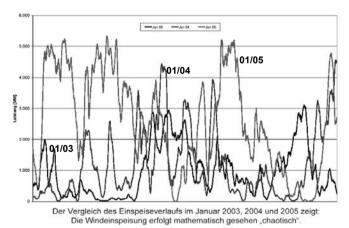
In der unterlagerten Ebene, wo zukünftig Tausende verteilter Kleinsterzeuger im kW-Bereich, z.B. KWK- oder PV-Anlagen, in Stadtnetzen installiert werden könnten, erfolgt eine evtl. Einbindung unter Aufwand/ Nutzenabwägung und im Hinblick auf das mögliche Datenvolumen sinnvoller Weise über Datenkonzentratoren. In diesen werden die einzelnen Kleinsterzeuger nach betriebsrelevanten Kriterien in Gruppen zusammengefasst und Web-basiert über eine XML-Schnittstelle von einem DEMS und evtl. überlagertem DMS mit mehrstündigen Fahrplanvorgaben versehen. In diesem Falle

werden dezentral einsatzoptimierte kW zu dezentral optimierten MW.

Mit diesem Konzept werden Datenumfang und Kommunikationsaufwand unter Wahrung der Optimierungsmöglichkeiten deutlich reduziert und die Dynamik aus wachsendem dezentralem Zubau im Verteilnetz bereits in der untersten Ebene intelligent abgefangen.

## Integration großer Windleistungen

Eine besondere und daher nachfolgend eingehender behandelte Herausforderung ist heutzutage die Netzeinbindung großer Windparks – Onshore und vor allem Offshore – mit installierten Leistungen > 100 MW, wo je nach Netzcharakteristiken derartige Maßnahmen zunehmend erforderlich werden – insbesondere bei der geplanten weiteren Entwicklung von derzeit rd. 18.000 MW Onshore (Stand Anfang 2006) auf langfristig rd. 47.000 MW durch vornehmlich Offshore-Zubau. Denn die Integration großer Windleistungen birgt verschiedene Probleme [7-9]:



Quelle: VE T 04.2006

Abb. 4: Verlauf der Windleistungseinspeisung bei VE-T 2003-2005

Generell: Windeinspeisung mathematisch gesehen "chaotisch" (Abb. 4) mit stark schwankender Erzeugung ohne Bezug zur Last sowie Prognose- und Planungsabweichungen;

Speziell: bei Starkwind und

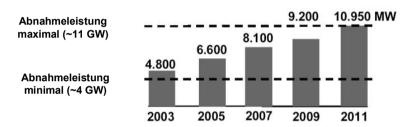
- · Starklast:
  - Engpassgefahr aufgrund thermischer Überlastung;

#### Schwachlast:

- Stabilitätsgefahr wegen fehlender Regelleistung/Ausgleichsenergie,
- Mangel an Blind- und Kurzschlussleistung sowie
- Automatische Abschaltung älterer Anlagen bei Sturm.

Zudem liegen die deutschen Erzeugungsschwerpunkte für Windenergie im Norden und Nordosten, die deutschen Lastschwerpunkte jedoch im Süden und Südwesten. Bereits im Jahre 2003 z.B. hat im Netzbereich Vattenfall Europe Transmission die installierte Wind-Leistung die minimale Abnahmeleistung im ostdeutschen Übertragungsnetz überschritten (Abb. 5).

## Installierte Wind-Leistung in [MW]



Bereits im Jahr 2003 hat die installierte Wind-Leistung die minimale Abnahmeleistung im ostdeutschen Übertragungsnetz überschritten!

Quelle: Vattenfall Europe Transmission (Prognosewerte jeweils zum Jahresende)

Abb. 5: Lastverhältnisse im VE-T-Netz

Die Folge ist, dass hier und anderenorts in kritischen Starkwind/Schwachlast-Situationen aufgrund der auf deutscher Seite nicht mehr allein beherrschbaren Netzstabilität einige europäische Netznachbarn im UCTE-Verbundsystem zuweilen – entgegen allen internationalen Vereinbarungen – mit deutscher Windleistungseinspeisung "überschwemmt" werden.

Die sich daraus ableitenden Transporterfordernisse lassen sich mit klassischem Netzausbau und ergänzenden Betriebsmitteln wie Blindleistungskompensations-, Speicher- und Regelleistungsanlagen allein nicht bzw. nicht optimal lösen. Daher beschreibt die erste dena-Netzstudie [10] auch nur die Ausbaumaßnahmen bis 2015 (Abb. 6). Für den weiteren Ausbau sind hier auch neue Konzepte und Technologien für Systemintegration und Betriebsführung gefragt, die in einer Folgestudie "dena II" bearbeitet werden sollen.

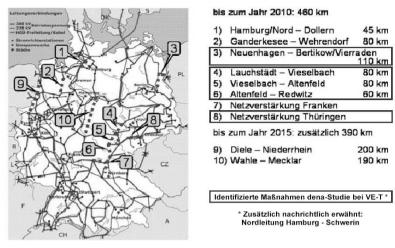


Abb. 6: Geplanter Ü-Netzausbau nach dena I bis 2015 – Veredelungsoptionen und Speicherung zur Erhöhung der Energiesystemkompatibilität

Neben verfeinerten Prognosen sind es vor allem durchgängige Kommunikation, verteilte Intelligenz, dezentrales Erzeugungs- bzw. Energiemanagement, virtuelle Großanlagen sowie Reserve- und Risiko-Strategien. Dabei ist eine intelligente Aggregation durch Kaskadierung mit netztopologischer Clusterung unter Berücksichtigung technischer Netzrestriktionen in Verbindung mit Lastflussrechung/ und -steuerung, umfassendem Energiemanagement einschließlich Blindleistungsführung der geeignete Schritt, um die Energiesystemkompatibilität der Windenergie deutlich zu erhöhen.

Auf dieser Basis bieten sich grundsätzliche Möglichkeiten der Beeinflussung bzw. Produktveredelung der eingespeisten Windleistung nach Anforderungen des Netzes bzw. des Marktes: Spitzenleistungsbegrenzung zur Netzsicherheit, Energieregelung zur marktkonformen Einspeisung, Leistungsregelung und Regelleistungsbereitstellung (Abb. 7). Damit können großflächig verteilte Windkraftanlagen profilbasiert einspeisen sowie – mit Reserve-/Risikostrategien unterlegt – vertragsfähig am Energiemarkt teilnehmen.

Das gilt insbesondere, wenn derartige virtuelle große Windenergieanlagen sogar noch Regelleistung bereitstellen, deren stabilisierende Wirkung auf die gesamte Windeinspeisung eines Gebietes anhand der Ergebnisse einer Simulationsrechnung erkennbar ist (Abb. 8).

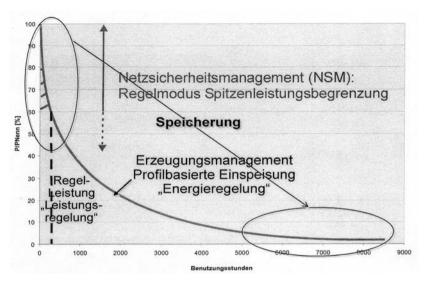
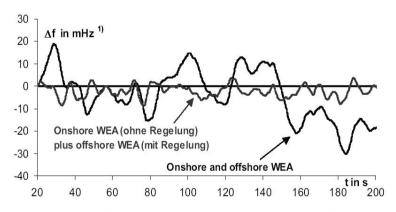


Abb. 7: Geordnete Windleistungsdauerlinie - Beeinflussungsoptionen



1) incl. des Einflusses der Frequenz-Leistungsregelung des übrigen Netzes

Quelle: VET, 2003

Abb. 8: Netzdynamik - Einfluss der Windeinspeisung auf die Frequenz

Mit diesen Optionen und unterstützt von den derzeitigen und weiterhin zu erwartenden steigenden Energiepreisen erhielte die Windenergie – zumindest teilweise – eine gewisse technologische und ökonomische Nachhaltigkeit, da

dieser Anteil differenzierter Stromprodukte, sofern die erzielbaren Erlöse über der EEG-Einspeisevergütung liegen, nicht mehr "umlagebedürftig" wären. Die Windenergie erführe damit eine nachhaltige Steigerung des energieund zudem gesamtwirtschaftlichen Nutzens, sofern es die Rahmenbedingungen zukünftig zulassen.

Eine besondere Notwendigkeit besteht aber noch in der Schaffung weiterer Speicherungskapazitäten, um den zukünftigen Energiemix zu beherrschen einschließlich des Managements fluktuierender Erzeugungen. Eine Hochrechnung aller auf EU-Basis für 2010 zu erwartenden Einspeisungen zeigt, dass deren Spitzenbeiträge nicht mehr durch die vorhandenen Pumpspeicherkapazitäten aufgefangen werden können (Abb. 9). Auf die Frage, "Wohin mit dem Überschuss", werden Druckluft-Speicherkraftwerke (CAES: Compressed Air Energy Storage) in adiabater Ausführung oder aber zusätzliche regelbare Lasten durch Elektrolyse mit Umwandlung in Wasserstoff, d.h. der Einstieg in die zukünftige Wasserstoffwirtschaft, diskutiert [11-13].

## EU-Ziele für Erzeugung 2010

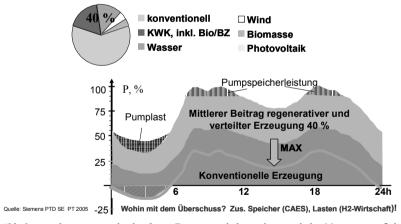
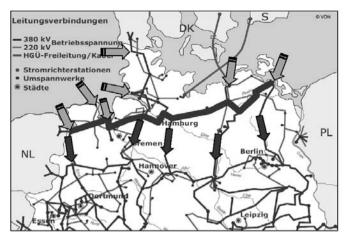


Abb. 9: ... und wir müssen den künftigen Energiemix beherrschen, auch das Management fluktuierender Erzeugung!

Für Deutschland wäre dazu die im Zusammenhang mit der dena-Netzstudie bereits angesprochene Windsammelschiene in Norddeutschland (Abb. 10) von ganz besonderer Bedeutung, zumal in dieser Region auch in großem Umfang geeignete geologische Formationen zu finden sind, die die Errichtung von o.g. CEAS ermöglichen.



Quelle: VE T 2006

Abb. 10: Geschlossene Windsammelschiene Norddeutschland

Hier könnte z.B. die fluktuierende Offshore-Windleistung mit ihrer vollen Dynamik zunächst aufgenommen/gespeichert werden und dann nach Bedarf und Netzverträglichkeit der öffentlichen Versorgung zugeführt werden. Dabei wird der Wirkungsgrad in adiabater Ausführung nach einschlägigen Untersuchungen bei 72% erwartet (Zum Vergleich: Das modernste deutsche Pumpspeicher-Kraftwerk Goldisthal hat 75%), das Investitionsvolumen wird in der Größenordnung eines vergleichbaren Gasturbinen-Kraftwerkes gesehen [11]. Der Wirkungsgrad einer Hochtemperatur-Elektrolyse kann etwa 80% erreichen (Persönl. Mitteilg. H. Müller-Steinhagen, Uni/DLR Stg., 22.09.06).

Hinsichtlich der Einsatz- bzw. Betriebsstrategie für o.g. Alternativen sollte generell das vorrangige Ziel sein, alle gesichert mögliche Einspeisung geplant ins elektrische Netz zu geben und alle Fluktuation einschl. Überschuss zukünftig nach Umwandlung in einen weiteren Sekundärenergieträgermarkt – z.B. Wasserstoff – zu leiten, da "Kraftstoff" für den mobilen Bereich zukünftig ebenfalls einen hohen Bedarf ausweisen wird.

# Marktorientierte Betriebsführung

Als konkrete Umsetzung oben beschriebener Konzepte und Funktionalitäten zeigt sich zunehmend die marktorientierte Betriebsführung dezentral aggregierter und optimierter Elemente innerhalb der existierenden Energieversorgung und zugehöriger Marktmechanismen (Abb. 11).

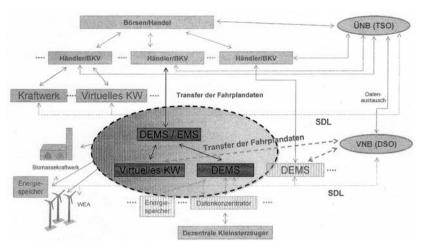


Abb. 11: Marktorientierte Betriebsführung (Szenario-Ausgangsbasis) [12]

Dabei ist ein wesentliches Merkmal der beteiligten Akteure, dass sie eigenverantwortlich und unbeeinflusst von gesetzlich verbrieften Vergütungen aktiv am Energiemarkt teilnehmen und durch differenziert angebotene Stromprodukte mit gesicherter Einspeisung mehr als nur die gesetzliche Einspeisevergütung erlösen wollen – d.h. es wird die Zeit nach Auslauf des derzeitigen EEG schon teilweise vorweggenommen [12].

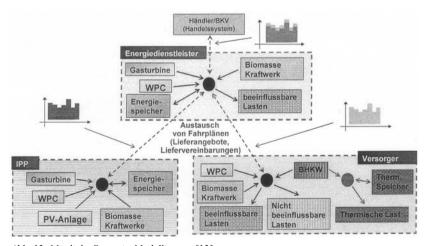


Abb. 12: Mögliche Szenario-Modellierung [12]

Als Akteure gibt es in der vorliegenden beispielhaften Konstellation (Abb. 12) auf der unteren Ebene einen

- IPP, der nur elektrische Erzeugungselemente und einen Energiespeicher besitzt,
- Versorger, der elektrische und thermische Erzeugungen hat und damit thermische und elektrische Lasten versorgt.

Darüber liegt in diesem Fall optimierungshierarchisch ein Energiedienstleister, der als Händler und Bilanzkreisverantwortlicher agieren kann, eigene elektrische Erzeugungen und einen Energiespeicher besitzt sowie auf Basis von Prognosen mit Toleranzen und daraus abgeleiteten Fahrplänen gesicherte Energielieferungen von seinen beiden Partnern bezieht und bestens vermarktet.

Der Fahrplan des hier betrachteten IPP (z.B. Abb. 13) zeigt, wie die veredelungsrelevanten regelbaren Elemente, Gasturbine und Speicher, aus dem vorhandenen Erzeugungsmix dazu eingesetzt werden, insbesondere das stärkere Windaufkommen am Nachmittag durch Regelleistungsvorhaltung zu sichern. Dadurch kann der vereinbarte Fahrplan gesichert an den Energiedienstleister geliefert werden.

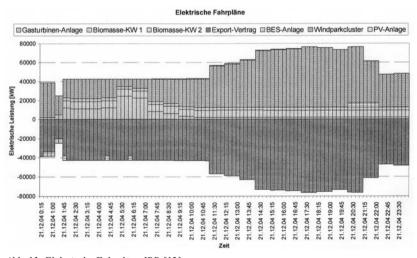


Abb. 13: Elektrische Fahrpläne IPP [12]

Beim betrachteten Versorger ergeben sich aufgrund der Lieferverpflichtungen gegenüber seinem eigenen Kundenkreis andere Fahrplanstrukturen, er hat auch noch einen Grundlast-Bezugsvertrag und ist nur während des stärke-

ren Windaufkommens exportfähig. Im Falle des Energiedienstleisters (Abb. 14) werden ebenfalls die regelbaren Elemente zur Sicherung und Optimierung seiner Energielieferung eingesetzt, wozu insbesondere der Speicher durch Aufladung in der Niedrigpreisphase und Entladung in der Hochpreisphase beiträgt.

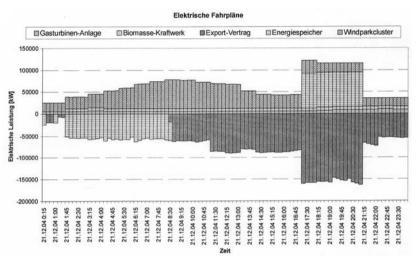


Abb. 14: Elektrische Fahrpläne Energiedienstleister [12]

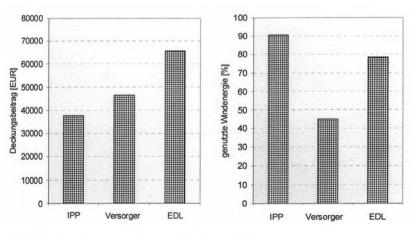


Abb. 15: Deckungsbeiträge und genutzte Windenergie [12]

Das Ergebnis dieser Modelluntersuchung einzelner Akteure im Energiemarkt zeigt sich in diesem Fall einmal monetär als Deckungsbeitrag, wobei mit höherwertigerer Energiedienstleistung auch die besseren Deckungsbeiträge erzielt werden (Abb. 15).

Zudem erhebt sich im Bereich der erneuerbaren Energiequellen und dezentralen Erzeugungen zugleich auch die Frage, wie viel denn z.B. des vorhandenen Windenergiedargebots bei dieser marktorientierten Betriebsführung mit gesicherter Einspeisung auch genutzt und im Energiemarkt abgesetzt werden konnte: Beim IPP sind es rund 90%; das zeigt zugleich auch, dass der Energie-/Erzeugungsmix für dieses Vorgehen richtig aus gelegt ist. Das gilt mit rd. 80% in etwa auch noch für den Energiedienstleister. Der Versorger dagegen mit rd. 45% derzeitiger Nutzung benötigt zur besseren zukünftigen Nutzung des Windenergiedargebots bei marktorientierter Betriebsführung weitere regelbare Elemente im Sinne eines ausgewogenen Energie-/Erzeugungsmixes.

#### Ausblick

Mit steigender Zahl großflächig verteilter erneuerbarer Energiequellen und dezentraler Erzeugungen wächst die Herausforderung systemkompatibler Integration in bestehende Elektroenergiesysteme und innovativer Lösungen. Eine ressourcenschonende und effizienzsteigernde Ausgangsbasis werden zunehmend dezentrale Energieversorgungskonzepte sein mit umfassendem dezentralem Energiemanagement auf Basis aufwand-/nutzengerechter Kommunikation und verteilter Intelligenz, die eine verbrauchsnahe Energieeinsatzoptimierung sowie eine Koordination der Vielzahl dezentraler Elemente mit dem zentralen System ermöglichen. Dabei werden durch netztopologische Clusterung und intelligente Aggregation der verteilten Energieeinspeisungen zu virtuellen Großanlagen ein vertragsfähiger Energieaustausch und marktorientierte differenzierte Strom-Produkte mit gesicherter Einspeisung für die "Zeit nach EEG" ermöglicht.

Ein Netzausbau im Sinne der dena-Netzstudie ist zunächst unumgänglich, um die Energie vor allem von den neuen Offshore-Erzeugungsschwerpunkten im Norden und Nordosten zu den traditionellen Lastschwerpunkten im Süden und Südwesten zu transportieren. Ein darüber hinaus gehender Ausbau sollte nach Kriterien der Gesamtwirtschaftlichkeit erfolgen und auch zusätzliche Speicherkapazitäten sowie ihre Wechselwirkung mit dem zukünftigen Kraftwerkspark berücksichtigen. Dabei gilt es zukünftig auch, durch angepasste energieprozeßoptimierte Verantwortlichkeiten und effizienzorientierte

Betriebsführung z.B. die unvermeidliche Dynamik im Netz weitgehend dort abzufangen, wo sie entsteht und nicht erst im Übertragungsnetz anzusetzen.

Die entscheidenden Technologien und Konzepte stehen im Grundsatz zur Verfügung. Für einen breiten Einsatz bedürfen Schnittstellen und Kommunikation z.T. noch eingehenderer Normierung.

Darüber hinaus muss auch der gesetzliche Rahmen mit weiteren Novellierungen von EEG, KWKG bzw. EnWG entsprechend angepasst sowie die EU-Harmonisierung fortgesetzt werden. Sodann sind alle beteiligten Partner im Energiesektor aufgerufen, die Technologien und Konzepte in gegenseitigem Verständnis aufzugreifen und die sich daraus ergebenden Chancen mit gesamtwirtschaftlicher Sicht national und international sinnvoll zu nutzen.

## Abkürzungen

BHKW Blockheizkraftwerk

CAES Compressed Air Energy Storage

DEMS Dezentrales Energiemanagementsystem

EEG Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnWG Energiewirtschaftsgesetz

EU Europäische Union

GSM Global System for Mobile Communications

IPP Independent Power Producer

ISDN Integrated Services Digital Network

KW Kraftwerk

KWK Kraft-Wärme-Kopplung

KWKG KWK-Gesetz

LAN Local Area Network

OPC OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control

PV Photovoltaik

UCTE Union for the Coordination of Transmission of Electricity

WAN Wide Area Network WPC Windpark-Cluster

XML Extensible Markup Language

#### Literatur

- [1] Aumayr, G., Bitsch, R., Feldmann, W.: Dezentrale Energieversorgungskonzepte optimieren Ressourcen; etz (1999), H. 3-4; S. 20-23
- [2] Bitsch, R., Feldmann, W., Aumayr, G.: Virtuelle Kraftwerke Einbindung dezentraler Erzeugungsanlagen; etz (2002), Jg. 123, H. 9, S. 2-9

[3] Hoppe, Kilpper, M., Bitsch, R.: Integration großer Offshore-Windleistungen in die Energieversorgung; Jahrestagung des Forschungsverbundes Sonnenenergie FSV Tagungsband, Stuttgart 2002

- [4] Bitsch, R.: Integrationskonzepte für regenerative/dezentrale Energieeinspeisungen; Energietag Brandenburg 2003, BTU Cottbus, Tagungsband
- [5] Bitsch, R., Gjardy, G., Woldt, Th.: Virtuelle große Kraftwerke eine Möglichkeit zur netzverträglichen Einbindung dezentraler Energieerzeugungen; Forum der Forschung 2004, Jg. 8, H. 17. S. 25-30, BTU Cottbus
- [6] Bitsch, R., Gjardy, G., Woldt, Th.: Bedeutung der dezentralen Stromerzeugung mit Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien und BHKW sowie des Last- und Energiemanagements in der Stromversorgung Deutschlands bis zum Jahr 2020; Kurzgutachten im Auftrag der Deutschen Energie Agentur GmbH, Cottbus 2004
- [7] Bitsch, R., Fünfgeld, C., Schwarz, H.: Auswirkungen des Ausbaus der Windenergienutzung in Brandenburg; Studie des Energieressourcen Instituts e.V. an der BTU Cottbus im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft des Landes Brandenburg, 2003
- [8] Bitsch, R.; Gjardy, G.; Woldt, T.: Systemintegration großflächig verteilter dezentraler Energieerzeugungen großer Leistungen; ew, Jg.103 (2004) H. 26, S. 40-42
- [9] Bitsch, R.; Gjardy, G.; Woldt, T.: Aspects of Large Scale RES/DG Integration in Existing Energy Supply Systems – considering as example the situation in Germany. International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 2 (2006), Nr.1, S. 59-81, Kassel
- [10]dena-Netzstudie Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020, Berlin 2005
- [11]5. dena EnergieForum "Druckluftspeicherkraftwerke" 08.09.2005, Berlin
- [12]Gjardy, G.: Beitrag zur zukünftigen marktorientierten Betriebsführung und Systemintegration großflächig verteilter dezentraler Erzeugungen mit besonderer Berücksichtigung der Windenergie (Diss. BTU Cottbus 2006); Shaker Verlag Aachen 2006, ISBN 3-8322-5110-3
- [13]Müller, J.: Windkraft und die regenerative Wasserstofferzeugung für das Grundlastmanagement; Energietag Brandenburg 2006, BTU Cottbus

## Herwig Brunner, Walter Trösch, Ulrike Schmid-Staiger

# Neue Ansätze zur Stoffproduktion mit Mikroalgen

Algen sind in unseren Breiten in der öffentlichen Meinung nicht besonders gut besetzt, da sie – in den Schlagzeilen eher als Algenpest bezeichnet – die Badefreuden in den Urlaubsgebieten beeinträchtigen. Allenfalls werden sie von "eingefleischten" Vegetariern oder Freunden asiatischer Küche geschätzt. Und doch sind sie eine absolute Notwendigkeit im Stoffkreislauf der lebenden Materie. Mit über 40 000 Arten bevölkern sie die Weltmeere, von den Süßwassergewässern ganz abgesehen. Wie erwähnt, befinden sie sich seit Jahrtausenden auf dem Speisezettel von Menschen und sind ein wichtiger Bestandteil in der asiatischen Medizin, wo sie seit Jahrhunderten überlieferte Funktionen für Gesundheit und Wohlbefinden haben. Mikroalgen stehen am Anfang jeder Nahrungskette auf diesem Planeten. Die Krillschwärme in den polaren Gebieten ernähren sich von Plankton und überwiegend von Mikroalgen.

Da die marine Biosphäre im Jahr ca. 2 Giga-Tonnen CO<sub>2</sub> fixiert, drängt sich die Frage auf, ob Mikroalgen im industriellen Maßstab nicht auch als Senke für CO<sub>2</sub> im Sinne der Realisierung einer nachhaltigen Umwelttechnologie eingesetzt werden könnten. Schon jetzt werden Produkte aus Mikroalgen, insbesondere für die Medizin und Kosmetik, industriell produziert, allerdings sind hier die erreichten Biomasse-Ausbeuten mit den traditionellen Technologien zu gering.

# Produkte aus Algen

Die industrielle Nutzung von Algen geht bis in das 19. Jahrhundert zurück. Kieselgur und Diathomen-Erde, welche teilweise aus fossilen Lagerstätten gewonnen werden, finden Eingang als Filtriermedien, Isoliermasse, aber auch in die Lack- und Papierindustrie. Alginsäure, Alginate oder Agar aus den fest wachsenden Algen *Euchema* und *Gylidium* finden in der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie bis hin zur Mikrobiologie breiten Einsatz. Als Quelle für diese Produkte gilt Kelp (japanisch Kombu). Dahinter verbergen

sich die Arten Laminariales und Fucales, die in Feldern in kühlen, klaren Meeresarmen bis zu 60 m Höhe wachsen. Aus ihrer Asche, welche entweder direkt als Soda für die Seifen- und Glasherstellung eingesetzt wird, können neben den vorgenannten Produkten auch elementares Jod gewonnen werden. Laminaria-Arten sowie Porphyra und Monostroma dienen im asiatischen Raum seit Jahrhunderten als Nahrungsmittel unter dem Namen .. Asacosa nori" oder "Kombu". Insgesamt kann die Algenbiotechnologie mit ihren Produkten als Wachstumsmarkt des 21. Jahrhunderts bezeichnet werden. Zum einen liefern Algen in industriellem Maßstab hochwertige Wirkstoffe wie Astaxanthin, das für die industrielle Lachszucht als das sprichwörtlich farbgebende Agens inzwischen auch synthetisch hergestellt werden kann. Zum anderen sei besonders darauf hingewiesen, dass Omega-3-Fettsäuren, die bislang aus Fischabfällen bzw. Restgut bei der Hochseefischerei gewonnen werden, letztlich von Mikroalgen als Syntheseprodukt herstammen und sich über die Nahrungskette in Fischen anreichern. Daher ist es nahe liegend, Mikroalgen direkt für die Gewinnung dieser essentiellen Nahrungskomponenten des Menschen in entsprechenden industriellen Anlagen und Verfahren zu produzieren

Die internationale Situation ist zurzeit die, dass die japanische Industrie, welche bisher fast vollständig durch die Gewinnung aus dem Meer, d.h. durch Verwertung von Fischen und Fischabfällen zu diesen Wertstoffen gelangte, beginnt, sich nun auch nach anderen Technologien umzusehen. So hat z.B. die Firma Fuji eine schwedische Technologie und Firma eingekauft. Große Teichanlagen in Hawaii wurden aufgekauft, neue Firmen gegründet und neue Technologien entwickelt. Auch China scheint zunehmend Interesse an diesem Markt zu haben.

Photosynthetische Mikroorganismen weisen schon sehr früh in der Evolution eine enorme Vielfalt an Synthesepotenzial auf. Demgemäß bilden sie bis heute in ihrer Vielfalt den Beginn der Nahrungskette über das gesamte Tierreich bis hinauf zum Menschen. Unter heutigen modernen Gesichtspunkten kommt noch der Charme der Nachhaltigkeit ihrer synthetischen Fähigkeiten hinzu. Sie bilden Farbstoffe und dabei zum Teil die Carotinoide, sie bilden Antioxidantien, Vitamine aber auch Fettsäuren, wobei vielfach – zumindest für den Wirbeltierorganismus – essentielle Moleküle dabei sind:

- Farbstoffe/Carotinoide:
   Beta-Carotin, Astanxanthin, Lutein, Ceaxanthin, Cantaxanthin, Chlorophyll, Lycopin, Fucoxanthin, Peridinin
- Vitamine: Vitamin A, B12, C, E, Biotin, Riboflavin, Nicotinsäure, Panthothenat

 Polyungesättigte Fettsäuren (PUFA), Omega-3-6-Fettsäuren: Docosahexaensäure (DHA), Eicosapentaensäure (EPA), Arachidonsäure (ARA)

Über diese wichtigen Verbindungen hinaus sind Wirkstoffe wie Fungizide, antimikrobielle Stoffe, Toxine, Aminosäuren, Polyole, Proteine/Enzyme bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) haben wir uns in den letzten Jahren insbesondere um Astaxanthin und EPA gekümmert und dafür optimierte Produktionsverfahren entwickelt. Diese beiden Wirkstoffe können als Schlüsselprodukte mit enormem zusätzlichem Marktpotenzial betrachtet werden. Astaxanthin, das mit einem weltweiten Umsatz von 234 Mio US \$ überwiegend in die Aquakultur eingeht, und dort neben seiner antioxidativen Wirkung auch für die uns als Lachsrot bekannte Färbung der Salmoniden verantwortlich ist, findet zunehmend in der Kosmetik und auch als pharmazeutischer Wirkstoff Verwendung. Schon länger sind die positiven Wirkungen von PUFAs bekannt, was sich in einem Marktwert von 950 Mio US \$ niederschlägt. PUFAs sind langkettige Fettsäuren, die zwei oder mehrere Doppelbindungen aufweisen. Das Interesse an ihnen kommt von ihrem Potenzial für Anwendungen in der Therapie und im Bereich der Lebensmittel. Sie kommen in der gesamten belebten Welt als Lipid-Komponente in Membranen, als Reservestoff, als Glykolipide, Phospholipide, Sphingolipide und Lipoproteine. Man unterscheidet dabei so genannte C3- und C6-Verbindungen, z.B. Linolensäure (LA), Arachidonsäure (ARA), Eicosapentaensäure (EPA) und Docosahexaensäure (DHA). Sie wirken im Organismus, nicht nur als Antioxidantien, sondern als Synthesebausteine für wichtige zelluläre Komponenten und Wirkstoffe. Hier seien insbesondere die Prostaglandine, Thromboxane und Leucotriene erwähnt. Ein Schlüsselenzym bei der Verwertung von EPA im menschlichen Körper ist die Cyklooxigenase, die ein wichtiges Target für antiinflammatorische Arzneimittel, z.B. Aspirin, darstellt. Neben den wissenschaftlich nachgewiesenen Wirkungen von PUFA-Lipiden hat sich ein grauer Markt mit sogenannten Pharmafoods entwickelt, denen antithrombische, antiinflammatorische, Anti-Cholesterin-, aber auch Anti-Krebs- und Anti-Aging-Wirkung zugeordnet wird. Es muss vor unkontrolliertem diäterischem Verbrauch gewarnt werden. Aber zweifellos ist der Markt interessant, da er z.B. für DHA schon 650 Mio US \$ und für EPA/ARA fast 300 Mio US \$ umfasst (Zahlen nach BCC Inc.; Martek Inc., 2004).

Astaxanthin (3,3'-Dehydroxy-4,4'-diketo-beta-Carotin) gewinnt als Nutraceutical wegen seiner antioxidativen Wirkung, aber auch in der Kosmetik als Pigment und Antioxidanz zunehmend an Bedeutung. Die größte Menge wandert in die Aquakultur und wird überwiegend schon synthetisch hergestellt. Unter Umständen problematisch könnte dabei sein, dass bei der Synthese zwei Isomere entstehen, welche in der Natur so nicht vorkommen. In Analogie zu Cantaxanthin, das wegen seiner dottergelbfärbenden Eigenschaften in der Geflügelhaltung eingesetzt wird, haben dort zwei in der Natur nicht vorkommende Isomere fatale Wirkung. Sie führen bei Geflügel zum Katarakt bis zur Blindheit. In Anbetracht des am Ende der Nahrungskette stehenden Menschen möglicherweise ein Gefährdungspotenzial!

Astaxanthin hat in der Natur auch die Funktion eines Farbgebers. So ist nicht nur die rote Farbe von Lachs oder der Lachsforelle darauf zurückzuführen, sondern in Verbindung mit verschiedenen Proteinen entstehen blaue, rote, gelbe oder orange Färbungen (Krustentiere, Flamingo!). In all diesen tierischen Vorkommen bildet das Astaxanthin, das durch Algen gebildet wird, die Grundlage. Astaxanthin hat starke antioxidative Eigenschaften, die etwa zehnfach höher liegen als bei Vitamin E gegeben. Zunehmend wird es als Nahrungsergänzungsmittel konsumiert und ist auch in der EU als solches zugelassen. Schwerpunkte im globalen Markt bilden die USA, Japan und der arabische Raum.

## **Technologischer Fortschritt**

Traditionell wurden und werden Algen meist in offenen Becken gezüchtet. Dabei steht der Gesichtspunkt der maximalen Exposition gegenüber dem Sonnenlicht im Vordergrund. Riesige Anlagen in Australien und vor allem auf Hawaii konnten mit dieser low tech-Methode nur einen Teil des Weltmarktes bedienen, was letztlich zur Stimulierung des chemisch-synthetischen Weges geführt hat.

Am Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, an dem wir uns seit Jahren mit nachhaltigen Technologieentwicklungen beschäftigen, wurde ein neuer Photoreaktor für die Algenzucht entwickelt. Diese Technologie berücksichtigt einerseits die kurze Lichtreaktion, die notwendig ist, um im zeitlichen Mittel jeder einzelnen Mikroalge die Möglichkeit zu geben, das erforderliche Lichtquant aufzunehmen, um es dann in der Dunkelreaktion in Reduktionsäquivalente umzuwandeln, die zur CO<sub>2</sub>-Fixierung, d.h. zur Synthese von Kohlehydraten und in der Folge für den Gesamtmetabolismus zur Verfügung stehen. Der Reaktor kann als Airlift-

Reaktor bezeichnet werden, da Luft ggf. mit CO<sub>2</sub> zur homogenen Durchmischung des Kulturmediums bzw. der Mikroalgen dient. Das Reaktormaterial besteht aus tiefgezogenen Kunststoffpaneelen, die Lichtdurchlässigkeit und niedrige Investitionskosten mit optimaler Bioverfahrenstechnik verbinden. Mit diesen Reaktoren werden hohe Produktivitäten durch die verbesserte Lichtnutzung bei geringen Betriebskosten und Investitionskosten verbunden. Der Reaktor ist universell einsetzbar für viele kleinzellige Algenarten und kann in skalierbarer Modulbauweise sowohl im Labor mit künstlichem Licht (z.B. während der kalten Jahreszeit), aber auch im Freiland eingesetzt werden. Die Technologie inklusive Reaktor wurde zum Patent angemeldet. Die Schutzrechte sind erteilt. Eine Ausgründung aus dem Fraunhofer IGB hält exklusiv die weltweiten Rechte.

Die Erfahrung mit einer Reihe verschiedener Mikroalgen zeigt, dass sehr hohe Biomassekonzentrationen erzeugt werden können, die weit über den Biomassekonzentrationen in statischen Aquakulturen liegen. Die Lichtausbeute und die Wachstumsrate sind für den Organismus jeweils maximal erzielbar. Insgesamt eine interessante technische Lösung, insbesondere wenn man sie vergleicht mit Röhrentechnologien aus Quarzglas, welche schon von den Investitionskosten kaum je zu wirtschaftlichen Produkten führen können.

Zurzeit wird in Stuttgart eine Pilotanlage über 400 m² als Vorstufe für eine 1000 m²-Anlage geplant. Mit letzterer können Biomassemengen von ca. 50 Jahrestonnen entsprechend einer Astaxanthin-Produktion von 1,8 t Reinstoff produziert werden.

#### Ausblick

Eine neue Technologie kann meist nicht aus dem Stand in großtechnische Dimensionen geführt werden. Am besten ist es, mit kleinvolumigen aber hochpreisigen Produkten die Technologie zu erproben, um den Ansatz bezahlbar zu halten. Wenn das gelungen ist, und wir sind dabei auf bestem Wege, können zusätzliche Visionen und Marktpotenziale ins Auge gefasst werden. Aufgrund der effizienten Nutzung von Sonnenlicht und des Einbaus von CO<sub>2</sub> in Biomasse kann diese Technologie als eine der vielversprechendsten nachhaltigen Verfahrensentwicklungen gesehen werden. Somit kommt unter heutigen Gesichtspunkten sofort der Gedanke der Produktion von Biomasse, welche als "Biodiesel" Verwendung finden kann. Da Mikroalgen frei in der Natur vorkommen, welche sehr hohe Fettgehalte aufweisen, kann man sich natürlich vorstellen, dass Mikroalgen eine Alternative zur landgestützten Produktion von ölhaltigen Pflanzen darstellen können. Eine Hochrechnung von

Lipidgehalten in Mikroalgen von 30 bis 60% der Trockensubstanz, was durchaus erreichbar ist, ergibt 30 bis 50 t Biomasse pro ha Solarreaktor/Jahr mit einer Ölausbeute von 15-20 t/ha/Jahr. Im Vergleich dazu ergeben sich bei landwirtschaftlicher Produktion von Raps ca. 15 t Biomasse/ha/Jahr mit einer Ölausbeute von 3 t/ha/Jahr. Der Nachteil bei Raps besteht zusätzlich zu diesen geringeren Ausbeuten im bisher kaum verwendbaren Glycerin als Abfall in der Größenordnung von 10% des gewonnenen Öls. Zusätzlich ist auch noch erwähnenswert, dass die pflanzliche Biomasse noch zu 80% Lignozellulose-haltige Reststoffe enthält, welche schwer aufschließbar sind und höchstens nach Trocknung verbrannt werden können. Demgegenüber sind Mikroalgen Lignin-frei.

Wenn man sich nun Großproduktionsanlagen zum Beispiel auch wassergestützt, d.h. auf dem Meer schwimmende Algenfelder vorstellt und dies mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus unseren Kraftwerken koppelt, kann man auf eine wirklich nachhaltige Biodiesel-Produktion extrapolieren, ohne dass weitere fossile Energieträger für die Landbearbeitung, Transportkosten und der Landverbrauch im Wettbewerb zur Nahrungsmittelproduktion zu Buche schlagen.

#### Weiterführende Literatur

- Gerngross, T. U., Can biotechnology move us toward a sustainable society. Nature Biotechnology 17, 541-544 (1999)
- Jassby, A., Some public health aspects of microagal products. In: Algae and Human Affairs (Lembi, C. A. and J. R. Waaland, eds.), pp. 181-202, Cambridge University Press, Cambridge (1988)
- Eriksen, N. T.; Poulsen. B. R.; Iversen, J. J. L., Dual sparging laboratory-scale phtobioreactorfor continous production of microalge. J. of Applied Phycology 10: 377-382 (1998)
- Rarbach, M.; Gerbsch, N.; Buchholz, R., Faseroptische und Röhren-Photobioreaktoren für die monoseptische Kultivierung von Mikroalgen. DECHEMA-Jahrestagung 1999
- Rarbach, M.; Gerbsch, N.; Buchholz, R., Strahlungstransport in Suspensionen phototropher Mikroorganismen. DECHEMA-Jahrestagung 1999
- Pringsheim, E. G., Algenreinkulturen ihre Herstellung und Erhaltung. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena 1954
- Molina Grima, E.; García Camacho, F.; Sánchez Pérez, J. A.; García Sánchez, J. L., Biochemical productivity and fatty acid profiles of Isochrysis galbana Parke and Tetraselmis sp. as a function of incident light intensity. Process Biochemistry 29, 119-126 (1994)

- Sánchez Pérez, J. A., n-3 Polyunsaturated fatty acid productivity of the marine microalga Isochrysis galbana. Growth conditions and phenotypic selection. Journal of Applied Phycology 6, 475-478 (1994)
- Pohl, P.; Zurheide, F., Fatty acids and lipids of marine algae and the control of their biosynthesis by environmental factors. Marine Algae in Pharmaceutical Science. Ed. by H. A.Hoppe, T. Levring; Y. Tanaka, pp. 473-523, Walter de Gruyter, Berlin 1979
- Behrens, P. W.; Kyle, D. J., Microalgae as a source of fatty acids. Journal of Food Lipids 3, 259-272 (1996)
- Benemann, J. R., Microalgae aquaculture feeds. Journal of Applied Phycology 4, 233-245 (1992)
- Borowitzka, M. E., Closed algal photobioreactors: Design considerations for largescale systems. Journal of Marine Biotechnology, 4: 185-191 (1996)
- Margalith, P. Z., Production of ketocarotenoids by microalgae. Appl. Microbiol. Biotechnol. 51, 431-438 (1999)
- Apt, K. E.; Behrens, P.W., Commercial developments in microalgal biotechnology. J. Phycol. 35, 215-226 (1999)
- Higuera-Ciapara, I.; Felix-Valenzuela, L.; Goycoolea, F. M., Astaxanthin: A review of its chemistry and applications. Critical Reviews in Food Science and Nurtition 46, 185-196 (2006)
- Leon-Banares, R.; Gonzalez-Ballester, D.; Galvan, A.; Fernandez, E., Transgenic microalgae as green cell-factories. Trends in Biotechnology 22 (1). 45-52 (2004)
- Kern, M., Food, feed, fibre, fuel and industrial products of the future: challenges and opportunities. Understanding the strategic potential of plant genetic engineering. J. Agronomy & Crop Science 188, 291-305 (2002)

#### Hermann G. Grimmeiss

# Nanoscience: Vom Forschungsergebnis zum Industrieprodukt

## 1. Einleitung

Obwohl in den vergangenen Jahren sowohl von Seiten der Länder als auch der EU mehrere Initiativen unternommen wurden, die Zielsetzungen und Möglichkeiten der universitären Ausbildung, Forschung und des Innovationssektors zu verbessern und die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Sektoren zu stärken, bleibt offensichtlich noch vieles zu tun. Sowohl die europäische Kommission als auch mehrere nationale Regierungen in Europa haben in einer Anzahl von Verlautbarungen immer wieder "ihre Besorgnis über den wachsenden Abstand in den Naturwissenschaften zwischen Europa und den USA" zum Ausdruck gebracht. Diese Besorgnis gilt insbesondere den Materialwissenschaften, nicht zuletzt wegen deren Breite und Bedeutung.

In den Materialwissenschaften unterscheidet man oft strukturelle und funktionelle Materialien. Aber in Anbetracht der Tatsache, dass sich die Materialwissenschaften in zunehmendem Maße über viele klassische Gebiete wie z.B. Physik, Biologie, Chemie, Mathematik, Medizin und Mechanik erstrekken, wird es immer schwieriger, klare Abgrenzungen zu definieren. Einer der Gründe für die außergewöhnlich große Bedeutung der Materialwissenschaften für die moderne Industrie und somit für die wirtschaftliche Entwicklung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Materialwissenschaften ihre Basis sowohl in der Grundlagenforschung als auch in den Ingenieurwissenschaften haben und daher eng mit der Technologie verbunden sind.

Nanotechnologie und Nanoscience sind Teile der Materialwissenschaften. Wegen der großen Breite des Gebietes und den notgedrungen daraus folgenden inter- und multidisziplinären Aspekten ergibt sich eine Komplexität, die für viele andere Wissenschaftsgebiete unbekannt ist. Sowohl für die Forschung und deren Anwendung als auch für die Aus- und Weiterbildung stellt dies eine sehr große Herausforderung dar.

Nanoscience wird nicht selten mit Nanotechnologie, die alle Materialien mit kleinen Dimensionen beinhaltet, verwechselt oder gleichgesetzt. Nanoscience ist jedoch nur ein Teil der Nanotechnologie. Sie schließt innerhalb der Nanotechnologie die Materialien, Bauelemente und Systeme ein, die wegen ihrer Nanostrukturen neue und wesentlich verbesserte physikalische. chemische oder biologische Eigenschaften aufweisen. Diese verbesserten und oftmals völlig neue Eigenschaften werden nur auf Grund der kleinen Dimensionen und deshalb nicht in deren Makrostrukturen beobachtet. Ein Transistor mit 90 nm Strukturbreite gehört daher zur Nanotechnologie, weil trotz seiner sehr kleinen Struktur die charakteristischen Merkmale des Transistors unverändert sind. Nanodrähte dagegen besitzen Eigenschaften, die sich grundlegend von den makroskopischen Kristallen unterscheiden. Sie gehören daher zur Nanoscience. Ebenso wie die Nanotechnologie ist die Nanoscience kein bestimmtes oder klar abzugrenzendes Gebiet innerhalb der Materialwissenschaften, sondern erfährt eine immer größere Bedeutung nicht nur auf einigen, sondern auf allen Gebieten der Materialwissenschaften.

Diese zunehmende Bedeutung und Breite der Nanoscience beinhaltet aber auch gewisse negative Aspekte, die durchaus ernst zu nehmen sind. Weil viele europäische Politiker vom Begriff "Nano" fasziniert sind, ohne deshalb immer zu wissen, worum es sich wirklich handelt, ist Nanoscience zu einem oft verwendeten Schlagwort in der Forschungspolitik geworden, was nicht selten zu Missverständnissen oder gar zum Missbrauch führt. So unerhört interessant und spannend die Nanoscience auch ist, es sind nicht immer die Dimensionen allein, die zu Innovationen und neuen Anwendungen führen. In den meisten Fällen spielen zusätzliche Materialeigenschaften und vor allem Kosten eine entscheidende Rolle.

# 2. Europäische Materialwissenschaft im Vergleich zu anderen Ländern

Es sieht so aus, als ob Europa im Umgang mit der Komplexität und Interdisziplinarität der Materialwissenschaften größere Schwierigkeiten hat als andere Länder. Die Gründe hierfür wurden von der EU-Kommission in einer Reihe von Mitteilungen aufgelistet und eingehend diskutiert.

In einer dieser Mitteilungen (com (2003) 58) bemerkt die Kommission: "European universities are not at present globally competitive with those of our major partners". In Anbetracht der Tatsache, dass in vielen europäischen Ländern nur ungefähr die Hälfte aller Studenten ihr Studium mit einem Ex-

amen abschließen und mehr als 10% der Postdocs in den USA studieren, fragt man sich, ob die staatlichen Förderungen für die höhere Ausbildung in Europa wirklich sinnvoll verwendet werden. Im deutschen Bundestag wurde daher im vergangenen Jahr darauf hingewiesen, dass sich "allein an der immer weiter gesunkenen Zahl der Nobelpreisträger in den entsprechenden Bereichen ablesen lässt, wie dringend die EU im Forschungssektor Tempo machen muss: Während 1901 und 1950 noch 73 Prozent der Preisträger aus Europa kamen, waren es zwischen 1995 und 2004 nur noch 19 Prozent" [1].

Bedenken äußerte die EU-Kommission auch über die nicht immer zufriedenstellende Zusammenarbeit zwischen den Universitäten und der Industrie. In der Mitteilung com (2004) 353 stellt die Kommission fest: "Europe lacks sufficient capacity to transform knowledge into productes and services" und unterstreicht in einer weiteren Mitteilung vom vergangenen Jahr: "Today's infrastructure in Europe does not always meet the requirements of industrry".

Wirft man dann noch einen Blick auf die internationalen Ranglisten von Universitäten der letzten Jahre [2,3], so stellt man fest, dass sich unter den 10 Top-Universitäten in der Welt fast immer mindestens 7 amerikanische Universitäten befinden und dass unter den 30 besten Universitäten der Welt nicht selten weniger als 10 europäische Universitäten zu finden sind. Die beste deutsche Universität liegt normalerweise im mittleren und die besten skandinavischen Universitäten im unteren Bereich der Top-100-Universitäten. Im Gegensatz zu anderen Meinungen hat eine von der Universität Göteborg durchgeführten Analyse dieser Ranglisten jedoch in Übereinstimmung mit einer entsprechenden Äußerung der EU- Kommission gezeigt, dass die Listen, obwohl sie von verschiedenen Kriterien ausgehen, wiedergeben, "was viele in der Welt für richtig halten".

Bereits diese wenigen Beispiele zeigen, dass wir in Europa allen Grund haben, die angesprochenen Probleme Ernst zu nehmen. Die Wissenschaftler sowohl in den USA als auch in Europa sind jedoch davon überzeugt, dass die Gründe für das schlechte Abschneiden Europas im Vergleich mit Ländern außerhalb Europas nicht eine Frage der Kreativität, Intelligenz oder gar des Geldes ist, sondern im wesentlichen auf den unterschiedlichen Forschungsstrukturen beruht.

Auf der einen Seite haben viele Universitäten in Europa immer noch die klassische Einteilung in streng von einander getrennten Fakultäten, die aus verschiedenen Gründen oftmals kaum mit einander zusammenarbeiten, geschweige denn gemeinsame Vorlesungen veranstalten. Solche Strukturen fördern die Multi- und Interdisziplinarität der Materialwissenschaften und

insbesondere der Nanoscience sicherlich nicht. Erfreulicherweise haben einige Universitäten diese Schwächen bereits erkannt und sind dabei, unter anderem durch verwaltungs- und bautechnische Maßnahmen die Zusammenarbeit zwischen den Abteilungen verschiedener Fakultäten zu erleichtern. Die Universität in Lund gehört zu den wenigen Universitäten in Europa, die einen gesonderten Studiengang "Nanotechnologie" anbietet [4,5]. Der Studiengang ist sehr beliebt, doch ist es noch zu früh, Analysen oder Schlussfolgerungen aus den bisherigen Erfahrungen zu ziehen. In Anbetracht der Breite des Studiengangs ist es eine der Hauptaufgaben der Verantwortlichen zu vermeiden, dass die Studenten "vieles über nichts lernen".

## 3. Universitätsforschung in Europa

Obgleich die wachsende Anzahl von Universitäten in Europa im Grunde eine positive Entwicklung ist, so hat diese Entwicklung dennoch dazu beigetragen, dass die Anzahl der Forschergruppen, die auf ähnlichen oder nahe gelegenen Gebieten Forschung betreiben, beträchtlich angewachsen ist und somit zu einer sehr bedeutenden Fragmentierung der Nanoscience in Europa geführt hat. Verbunden mit einer nicht im gleichem Maße zunehmenden Finanzierung hat dies zur Folge, dass viele Forschergruppen nicht selten unterkritisch finanziert sind. Diese Gruppen haben kaum eine Chance, auf internationaler Basis mit Kollegen in anderen Teilen der Welt zu konkurrieren. Das bedeutet aber, dass ein wesentlicher Teil der europäischen Forschungsgelder nicht effizient genützt wird.

Die EU-Kommission hat mehrmals betont, dass "der Rahmen für eine Erhöhung des Forschungsbudgets sehr begrenzt ist" und hat daher vorgeschlagen, dass die Universitäten durch Verkauf von Dienstleistungen sich selber um Forschungsgelder aus dem privaten Sektor bemühen sollen. Dienstleistungen dieser Art, nicht zuletzt wenn es um eine Zusammenarbeit mit kleineren oder mittleren Betrieben geht, setzen jedoch voraus, dass die betreffenden Forschergruppen in der Lage sind, ihren industriellen Partner Prototypen zur Verfügung zu stellen. Auf manchen Gebieten, wie z.B. der Mikroelektronik, gibt es aber in vielen europäischen Ländern kaum eine Universität, die hierfür die entsprechende moderne Ausrüstung besitzt. Viele Spitzenforscher Europas sind außerdem der Meinung, dass es nicht Hauptaufgabe der Universitätsforschung sein sollte, Prototypen oder gar Produkte für die Industrie zu entwickeln, weil dadurch die Exzellenz und Zielsetzung der Universitäten in Gefahr gerät. Nach ihrer Meinung wird die Exzellenz der Universitäten nicht durch kurzfristige Produktentwicklungsprogramme, son-

dern eher durch mittel- und langfristige Forschung gefördert. Dennoch sollte man nicht vergessen, dass es in Anbetracht der universitären Freiheit den einzelnen Universitäten und Forschergruppen freisteht zu entscheiden, welche Zielrichtungen man bevorzugt.

Ein weiterer Punkt, der die Wissenschaftler zunehmend beunruhigt, ist die Tatsache, dass Universitätsforscher heute sehr viel mehr Zeit für Förderanträge und Berichte aufwenden müssen als früher. Eine Umfrage unter führenden Universitätsforschern Europas hat ergeben, dass diese oftmals mehr als 60% ihrer Arbeitszeit für nicht-wissenschaftliche Tätigkeiten aufwenden müssen und nicht selten weniger als 20% ihrer Zeit für die Forschung zur Verfügung haben.

Zersplitterung, unterkritische Förderung und kurzfristige Forschungsprojekte sind nur einige wenige Bespiele, die die Forschungsstruktur vieler europäischer Länder verändert haben. Eine überzeugende Mehrheit von Forschern in Europa ist deshalb der Ansicht, dass – im Gegensatz zu den USA – Europa nicht immer seine Fähigkeiten und Stärken als Ganzes nützt. Man fragt sich deshalb, ob es nicht angebracht wäre, die Spitzenforschung in den verschiedenen Ländern auf europäischer Ebene zu bündeln, um die Stärken Gesamteuropas zum Tragen zu bringen. Diese Einstellung geht von der Überzeugung aus, dass die Forscher in Europa genau so kreativ und engagiert sind wie ihre Kollegen anderswo in der Welt und dass sie sehr wohl in der Lage sind, auf vielen Gebieten global erfolgreich konkurrieren zu können.

## 4. Hinweise der EU-Kommission und des EU-Parlamentes

In der Vorbereitung zum 7. FWP haben sowohl die EU-Kommission als auch das europäische Parlament immer wieder unterstrichen, "that it is paramount to overcome one of the key European weaknesses – the "European Paradox" – in generating splendid scientific knowledge but insufficient ability to convert this knowledge into innovation and commercial products".

Das EU-Parlament hat dieser Ermahnung noch folgende interessante Bemerkung hinzugefügt: "The participation of the business sector and the commercial exploitation of scientific knowledge and technical skills are important factors in ensuring that the Framework Programme can make a contribution towards the Lisbon agenda and the creation of growth and jobs. However, concrete measures are still missing."

Um Zersplitterungen und Überlappungen zu vermeiden und eine weiter reichende Integration zu erreichen, hat das EU-Parlament darauf bestanden, dass "die Rolle der NoEs (networks of excellence) erweitert wird". Obgleich das 7. Rahmenprogramm mehrere Handlungsprogramme anbietet, stellt das EU Parlament dennoch fest, dass "es nicht klar ist, wie diese verschiedenen Programme mit einander kooperieren werden. Außerdem sollte deutlich gemacht werden, wie die Integration dieser Programme auf europäischer, nationaler und regionaler Ebene verwirklicht werden kann".

Beide Instanzen haben mit diesen Feststellungen die Probleme klar und deutlich zum Ausdruck gebracht. Aber nur wenige Spitzenforscher Europas sind mit den bisherigen Erfolgen und Möglichkeiten wirklich zufrieden. In den USA wird die Meinung über die europäischen Forschungsprogramme oft mit dem Satz zusammengefasst: "Billions spent and nothing to show". Bezüglich der NoEs wird zu bedenken gegeben, dass keine Kriterien zur Definition von "Exzellenz" angeboten wurden. Oftmals haben große und nicht kontrollierbare Konsortien Anträge eingereicht, jedoch in vielen Fällen ohne jegliche Teilnahme von industriellen Partnern. Hinzukommt, dass die bewilligten Fördermittel für die einzelnen Partner zu klein waren. Viele Forscher sind daher der Meinung, dass keine wirklichen Forschungsziele vorgegeben wurden und das Ziel der NoEs im wesentlichen darin bestand, die Reisekosten für informelle Treffen zu finanzieren.

## 5. Vorschläge zum Transfer von neuen Forschungsergebnissen

Diese kurze Zusammenfassung zeigt bereits, dass man nach anderen Lösungen Ausschau halten sollte, um die Umsetzung von neuen Forschungsergebnissen, die Fachgebiete wie die Nanoscience anbieten, zu ermöglichen oder zu verbessern. Diese Lösungen sollten nicht nur das Ziel haben, eine Brücke zwischen den Universitäten und dem privaten Sektor zu bauen, sondern *gleichzeitig* auch darauf bedacht sein, die Exzellenz der europäischen Universitäten zu verstärken, um so den Abstand zwischen Europa und den USA in Bezug auf die Naturwissenschaften, und hier nicht zuletzt auch in der Nanoscience, zu verringern.

Dies mag vermessen klingen, ist aber im Grunde gar nicht so schwierig, wenn man sich bemühen würde, die vorhandene Forschungsstruktur in Europa so zu verbessern, dass die Forschungsstärke Gesamteuropas optimal ausgenützt werden kann. Dabei sollte beachtet werden, dass die beiden Ziele, nämlich die Zusammenarbeit zwischen den Universitäten und der Industrie und die Verringerung des Abstandes in den Naturwissenschaften zwischen Europa und den USA, mit einander verknüpft sind und daher nicht getrennt von einander realisiert werden sollten. Selbst wenn Europa die Führungsspitze in der globalen Forschung übernehmen sollte, würde eine solche Entwick-

lung keine wirtschaftliche und industrielle Auswirkung zur Folge haben, wenn die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse nicht auf den Markt gebracht werden können. Auf der anderen Seite würde sich der Abstand in der Grundlagenforschung im Vergleich zum Rest der Welt sehr bald weiter vergrößern, wenn sich die Hochschulen allein auf die Herstellung von Prototypen beschränken.

Eine Bündelung der Forschungsspitzen auf verschiedenen Gebieten der Wissenschaft in Europa ist an und für sich nichts neues und wird auf regionaler Ebene bereits mit großem Erfolg praktiziert, wenn auch im begrenzten Umfang. Aber auch auf europäischer Ebene gibt es eine Reihe von Beispielen. Man bedenke nur, welch große Bedeutung Institutionen wie CERN nicht nur für die Kern- und Partikelphysik, sondern auch für das Ansehen der europäischen Forschung an sich haben. Warum sollte dies nicht auch auf anderen Gebieten der Wissenschaften möglich sein?

Eingedenk der Tatsache, dass der Aufbau von Institutionen wie CERN in der Nanoscience sehr zeitraubend und kostenintensiv ist, hat das European Materials Forum [6] daher der EU Kommission zu Beginn des Jahres 2006 einen Vorschlag unterbreitet, der es ermöglichen würde, die besten Forschergruppen an europäischen Universitäten auf einem bestimmten Gebiet der Nanoscience mit den am besten hierfür ausgerüsteten Forschungsinstituten Europas zusammenarbeiten zu lassen. Voraussetzung ist allerdings, dass diese Forschungsinstitute bereits eine breite und erprobte Zusammenarbeit nicht nur mit der Universitätsforschung, sondern auch mit der Industrie haben.

Im Gegensatz zu bereits bestehenden europäischen Programmen müssen diese virtuellen Zentren oder Cluster dem Vorschlag entsprechend stark integriert sein und so organisiert werden, als würden alle Partner im gleichen Institut arbeiten. Das Management und die Verwaltung sollte aus Spezialisten bestehen und von einem erfahrenen CEO geleitet werden. Förderanträge werden in diesen Zentren vom Management verfasst und alle verwaltungstechnischen Fragen werden von der Verwaltung bearbeitet, so dass die am Projekt beteiligten Forscher sich ausschließlich auf ihre Forschung konzentrieren können. Wie bereits erwähnt, ist dieser Punkt von besonderer Bedeutung, weil gegenwärtig führende Universitätsforscher in Europa den größeren Teil ihrer Arbeitszeit für nicht-wissenschaftliche Arbeiten reservieren müssen. Es wurde auch vorgeschlagen, dass die beteiligten Forschergruppen nur während der Dauer eines Projektes berechtigte Partner eines solchen virtuellen Zentrums sind. Dies würde es den Universitäten leichter machen, Forschergruppen auch administrativ für eine begrenzte Zeit in einer anderen Organi-

sation arbeiten zu lassen. Vor der Auswahl der Partner müssen außerdem klare und eindeutige Kriterien für die Definition von "Exzellenz", nach denen die Auswahl zu erfolgen hat, erstellt werden.

Diese Vorschläge sind keineswegs so wirklichkeitsfremd, wie es erscheinen mag, denn regional gibt es in Europa bereits sehr erfolgreich arbeitende Forschungscluster, wie z.B. das Institut für Halbleiterphysik in Frankfurt (Oder) [7]. Der Vorteil der vorgeschlagenen Cluster besteht darin, dass die beteiligten Forschungsinstitute die zur Herstellung von Prototypen erforderlichen Ausrüstungen und Expertise besitzen und mit den Forderungen der Industrie, z.B. bezüglich des Einhaltens von Zeitplänen oder der Absicherung von Erfindungen mit Patenten, bestens vertraut sind. Hinzukommt, dass die Schaffung und Pflege von Kontakten mit Industriepartnern an diesen Instituten von Experten mit langjähriger Erfahrung betrieben wird. Erfahrungen dieser Art sind von entscheidender Bedeutung, wenn man bedenkt, dass sich die Zielsetzungen in der Industrie und die Vorgehensweise, wie sie erreicht werden, wesentlich von denen an Universitäten unterscheiden. Diese Punkte sind deswegen zu beachten, weil es in vielen europäischen Ländern, im Gegensatz zu den USA, nur sehr wenige Universitätsforscher mit Industrieerfahrung gibt.

Auf der anderen Seite haben Forschungsinstitute, abgesehen von z.B. Akademien oder Max- Planck-Instituten, oftmals nicht genügend Zeit oder Ressourcen, um langfristige Forschung auf höchstem internationalen Niveau zu betreiben. Für sie ist es deshalb ein Vorteil, wenn sie auf der Basis ihrer Technologie mit den besten Forschergruppen Europas auf Gebieten, die Themen außerhalb ihrer eigenen Kernkompetenz abdecken, zusammenarbeiten können, um so Zugriff zu den neuesten Errungenschaften auf diesen Gebieten zu erhalten. Ohne Zweifel würde die Basis für eine Brückenbildung zwischen der Universitätsforschung und der Industrie dadurch wesentlich zu erweitert werden. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Verknüpfung von Gebieten wie die Nanoelektronik mit der Biophysik oder Biomedizin.

In vielen Gesprächen hat sich gezeigt, dass solche Arbeitsformen von fast allen Universitäten und Politikern in verschiedenen europäischen Ländern, einschließlich der EU-Kommission und der entsprechenden Ministerien in Russland, sehr positiv bewertet werden. Für neue Forschungsgebiete, wie die Nanoscience, scheint es wegen der Inter- und Multidisziplinarität schwierig zu sein, andere Lösungen zu finden. Dies ist vor allem der Fall, wenn es darum geht, auf der einen Seite neue Forschungsergebnisse schnell auf den Markt zu bringen, ohne die Exzellenz und Freiheit der Hochschulen zu beein-

trächtigen, und auf der anderen Seite den Abstand in den Naturwissenschaften zwischen Europa und der übrigen Welt zu verringern.

## 6. Schlussbemerkung

Virtuelle Forschungszentren der Art, wie sie hier beschrieben werden, ermöglichen eine sehr viel wirkungsvollere Integration von Forschung und Ausbildung als andere Netzwerke innerhalb der europäischen Forschungsprogramme wie z.B. die NoEs und IPs. Sie erlauben deshalb eine sehr viel schnellere Überführung von Innovationen in Industrieprodukte. Darüber hinaus würden diese integrierten Netzwerke oder Cluster nicht nur Forschung auf höchstem Niveau betreiben, sondern gleichzeitig auch die Qualität der Universitätsausbildung und die Mobilität der Wissenschaftler wesentlich verbessern. Diese Langzeiteffekte sind daher nicht nur für Gesamteuropa von großer Bedeutung sondern wären auch für jedes Mitgliedsland innerhalb der europäischen Union von Interesse.

#### Literatur

- [1] http://nobelprize.org/nobel\_prizes/lists/all/
- [2] http://ed.sjtu.edu.cn/rank/2005/ARWU2005Main.htm
- [3] http://www.thes.co.uk/worldrankings/
- [4] K. Deppert and L. Samuelson: "Engineering nanoscience a new education program to satisfy the future needs of industry", Facets 3, 7-10 (2004)
- [5] K. Deppert, R. Kullberg and L. Samuelson: "Engineering nanoscience a curriculum to satisfy future needs of industry" in "Nanoscale science and engineering education: Issues, trends and future directions", Editors: A.E. Sweeney and S. Seal, American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, CA, 2007, in press
- [6] http://www.euromaterialsforum.com/Cork Meeting final report.pdf
- [7] http://www.ihp-ffo.de/

Ulrich Wulf, Paul N. Racec und Hans Richter

# Quantentransport in Nanotransistoren

Wir stellen die grundlegend unterschiedlichen Transportprozesse dar, die sich in Transistoren mit Kanallängen im Mikrometerbereich auf der einen Seite und Kanallängen im Nanometerbereich auf der anderen Seite ergeben. Im Mikrometerbereich liegt diffusiver Transport vor, der im Drift-Diffusionsmodell eine angemessene Beschreibung findet, im Nanometerbereich liegt Quantentransport vor, für den der Landauer-Büttiker Formalismus geeignet ist. Letzterer ist der einfachste quantenmechanische Zugang der eine quantitative Beschreibung ermöglicht. Wir zeigen, wie der Landauer-Büttiker Formalismus auf Nanometer-Feldeffekttransistoren angewendet werden kann. In qualitativer Übereinstimmung mit Experimenten finden wir im Nanometerbereich einen charakteristischen Übergang von einem ON-state Regime in dem der Transistor als 'klassischer' Transistor arbeitet, hin zu einem quasi-OFF-state Regime, in dem der Transistor als Tunneltransistor arbeitet. Im Gegensatz zum Nanotransistor ergibt sich im Mikrotransistor kein Tunnelregime, d.h. es bildet sich ein klarer OFF-state aus, in dem das Bauelement sperrt.

U. Wulf

Technische Universität Cottbus, Fakultät 1, Postfach 101344, 03013 Cottbus, Germany P. N. Racec

Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, Mohrenstr. 39, 10117 Berlin, Germany

National Institute of Materials Physics, PO Box MG-7, 76900 Bucharest, Romania

H. Richter

Technische Universität Cottbus, Fakultät 1, Postfach 101344, 03013 Cottbus, Germany

## 1 Einleitung

Technologische Fortschritte ermöglichen die Verwendung von Bauelementen mit immer kleiner werdenden Abmessungen in hochintegrierten elektronischen Schaltkreisen. Durch die wachsende Anzahl der bei gegebener Chipgröße erzielbaren elektronischen Funktionen sinken die Produktionskosten. Da der Feldeffekttransistor (FET) in diesen Schaltungen eine zentrale Rolle spielt, ist dessen Kanallänge eine entscheidende Größe. Beispielsweise war in den siebziger Jahren eine Kanallänge von 10 µm Stand der Technik, wohingegen in den kommenden Jahren mit Kanallängen von unter vierzig Nanometern zu rechnen ist [1]. In der Forschung werden bereits Transistoren mit Kanallängen im Bereich von  $\leq 10 \ nm$  untersucht [2, 3, 4], wobei auch alternative Geometrien und Materialien eingesetzt werden [5], wie bei Carbon Nanotube FETs (CNFET) [6, 7], Doppelgate FETs (DGFET) [8], Siliconon-Insulator MOSFETs (SOI MOSFET) [9], Silizium-Nanowiretransistoren (SNWT) [10, 11], strained channel FETs [12] oder Transistoren in hybridorientation Technologie (HOT) [13]. Wir wollen in dieser Arbeit zeigen, dass durch den Wandel in den Größenordnungen vom Mikrometermaßstab zum Nanometermaßstab ein drastischer Wechsel in den Transportmechanismen hervorgerufen wird: Bei Kanallängen im Mikrometerbereich vollzieht sich der Ladungstransport im Drift-Diffusionsregime. Hier kann angenommen werden, dass sich durch schnelle Stöße ein lokales Gleichgewicht einstellt, das sich durch lokale quasi-elektrochemische Potentiale beschreiben lässt. Die im stromfüh-renden Zustand resultierende kleine Störung dieses Gleichgewichts kann durch die Boltzmanngleichung berechnet werden. Wie bekannt, resultiert ein Strom, der aus zwei Komponenten besteht, zum einen aus dem Driftstrom, der durch ein elektrisches Feld induziert wird, und zum anderen aus dem Diffusionsstrom, der durch Konzentrationsgradienten hervorgerufen wird.

Im Gegensatz dazu, wenn bei typischen Längen von unterhalb von einigen zehn Nanometern 'Nanostrukturen' vorliegen, werden Streuprozesse durch Verunreinigungen oder Gitterschwingungen im Prinzip immer unwichtiger und Quantentransport gewinnt an Bedeutung [14, 15]. Im Extremfall, dem sogenannten ballistischen Fall, wird angenommen dass die Ladungsträger ungestreut das Bauelement durchqueren. Dann werden die stromtragenden Ladungsträger durch Wellenfunktionen beschrieben, die im gesamten Bauelement definiert sind. Durch das Auftreten von solchen durchgängig

kohärenten Wellenfunktionen in kleinen und reinen Bauelementen werden völlig neue Wirkungsprinzipien möglich, wie der negative differenzielle Widerstand in einer resonanten Tunneldiode belegt [16]. Außerdem ist zu erwarten, dass im ballistischen Limit weit größere Ladunsgsträgergeschwindigkeiten als die Sättigungsgeschwindigkeit im Drift-Diffusionsmodell möglich sind. In Gegenwart von geringfügiger Streuung, im quasi-ballistischen Transportbereich, müssen die Reststreuer individuell und mikroskopisch behandelt werden. In der Folge können nominell gleichgebaute Strukturen durch eine individuell unterschiedliche Konfiguration der Verunreinigungen in ihren Eigenschaften fluktuieren. Bei noch stärkerer Streuung wird die Kohärenzlänge der Wellenfunktion kleiner als die Bauelementlänge, wodurch ein Übergang zu diffusivem Transport eingeleitet wird [17], in dem sich im Extremfall das im vorherigen Absatz beschriebene Drift-Diffusionsregime einstellt.

Im streutheoretischen Zugang zum ballistischen Transportproblem, dem Landauer-Büttiker Formalismus [18, 19, 20, 21], geht man davon aus, dass die quantenmechanischen Zustände der Ladungsträger Einteilchen-Streuzustände sind. Der zweite wichtige Bestandteil dieser Theorie ist ein noch zu beschreibender Ansatz für die Besetzung der Streuzustände. Der Landauer-Büttiker Formalismus oder ein ähnlicher Zugang wurde in den Arbeiten [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28] auf Nanotransistoren angewendet. In dieser Arbeit wollen wir zunächst den Landauer-Büttiker Formalismus elementar darstellen. Es soll demonstriert werden, dass es sich hierbei um den einfachst möglichen quantitativen Zugang zum Quantentransportproblem handelt. Dieses ist ein wichtiger Vorteil gegenüber anderen Zugängen, die auf komplexeren theoretischen Konzepten, wie den Nichtgleichgewichts-Greensfunktionen [29, 30, 31], den Wignerfunktionen [32] oder der Mastergleichung [33] beruhen. Des Weiteren werden wir zeigen, wie der Landauer-Büttiker Formalismus konkret auf einen Nanotransistor angewendet werden kann. In einem einfachen Transistormodell [24, 27] wird qualitative Übereinstimmung mit den Kennlinien von Nanotransistoren von INTEL [2] und IBM [3] erzielt. Es ergeben sich als wesentliche Merkmale von ballistischem Quantentransport im ON-state des Transistors gerundete I-V-Kennlinien mit einem schwachen, fast linearen Anstieg für größere Drainspannungen ('quasi-Sättigung'). An Stelle des im Mikrotransistors vorliegenden OFF-states, in dem der Transistor sperrt, ergibt sich im Nanotransistor nur ein quasi-OFF state. Hier führen Tunnelströme über die Source-Drainbarriere zu signifikanten Leckströmen, die zu einer positiven Krümmung der I-V-Kennlinien führen. Letzteres steht im Gegensatz zur negativen Krümmung der I-V-Kennlinien im ON-state. Es treten im quasi-OFF-state darüber hinaus charakteristische resonante Fowler-Nordheim Tunneloszillationen auf.

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Diffusiver Transport im Drift-Diffusionsmodell

Der diffusive Transport in Mikrotransistoren ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt:

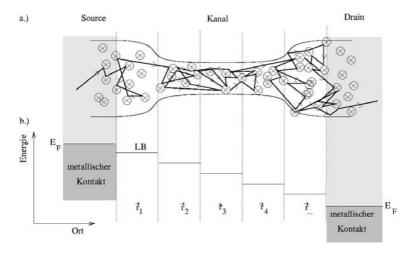


Abb. 1: a) Diffusiver Transport durch einen leitenden Kanal zwischen zwei metallischen Kontakten, Source und Drain. Auf Grund der vielen Streuer (Kreise mit Kreuzen) bewegt sich der Ladungsträger (durchgezogene Linie mit Richtungspfeil) wie ein durch das elektrische Feld getriebener Zufallsgeher auf seinem Weg von Source nach Drain.

b) Einteilung des Gesamtsystems in Zellen bei  $\vec{r}_n$ . In jeder Zelle ist die Lage des Leitungsbandes LB durch das lokale Potenzial definiert, sowie eine zeitabhängige lokale Verteilungsfunktion  $\rho(\vec{r}_n, \vec{k}, t)$  der Ladungsträger im Impulsraum. Auf Grund der vielen Streuprozesse ist diese lokale Verteilungsfunktion nahe an einer Fermifunktion mit einem lokalen elektrochemischen Potenzial.

Bei großen Kanallängen können wir eine mesoskopische Zerlegung des Bauelements in Zellen  $d^3r_n$  bei den Orten  $\vec{r}_n$  annehmen. Diese Zellen sind groß gegen die atomaren Abstände und gegen die Fermiwellenlänge  $2\pi/k_F$ ,

aber klein gegen die typische Länge der Modulation des elektrischen Feldes. Für jede Zelle ist eine Verteilung  $\rho(\vec{r}_n, \vec{k}, t)$  definierbar mit

$$dN(\vec{r}_n, \vec{k}, t) = \rho(\vec{r}_n, \vec{k}, t)d^3r_nd^3k, \tag{1}$$

wobei  $dN(\vec{r_n}, \vec{k}, t)$  die Anzahl der Elektronen im n-ten Teilvolumen  $d^3r_n$  mit Wellenvektoren im Volumenelement  $d^3k$  um  $\vec{k}$  zur Zeit t ist. Die Verteilungsfunktion wird durch die Boltzmanngleichung

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho(\vec{k},\vec{r},t) + \vec{v}(\vec{k})\nabla_{\vec{r}}\rho(\vec{k},\vec{r},t) + \frac{\vec{F}(\vec{r})}{\hbar}\nabla_{\vec{k}}\rho(\vec{k},\vec{r},t) = -\frac{\rho(\vec{r},\vec{k},t) - \rho_0(\vec{r},\vec{k},t)}{\tau} \tag{2}$$

bestimmt [34].  $\vec{F}(\vec{r})$  ist die extern ausgeübte Kraft. Wir haben für die Zelleneinteilung den Kontinuumslimes  $\vec{r}_n \to \vec{r}$  eingeführt und die Streuung in Relaxationszeitnäherung behandelt mit einer Relaxationszeit  $\tau$  und einer lokalen Gleichgewichtsfunktion

$$\rho_0(\vec{r}, \vec{k}, t) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E_{\vec{k}} - \phi(\vec{r}, t)}{k_B T}\right] + 1},\tag{3}$$

 $E_{\vec{k}}=E_L+\hbar^2k^2/(2m^*)$ . Hier nehmen wir an, dass aufgrund der schnellen Stoßvorgänge eine lokale Gleichgewichtsfunktion angestrebt wird, die durch ein zeitabhängiges elektrochemisches Potenzial  $\phi(\vec{r},t)$  bestimmt ist. Die Abweichung der tatsächlichen Verteilungsfunktion von der lokalen Gleichgewichtsfunktion ist nur sehr klein und kann mit einer linearisierten Boltzmanngleichung berechnet werden. Mit Standardmethoden erhält man aus der so gewonnenen Verteilungsfunktion im stationären Limit den üblichen Drift-Diffusionsstrom

$$\vec{J} = e\mu_n n\vec{E} + eD_n \nabla n. \tag{4}$$

Hier ist der erste Summand der Feldstrom und der zweite Summand der Diffusionsstrom.

# 2.2 Ballistischer Quantentransport im Landauer-Büttiker Formalismus

Im ballistischen Quantentransport wird vorausgesetzt, dass das Bauelement so klein ist und die verwendeten Materialien so rein, dass Streuung außerhalb

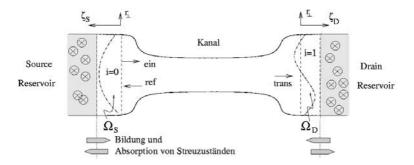


Abb. 2: Ballistischer Quantentransport: Die Ladungsträger werden durch im Kanal kohärente Streuzustände beschrieben. Diese können sich ausbilden, weil im Gegensatz zum diffusiven Limit in Abb. 1 im ballistischen Fall keine Streuung im Kanal stattfindet. In den gestrichelten Übergangsbereichen  $\Omega_S$  und  $\Omega_D$  werden im Teilchenaustausch mit den Kontaktreservoirs Streuzustände gebildet (ein) oder auch reflektierte (ref) und transmittierte (trans) Komponenten der Streuzustände (reflexionslos) absorbiert. Schematisch mit gestrichpunkteter Linie gezeigt: Bildung eines Streuzustandes mit einer einlaufenden Transversalmode i=0 und Absorption einer transmittierten Komponente mit einer Transversalmode i=1 im Drainkontakt. Durch die transmittierte Komponente des Streuzustandes entsteht der quantenmechanische Strom.

der Kontakte vernachlässigbar ist. Im Falle des leitenden Kanals gehen wir dann von der in der nächsten Abbildung dargestellten Situation aus. Die im Folgenden zusammengefasste allgemeine Theorie hierzu ist im Wesentlichen den Refn. [20] und [21] entnommen: Im Elektronenkanal werden die Elektronen durch kohärente Wellenfunktionen beschrieben, welche Lösungen der Schrödinger Gleichung

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \triangle + V(\vec{r}) - E \right] \Psi(\vec{r}) = 0 \tag{5}$$

sind. Hier ist  $V(\vec{r})$  das effektive Einteilchenpotenzial. In den Übergangsbereichen  $\Omega_s$  zwischen dem Elektronenkanal und dem Kontakt s (s=S für den Sourcekontakt, s=D für den Drainkontakt) setzen wir voraus, dass das Potenzial nur von der Transversalkoordinate  $\vec{r}_{\perp}$  abhängt i. e.  $V(\vec{r} \in \Omega_s) = v_s(\vec{r}_{\perp;s})$ . Dann können wir die Eigenfunktionen  $\Psi$  als Streuwellenfunktionen  $\Psi^{\nu}$  wählen. Diese sind definiert durch ihr Verhalten in den Übergangsberei-

chen

$$\Psi^{\nu}(\vec{r} \in \Omega_{s'}, E) = \delta_{s,s'} \exp(-ik_{\nu}\zeta_s) \Phi_{\nu}(\vec{r}_{\perp;s}) 
+ \delta_{s,s'} \sum_{i'} r^{\nu}_{\nu'} \exp(ik_{\nu'}\zeta_{s'}) \Phi_{\nu'}(\vec{r}_{\perp;s'}) 
+ (1 - \delta_{s,s'}) \sum_{i'} t^{\nu}_{\nu'} \exp(ik_{\nu'}\zeta_{s'}) \Phi_{\nu'}(\vec{r}_{\perp;s'}).$$
(6)

Die Transversalmoden  $\Phi_{\nu}$  mit ihren Energien  $E_{\perp}^{\nu}$  sind festgelegt durch das Eigenwertproblem

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \Delta_{\vec{r}_{\perp;s}} + v_s(\vec{r}_{\perp;s}) - E_{\perp}^{\nu} \right] \Phi_{\nu}(\vec{r}_{\perp;s}) = 0 \tag{7}$$

und der longitudinale Wellenvektor entlang der Kanalkoordinate  $\zeta_s$  ist

$$k_{\nu} = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}(E - E_{\perp}^{\nu})}.$$
 (8)

Wir definieren den zusammengesetzten Streukanalindex  $\nu=(s,i)$ , wobei i die Anzahl der Knotenlinien der Transversalmode  $\Phi_{\nu}$  im  $r_{\perp;s}$ -Raum ist. In Gl. (6) stellt der erste Summand auf der rechten Seite den im Streukanal (s,i) einlaufenden Teil des Streuzustandes dar. Diese einzige einlaufende Komponente  $\nu=(s,i)$  legt den Index des Streuzustandes  $\Psi^{\nu}$  fest. Der zweite Summand auf der rechten Seite von Gl. (6) ist der in den Streukanal (s,i') reflektierte Anteil und der dritte Summand ist der in den Streukanal  $(s'\neq s,i')$  transmittierte Anteil des Streuzustandes.

Im Landauer-Büttiker Formalismus folgt die Besetzung  $f_{\nu}$  eines Streuzustandes aus seiner Energie  $E=E_{\nu}=E_{\perp}^{\nu}+\hbar^2/(2m^*)k_{\nu}^2$  und aus dem chemischen Potenzial  $\mu_s$  desjenigen Kontaktes aus dem die einlaufende Komponente des Streuzustandes stammt,

$$f_{\nu} = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_{\nu} - \mu_s}{k_B T}\right) + 1} = f_{\text{FD}}(E_{\nu} - \mu_s).$$
 (9)

Die verwendete Fermiverteilung wird durch die Annahme einer schnellen Relaxation durch Streuprozesse in den Kontakten begründet. Der Strom durch das Bauelement ergibt sich als Differenz eines Stromes  $I_{\rightarrow}$  der vom Sourcekontakt stammenden Streuzustände

$$I_{\rightarrow} = \sum_{\nu} \delta_{s,S} f_{\nu} \langle \nu | I_z | \nu \rangle \tag{10}$$

und eines entsprechenden Gegenstroms  $I_{\leftarrow}$  der aus dem Drainkontakt stammenden Streuzustände. Nach elementarer Auswertung der Erwartungswerte  $\langle \nu | I_z | \nu \rangle$  der  $\zeta$ -Komponente des Stromoperators im Streuzustand  $\nu$  ergibt sich

$$I \equiv I_{\rightarrow} - I_{\leftarrow} = \frac{2e}{h} \int_{-\infty}^{\infty} [f_{\rm FD}(E - \mu_S) - f_{\rm FD}(E - \mu_D)] \tilde{T}(E) dE \quad (11)$$

mit der effektiven Stromtransmissionswahrscheinlichkeit

$$\tilde{T}(E) = \sum_{\nu,\nu'} \Theta(E - E_{\perp}^{\nu}) \Theta(E - E_{\perp}^{\nu'}) \delta_{s,S} \delta_{s',D} \tilde{T}_{\nu\nu'}(E)$$
(12)

und  $\delta_{s,S}\delta_{s',D}\tilde{T}_{\nu\nu'}=\delta_{s,S}\delta_{s',D}k_{\nu'}^{1/2}|t_{\nu'}^{\nu}|^2k_{\nu}^{-1/2}$ , wobei  $\delta_{s,s'}$  der Kronecker Symbol ist.

# 3 Beschreibung von Nano-Feldeffekttransistoren im Landauer-Büttiker Formalismus

#### 3.1 Transistormodell

Referenz [24] folgend betrachten wir einen konventionellen n-Kanal FET, dessen Standardaufbau in Abb. 3 a) schematisch dargestellt ist. In der x-Richtung wird der Transistor als homogen angenommen und seine endliche Breite  $L_x$  in dieser Richtung wird durch die Forderung nach verschwindender Wellenfunktion an den Rändern berücksichtigt,

$$\Psi(x = 0, y, z) = \Psi(x = L_x, y, z) = 0.$$

Für den Verlauf des Potenzials in Transportrichtung (y-Richtung) und in das Halbleiterinnere hinein (z-Richtung) benutzen wir das in Abb. 3 b) dargestellte Modellpotenzial: Im Bereich des Source-Kontakts  $(y \leq y_S)$  und des Drain-Kontakts  $(y \geq y_D)$  nimmt es die in Abb. 4 a) dargestellte Form eines endlichen Potenzialtopfs an. Für den Kanal  $(y_s \leq y \leq y_D)$ , s. Abb. 4 b) verwenden wir ein Dreieckspotenzial,

$$V(z>0) = V_{2D}(z) = \psi_p - \frac{eU_{GS}}{z_W + \frac{\epsilon_{SC}}{\epsilon_L} z_G} (z_W - z)\theta(z - z_W), \quad (13)$$

wobei  $U_{GS}$  das Gatepotenzial bei geerdetem Sourcekontakt ist. Die Parameter dieses Potenzials sind durch selbstkonsistente Rechnungen von Ando [35] motiviert. In den später gezeigten numerischen Rechnungen ist bei der betrachteten Dicke der Isolatorschicht  $z_G$  der Gatetunnelstrom klein.

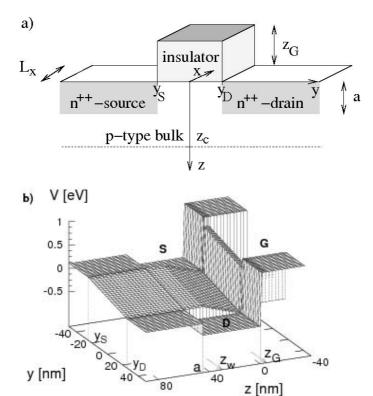
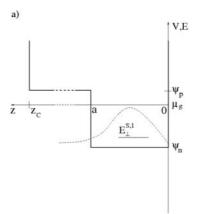


Abb. 3: a) Konventioneller n-Kanal Feldeffekttransistor der Breite  $L_x$ . Der Elektronenkanal bildet sich bei ausreichender Gatespannung an der Trennfläche zwischen dem p-Wirtshalbleiter und dem Isolator, d. h. bei z=0 und  $y_S \leq y \leq y_D$ . Durch den Elektronenkanal entsteht eine leitende Verbindung zwischen dem hoch n-dotierten Kontakten Source und Drain.

b) Zweidimensionales Modellpotenzial in *y*- und *z*-Richtung. Im Elektronenkanal herrscht ein nahezu dreieckiges Einschlusspotenzial (s. Abb. 4b), dem ein nur von *y* abhängiges Source-Drain Potenzial überlagert ist (s. Gl. (14)).



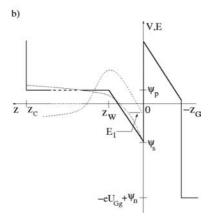


Abb. 4: Schnitt durch das Potenzial bei konstantem y, Darstellung der Energieniveaus und der entsprechenden Wellenfunktionen

a) y im Sourcekontakt ( $y < y_S$ ) oder im Drainkontakt ( $y > y_D$ ),  $E_{\perp}^{S,1}$  ist die Energie der niedrigsten Transversalmode, für die Kanalkoordinaten ergibt sich  $\zeta_S = -(y - y_S)$ , sowie  $\zeta_D = y - y_D$ .

b) y im Kanal.  $E_1$  ist der niedrigste Energieeigenwert der Schrödingergleichung im annähernd dreieckigen Confinementpotenzial (13). In allen gezeigten Rechnungen verwendete Modellparameter:  $a=45~nm,\,z_c=L_z-z_G=195~nm,\,\psi_n=150~meV,\,\psi_p=100~meV,\,\epsilon_{sc}=\epsilon_b=\epsilon=12.5\epsilon_0,\,z_W=30~nm,\,z_G=5~nm,\,V_b=1.0~eV$  (ohne Spannung),  $m^*=0.0655m_0,\,N_D=4.42\times10^{18}cm^{-3}$  in allen Kontakten,  $N_A=10^{15}cm^{-3}$  im Substrat, s. Ref. [27].

Bei einem endlichen Drainpotenzial  $U_{DS}$  wird ein Potenzialterm  $V^{Feld}(y)$  hinzuaddiert, mit  $V^{Feld}(y < y_S) = 0$ ,  $V^{Feld}(y > y_D) = U_{SD}$  und

$$V^{Feld}(y_S \le y \le y_D) = -\frac{eU_{DS}}{y_D - y_S}(y - y_S).$$
(14)

#### 3.2 Numerische Resultate

Wir stellen in Abb. 5 einen Vergleich an zwischen den Kennlinien eines Transistors mit einem relativ langen Kanal von  $L_y = 50 \ nm$  und denjenigen eines Transistors mit einem kurzen Kanal mit  $L_y=10\ nm$ . In der Praxis wird bei einer Kanallänge von 50 nm der Transport sehr stark diffusiv sein, weswegen in diesem Falle ein Vergleich mit experimentellen Kurven nicht möglich ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass an Stelle einer Sättigung des Drainstromes bei beiden Kanallängen eine quasi-Sättigung eintritt, d.h. bei höheren Drainspannungen wächst der Strom schwach aber nahezu linear. Die Quantenmechanismen für die quasi-Sättigung werden in Ref. [27] im Detail diskutiert. Für kleinere Drainspannungen gibt es den bekannten linearen Bereich in der I-V-Linie mit einem starken Stromanstieg, wenn die Gatespannung oberhalb der Schwellspannung liegt, die zur gepunktet dargestellten Schwellwertkennlinie gehört. Im Einsatz vom rechten Teilbild ist zu erkennen, dass bei sehr kurzen Kanälen der Übergang vom linearen Bereich zum quasi-Sättigungsbereich ausgeglättet wird, was zu gerundeten Kennlinien führt. Mit wachsender Kanallänge steigt die effektive Stärke der Source-Drain Potenzialbarriere, was zu einem abrupten Übergang vom linearen Bereich zum quasi-Sättigungsbereich führt (s. Einsatz Abb. 5). Weiterhin wird die Reststeigung im quasi-Sättigungsbereich kleiner.

Bei Verringerung der Gatespannung wechseln die Kennlinien ihre Krümmung (zweite Ableitung des Stroms nach der Spannung) von anfänglich negativen Werten oberhalb der Schwellspannung zu positiven Werten unterhalb der Schwellspannung. Bei der Schwellspannung bildet sich eine nahezu lineare Schwellwertkennlinie heraus. Schwache Oszillationen auf der Schwellwertkennlinie, die hin zu kleineren Gatespannungen wachsen, sind auf resonantes Fowler-Nordheim Tunneln zurückzuführen. In Ref. [27] wird demonstriert, dass der Transistor unterhalb der Schwellspannung als Tunneltransistor arbeitet. Durch den Source-Drain Tunneleffekt im Tunneltransistorregime ist es unmöglich, das Bauelement vollständig zu sperren. Daher bildet sich an

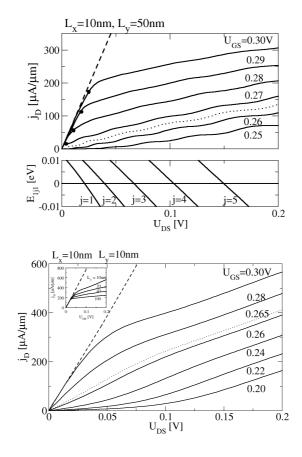


Abb. 5: Berechnete I-V-Kennlinien (Source-Drain-Strom vs. Drainspannung für gegebene Gatespannung), oben für FET mit 50 nm Kanallänge (starke Barriere), unten bei 10 nm Kanallänge (schwache Barriere). Gepunktet ist jeweils die Schwellwertkennlinie dargestellt. Im unteren Diagramm auf der linken Seite wird demonstriert, dass die den Kennlinien überlagerten Oszillationen durch resonantes Fowler-Nordheim Tunneln hervorgerufen werden, s. Ref. [27].

Stelle eines OFF-states ein quasi-OFF-state heraus, der zu den erwähnten positiv gekrümmten Kennlinien führt.

### 4 Experimentelle Ergebnisse

In der folgenden Abb. 6 sind experimentelle Kennlinien von Nanotransistoren dargestellt. Wie in den numerischen Resultaten wird bei kleinen Kanallängen für größere Drainspannungen nur eine quasi-Sättigung erreicht und es treten gerundete Kennlinien auf. Nach unserer Diskussion im vorherigen Kapitel lässt dieser Umstand auf eine schwache Source-Drain Potenzialbarriere schließen (s. Abb. 5, rechts). Wie in den numerischen Kennlinien findet im Bereich größerer Gatespannungen in den experimentellen Kennlinien ein Wechsel in der Krümmung der I-V-Kurven statt. Die entstehende Schwellwertkennlinie ist jeweils von uns gestrichpunktet eingetragen. Die experimentellen Ergebnisse weisen daher auf einen Übergang zum Tunneltransistorregime hin. Die Auflösung der vorhandenen Strukturen in den experimentellen Kennlinien reicht jedoch nicht aus, um resonante Fowler-Nordheim Oszillationen als zwingenden Hinweis auf Quantentransport zu identifizieren.

# 5 Zusammenfassung

Transistoren mit Kanallängen im Mikrometerbereich können im Drift-Diffusionsmodell behandelt werden. Im Gegensatz dazu sind heutzutage Transistoren mit Kanallängen im Bereich von zehn Nanometern herstellbar, in denen Quantentransport stattfindet. Es wird der einfachst mögliche Ansatz zur quantitativen Behandlung von Quantentransport, nämlich der Landauer-Büttiker Formalismus beschrieben und auf nano-Feldeffekttransistoren angewendet. In qualitativer Übereinstimmung mit den Experimenten ergeben sich als wesentliche Merkmale von ballistischem Quantentransport im ONstate des Transistors gerundete Kennlinien mit einem schwachen fast linearen Anstieg ('quasi-Sättigung'). An Stelle eines OFF-states ergibt sich ein quasi-OFF state. Hier führen Tunnelströme über die Source-Drainbarriere zu einer positiven Krümmung der I-V-Kennlinie im Gegensatz zur negativen Krümmung im ON-state. Weiterhin ergeben sich resonante Fowler-Nordheim Oszillationen auf den Kennlinien, die einen eindeutigen Hinweis auf Quantentransport darstellen.

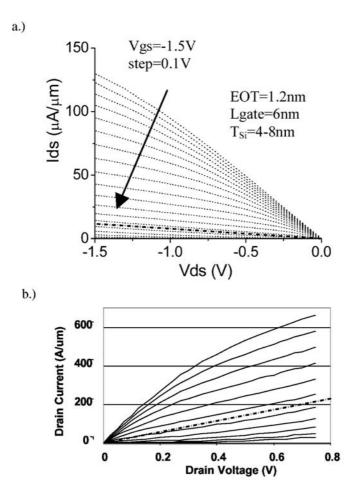


Abb. 6: a) I-V-Kennlinien eines pFETs mit einer Kanallänge von 6 nm nach Ref. [3]: zur Verdeutlichung der gestrichpunktet eingetragenen Schwellwertkennlinie.

b) I-V-Kennlinien eines nFETs mit 10 nm Kanalänge nach Ref. [2] und die gestrichpunktete Schwellwertkennlinie.

#### Literatur

- [1] Semiconductor Industry Association, International Technology Roadmap for Semiconductors; see http://public.itrs.net/.
- [2] B. Doyle, R. Arghavani, D. Barlage, S. Datta, M. Doczy, J. Kavalieros, A. Murty, and R. Chau. *Intel Technology Journal*, 6:42–54, 2002. downloadable at http://www.intel.com/technology/itj/.
- [3] B. Doris, M. Ieong, T. Kanarsky, Y. Zhang, R. Roy, O. Dokumaci, Z. Ren, F-F. Jamin, L. Shi, W. Natzle, H-J. Huang, J. Mezzapelle, A. Mocuta, S. Womack, M. Gribelyuk, E. Jones, R. Miller, H-S. Wong, and W. Haensch. *IEDM Tech. Dig.*, page 267, 2002.
- [4] F. Boeuf, X. Jehl, M. Sanquer, and T. Skotnicki. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 3:105, 2004.
- [5] M. Ieong, B. Doris, J. Kedzierski, K. Rim, and M. Yang. *Science*, 306:2057, 2004.
- [6] R. Martel, T. Schmidt, H. R. Shea, T. Hertel, and Ph. Avouris. *Appl. Phys. Lett.*, 73:2447, 1998.
- [7] J. Appenzeller, J. Knoch, M. Radosavljevi'c, and Ph. Avouris. *Phys. Rev. Lett.*, 92:226802, 2004.
- [8] B. Yu. IEDM Techn. Dig., page 251, 2002.
- [9] Yang-Kyu Choi, K. Asano, N. Lindert, V. Subramanian, Tsu-Jae King, J. Bokor, and C. Hu. *IEEE Electron Device Lett.*, 21:254, 2000.
- [10] I. Shorubalko, H. Q. Xu, P. Omling, and L. Samuelson. *Appl. Phys. Lett.*, 83:2369, 2003.
- [11] S. H. Son, K. H. Cho, S. W. Hwang, K. M. Kim, Y. J. Park, Y. S. Yu, and D. Ahn. *J. Appl. Phys.*, 96:704, 2004.
- [12] P. Chidambaram, C. Bowe, S. Chakravarthi, C. Machala, and R. Wise. *IEEE Trans. Electron Devices*, 53:944, 2006.
- [13] M. Yang, V. Chan, K. Chan, L. Shi, D. Fried, J. Stathis, A. Chou, E. Gu-sev, J. Ott, L. Burns, M. Fischetti, and M. Ieong. *IEEE Trans. Electron Devices*, 53:965, 2006.

- [14] V.K. Khanna. Phys. Rep., 398:67, 2004.
- [15] M. Lundstrom and J. Guo. *Nanoscale Transistors*. Springer, Berlin, 2006.
- [16] L. L. Chang, L. Esaki, and R. Tsu. Appl. Phys. Lett., 24:593, 1974.
- [17] T. Ando, Y. Arakawa, K. Furuya, S. Komiyama, and H. Nakashima (Eds.). *Mesoscopic Physics and Electronics*. Springer, Berlin, 1998.
- [18] R. Landauer. IBM J. Res. Develop., 1:223, 1957.
- [19] M. Büttiker. Phys. Rev. Lett., 57:1761, 1986.
- [20] M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, and S. Pinhas. *Phys. Rev. B*, 31:6207, 1985.
- [21] M. Büttiker. Phys. Rev. B, 46:12485, 1992.
- [22] K. Natori. J. App. Phys., 76:4879, 1994.
- [23] H. Ueneo, M. Tanaka, K. Morikawa, T. Takayashi, and M. Miura-Mattausch. *J. Appl. Phys.*, 91:5361, 2002.
- [24] G. A. Nemnes, U. Wulf, and P. N. Racec. J. Appl. Phys., 96:596, 2004.
- [25] S. E. Laux, A. Kumar, and M. Fischetti. J. Appl. Phys., 95:5545, 2004.
- [26] M. J. Gilbert and D. K. Ferry. J. Appl. Phys., 95:7954, 2004.
- [27] G. A. Nemnes, U. Wulf, and P. N. Racec. J. Appl. Phys., 98:84308, 2005.
- [28] M. DeMichielis, D. Esseni, and F. Driussi. *IEEE Trans. Electron Devices*, 54:115, 2007.
- [29] A. Svizhenko, M. Anatram, T. R. Govindan, B. Biegel, and R. Venugopal. *J. Appl. Phys.*, 91:2343, 2002.
- [30] R. Venugopal, S. Goasguen, S. Datta, and M. S. Lundstrom. *J. Appl. Phys.*, 95:292, 2004.
- [31] J. Wang, E. Polizzi, and M. Lundstrom. J. Appl. Phys., 96:2192, 2004.

- [32] M. D. Croitoru, V. N. Gladilin, V. M. Fomin, J. T. Devreese, W. Magnus, W. Schoenmaker, and B. Sorée. *J. Appl. Phys.*, 93:1230, 2003.
- [33] M. Fischetti, S. E. Laux, and A. Kumar. *IEDM Techn. Dig.*, page 467, 2003.
- [34] W. Hänsch. *The drift diffusion equation and its applications in MOSFET modeling*. Springer, Wien, New York, 1991.
- [35] T. Ando. J. Phys. Soc. Jpn., 51:3893, 1982.

# Nanotechnologie im chemischen und im biotechnischen Labor: Mikrodurchflußreaktoren und Nanolitersegmenttechnik

## 1. Einleitung

Die Nanotechnologie umfaßt ein weites Spektrum von Techniken. Die meisten Methoden lassen sich einer von zwei großen Strategien zuordnen. Wenn die Erzeugung und Handhabung von funktionellen Nanostrukturen im wesentlichen auf Selbstorganisationseffekten beruht oder die lebende Natur als direktes Vorbild wirkt, spricht man von "bottom-up-Strategie". In diesem Fall ergeben sich Struktur und Funktion der Nanosysteme aus dem Zusammenspiel atomarer bzw. molekularer Komponenten. Wenn dagegen bewährte ingenieurtechnische Lösungen in den Nanometerbereich hinab skaliert werden, ist von "top-down-Strategie" die Rede. Die damit verbundenen Techniken leiten sich im wesentlichen vom dem in der Mikroelektronik und in der Mikrosystemtechnik bewährten Technologiekonzept der Planartechnik ab. Sie sind von physikalischen Beschichtungs- und Strukturierungstechniken, namentlich der Dünnschichttechnik und der lithografischen Verfahren geprägt.

In den lithografischen Verfahren wird die Präzision der Formgebung und die Umsetzung eines Designs in ein bestimmtes System durch eine räumliche Zuordnung von Komponenten erreicht, die über eine hohe Genauigkeit der Zuordnung zu einem äußeren Koordinatensystem vermittelt wird. Geometrische Messungen und präzise Manipulation sind Voraussetzung für die Bildung des Nanosystems. Während bei der top-down-Strategie die Formgebung und der direkte Materialschluß von nanostrukturierten Festkörperelementen im Mittelpunkt der Technologien steht, ist für die bottom-up-Strategie die spontane, aber selektive Wechselwirkung von molekularen Komponenten in einer beweglichen Phase – in Analogie zu Zellen zumeist der flüssigen Phase – von ausschlaggebender Bedeutung. Die Entstehung einer gewünschten Systemarchitektur wird nicht durch Bewegung gegenüber einem äußeren Koordinatensystem, sondern durch die Präzision der relativen Zuordnung aufgrund

spontaner Bewegungsprozesse erreicht. Die äußeren Bedingungen der bottom-up-Nanotechnologie rücken deshalb ganz in die Nähe klassischer biochemischer und chemischer Prozesse. Der Schlüssel liegt in der Wohldefiniertheit von lokalen Bedingungen der molekularen Bewegung und chemischen Wechselwirkung. Die Handhabung kleinster Stoffmengen bis herab auf das Niveau kleiner Molekül- und Nanopartikelensembles und von Einzelteilchen ist der Schlüssel für die bottom-up-Nanotechnologie.

Die lokale Einstellung wohldefinierter molekularer Bewegungs- und Reaktionsbedingungen erreicht die Natur durch die zelluläre und subzelluläre Raumorganisation. Dieses Prinzip der Mikrokompartimentierung findet in der Entwicklung mikrostrukturierter Reaktionsräume seine moderne technische Entsprechung. Im Rahmen der Mikroreaktionstechnik werden Reaktionsvolumina und Reaktionsabläufe miniaturisiert. Dabei hat sich eine Entwicklung der Volumina von Laborprozessen vom Liter- und Milliliterbereich bis in den unteren Mikroliter- und den Nanoliterbereich vollzogen. Im chemischen und biologischen Labor ist dadurch eine "Nanolitertechnologie" entstanden, in der zwar im allgemeinen keine Nanometer-Strukturtechnik realisiert wird, mit der aber kleine Stoffmengen und Operationen bis zum Einzelzellniveau und bis zu kleinsten Teilchenensembles prozessiert werden. Diese fluidische "Nanotechnologie" ist mehr als eine Abwärtsskalierung chemischer Reaktoren. Sie ermöglicht die automatisierte Durchführung von Stoffoperationen auf kleinstem Raum. Sie bildet eine Technik, um stoffgebundene Informationen auszulesen und Meßelemente und Aktuatoren als Informationssschnittstellen zwischen stofflicher und digital-elektronischer Information zu integrieren. Schließlich gibt sie den Rahmen für Selbstorganisationsprozesse vor, die für die Assemblierung von Nanopartikeln und Molekülen zu funktionellen Nanoarchitekturen genutzt werden können. Im folgenden werden einige Grundzüge der Mikroreaktions- und Nanolitertechnik für chemische, biochemische und zellbiologische Prozesse diskutiert und Anwendungsbeispiele vorgestellt.

# 2. Mikrodurchflußanordnungen für die Nanomaterial-Synthese

Mikrodurchflußreaktoren übertragen das Prinzip der kontinuierlichen Prozeßführung aus der großmaßstäblichen Technik in den Laborbereich [1]. Mikrotechnisch hergestellte Bauelemente unterstützen dabei Funktionen wie schnellen Wärmetausch und raschen Stoffübergang, beispielsweise mit Hilfe von lithografisch hergestellten Dünnschichtporenmembranen (Abb. 1). In Mikrodurchflußreaktoren können die Vorgänge der Stoffmischung, der Stoff-

und Wärmeübertragung und Grenzflächenprozesse besser als in einem Rührreaktor ("batch-Prozeß") kontrolliert werden. Das kann auch für die Herstellung von Nanopartikeln genutzt werden [2]. Nanoskalige Festkörper sind wegen ihrer besonderen elektronischen und optischen Eigenschaften auf der einen Seite und wegen der Fähigkeit, selektive Wechselwirkungen mit anderen Teilchen einzugehen, auf der anderen Seite auch für die Nanotechnologie von größtem Interesse [3-5]. Metallische Nanopartikel werden vor allem als Komponenten von nanoelektronischen Systemen ("Nano-confinements", "Nanowires"), aber auch als Pigmente und Markierungselemente ("Nanolabels") sowie als selektive Katalysatoren ("Nano-tools") eingesetzt und in zunehmender Breite in Betracht gezogen. Die Eigenschaften der Partikel hängen dabei in starkem Maße von der Zusammensetzung und den Entstehungsbedingungen ab.

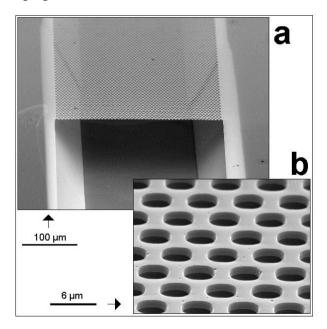


Abb. 1: Beispiel einer mikrofluidischen Grabenstruktur mit freitragender Porenmembran, hergestellt durch Kombination von Photolithografie, reaktivem Ionenätzen, isotropem und anisotropem Naßätzen: a) Graben in Si(100) mit Anschnitt der Separationsmembran, b) Ausschnitt der Porenmembran mit streng regulärer Porengröße (Präparation: IPHT Jena)

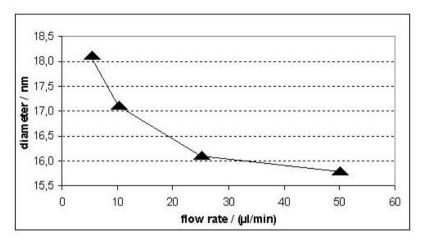


Abb. 2: Beeinflussung des Durchmessers von Nanopartikeln durch die Volumenflußrate bei der Herstellung von kolloidalem Gold durch Reduktion einer Tetrachloroauratlösung mit Ascorbinsäure in einer Mikrodurchflußanordnung mit statischem Mikromischer

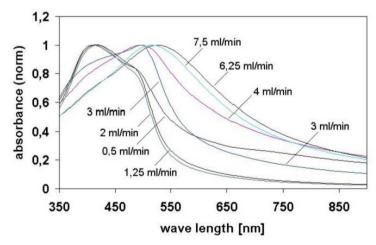


Abb. 3: Einfluß der Volumenflußrate auf die optischen Eigenschaften einer Nanopartikelsuspension: Herstellung von Gold/Silbernanopartikeln in einem zweistufigen Mikrodurchflußprozeß in einem statischen Mehrstufenmikromischer unter Konstanhaltung aller Flußratenverhältnisse (Reduktion von Tetrachloroaurat und Silbernitrat in wässriger Lösung durch Ascorbinsäure)

Es konnte gezeigt werden, daß in Mikrodurchflußanordnungen die Grö-Benverteilung von Nanopartikeln gut gesteuert werden kann und sich auch die Größe selbst innerhalb gewisser Grenzen einstellen läßt [6]. So kann der Durchmesser von Au-Nanopartikeln, die in einer Mikrodurchflußsynthese durch Reduktion von Tetrachloroaurat mit Ascorbinsäure gebildet werden, allein durch die Variation der Flußrate zwischen 5 und 50 L/min von 18.1 über 17 und 16 bis auf 15,8 nm reduziert werden (Abb. 2). Besonders empfindlich läßt sich die Qualität zusammengesetzter Nanopartikel bei Mehrstufensynthesen steuern. Bei der Bildung von Au-Ag-Nanopartikeln in einem Zweistufen-Durchflußverfahren werden die optischen Eigenschaften der kolloidalen Produktlösungen zum einen vom Verhältnis der eingesetzten Metallsalzlösungen, zum anderen aber entscheidend von der Flußrate bestimmt. Auch bei gleichem Metallverhältnis ändert sich die Produktlösung und damit auch das Absorptionsspektrum stark. Ursache sind die veränderten Verweilzeiten zwischen Goldkeimbildung und Silberabscheidung, die zu Unterschieden im Partikelaufbau führen (Abb. 3).

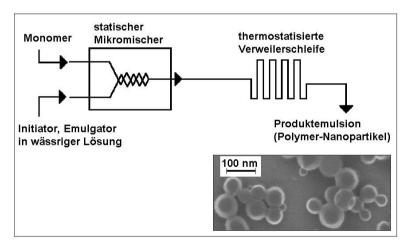


Abb. 4: Experimentelle Anordnung bei der Mikrodurchflußpolymerisation von Styren

Mikrodurchflußsynthesen können auch für die Erzeugung von Polymernanopartikeln eingesetzt werden. Abbildung 4 gibt den schematischen Aufbau einer miniaturisierten Durchflußanordnung für eine kontinuierliche Mikrosynthese wieder. In einem statischen Mikromischer wird aus einer Monomerflüssigkeit (organische Phase) und einer Lösung von Initiator und Emulgator (wässrige Phase) eine Emulsion gebildet. In dieser entstehen in einer nachfol-

genden Verweilerschleife Polymernanopartikel. Die Methode wurde anhand der Bildung von Polystyrenpartikeln (Abb.5) demonstriert [7].

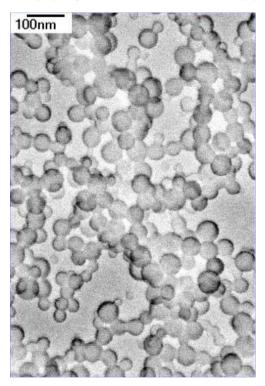


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Polystyrennanopartikeln, erhalten bei der Emulsionspolymerisation in einem Mikrodurchflußsystem unter Einsatz eines statischen Mikromischers

# 3. Mikrofluidsegment-Technik

Während das Innenvolumen von statischen Mikromischern, wie im 2. Abschnitt beschrieben, im unteren Mikroliterbereich liegt, können Reaktionskompartimente für Mikrodurchflußsysteme mit deutliche kleineren Volumina durch die spontane Ausbildung von Mikrofluidsegmenten in flüssig/flüssig-Zweiphasensystemen realisiert werden [8-13]. In Abhängigkeit vom jeweiligen Kanal- oder Kapillardurchmesser liegen die Volumina der Einzelsegmente im Submikroliter-, im Nanoliter- oder im Pikoliterbereich.

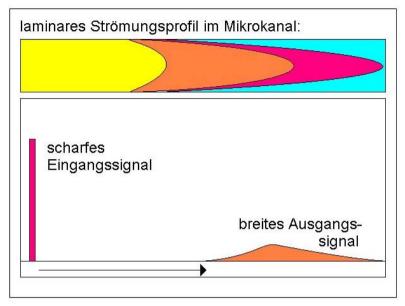


Abb. 6: Fluidische Dispersion in Mikrokanälen; oben: laminare Strömung, unten: Verbreiterung von schmalen Eingangssignalen zu breiten Ausgangssignalen

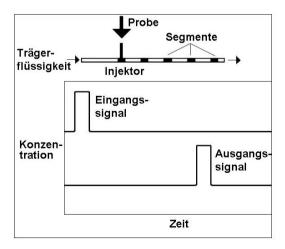


Abb. 7: Prinzip der idealen Pfropfenströmung in flüssig/flüssig Zweiphasensystemen: Segmentbildung in Mikrofluidkanäle

Die Mikrofluidsegmenttechnik ist besonders für die Einstellung konstanter Verweilzeiten interessant. In Mikrokanälen, die von homogenen flüssigen Phasen durchströmt werden, stellt sich im allgemeinen ein laminares Strömungsprofil ein, das eine starke fluidische Dispersion zur Folge hat. Im Ergebnis entsteht eine breite Verweilzeitverteilung (Abb. 6). Das ist für zeitkritische chemische Prozesse häufig nachteilhaft. Im Gegensatz dazu liegt bei strömenden Mikrofluidsegmenten eine ideale Pfropfenströmung vor. Die Verweilzeiten aller Teilchen sind praktisch identisch (Abb. 7). Damit ist eine sehr gute Voraussetzung für die Einstellung einer hohen Einheitlichkeit in der Produktverteilung gegeben.

Mikrofluidsegmente sind wegen der Pfropfenströmung auch besonders gut für serielle chemische oder biologische Prozesse einsetzbar [14-16]. Größere Serien von Proben können in kurzem Abstand nacheinander in Mikrofluidsystemen prozessiert werden, wenn eine Pfropfenströmung vorliegt und ein Übersprechverhalten, d.h. eine Übertragung von Material aus einer Probe in eine nachfolgende mittels einer inerten Trägerphase ausgeschlossen werden kann. Dadurch können Nanoliter-Experimentserien mit Konzentrationsabstufungen, z.B. im Rahmen von mikrokombinatorischen Synthesen, bei kinetischen Untersuchungen, für das Katalysatorscreening aber auch bei analytischen Untersuchungen und für toxikologische und zellbiologische Screenings durchgeführt werden.

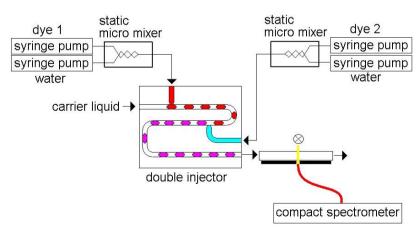


Abb. 8: Experimentelle Anordnung für die Erzeugung konzentrationsabgestufter Segmentzusammensetzungen im Nanoliterbereich (Modellexperiment mit Farbstofflösungen)

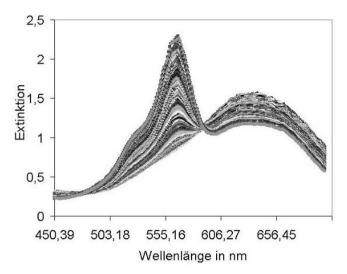


Abb. 9: Serie von UV/VIS-Spektren erhalten durch mikrospektralphotometrische Messung in einer Serie von bewegten Nanoliterfluidsegmenten mit abgestufter Konzentration der Inhaltsstoffe

Die Einstellung von Konzentrationsabstufungen kann mit Hilfe von Doppelinjektoren durchgeführt werden, indem in bereits vorgebildete Segmente unterschiedliche Mengen von einer zweiten Stammlösungen hinzudosiert werden. Abbildung 8 zeigt eine mikroreaktionstechnische Anordnung für die Erzeugung von konzentrationsabgestuften Segmentserien im Nanoliterbereich. Zwei Ausgangsmaterialien (im Modellversuch Farbstoff 1 und Farbstoff 2) werden in zwei statischen Mikromischern mit Lösungsmittel (Wasser) vorgemischt. Innerhalb einer Versuchsserie wird die Gesamtflußrate an beiden Eingangskanälen konstant gehalten, indem die Flußrate für das Lösungsmittel und die Flußrate für die zu dosierende Substanz komplementär zueinander eingestellt werden. Die Einstellung erfolgt über PC-gesteuerte Spritzenpumpen. Die konstanten Gesamflußraten gewährleisten, daß trotz veränderter Konzentrationen an den Mikroinjektoren gleichbleibende Bedingungen für die Segmentbildung und die Zudosierung herrschen und Segmente konstant bleibenden Volumens gebildet werden. Die Größe, der Abstand und die Zusammensetzung der Segmente kann durch ein nachgeschaltetes Mikrodurchflußphotometer oder eine an ein Kompaktspektralphotometer angeschlossene Mikrodurchflußmeßzelle verfolgt werden. Dank Aufnahmezeiten, die im Zehntelsekundenbereich liegen können, ist es möglich, auch bei relativ hoher Segmentfrequenz photometrische Daten oder komplette Spektren von allen Segmenten zu gewinnen. Abbildung 9 zeigt eine größere Serie

von Spektren, die bei Konzentrationsabstufungen in einer Serie von Segmenten aufgenommen worden sind. Die Zweiwellenlängen-Messung belegt eine relativ gute Qualität in der Einstellung der Konzentrationen. Bei Zudosierung von zwei Farbstoffen in unterschiedlichen Konzentrationen und entgegengesetzter Konzentrationsänderung wird erwartungsgemäß ein monotoner Anstieg im Absorptionsmaximum des einen und ein monotoner Abfall im Absorptionsmaximum des zweiten Farbstoffes beobachtet (Abb. 10). Das Volumen der vermessenen Einzelsegmente liegt dabei im Bereich von etwa 200 nl.

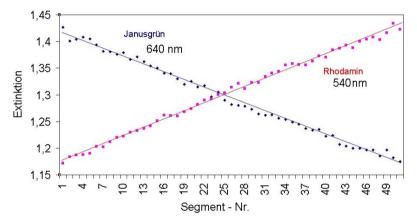


Abb. 10: Schrittweise Änderung der Extinktion von Nanoliterfluidsegmenten entsprechend der abgestuft injiziierten Ausgangslösungen

Die Reproduzierbarkeit in der Einstellung von Segmentgröße und Segmentabstand kann mit Hilfe von Durchflußphotometern gut überprüft und im Sinne eines Prozeßmonitorings kontinuierlich erfaßt werden. Bei Abtastraten von bis zu 5 kHz sind dabei auch bei Probenfrequenzen von mehreren hundert Probesegmenten pro Minute Genauigkeiten besser als 1% erreichbar. Die Qualität von Segmentpopulationen kann dabei sehr gut anhand von Größen-Abstands-Diagrammen erfaßt werden. Abbildung 11a zeigt ein Beispiel für eine Segmentpopulation mit vergleichsweise geringer Schwankung in Größe und Abstand der Segmente. Unter ungünstigen Bedingungen können größere Abweichungen auftreten (Abb. 11b). Namentlich in Fluidnetzwerken, in denen unterschiedliche Segmentströme vereingt werden und in denen es auch zur Teilung oder zum Verschmelzen von Segmenten kommen kann, treten häufig komplexe Populationen von Segmenten auf. Ein Beispiel von einer Verteilung von Segmenten zu Subpopulationen im Größen-Abstands-Dia-

gramm bei einer Segmentserie, die in einer Doppelinjektoranordnung erhalten wurde, zeigt Abbildung 11c.

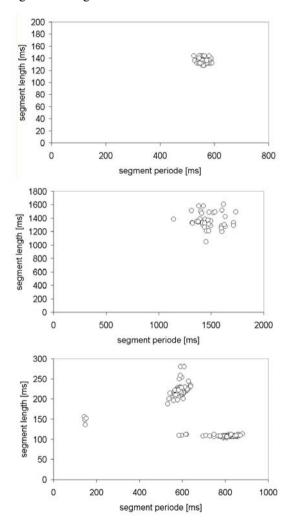


Abb. 11: Charakterisierung von mikrofluidischen Segmentpopulationen nach Segmentlänge (gemessen in ms Passagezeit am Sensor) und Segmentperiode (Abstand + Länge): a) Poulation mit relativ enger Größe- und Abstandsverteilung, b) Population mit breiterer Segmentgrößen- und abstandsverteilung, c) Bildung von Teilpopulationen mit unterschiedlicher Verteilungscharakteristik von Segmentgrößen und -abständen

## 4. Nanoliterfluidsegmente im biologischen Screening

Eine Aliquotierung von Flüssigkeiten im Submikroliterbereich ist von großem Interesse für miniaturisierte biologische Screenings. Bei einem Ausgangsvolumen von nur einem Milliliter werden bei einem Segmentsvolumen von 100 nl 10 000 Probenvolumina erhalten. Eine solche Unterteilung findet, z.B. bei der Suche nach neuen unbekannten Mikroorganismen Anwendung. Bei der Kultivierung von Zellen aus komplexen Gemischen besteht das Problem, daß schnell wachsende Keime langsamer wachsende überwachsen. Durch eine konsequente Trennung der Kulturräume ist die Erzeugung von separaten Mikroorganismenklonen möglich. Voraussetzung dafür ist eine Aliquotierung, die dafür sorgt, daß sich in einem wesentlichen Teil der Segmente genau eine Zelle befindet. Gelingt das, so können auch langsam wachsende Keime kultiviert und somit einer nachfolgenden Analyse und Tests unterzogen werden. Man erhofft sich, auf diese Weise Zugang zu Mikroorganismen mit neuen, bisher unbekannten Syntheseleistungen zu erhalten, um neue Wirkstoffe, etwa für Arzneimittel, zu gewinnen [17].

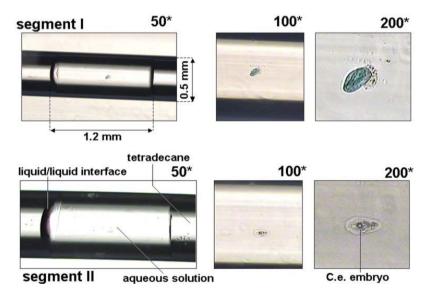


Abb. 12: Einführung multizellulärer Systeme in Mikrofluidsegmente: Embryonen von C. elegans in einem wässrigen Kultursegment, eingebettet in eine Trägerphase von Tetradekan

Serien von gleichartigen Klonen in Mikrofluidsegmenten lassen sich auch für toxikologische und pharmazeutische Screenings einsetzen. Dabei können neben Mikroorganismen auch humane Zellkulturen verwendet werden. Die Einstellung von Konzentrationsabstufungen potentieller Schadstoffe oder Wirkstoffe ist für die Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Kurven wichtig. Mikrosegmentierte Flüsse sind auch interessant für die Ermittlung von Kombinationswirkungen, da sich mit diesem Prinzip größere Zahlen von Wirkstoffkombinationen einstellen lassen.

Neben dem Einsatz von Mikroorganismen- und Zellkulturen ist für Screenings auch die Bestimmung des Einflusses von Wirkstoffen auch Differenzierungsprozesse in Zellverbänden und während der Embryonalentwicklung interessant. Es konnte anhand des Fadenwurms C. elegans gezeigt werden, daß auch Eier in Nanoliter-Fluidsegmente eingeschleust werden können (Abb. 12) und eine Embryonalentwicklung in den Segmenten stattfinden kann [18].

Zukünftige Studien sind darauf ausgerichtet, das Potential der Mikrofluidsegmenttechnik auch für die Beurteilung von Umweltsschadstoffen zu erschließen. Neben der Beurteilung von chemischen Einflussfaktoren auf die Vermehrung von Einzellern und die Entwicklung von Mehrzeller, könnten Mikrofluidsegmente auch eine interessante Option für die Untersuchung von Interaktionen zwischen einzelnen Zellen im Sinne "mikroökologischer" Screenings werden. In Mikrofluidsegmentserien ließen sich zahlreiche Zellkombinationen bzw. Zell-Wirkstoffkombinationen einstellen und testen.

#### 5. Mikrofluidik als Schnittstelle zur molekularen Information

Mikro- und nanofluidische Systeme können Hilfsmittel zur Übertragung stoffgebundener Information in elektronische Information darstellen. Durch die Kompartimentierung von Reaktionsräumen ist eine separate chemische, aber auch sensorische Adressierung von Teilvolumina möglich. Speziell in zweidimensionalen Trägern wie den Mikro- und Nanotiterplatten und in eindimensionalen Anordnungen wie den mikrosegmentierten Flüssen können komplex zusammengesetzte Analyte – etwa auch Zellinhalte – aliquotiert und separat untersucht werden.

Die für die DNA-Technik gut eingeführte PCR-Technik zur selektiven Verstärkung von Sequenzabschnitten kann in Nanolitersegmenten angewendet werden [19, 20]. Damit ist es möglich, Serien von DNA-Abschnitten in einem seriellen Verfahren chemisch zu verstärken und anschließend Molekulargewichte zu bestimmen oder auf die Ausgangskonzentration der einzelnen

Sequenzen zurückzuschließen. Mikro- und nanofluidische Techniken werden inzwischen auch für die Auslesung von Sequenzinformationen mit Hilfe von DNA-Chips eingesetzt.

Mit der PCR vergleichbare chemische Techniken zur molekularen Amplifikation und Sequenzierung stehen leider bisher nicht für Proteine oder synthetische Sequenzmoleküle wie z.B. Copolymere, Terpolymere usw. zur Verfügung. Prinzipiell besitzen aber auch synthetische Makromoleküle ein hohes Informationsspeicherungspotential, das mit Hilfe nanofluidischer Techniken erschlossen werden könnte. Hier besteht eine große Herausforderung für die moderne Polymer- und Katalyseforschung.

Die Umsetzung von elektronisch gespeicherten Designdaten in Moleküle oder die Übertragung elektronisch gespeicherter Zeichenketten in molekular codierte Informationen ist eine weitere Herausforderung künftiger Entwicklungen. Neben der erforderlichen Kontrolle von Reaktionsbedingungen und dem Einsatz geeigneter Katalysatoren dürfte das automatisierte Handling von Probenströmen eine der wichtigsten Komponenten für eine zukünftige chemische Informationsverarbeitung sein. Hierbei wird die gute Manipulierbarkeit von Nano- und Pikofluidsegmenten in Mikrokanälen aller Voraussicht nach eine wichtige Rolle spielen. Dazu sind automatisierbare Prozesse der Erzeugung von kleinsten Fluidsegmenten, aber auch des kontrollierten Transportes, des Stoppens, der Vereinigung mit anderen Fluidsegmenten und der Aufspaltung erforderlich. Dazu wird es eine Entwicklung nanofluidischer Netzwerke mit integrierten Transducern für gesteuerte und geregelte fluidische Prozeßführungen geben.

# 6. Ultraminiaturisierung: Von der Nanolitertechnik zur Fluidik im Nanometerbereich

Ein Volumen von einem Nanoliter entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 100  $\mu$ m. Nanolitertechnologie ist bezüglich des Volumens also weit von Nanometertechnologie entfernt. Es gibt in den letzten Jahren jedoch zunehmend Untersuchungen zum Verhalten von Flüssigkeiten in weitaus kleineren Reaktionsräumen und zum Verhalten gegenüber Strukturen und Begrenzungen im Nanometerbereich.

Theoretische Überlegungen zeigen, daß selbst in molekularen Nanoröhren, wie etwa in Kohlenstoff-Nanotubes, mit einem Fluidtransport zu rechnen ist. Jüngste Untersuchungen demonstrieren die Ausbreitung einer Diffusionsfront in Kanälen mit Durchmessern im Submikrometerbereich. Durch zeitli-

che Kontrolle des Diffusionsprozesses läßt sich dabei die Belegung von Oberflächen im Inneren von Kanälen durch Moleküle der flüssigen Phase steuern [21].

Beim Durchströmen von Flüssigkeiten durch Kanäle mit Nanometerabmessungen sind die Moleküldurchmesser nicht mehr gegenüber der Kanalweite vernachlässigbar. Neben den aus der klassischen Fluidik bekannten Effekten des nicht-Newtonschen Fließverhaltens, wie sie bei Polymerlösungen, Suspensionen und Emulsionen auftreten, werden im Nanometerbereich aufgrund spezifischer Wandkontakte, durch Orientierungsvorgänge und Ordnungprozesse aufgrund der enormen Scherkräfte Abweichungen auch bei kleinen Nanopartikeln und kleinen Molekülen erwartet.

Besondere Effekte sind auch für den Transport größerer Moleküle in Nanometerkanälen zu erwarten. So konnte bereits für Lösungen von DNA gezeigt werden, daß die kettenförmigen Moleküle sich beim Durchströmen von Nanokanälen nicht nur ausrichten, sondern auch stark strecken [21].

In den vergangen Jahren wurden unterschiedliche technologische Zugänge zur Herstellung von Nanokanälen realisiert. Wie bei Mikrokanälen können auch Nanokanäle durch Substratbonden von nanolithografisch bearbeiteten Wafern erhalten werden. Alternative Techniken nutzen spezielle Effekte im Nanometerbereich aus. So konnten Nanokanäle aus mäßig beweglichem Polymermaterial, die durch lithografische Nanostrukturierung auf planaren Substraten vorgeformt worden waren, allein durch eine oberflächenspannungsinduzierte Deformation von Seitenwänden verschlossen werden [22]. Senkrecht zur Waferoberfläche verlaufende Kanäle in dichter Anordnung können z.B. durch anodisches Tiefenätzen einer primär durch Ionenstrahllithografie erzeugten Array-Struktur in Aluminium erhalten werden [23.]

Besonderes Interesse verdienen im Submikrometer- und im Nanometerbereich wiederum die flüssigen Mehrphasensysteme. Flüssigkeiten, die in andere, nicht miteinander mischbare, Flüssigkeiten eingebettet sind, bilden umso stabilere Phasen, je kleiner sie sind. Oberflächenladungen oder in der Grenzfläche angereicherte Tensidmoleküle tragen mit abnehmendem Volumen-zu-Oberfläche-Verhältnis immer effizienter zur Stabilisierung der kleinen flüssigen Phasen bei. Die flüssigen Nanophasen können durch einen kritischen Grenzflächendruck  $p_c$  beschrieben werden, der dem Verhältnis der Grenzflächenspannung  $\Phi$  zwischen innerer und äußerer flüssiger Phase und der Partikelgröße entspricht, die am besten durch einen Längenparameter l beschrieben wird, der dem Verhältnis von Volumen V zu Oberfläche A entspricht:

154 J. Michael Köhler

$$p_c = \Phi / l = \Phi * A/V$$
 (1)

Während ein Tropfen oder Segment von 1  $\mu$ l bei einer Grenzflächenspannung von 40 mN/m einen kritischen Grenzflächendruck von lediglich ca. 40 Pa (0,0004 atm) aufweist, steigt dieser Druck bei einem Mikrotröpfchen von 1:m Größe auf etwa 40 000 Pa, d.h. 0,4 atm an. Bei Nanotröpfchen mit einem Durchmesser von 25 nm liegt der Grenzflächendruck in der Größenordnung von 1 MPa, d.h. ca. 10 atm.

In homogenen Phasen steigt bei gleichbleibender Volumenflußrate der strömungsbedingte Druckabfall mit abnehmendem Kanaldurchmesser stark an  $\Delta p \sim 1/r^4$ ). In den Proportionalitätsfaktor geht die Viskosität des Fluides ein. Für mittel- und höherviskose Fluide, die bei flüssig/flüssig-Zweiphasenströmungen in eine niedrigviskose Trägerflüssigkeit eingebettet sind, spielt die eigene Viskosität keine Rolle. Niedrigviskose Trägerflüssigkeiten wirken auf die Segmente der höheren Flüssigkeit wie ein Schmiermittel, so daß diese auch in engen Kanälen mit vergleichsweise geringem Druckabfall transportiert werden können. Besonders interessant könnte in Zukunft der Einsatz von druckverflüssigten Gasen (wie z.B. Propan, Äthan, Methan, Edelgase) als inerte Trägerphasen für die Manipulation von Nanotröpfchen in nanosegmentierten Flüssen werden.

Die Verwendung von flüssig/flüssig-Zwei- und Mehrphasensystemen wird vor allem für die Anwendung nanofluidischer Netze Bedeutung erlangen. Es ist zu erwarten, daß in den kommenden Jahren Bauelemente und Systeme entstehen, mit denen Serien von mikro- und nanofluidischen Segmenten nicht nur generiert, sondern auch manipuliert, systematisch geteilt und verschmolzen werden können. Solche Fluidoperationen könnten den Weg für hochintegrierte und automatisierte Systeme frei machen, in denen fluidische, molekulare und elektronische Prozesse zusammengeführt und ähnlich wie in Organismen komplexe Reaktionsnetzwerke und komplexe Informationsnetzwerke integriert sind.

## **Danksagung**

Für zahlreiche Diskussionen zur Realisierung und Anwendung mikrosegmentierter Flüsse und experimentelle Unterstützung danke ich Th. Henkel (Jena), F. Jahn (Jena), K. Martin (Jena), M. Roth (Jena), J. Metze (Heiligenstadt), S. Schneider (Ilmenau), F. Möller (Ilmenau), A. Groß (Ilmenau), J. Wagner (Ilmenau), A. Brösing, M. Günther, M. Held und M. Ogrisek (Ilmenau). Für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Projektes

Serizell danke ich dem BMBF und dem Projektträger VDI/VDE Berlin sowie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

### Literatur

- [1] W. Ehrfeld, V. Hessel, H. Löwe; Microreactors (Wiley VCH 2000)
- [2] R. Schenk, M. Donnet; V. Hessel, Ch. Hofmann, N. Jongen, H. Löwe; IMRET 5, (2001), 489
- [3] A. Henglein; Chem. Rev. 89 (1989), 1861
- [4] S. Mann, H. Cölfen; Angew. Chem. 115 (2003), 2452
- [5] C. M. Niemeyer, D. Blohm; Angew. Chem. 111 (1999), 3039
- [6] J. Wagner, J. M. Köhler; Nano Letters 5 (2005), 685
- [7] P. M. Günther, J. Wagner, G. A. Groß, J. M. Köhler; 9th Internatl. Conf. On Miniaturized Systems -TAS (Boston, October 9-13, 2005), 918-920
- [8] J. R. Burns and C. Ramshaw; Lab on a Chip 1 (2001), 10
- [9] T. Nisisako, T. Torii and T. Higuchi; Lab on a Chip 2 (2002), 19
- [10]I. Shestopalov, J.D. Tice, R. F. Ismagilov; Lab Chip, 4 (2004), 316
- [11]B. Zheng, J. D. Tice and R. F. Ismagilov; Anal. Chem., 76 (2004), 4977
- [12]J. M. Köhler, Th. Henkel, A. Grodrian, Th. Kirner, M. Roth, K. Martin and J. Metze; Chem. Engn. J. 101 (2004), 201
- [13]T. Henkel, T. Bermig, M. Kielpinski, A. Grodrian, J. Metze and J. M. Köhler; Chemical Engineering Journal, 101 (2004), 439-445.
- [14]H. Song, H., J. D. Tice, R.F. Ismagilov; Angew. Chem. 115 (2003), 792
- [15]A. Grodrian, J. Metze, T. Henkel, K. Martin, M. Roth and J. M. Köhler; Biosensors & Bioelectronics 19 (2004), 1421
- [16]P. M. Günther, F. Möller, T. Henkel, J. M. Köhler, G. A. Groß; Chem. Eng. Technol., 28 (2005), 520
- [17]K. Martin, T. Henkel, V. Baier, A. Grodrian, T. Schön, M. Roth, J. M. Köhler and J. Metze; Lab on a Chip 3 (2003), 202
- [18]A. Brösing, J. M. Köhler, Proc. BMT 2005 (Nürnberg 14.-17.9.2005); Biomedizinische Technik 50, Suppl. 1 (2005), 195-196
- [19]J. M. Köhler, U. Dillner, A. Mokansky, S. Poser and T. Schulz; Proc. 2nd Internat. Conf. on Microreaction Technology (New Orleans). 2 (1998), 241
- [20]M. Curcio and J. Roeraade; Anal. Chem. 75(2003), 1
- [21]R. Karnik, K. Castelino, Ch. Duan and A. Majumdar; Nanoletters 6 (2006), 1735.
- [22] J. L. Pearson, D.R.S. Cumming; J. Vac. Sci. Technol. B 23 (2005), 2793.
- [23]N. W. Liu, A. Datta, C.Y. Liu and Y. L. Wang; Appl. Phys. Lett. 82 (2003), 1281

Achim Weber, Carmen Gruber-Traub, Marc Herold, Kirsten Borchers, Günter E. M. Tovar and Herwig Brunner

# Biomimesis by Nanoparticles: Concept, Design and Applications in Biotechnology and Biomedicine

Communication of living systems is done by molecular recognition. This central principle of the living world is performed at the contact sites of different objects such as single macromolecules or highly complex supramolecular assemblies as which living cells may be described. Molecular recognition capabilities can be evoked at artificial materials. Thus biomimetic materials are created which are excellently suited to communicate with the living world. When the material is scaled down to nanoscopic dimensions, insoluble solids are prepared to be efficiently contacted with biological systems, easiest by dispersing nanoparticles in a liquid. This is enabled by the NANOCYTES<sup>TM</sup>-technology of the Fraunhofer IGB.

The biomimetic nanoparticles described here, possess such molecularly recognizing properties. For this purpose they carry molecularly defined binding sites at their surface. These binding sites are either composed from biologically derived macromolecules or fully synthetic receptors. When biological building blocks shall be used for their outstanding specificity, they have to be conjugated with a synthetic carrier. These carriers have to be carefully prepared by fine-tuning their surface properties. Core-shell nanoparticles are particularly suited for this purpose, e.g. to immobilise a specific protein or a protein complex at their shell surface. The demanding task for the preparative work before conjugating the biological active agent, e.g. a receptor or agonist, is to render the artificial carrier compatible for the close contact to the biological substance without denaturing the complex structure of the biomolecule. Biomacromolecules are often surrounded by a specific supramolecular environment in their natural state. This must be mimicked by the artificial surface. Also, the binding site of the macromolecule is always located at a specific steric region of the molecule. Thus a three-dimensionally defined anchoring system must be introduced to the carrier. Most elegantly, the 158 A. Weber et al.

core material is surrounded by a soft organic shell. This shell enables for the binding of the biomacromolecule and ensures its native state. Resulting are core-shell particles to which the macromolecules are conjugated and which then possess hybrid properties of the central artificial substances and the surrounding biological macromolecules (Figure 1).

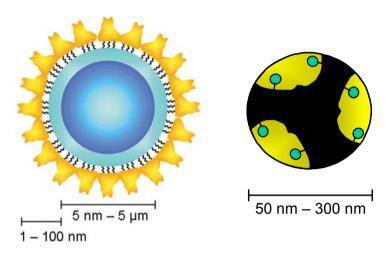


Fig. 1: Scheme of core-shell nanoparticles for molecular recognition applications. The shell consists of a supramolecular organic arrangement which either (a) ensures the steric directivity of attached biologically derived receptors and their bioactivity or (b) forms entirely synthetic molecular binding sites. The chemical design and typical applications for both concepts of biomimetic nanoparticles are described throughout the article. The core inside the particles can contain specific physical properties such as a magnetic moment or fluorescent activity.

Entirely synthetic molecularly recognising nanoparticles can also be prepared by chemical nanotechnology. A cooperative chemical reaction evokes the formation of specific molecular binding sites at the surface of copolymer nanoparticles. This reaction, although complex, is run in a single reaction chamber and in a single step chemical process. The trick in this procedure is, that nanoscopic monomer emulsions are prepared that are "imprinted" by molecular templates during their polymerisation to copolymer nanospheres. Negatives of the shape and the chemical composition of these templates are thus formed at the surface of the resulting monolithic beads. Chemical interaction between the template and the resulting synthetic receptor is composed of cooperative weak interactions, e.g. H-bonds, van-der-Waals forces and electrostatic forces. Highly specific binding sites can be created for a huge variety of

different compounds ranging from low molecular weight compounds to biomacromolecules. The composition of the copolymer is chosen such that complementary chemical groups can arrange themselves sterically ideally to form the binding sites. A straightforward application is to use the synthetic receptors as specific absorbers e.g. to remove of toxins or contraries from mixtures which may even be of complex nature. Other applications range from specific chromatography or membrane processes to diagnostic purposes and will be highlighted later in this paper.

A general advantage of small particles is their high specific surface area — with a very small mass of nanoparticles, large surfaces can be provided for specific interaction with their corresponding binding partners. Therefore nanoparticles are also used for surface functionalisation of larger two-dimensional surfaces by depositing nanoparticle layers. The surface area of the original planar device is thereby enhanced by the resulting three-dimensional arrangement of nanoparticles. Furthermore, by using biomimetic core-shell nanoparticles for surface functionalisation, the molecularly defined surfaces of the nanoparticles constitute the contact area of the resulting modified biochip surface. The nanoparticle layers can be deposited in a micro-structured way by a large variety of different lithographic or printing techniques.

The present article will highlight the design and application of biomimetic nanoparticles based on the structural concepts described above.

# Core-shell nanoparticles enable new drug concepts

Future drugs will be increasingly based on proteins as the active agent. If a protein is soluble, applications might be straightforwardly based on administering them in a liquid. However, in multicellular organisms, receptor ligands are often presented at the surface of cells. Such cell membrane-bound ligands bind highly specific to their corresponding interaction partners, based on molecular recognition processes. The protein tumor necrosis factor (TNF) is mirrored by cell surface membrane receptor proteins [1]. TNF is a cytokine and capable of inducing apoptosis – the programmed cell death. This capability makes it a promising and highly attractive candidate for new strategies in cancer therapy or pathway studies in cells. In the past, studies directed towards new TNF-based cancer therapies have been performed with the soluble cytokine (sTNF). However, typical for the members of the TNF ligand family, TNF is a transmembrane protein (mTNF) and initially expressed at the cell membrane. From this membrane-bound protein sTNF is subsequently derived by an enzyme process. Both mTNF and sTNF bind to two different cell

membrane receptors, termed TNF-R1 and TNF-R2. Whereas TNF-R1 is ubiquitously expressed in all tissues, TNF-R2 is highly regulated in expression and mainly found in immune cells and endothelial cells but also in neuronal tissue. The two TNF forms possess differential capabilities for the induction of larger signalling complexes. Whereas sTNF binding enforces receptor trimerization only, cell-associated mTNF might subsequently cause the formation of larger complexes by induction of capping of the membrane-bound ligand molecules and the receptors at the respective interacting cellular sites. In light of these data, it is very likely that the physiological role of TNFR2 is largely underestimated, simply because sTNF has been used in by far the most studies. Accordingly, there is a need for a mTNF-adequate stimulus that can be easily applied in experimental systems in vitro but also in animal model systems in vivo. To overcome the lack of an appropriate mTNF-like stimulating reagent, we have constructed core-shell particles covalently coupled with mutated functional TNF derivatives, forming bioactive homotrimers at the particle surface. These novel particles are able to initiate mTNF-resembling cellular responses - the action of membrane-bound TNF was successfully mimicked by the biomimetic nanoparticles. Moreover, these tools can be used for selective and spatially restricted activation of either of the two TNF receptors and allows live imaging of receptor proximal events and apoptosis events. Future areas of application for similar but biodegradable (nano)particles might include the *in vivo* usage of particles carrying more than a single effector or targeting protein for therapeutic treatment.

## Tailoring of biomimetic core-shell nanoparticles

Core-shell nanoparticles are composite materials which are composed of at least two different components. In the examples highlighted in this article, the shells consist of organic substances and provide supramolecular arrangements for the interaction with organic molecules. The core may be composed from organic matter but also from metals, metal oxides or rather ceramic materials. A widespread approach for core preparation consists in synthesising spherical silica nanoparticles. They are often prepared from organosilanes via sol-gel chemistry [3] and their diameter can be freely chosen in the range between 10 nm and 10  $\mu$ m. Such particles dispose surfaces that are densely covered by silanol groups. Organic shells of silica cores can be tailored by the use of organofunctional silanes (Figure 2) [4].

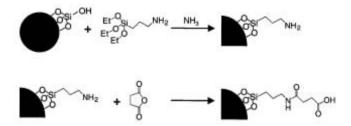


Fig. 2: Reaction scheme of the organo-chemical functionalization of the particle surface: upper: silanization of the silica surface covered by silanol groups with aminopropyltriethoxysilane (APS), which results in an amino-functionalized surface of the nanoparticles. lower: Further reaction of the amine functions with succinic anhydride by a ring opening linker elongation to receive a carboxyl-functionalized surface of the nanoparticles [4].

The shape and composition of the particles is characterised by various independent analytical methods and enables to monitor and fine-tune precisely the preparative steps used to tailor core-shell nanoparticles. E.g. the change in surface properties of the particles upon a second surface reaction using the organic modifier succinic anhydride is monitored by zeta-potential measurements as a function of the pH to decide on a useful pH regime for successive bioconjugation reactions. In a next reaction step proteins are bound to the particle shell. To bind specific proteins, often an intermediate protein shell is bound first, e.g. composed of the protein streptavidin. This protein is a prominent molecular building block with an extremely high affinity to the low molecular weigh compound biotin. Biotin, on the other hand, is then introduced to the protein to be immobilised to the shell by a biotinylation reaction. Biotin serves then as an anchor to conjugate the protein to the streptavidin shell. This procedure is one way to control the orientation of the protein as well as enhancing the protein compatibility of the shell. The resulting protein modified core-shell nanoparticles can be directly used in a vast variety of applications in biotechnology and protein analytics. Due to their high specific binding capacity and their colloidal stability they are entirely compatible with liquid handling systems, e.g., in (ultra)high-throughput screening techniques. They can be used as solid carrier systems of protein receptors to capture analytes from biological samples and present them for further analysis using powerful read-out techniques such as fluorescence spectroscopy or MALDI mass spectrometry [5].

162 A. Weber et al.

## Shell preparation in a single step – surfmer technology

An elegant way to prepare the shell of nanoparticles with full control of its composition is based on the use of polymerisable surfactants – so-called surfmers [6]. Surfmer is an abbreviation of the two terms surfactant and monomer and this describes two intrinsic functions of such a molecule: to stabilise as an emulsifier the emulsion during the particle synthesis or modification as well as the resulting nanoparticles. And to react in a polymerisation chain reaction and thereby introducing itself covalently in the particle shell. Additionally, the surfmers described here, possess a third functionality. They introduce a so-called active ester group to the nanoparticle shell [7]. This chemical functionality is stable to polymerization and storage. And it can be activated at any desired moment for gentle covalent anchoring of functional components such as biomolecules [8].

Surfmers are employed in emulsion polymerization and render nanoparticles with tailor-made surface properties in a single step. Typical particle diameters lie in the range from 80 nm–200 nm. Organic shells are prepared by this technology onto polymeric cores and just as well as to almost any other core material by a so-called seeded emulsion polymerisation. The polymerisable endgroup can be freely chosen for optimal reactivity with the desired core material. Most importantly, the surfmer technology allows replacing tedious multi-step preparation techniques employed to date in industrial practice. Additionally, the surfmer technology enables to create particles that are about a thousand times smaller than the beads currently employed in biotechnology for biomolecule immobilisation.

# Nanoparticles as nanocarriers and nanocontainers for drug delivery

Polymeric nanoparticles as carrier for drugs are able to control the release of active agents (controlled release) [9]. The purposes behind the controlled drug delivery are more effective therapies as the level of the active agent within the organism can be controlled.

Biodegradable polymers which are fully metabolised by the body are of increasing interest for drug delivery. The physical and chemical properties of the particles influence the degradation process and its rate and thus define the release kinetics. These properties are strongly affected by the polymer composition. The polymer matrix material is either commercially available as is the case for the family of biodegradable polylactides or biocompatible block-copolymers are designed and synthesized for this purpose. Biodegradable li-

near polyesters are well established and approved by the FDA but often suffer from insufficient properties. Tailor-made new polymeric matrix systems with improved features and different molecular weights can overcome the limitations.

The drug release kinetics can be fine-tuned to needed requirements by changing different parameters during the particle preparation. E.g. the molecular weight and the ratio of hydrophilic to hydrophobic monomer units influence the release kinetics drastically. A variety of emulsion techniques are employed for the formation of the nanoparticles. The particles were prepared by a double emulsion technique using an aqueous phase being emulsified in an oily phase which then is emulsifies in an aqueous phase (water-oil-water double emulsion). The particle diameter can be freely chosen between 60 nm –300 nm. The process is tailored according to the chemical nature of the compound to be released – active agents range from simply structured low molecular weight molecules to complex biomacromolecules such as proteins like cytokines and growth factors. For drug targeting, the shell of the nanoparticles is specifically functionalised for a specific interaction with the surrounding medium – another application of the general principle of molecular recognition.

# Entirely synthetic receptors – molecularly imprinted nanoparticles (nanoMIPs)

Entirely synthetic receptors which combine the specificity of biological binding sites with the superior chemical stability of synthetic materials are most desired moieties. Molecularly imprinted nanoparticles come close to such an ideal. Molecular imprinting is a way to induce specific molecular binding sites in otherwise non-functional materials [10]. Wanted is a specific interaction of so-called templates with a comonomer mixture during the polymerisation process which leads to a monolithic copolymer network to which the templates are strongly adhered, e.g. by H-bonds, van-der-Waalsforces and electrostatic forces. When the template is extracted, empty binding sites are retained in the copolymer which constitute artificial molecular recognition sites. Although successful in the lab, a technological break-through of these "plastic antibodies" or "plastic enzymes" suffered from the fact that for practical use of the imprinted material, it always had to be crushed and sieved in order to obtain useful particles for desired applications. NANO-CYTES<sup>TM</sup>-technology overcomes this crucial limitation by scaling down the

164 A. Weber et al.

preparation of the imprinted material to the nanoscale [11]. Monomer nanodroplets are prepared by emulsion techniques. These droplets interact with the templates in the liquid state. Then they are converted to nanoscopic polymer monoliths – all in the presence of the template. The resulting particles have only to be freed from the template by extraction and entirely synthetic receptor nanoparticles are obtained [12]. The change to an emulsion polymerisation techniques offers additionally to the benefit of size and morphology control, also superior control on the chemical composition of the resulting material – and thus it provides a key to fine-tuning the recognition properties. Molecularly imprinted nanoparticles (nanoMIPs) can be produced economically in quantitative yield. A variety of active agents ranging from low molecular weight drugs to peptides and proteins have been successfully imprinted in this way [11].

The emulsion technique for the nanoMIPs preparation is called a miniemulsion polymerisation and results particles with typical sizes between 50 nm and 300 nm. Besides classic miniemulsion polymerisation (hydrophobic phase emulsified in hydrophilic phase – here water) also a MIP technique based on inverse miniemulsion polymerisation has been established. Thus possible templates can be chosen fro the full range of hydrophilic to amphiphilic to hydrophobic molecules. A further advantage of this new technique is that the nanoparticles created can be used under physiological conditions, assuring the sustainability of the "biological key".

NanoMIPs can be used to absorb specific compounds from mixtures e.g. in order to remove toxic compounds or undesired by-products. Easiest is to employ the material as a suspension or powder. Due to their defined morphology they are also excellent coating material for sensors or membranes in a separation process [13]. NanoMIPs can be integrated in a membrane set-up, e.g. by forming the functional heart of a composite membrane. Common ultrafiltration membrane discs are used as support and cover of a nanoMIP multilayer. To work up the imprinted material to a membrane allows to integrate the principal of molecular recognition in a new fashion in biotechnical or chemical industrial processes for specific separation of molecules. Here, the aim may either be to eliminate undesired compounds or to gain effectively valuable products.

# NANOCYTES<sup>TM</sup>-based 3 D-biochips

Biochip-technology is a key factor in today's biotech research: To gain a comprehensive insight into complex metabolism sequences or to safeguard

diagnostic conclusion, it is essential to probe particular molecules of interest with a great variety of potential interaction partners [14]. Preparation of biochip-interfaces is done e.g. by printing small amounts of biological or synthetic capture-molecules on a solid substrate. This results in arrays of microspots, which display different specific binding-affinities. Thus, biochips enable scanning of minor biological sample volumes for a multiplicity of different analyte molecules in one go.

The reactive microspot within a biochip can be drastically enhanced by micro-structured deposition of functional nanoparticles. The resulting three-dimensional micropads provide enlarged reactive surfaces for the detection of biomolecules [15]. The whole variety of core-shell nanoparticles described above can be used for generation of microarray-surfaces. This concept of modular assembly allows for flexible tailoring of biochip-interfaces. NANO-CYTES<sup>TM</sup>-based 3D-biochips are compatible with fluorescence detection and MALDI mass spectrometry, the state-of-the-art read-out techniques of modern biotechnology [5].

Deposition of defined amounts of particles is accomplished by contact-printing nanoparticle suspensions using a pin-ring spotter. By tuning the amount of particles deposited per spot the binding-capacity of nanoparticle-microarrays can be increased. In contact with a sample, high receptor-density shifts the equilibrium towards the formation of the receptor-ligand complex and therefore results in a greater amount of bound analyte for a given concentration of analytes in the sample. The separation of the bioconjugate-chemistry from the actual array printing-process allows for tailoring different immobilization strategies for different capture-molecules. The concept of simultaneous detection of multiple analytes on a nanoparticle biochip-surface was proven using antigens and antibodies as particle-bound capture-molecules [16].

By NANOCYTES<sup>TM</sup>-based microarray-technology, surfaces are tailored for optimised binding of biomolecules. Furthermore, the constitution of the active micropads from nanoparticles provides enlarged reactive surfaces within the biochip. The technology is compatible with multiplex analysis. It provides a flexible platform for the generation of innovative biochip-surfaces – a field of growing impact on biomedical and diagnostic issues.

#### Conclusion

Smart nanostructured particles that have the ability to molecularly recognise specific compounds already have found widespread use in research and tech-

166 A. Weber et al.

nology. Such systems can be fine-tuned by a variety of technological means which are mastered by todays chemical and biochemical nanotechnology. They are and will be applied in the chemical industry, in biomedical engineering and in biotechnology. Their task is to gain valuable compounds in production lines, to enable diagnostic and sensoric processes or to enable new therapeutical approaches. Biomimetic nanoparticles mark an enthralling field of highly interdisciplinary research and development and will continue to attain importance.

## Acknowledgments

The authors thank Prof. Pfizenmaier and Prof. Scheurich (University of Stuttgart, Institute for Cell Biology and Immunology) for the cooperation concerning TNF. This work was funded in a variety of specific projects by industry and the Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), the European Community, the Land Baden-Württemberg and the Fraunhofer-Gesellschaft.

#### References

- [1] B. B. Aggarwal, Nature Reviews in Immunology 2003, 3, 745-756.
- [2] S. Bryde, I. Grunwald, A. Hammer, A. Krippner-Heidenreich, T. Schiestel, H. Brunner, G. E. M. Tovar, K. Pfizenmaier, P. Scheurich, Bioconjugate Chemistry 2005, 16, 1459-1467.
- [3] W. Stöber, A. Fink, Journal of Colloid and Interface Science 1968, 8, 62.
- [4] T. Schiestel, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Journal of Nanoscience and Nanotechnology 2004, 4, 504-511.
- [5] A. Weber, K. Borchers, J. Schmucker, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Canadian Journal of Science and Spectroscopy 2005, 50, 49-53.
- [6] H. A. S. Schoonbrood, J. M. Asua, Macromolecules 1997, 30, 6034-6041.
- [7] M. Herold, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Macromolecular Chemistry and Physics 2003, 204, 770-778.
- [8] M. Herold, M. Hakanson, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Progress in Colloid and Polymer Science 2006, 133, 30-34.
- [9] O. Pillai, R. Panchagnula, Current Opinion in Chemical Biology 2001, 5, 447-451.
- [10]C. Alexander, H. S. Andersson, L. I. Andersson, R. J. Ansell, N. Kirsch, I. A. Nicholls, J. O'Mahony, M. J. Whitcombe, Journal of Molecular Recognition 2006, 19, 106 180.
- [11]G. E. M. Tovar, C. Gruber, I. Kräuter, Topics in Current Chemistry: Colloid Chemistry II 2003, 227, 125-144.

- [12]D. Vaihinger, K. Landfester, I. Kräuter, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Macromolecular Chemistry and Physics 2002, 203, 1965-1973.
- [13]M. Lehmann, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Desalination 2002, 149, 315-321.
- [14]P. Angenendt, Drug Discovery Today 2005, 10, 503-511.
- [15]K. Borchers, A. Weber, H. Brunner, G. E. M. Tovar, Analytical and Bioanalytical Chemistry 2005, 383, 738-746.
- [16]K. Borchers, A. Weber, E. Hiller, S. Rupp, H. Brunner, G. E. M. Tovar, PMSE Preprints 2006, in press.

# Sensorsysteme lösen eine neue Ära der Produktivitätsentwicklung

Seit etwa zwei Jahrzehnten wird immer deutlicher erkennbar, dass sich Sensorsysteme zum Schlüsselelement einer neuen technischen Revolution mit weit reichenden Konsequenzen für alle Bereiche der Gesellschaft entwickeln. Ungeachtet der fundamentalen Bedeutung von Sensorsystemen für die künftige Entwicklung der Gesellschaft ist die Wahrnehmung dieser neuen Technologie im Wesentlichen auf die beteiligten Akteure und professionelle Beobachter der Technikszene beschränkt. Der dringend gebotene gesellschaftliche Diskurs über die Auswirkungen dieser Entwicklung findet kaum statt.

Mit dem Ziel, eine breitere Auseinandersetzung über dieses Thema in der Öffentlichkeit zu befördern, hat das Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien in Zusammenarbeit mit dem Silicon Saxony e.V. im Oktober 2006 in Lichtenwalde die Leibniz-Konferenz "Sensorsysteme 2006" ausgerichtet. Die dort von führenden Vertretern involvierter Wissenschaftsbereiche gemeinsam mit Industriepartnern diskutierten aktuellen Ergebnisse haben die Tiefe und Breite dieser weitgehend unbemerkt von der Öffentlichkeit in Gang gesetzten Revolution deutlich gemacht.

Im Folgenden soll der Stand dieser Entwicklung im Überblick dargestellt werden. Zu drei besonders interessanten Themen, die auf der Leibniz-Konferenz diskutiert wurden, haben die Autoren nachfolgend eigene Beiträge verfasst (siehe Meyendorf [1], De Man [2], Fischer [3]).

# 1. Ubiquitäre Elektronik und Sensorsysteme

Elektronik, die allgegenwärtig und kontinuierlich Informationen über ihre Umgebung gewinnt, diese Informationen geeignet verarbeitet und wo nötig eigenständig zum Auslösen notwendiger Reaktionen weiterleitet, aber auch Informationen aus anderen Teilen eines nahezu unbegrenzten Informations-

netzes empfangen und verarbeiten kann, wird als ubiquitäre Elektronik bezeichnet. Sensornetzwerke sind Kernbestandteil dieser Vision, die auch als "ubiquitous computing" oder "ambient intelligence" bezeichnet wird. Die technische Zielstellung einer solchen Vernetzung der Welt mit Sensoren hat einer der Pioniere dieser Technologie, K.A. Delin, im Jahr 2004 wie folgt formuliert:

"The ultimate goal of a sensor network system is to extract knowledge from the data it collects and to use their information to intelligently react and adapt to its surroundings".[4]

Die gesellschaftliche Relevanz einer solchen Technologie ist jedoch viel dramatischer, als diese nüchterne technische Zielstellung auf den ersten Blick vermuten lässt. Sie ist der Schlüssel zu einem fundamentalen Produktivitätsschub in allen Bereichen menschlicher Tätigkeit.

Hatte die Erfindung der Kraftmaschinen die körperlichen Kräfte des Menschen in der Produktion über alle Maßen gesteigert und damit die erste industrielle Revolution ausgelöst, hat die Erfindung und praktischen Einführung der modernen Kommunikations- und Informationstechnologien im vergangenen Jahrhundert zu einer weiteren industriellen Revolution geführt, die dank effizienterer Ausführung geistiger Routineaufgaben durch elektronische Rechner nicht nur zu einer unerhörten Steigerung der Arbeitsproduktivität in der Produktion geführt hat, sondern auch in vielen Dienstleistungsbereichen menschliche Tätigkeiten sehr viel produktiver oder gar überflüssig gemacht hat. Schließlich hat diese vor allem von den allgegenwärtigen Computern und deren Vernetzung (Internet) getragene Revolution auch über das Eindringen in den privaten Bereich unseren Lebensstil wesentlich verändert.

Was den derart mit "Intelligenz" ausgestatteten Maschinen bisher noch fehlte, waren Sinne zur Erfassung ihrer Umgebung und eine darauf aufbauende aktive Kommunikation und Reaktion. Genau das leisten aber zunehmend die Sensorsysteme: Die "Dinge" erhalten in Gestalt von Sensoren geeignete Sinne und können über die Auslegung der Sensorsysteme wo nötig auch untereinander kommunizieren, weshalb Sensornetzwerke auch als "Internet der Dinge" bezeichnet werden. Sie erhalten technisch damit auch die Möglichkeiten, Entscheidungen zu treffen. Mit solchen Systemen ist eine sprunghafte Produktivitätssteigerung in nahezu allen Bereichen der Produktion und Dienstleistungen möglich. Meyendorf [1] sieht damit nach dem Zeitalter der Industrialisierung (19. Jahrhundert) und dem Zeitalter der Information (20. Jahrhundert) das von entscheidungsfähigen Maschinen geprägte "Age of Decision" (21. Jahrhundert) voraus.

In viele Bereiche unseres Lebens haben solche Systeme bereits heute weitgehend unbemerkt Einzug gehalten oder stehen kurz vor der massenhaften Anwendung. Dazu gehören:

- Hausautomatisierung (u.a. Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Sonnenschutz, Kommunikation, Unterhaltung, Überwachung und Zugangskontrolle),
- Industrieautomatisierung ("menschenleere" Fabriken, Roboter, Logistik, Überwachung usw.),
- Präzisionslandwirtschaft und Umweltmonitoring (Boden-, Luft-, und Gewässerüberwachung, aktive Steuerung von Bodenparametern),
- Transportautomatisierung (Kommunikation der Autos untereinander sowie mit der Infrastruktur, Leitsysteme, Kontrolle- und Steuerung aller Verkehrsmittel),
- Gesundheitswesen (Telemedizin, elektronische Prothesen u.a.),
- Militärwesen (automatisch gesteuerte Fahrzeuge, Aufklärungsdienste durch Tausende im Feld verstreute "Silicon dust"-Sensoren usw.),
- Automatisierung aller Arten von Dienstleistung (E-Banking, Wartung, Logistik, Einzelhandel, wie etwa mit automatischen Kassen auf Basis von RFID-Systemen, usw.).

Viele dieser Anwendungen entwickeln sich eher unspektakulär als Insellösungen und auf Basis herkömmlicher Systeme. Einige Millionen drahtloser Sensorknoten überwachen bereits heute Heizung, Hausgeräte, Beleuchtung, Türen und Fenster in Häusern oder steuern Industrieanlagen; einige Milliarden können es demnächst werden. Allein 16 Milliarden Sensorgeräte sind in Gebäuden derzeit weltweit installiert, die ein offenkundiges Potential für die neuen drahtlose Sensorknoten sind [5].

Neue Sensorsysteme werden zumeist nicht schlagartig eingeführt, vielmehr lösen sie ältere Systeme schrittweise ab oder ergänzen diese qualitativ. Sie heben die älteren Systeme im dialektischen Sinne auf. Die neue Qualität entsteht vor allem durch die massenhafte Verbreitung und Vernetzung von Sensorsystemen. Es vollzieht sich ein bemerkenswerter Umschlag von Quantität in eine neue Qualität. Das heißt natürlich nicht, dass nicht auch die Qualität der technischen Lösungen für diese Sensorsysteme eine faszinierende und stürmische Entwicklung erfährt.

Im Folgenden sollen deshalb zunächst einige aktuelle Entwicklungsaspekte der Sensorsysteme zusammengefasst werden. Eine tiefgehende Analyse der wissenschaftlich-technischen Aspekte dieser Entwicklung wurde von einem Pionier dieser Entwicklung vom renommierten IMEC, Hugo De Man, auf der 3. Leibniz-Konferenz in seinem Eröffnungsvortrag vorgenom-

men und kann auch in diesem Band in einem von ihm zusammengestellten Überblick [2] nachgelesen werden.

## 2. Entwicklungstendenzen von Sensorsystemen

## 2.1. Systemanforderungen und -konzepte

So vielseitig wie die Anwendungsgebiete von Sensorsystemen, sind auch die Anforderungen an diese Systeme. Unterschiedliche Einsatzgebiete erfordern häufig spezielle Sensoren, die ihrerseits natürlich auch die Systemlösung stark beeinflussen können. Dennoch lassen sich einige allgemeine Forderungen an diese Systeme formulieren, für die bereits heute tragfähige Lösungsansätze existieren:

- Sensorsysteme müssen zu niedrigen Kosten hergestellt werden können; woraus die Notwendigkeit von Massenfertigungen folgt.
- Sensorsysteme dürfen nur geringe Installationskosten erfordern; dazu werden zunehmend Methoden der Selbstkonfigurierung entwickelt "plug and play".
- Sensorsysteme müssen weitgehend wartungsfrei und extrem zuverlässig sein; das macht Selbstdiagnose und Selbstreparatur erforderlich - "place and forget".
- Der Datenaustausch in Sensorsystemen muss störungsfrei und sicher sein; was den verschlüsselten Datenaustausch insbesondere bei drahtlosen Netzen notwendig macht.
- In der Mehrzahl der Anwendungen müssen die Systemkomponenten von geringen Abmessungen sein; weshalb die Miniaturisierung in Form von Mikrosystemen stark vorangetrieben wird.
- Viele neue Anwendungsgebiete von Sensorsystemen erfordern drahtlose Sensorelemente, was zur Entwicklung energieautarker, funkbasierter Sensorknoten führt.

Diese Systemanforderungen haben weltweit zu umfangreichen Forschungsund Entwicklungsprojekten mit beachtlichen Fortschritten auf allen Teilaspekten geführt.

Die Forderung nach geringen Produktionskosten und Abmessungen der Sensorkomponenten hat die Entwicklung von Mikrosystemen unter Anlehnung an die technologischen Prinzipien der Mikroelektronik stark vorangetrieben [2].

Die Notwendigkeit von energieautarken Systemelementen hat sowohl zur Entwicklung extrem energiesparender Schaltungstechniken ("low power") und effizienten Softwarelösungen (Betriebssysteme und Operationsmodi), als auch zu neuen Methoden der autarken Energieversorgung für die Sensorknoten ("energy harvesting") geführt.

Einige Anforderungen an die Sensorsysteme lassen sich jedoch nur durch geeignete Lösungen auf der Systemebene lösen (Wolisz [6]). So hat die notwendige hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Systeme bei geringen Installations- und Wartungskosten auch zu innovativen Lösungen auf der Komponentenebene (Michel [7]), vor allem aber zur Entwicklung neuer Systemkonzepte geführt, die die Funktion des Sensorsystems auch dann gewährleisten, wenn einzelne Elemente ausfallen.

Ein viel versprechendes Konzept sind Maschennetze (im Gegensatz zu den heute weit verbreiteten Stern-, Baum-, Ring oder Bus-Strukturen). In solchen Netzen wird die Information von Knoten zu Knoten weitergegeben, ohne dass eine genaue Route vorgegeben wird (Abb. 1).

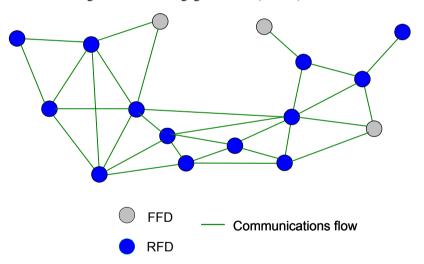


Abb. 1: Topologie eines Maschennetzwerkes

Bei Ausfall eines Knotens wird die Informationsweiterleitung über benachbarte FF-Knoten (full function knots) gewährleistet; RF-Knoten (reduced function knots) dienen lediglich der Aufnahme und Abgabe von Informationen, haben also nicht die Funktion einer Relaisstation. Der eigens für Sensornetzwerke entwickelte Kommunikationsstandard IEEE 802.15.4 ermöglicht den Aufbau derartiger Maschennetze mit bis zu 64.000 Knoten.

Um die Installations- und Wartungskosten gering zu halten, müssen Sensorknoten im System selbst konfiguriert werden, selbständig Software-Updates durchführen und sich selbst neu kalibrieren oder gar reparieren [8].

Selbst Probleme der Energieversorgung einzelner Knoten können durch Lösungen auf Systemebene entschärft werden. Z.B. kann das System selbständig in die Informationsweiterleitung eingreifen, um bestimmte Knoten energieseitig zu entlasten, wenn diese einen niedrigen Stand an verfügbarer Energie melden. Dann werden Routingvorgaben gemacht, die diese Knoten entlasten [9][10].

Die Struktur der Sensorknoten hängt stark von den eigentlichen Sensoren ab. Sensorsysteme auf Basis von optischen Fasern (R. Willsch, W. Ecke [11]) haben dank des angewandten Wirkprinzips eine völlig andere Auslegung als etwa Systeme, die auf traditionellen Sensoren aufbauen. Drahtlose Sensorknoten verkörpern nahezu alle Herausforderungen, die an die Entwicklung von modernen Sensorknoten gerichtet sind (Abb. 2).

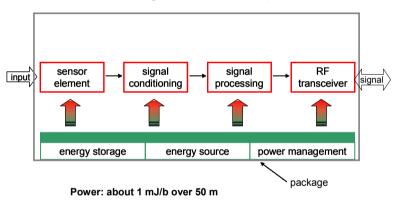


Abb. 2: Sensorknoten

Diese Sensorknoten enthalten typischerweise

- das (ggf. die) Sensorelement(e),
- eine nachgeschaltete Elektronikschaltung zur Signalkonditionierung,
- eine Schaltung zur Signalverarbeitung und Netzwerksteuerung,
- eine Hochfrequenzschnittstelle zur drahtlosen Kommunikation,
- eine Antenne, sowie
- Elemente zu Speicherung, Management und ggf. Gewinnung der elektrischen Energie.

Im Idealfall, sind alle diese Komponenten in einem Mikromodul platz- und energiesparend untergebracht. Ein Beispiel für einen solchen kompakten Knoten hat das IMEC mit dem "System-in-a-cube (SiC)"-Konzept demonstriert [12], bei dem der Sensor, die Signalverarbeitung, die Signalübertragung und die Energieversorgungseinheit in einem Würfel von 1 ccm integriert wurden, und mit dem das Potential für weitere Miniaturisierung aufgezeigt wurde.

Zu jeder dieser Komponenten eines solchen Sensorknotens gibt es derzeit hohe Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten [2].

#### 2.2. Sensoren

Sensoren gibt es heute zu nahezu allen physikalischen und chemischen Parametern bis hin zur Erkennung und Analyse von biologischen Objekten ("labon-a-chip" [13][14]). Die am weitesten verbreiteten Sensoren sind solche für

- Temperatur,
- Mechanische Größen (Druck, Dehnung, Winkel, Beschleunigung, Schall, ...),
- Elektrische Größen (elektrische und magnetische Felder, Spannungen, ...),
- Strahlung (Infrarot, sichtbares Licht, Röntgenstrahlung, Kernstrahlung),
- Chemische Elemente und Verbindungen (Gase, Flüssigkeiten).

Auf der Leibniz-Konferenz wurde der Fortschritt auf diesem Gebiet eindrucksvoll demonstriert. Der Trend zur Miniaturisierung und Einsatzvielfalt wurde besonders deutlich bei Spektralsensoren (F. Kerstan [15]) mit enormen Anwendungsbreite in der Landwirtschaft, im Gesundheitswesen, der Pharmazie oder für Beschichtungsverfahren in der Industrie aber auch bei den sehr vielseitig einsetzbaren Infrarotsensoren (M. Krauss [16]). Selbst vormals sehr aufwändige und großvolumige Geräte sind heute in miniaturisierter Form für Sensorsysteme geeignet, wie etwa zur Ionenbeweglichkeitsspektrometrie (J. Leonhardt [17]), Röntgenfluoreszenzanalyse (N. Langhoff [18]) oder Ramanspektrometrie (J. Popp [19]).

# 2.3 Sensorsignalübertragung

Das vom Sensor bereitgestellte elektrische Signal muss nach einer geeigneten Verarbeitung (Konditionierung) im Sensorknoten an das System weitergeleitet werden, ebenso muss der Sensorknoten in Sensornetzwerken in aller Regel auch Signale aus dem System empfangen können.

Die größte Herausforderung stellt dabei die drahtlose Übertragung dar. Es sind verschiedene Hochfrequenztechnologien für drahtlose Sensornetzwerke

verfügbar. Alle sind Breibandverfahren, da Schmalbandverfahren wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber Interferenzen und Mehrwegempfang (multipath fading) in Netzwerken nicht stabil arbeiten. Die verbreitetsten Breitbandtechniken sind:

- DSSS (direct sequence spread spectrum) und
- OFDM (orthogonal frequency division multiplexing).

Lizenzfreie Frequenzbänder für Netzwerke sind 868 MHz (in Europa), 915 MHz (in den USA) und weltweit 2.4 GHz und 5.8 GHz mit jeweils unterschiedlichen Vor- und Nachteilen für die verschiedenen Anwendungsfälle.

Neben proprietären Kommunikationsprotokollen ist nur der Standard IEEE 802.15.4 derzeit für Sensornetzwerke geeignet. Dieser Standard wird durch neuere Weiterentwicklungen immer attraktiver (A. Wolf [20]). WiFi and Bluetooth sind für DLSN vor allem wegen der begrenzten Netzwerkgröße (7 bis 32 Knoten), ihrer fehlenden Eignung für Echtzeitbetrieb (lange Aufwachzeiten aus dem Schlafzustand) und vor allem wegen ihres hohen Energieverbrauches nicht geeignet.

Aufbauend auf den IEEE Standard 802.15.4 wurde für verschiedene Nutzungsprofile der sogenannte ZigBee-Standard durch eine größere Industrieallianz geschaften. Abbildung 3 zeigt die wesentlichen Parameter im Vergleich mit dem populären Netzwerk-Standard "Bluetooth".

=18500 (IEEE 002/10/1)			
Parameter	ZigBee	Bluetooth	
Power consumption	μW mW	100 mW	
Data rate	20 200 kbit/s	1 Mbit/s	
Network size	65536	8	
Protocoll stack	25 Kbyte	250 Kbyte	
Network join time	30 ms	3 s	
Wake-up time	15 ms	2 s	

**ZigBee (IEEE 802.15.4)** 

Abb. 3

Perspektiv ist auch die UWB-Technologie ein ernsthafter Kandidat für drahtlose Sensornetzwerke, die allerdings derzeit nur in den USA zugelassen ist.

Für besondere Anwendungen, wie etwa in Militärbereich oder in speziellen Applikationen (so bei Diehl oder Zensys im Bereich der Hausautomatisierung), werden neben den Standards auch Speziallösungen existieren.

## 2.4. Energieversorgung

Die meisten Anwendungen drahtloser Sensornetzwerke werden autonome Netzknoten erfordern, die mit einer entsprechenden Energieversorgung auszustatten sind. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten:

- Batterien mit langer Lebensdauer,
- Energiegeneratoren als Teil des Mikrosystems selbst.

Beide Energiequellen setzen voraus, dass extrem energiesparende Techniken in allen Teilen des Mikrosystems angewandt werden.

Bei beiden Quellen gibt es noch Probleme mit der Baugröße, die bei den Batterien zum Lebensdauerproblem hinzukommen. Wegen der angestrebten Miniaturisierung der Sensorknoten müssen auch die Batterien klein und vorzugsweise sehr flach sein. Auf der Leibniz-Konferenz wurden durch K. Marquardt [21] interessante Lösungen für ultraflache Mikrobatterien vorgestellt.

Für die angestrebten wartungsfreien und langlebigen Sensorsysteme ist zweifellos der Einsatz von Mikrogeneratoren [22][23][24] die Methode der Wahl. So sind Vibrationsgeneratoren sehr gut für bewegte Objekte wie Maschinen, Strassen- und Schienenfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge geeignet. Piezoelektrische Wandler erreichen inzwischen einen Wirkungsgrad von bis zu 90 % für die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie. Für autonome Sensoren sind auch Solarzellen eine attraktive Energiequelle, insbesondere in Kombination mit Superkondensatoren als Energiespeicher.

Der Energiebedarf eines Sensorknotens liegt in Abhängigkeit vom Betriebsmodus im Bereich von Mikrowatt bis zu einigen Milliwatt. Diese Größenordnung wird durch Mikrogeneratoren heute schon erreicht, selbst wenn für einen breiten und effektiven Einsatz weitere Entwicklungsfortschritte notwendig sind. Die derzeit erzielbare Leistung liegt bei

- ca. 10 mW/cm<sup>2</sup> für Energiewandler auf Basis von Strahlung (elektromagnetische Felder, Licht, Kernstrahlung),
- ca. 10–100 mW/cm<sup>3</sup> für Thermogeneratoren und elektromechanische Wandler (Spannung, Vibration, Bewegung).

Die Wahl der Energieversorgung hängt sehr von den Anwendungsbedingungen ab, wie auch das gesamte Design von Mikrosystemen für drahtlose Sensornetzwerke.

# 3. Anwendungsfelder und gesellschaftliche Konsequenzen

Die Anzahl und Vielfalt von Anwendungen für Sensorsysteme ist nahezu unüberschaubar und wächst ständig.

Heute bereits millionenfach im Einsatz sind Sensorsysteme zum automatischen Ablesen von Verbrauchswerten in Gebäuden (P. Kalisch [25]) oder auch zur Steuerung von Hausgeräten und Sicherheitssystemen ("home automation"). Das Potenzial für derartige Sensorsysteme beträgt für die etwa 2,7·10<sup>8</sup> Haushalte in Westeuropa und den USA ca. 2·10<sup>10</sup> Sensorknoten. Das liegt mehr als eine Größenordnung über der Anzahl der Computer und Mobiltelefone, die bisher die Umsatzvolumentreiber für die Elektronikindustrie waren.

Ein ebenso riesiger Markt zeichnet sich für den Einsatz von Sensorsystemen im Verkehrswesen ab [26][27][28]. Fahrzeuge werden dadurch sicherer und komfortabler, wie das wohl schon fast jeder Kraftfahrer durch seine Erfahrungen mit ABS- und EPS-Systemen zu schätzen weiß. Technisch machbar sind heute bereits vollautomatische Fahrzeuge, wie das von der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) in der Wüste von Arizona über eine Distanz von 175 Meilen jährlich veranstaltete Wettrennen ("Grand Challenge" [29]) automatischer Fahrzeuge zeigt. Die dort installierten Fahrerassistenzsysteme werden mit zahlreichen weiteren Sensoren zur Umfelderkennung und mit dem GPS-System kombiniert, was es ihnen erlaubt, eine beim Start unbekannte Strecke unter Umgehung von Hindernissen sicher zurückzulegen. Diese Entwicklung wirft allerdings eine ganze Reihe juristischer Fragen auf, die vor dem Einsatz auf öffentlichen Straßen geklärt werden müssen. Sollte dieses rechtliche Problem gelöst werden können, ergeben sich dramatische Konsequenzen für einen ganzen Berufsstand, dem der Kraftfahrer, die dann nicht mehr nur in Militärfahrzeugen eingespart werden könnten.

Ein anderer großer Anwendungsbereich mit weitreichenden Folgen für die gesamte Produktions- und Dienstleistungsbranche ist das Structural Health Monitoring, das von Meyendorf [1] ausführlich beschrieben wird.

Ebenso weitreichend sind die Auswirkungen des Einsatzes von Sensorsystemen im Gesundheitswesen [3][30]. Die Diskussion auf der Leibniz-Konferenz hat gerade hier einen Bedarf nach interdisziplinärer Betrachtung des jeweils technisch Machbaren, ethisch Vertretbaren und rechtlich Zulässigen aufgezeigt.

Noch nicht absehbar sind die Konsequenzen aus dem massenhaften Einsatz von Sensorsystemen in der Logistik. Interessante Einblicke in Vielfalt der Anwendungen auf diesem Gebiet wurden von U. Meinberg [31] vermittelt. Aus dem dramatischen Anstieg der Arbeitsproduktivität, der mit dem Einzug von Sensorsystemen in die Logistik möglich wird, lässt sich eine gewaltige Einsparung von gering qualifizierten Arbeitskräften und eine Umwäl-

zung der Arbeitsinhalte auf diesem Gebiet erwarten. Die sich daraus ergebenden gesellschaftlichen Folgen sind bisher kaum untersucht.

Die weitreichendste Frage aus dem allumfassenden Einsatz von Sensorsystemen ist die nach den gesellschaftlichen Folgen dieser neuen Ära der Produktivitätsentwicklung: Wird die enorme Steigerung der Arbeitsproduktivität und damit massenhafte Freisetzung von Arbeitskräften zur allgemeinen Verbesserung der Lebensqualität und des Wohlstandes der Gesellschaft insgesamt führen oder wird sie den Riss in der Gesellschaft zwischen Beteiligten und Ausgeschlossenen vertiefen?

#### Literatur

- [1] N. Meyendorf, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, (dieser Band), Jahrgang 2007; "Neue Konzepte für Bauteil- und Materialüberwachung in der Verkehrstechnik, speziell Bahn und Flugzeug"
- [2] H. De Man, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (dieser Band), Jahrgang 2007; "Ambient Intelligence: A Giga-Scale Dream Facing Nano-Scale Realities"
- [3] W. J. Fischer, H. G. Despang, H. J. Holland, D. Wiedemuth, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (dieser Band), Jahrgang 2007; "Body Area Networks – Anwendung in telemedizinischen Systemen"
- [4] K. A. Delin, A Distributed Wireless Monitoring System, www.sensormag.com, April 2004
- [5] Firmenangaben Zensys, Inc. 2005
- [6] A. Wolisz, Sensornetze: Entwicklungstendenzen und Perspektiven, 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [7] B. Michel, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Lebensdauer von Sensornetzwerken im Mikro-Nano-Übergangsbereich, 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [8] N. Bulusu, T. Bokareva, Sensor Fault Detection and Calibration, in: N. Bulusu, S. Jha, Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.35
- [9] J. Heidemann, W. Ye, Energy Conservation in Sensor Networks at the Link and Network Layers, in: N. Bulusu, S. Jha, Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.75
- [10]M. Welsh, S. Madden, A whole-Network Approach to Sensor-network Programming, in: N. Bulusu, S. Jha, Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.191
- [11]R. Willsch, W. Ecke, Optische Fasersensorsysteme für die strukturintegrierte Überwachung technischer Anlagen; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006; www.leibniz-institut.de
- [12]IMEC NEWSLETTER, 1cm<sup>3</sup> system-in-a-cube: any sensor, anytime, anywhere! July 2004

[13]S. Smith, D.J. Nagel, Nanotechnology-Enabled Sensors: Possibilities, Realities, and Applications, www.sensormag.com, November 2003

- [14]P. Singer, Silicon "Nanograss" Provides Precise Fluid Control, Semiconductor International 6/1/04
- [15]F. Kerstan, Spektroskopische Prozessüberwachung unter Einsatz miniaturisierter Spektralsensoren, Anwendungen vom Kraftwerk bis zum Krankenbett; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [16]M. Krauss, Thermografie als Mess- und Monitoringverfahren Stand und Tendenzen; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [17]J. Leonhardt, Industriefeste IMS-Systeme f
  ür Industrie- und Umweltmonitoring im unteren ppm-Bereich; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [18]N. Langhoff, On-line Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bestimmung des Zn-Gehaltes von Konverterstaub bei Temoeraturen bis 250 grad Celsius; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [19]J. Popp. Miniaturisierte Raman-Sensoren zur Überwachung chemischer und biologischer Vorgänge; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [20]A. Wolf, New IEEE Standards for Wireless Sensor Networks; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [21]K. Marquardt, Ultraflache Mikrobatterien; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [22]T. Riedel, Power Considerations for Wireless Sensor Networks, www.sensormag.com, March 2004
- [23]A. Kansal, M. Srivastava, Energy-Harvesting-Aware Power Management, in: Wireless Sensor Networks, Archtech House, Inc. 2005, p.119
- [24]M. Ashauer, Energiegewinnung für autarke Mikrosysteme; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [25]P. Kalisch, Funksysteme zur automatischen Ablesung von Verbrauchswerten in Wohnungen und Gebäuden; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [26]H. Winter, Kamerabasierte Sensorik für Fahrerassistenzsysteme; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [27] W. König, P. Knoll, Intelligente Sensoren in prädikativen Fahrerassistenzsystemen. Bevormundung des Fahrers oder realer Kundenutzen?; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [28]J. Apitz, Lasersensoren für Verkehrstechnik, Kfz und industrielle Anlagen;, 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [29]www.darpagrandchallenge.com/
- [30]R. Kraemer, Sensornetze im medizinischen Umfeld; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de
- [31]U. Meinberg, Sensorsysteme in Wertschöpfungsketten; 3. Leibniz-Konferenz, Lichtenwalde 2006, www.leibniz-institut.de

## Hugo De Man

# Ambient Intelligence: A Giga-Scale Dream Facing Nano-Scale Realities

### 1. The Ambient Intelligence Vision:

Today, we are entering the "embedded everywhere" world in which all objects in our surroundings become intelligent micro-systems interacting with each other and with people through wireless sensors and actuators. The latter also rely on technologies emerging around CMOS, such as 3D packaging, MEMS and polymer displays. Nano-scale biosensors will connect electronics to bio-technology and create new opportunities for healthcare. With IPv6 eve-

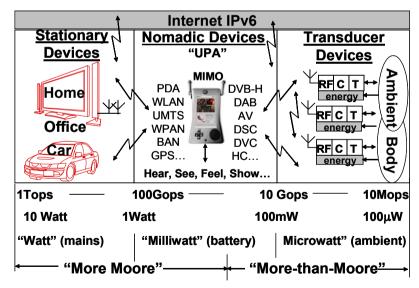


Fig. 1: Device classes for ambient intelligent systems. UPA: Universal personal Assistant; T:Transducer; C: Signal processing and control. MIMO: multiple input, multiple output multi-antenna system.

182 Hugo De Man

ry object on earth can have its own unique IP address and ultra-low power radio technology will connect all objects by global ad-hoc networking.

This will culminate in the *Ambient Intelligence* (AmI) [1] vision of a world in which people will be surrounded by networked devices that are sensitive to, and adaptive to, their needs.

Fig. 1 is a schematic view of the AmI world. It can be partitioned into three communicating classes of devices depending on their energy sources, cost and computational requirements.

1. Stationary devices in the home, office or car require compute platforms that take care of major information processing and execute computational intensive tasks such as interactive audio-visual infotainment in the home or advanced safety, navigation and engine control in cars. Computational power for these applications can reach 1 Tops in the future but packaging and cooling cost limits power for these consumer products to less than 5 Watt (including leakage power). Therefore these devices are called "Watt nodes" [1].

Clearly Watt nodes require a power efficiency of 100...200 Gops/Watt which is 3 orders of magnitude higher than of today's PC microprocessors. However, as AmI components are embedded systems, they need not be general purpose programmable, but must be "just flexible enough" within the intended set of applications. This must be exploited to reduce power.

2. Nomadic devices. Every person will carry a Universal Personal Assistant (UPA) powered by battery or fuel cell. It will have natural human interfaces (pen, speech, video, gestures, goggles...). It will provide adaptive multimode wireless and broadband connectivity to the web, to the personal space and to a Body Area Network (BAN) for health monitoring, security and biometric interaction. Natural interfacing requires full multimedia capabilities that automatically adapt the Quality of Service (QoS) to the communication channel, to the computing resources available, and to the attention span of the user. Therefore such a system must be flexible (programmable and reconfigurable).

The wireless part will require a Software Defined Radio (SDR) architecture with multiple antenna (MIMO) techniques for bandwidths in excess of 100 Mbps as well as a configurable front-end to cover all required frequency bands, all of this for a power budget below 500 mW.

The biggest challenge will be in harnessing power in the multimedia and smart audio-visual user interface as well as in the RF power amplifiers. Future multimedia content will be created and consumed by Scalable Video Coding (SVC) [2]. This technique is very error resilient, as needed for wireless chan-

nels, and allows for excellent QoS control. However, computational complexity of SVC decoding and encoding is respectively 9 and 36 times more complex than MPEG-4 for the same resolution. As a result, at least a ten times higher power efficiency will be needed compared to today's known solutions. Peak computational power of an UPA is between 10...100 Gops but peak power for the silicon parts should be less than 1 Watt. Therefore nomadic devices are called the "Milliwatt nodes". They require a power efficiency of the order of 10..100 Gops/Watt.

3. Autonomous wireless transducers will be empowered by energy scavenging or lifetime battery. They observe and control our surroundings and form ad-hoc networks communicating with the above two device classes. Today, energy scavenging is limited to 100 microwatt/cm<sup>3</sup>. So, in spite of the low duty cycle (< 1%) and low bit rates (1 bps...10 kbps), these devices must provide sensing, A/D conversion, computation (< 10 Mops) and RF communication for less than 100 microwatt average, and with microwatt level standby power. Therefore these devices are called "Microwatt nodes".

The digital parts of Watt and Milliwatt nodes demand for "More-Moore" i.e. further relentless CMOS scaling provided we can manage the huge NRE design cost and as long as it leads to further reduction of power and cost per function. Smart autonomous transducers and Milliwatt wireless systems, on the other hand, demand for "More-than-Moore". The challenge is in finding novel combinations of technologies above and around CMOS, for the design of ultra-low power, ultra-simple and ultra-low cost sensor motes for AmI. In the next section we focus first on the challenges for the digital Watt and Milliwatt nodes.

# 2. "More-Moore": Managing Giga-complexity

Watt and Milliwatt devices are consumer products. Unlike general-purpose processors they are not designed for raw performance but for two-orders-of-magnitude lower power for a given task set, at one twentieth of the cost. The computational bottleneck is usually in the memory-intensive digital signal processing parts for multi-mode SDR and processing of multimedia streams. Up to 70% of chip area consists of embedded memory, which is responsible for most of the power dissipation [5].

The battle of standards for 4 G radio and media content processing, and rapidly increasing NRE cost, make ASIC design no longer an option. Instead, energy efficient platforms are needed that can be adapted to new standards

184 Hugo De Man

and applications, by preference by loading new embedded system software or by fast incremental modifications to obtain derived products.

Fig. 2 shows that, for the digital Watt and Milliwatt nodes, two major gaps are popping up between AmI dreams and further nano-scaling.

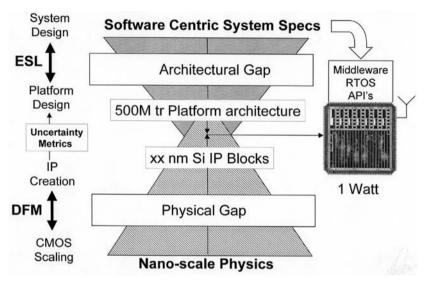


Fig. 2: Growing gaps between software-centric system specifications and nano-scale physical phenomena affect all levels of the design process and require new skills and industry alliance building. DFM: Design For Manufacturability; ESL: Electronic System Level Design.

First, there is an architectural gap between AmI dreams and platform architectures. System houses deliver reference specs in C++, MATLAB and the like to semiconductor or fabless companies. These reference specs show functionality without much concern for implementation. The task of platform designers is to map these into energy and cost efficient platforms of hundreds of processors and megabytes of embedded memory. Therefore semiconductor houses have to migrate from pure component manufacturers to domain specialists able to link system knowledge to power-aware nano-scale architectures. Platform design starts far above HDL level and, besides hardware, also a software interface (API) must be delivered as well as a RTOS controlling active and leakage power depending on the platform workload.

To reduce NRE cost, platform design must be based on reuse or EDA supported synthesis of IP-blocks at the processor-memory-bus-periphery level together with the software development environment (compilers, debuggers,

linkers, IS simulators etc.).

Second, there is also a growing physical gap between process technology and platform design caused by nano-scale phenomena such as increased leakage, intra-die variability, signal integrity degradation, interconnect delay and lithographic constraints on layout style. These effects jeopardize the digital abstractions now used for complexity management.

## Managing the architectural gap

Improving power efficiency of AmI systems by two-orders-of-magnitude requires a rethinking of domain specific compute architectures. Fig. 3 shows the power efficiency PE in Gops/Watt vs. feature size for 32-bit signal processing [6].

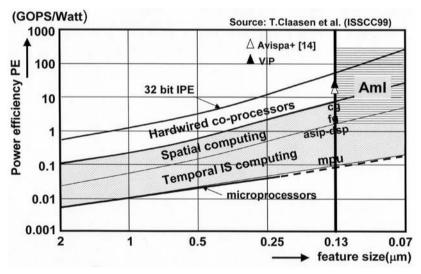


Fig. 3: Power efficiency vs. feature size for different 32 bit computing architectures. IPE: Intrinsic power efficiency of silicon; ASIP: application specific instruction set computer; fg: fine grain configurable; cg: coarse grain configurable.

Mono-processors executing temporal computing are the easiest to program, but have the lowest PE. The way to increase computational power is to increase clock speed to the GHz level. This is a poor use of scaling since virtually all additional hardware goes into more levels of cache and in extending instruction level parallelism, which by far does not reach the inherent task and

186 Hugo De Man

data level parallelism present in multimedia workloads. As a result we now see a clear trend towards multi-core solutions instead.

Fig. 3 shows that general-purpose microprocessors can dissipate up to 500 times more power for the same task than a pure hardware realization in which all register transfer operations are executed in parallel using distributed local storage. The latter is called the Intrinsic Power Efficiency (IPE) of silicon. The challenge is to approach, as much as possible, the IPE, but for domain specific, flexible, data-dominated platforms.

Spatial computing in Fig. 3 refers to parallel architectures whereby multiple (temporal) processing elements as well as their communication network can be configured at run time under software control. Best PE is obtained if data and instructions are local to the processing elements.

Hardwired multiplexed data paths with local storage and hardware thread control (co-processors) have the highest power efficiency but least flexibility.

Fig. 3 shows that AmI platforms demand for a careful mixture of spatial compute architectures and co-processors with just enough embedded programmability to meet the power budget. It also shows that further CMOS scaling is needed to meet the necessary PE, provided leakage power can be controlled.

We discuss four emerging techniques to reconcile flexibility and power efficiency for data-intensive computing in multimedia and multi-mode digital communication devices. We then discuss the impact of the physical gap.

# 1. The need for low power embedded software

Although power reduction must be performed at all levels of design, the largest gain is at the top. The lack of temporal and spatial locality of data in system level reference code for multimedia and SDR leads to substantial power dissipation. This is especially so for data-dominated systems as most of the power dissipation results from data-transfers to memory. Transfer of data from main memory, cache and local registers costs respectively 10, 5, 2 times as much energy as the actual operation on them by an ALU.

In [7] methods and tools are proposed to transform sequential C or C++ reference code into concurrent SystemC code for low power. These methods help the designer to refine data-types, extract task level parallelism and optimize temporal and spatial locality of data production and consumption This leads to a much better utilization of the memory hierarchy and processor cycles. In addition, tools have been developed to design optimal memory architectures for low power [8] and to minimize cache misses for software controlled caches [9].

These Data Transfer and Storage Exploration (DTSE) techniques have lead to power gains between 2 and 10 on real life designs. Clearly, not paying attention to software transformations for low power leads to a poor utilization of all later architectural optimization efforts.

## 2. Exploit parallelism at lowest possible clock speed

AmI platforms run many concurrent dynamic tasks with widely different sampling rates (audio, video, control, SDR baseband). Hence, a bus-based heterogeneous multi-processor architecture exploiting task level parallelism with localized memory is a natural choice (MIMD). Each processor node must be tuned to the application with just enough flexibility needed by the applications. In each processor, lower levels of parallelism can be exploited (e.g. loop-, data-, instruction-parallelism). This allows for low clock frequencies below 500 MHz, lower supply voltage, use of commercial EDA and Electronic System Level (ESL) design tools and of reuse of large IP blocks. This is mandatory to reduce NRE cost and time-to-market.

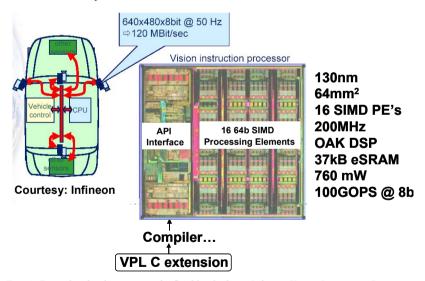


Fig. 4: Example of a domain specific flexible platform. Infineon Vision Instruction Processor (VIP) for car safety application achieves about 50% of silicon IPE.

Fig. 4 and 5 show two typical examples of Watt platforms. Fig. 4 is a Vision Instruction Processor (VIP) for car vision from Infineon. Each car mirror has a camera and a VIP that performs real time safety preserving calculations on the image. Notice a network of 16 64 bit SIMD processors each handling e.g.

188 Hugo De Man

8\*8 bit in parallel. This allows for 100 Gops at 8 bits for a clock frequency of only 200 MHz and 700 mW power dissipation, which corresponds to 38 Gops at 32 bits. Referring to Fig.4 this is close to IPE at 130 nm. An OAK processor allows for programming the VIP for vision applications. It has 204 video oriented instructions.

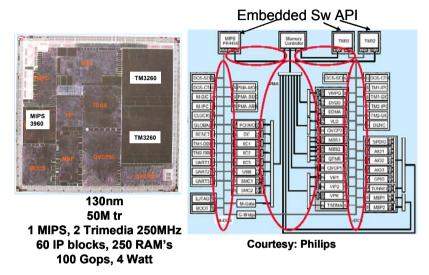


Fig. 5: Philips Viper2 Bus-Based Nexperia Platform for Advanced Set Top Box applications and digital TV. MIPS controls 60 coprocessors. Two programmable Trimedia VLIW processors allow adaptation to emerging standards.

Fig. 5 shows the Philips Nexperia platform for high quality digital home video applications handling two video and three audio streams. This 50 M transistor chip in 130 nm technology contains a MIPS processor for global control and 2 VLIW Trimedia processors for adaptation to emerging standards as well as 60 function specific weakly programmable cores for advanced HDTV algorithms. The platform dissipates 4 Watt for a computational power of 104 Gops and local memory bandwidth is 605 MB/s. Exploiting parallelism and locality of data and computation again optimizes the power budget. As a result, the chip contains 250 embedded SRAM's local to the functional units, which again illustrates the need for careful optimization of data-transfer operations.

## 3. Exploit task level dynamism

Advanced multimedia applications are dynamic. Computational power depends strongly on image, music or speech content. Dynamic Voltage/clock

Frequency Scaling (DVFS) [15], driven by the workload, can exploit this. Conventional DVFS is based on a run-time scheduler based on worst-case task profiling in order to meet real time constraints. Recently a Task Concurrency Method [11] (TCM) based on a design time Pareto analysis of trade-offs between energy and algorithmic tasks has been proposed. Based on the restricted set of Pareto points, a simple run-time scheduler performs an optimal DVFS scheduling on a multi-voltage multiprocessor platform still guaranteeing real-time behaviour. It shows a factor 2 power reduction with respect to traditional DVFS for an MPEG21 graphics application running on 2 StrongARM processors on different supply voltages [8].

### 4. Use domain specific processor nodes

The power efficiency of processor nodes can be substantially improved by defining a specialized instruction set and adding dedicated execution units and memory hierarchy to a processor data path. Application specific instruction set computers (ASIP), VLIW's and run-time reconfigurable 2-D VLIW coarse grain architectures [12] have been successfully used in video applications and SDR baseband processing. Today, design of such processors is greatly facilitated by interactive design systems that automatically generate efficient C compilers, instruction set simulators and HDL descriptions from a description of the processor architecture and its instruction set [13][14]. For example in [14] Silicon-Hive reports the design of a 60 issue VLIW processor (Avispa+) for SDR applications running 5.4 Gops (16 bit) at 150 MHz and dissipating only 150 mW in 130 nm technology. This corresponds to 18 Gops at 32 bits. As shown in Fig. 3, such architectures come close to the PE of ASIC's, but they retain programmability within the application domain and incremental changes are easy to perform from a software specification in C.

# Managing the physical gap: nano-scale realities hit platform architects

Scaling below 90 nm disturbs the digital abstractions and affects both IP design and platform architecting at a time when NRE cost is exceeding 50 M\$. The main challenges are:

1. Gate and sub-threshold leakage power start to exceed dynamic power. Hick gate dielectrics combined with metal- or fully silicided gates (FUSI) will be mandatory to solve the gate leakage problem for high performance applications, but it will take at least until 45 nm before its use in mass production. For AmI applications it is cheaper to keep a thicker gate oxide and, at best, maintain performance by strained silicon.

190 Hugo De Man

On the other hand, scaling for performance (low  $V_T$ ,  $V_{DD}$ ) leads to a tenfold increase of sub-threshold leakage current per technology node. This is unacceptable for AmI applications. A plethora of techniques for leakage control have been proposed [15] but they all affect library design, process technology and even RTOS design and require tight system/technology interaction. Scaling for low leakage (high  $V_T$ ,  $V_{DD}$ ) conflicts with high  $I_{on}$  and smaller gate delays. Hence, larger computational power must come from more transistors rather than faster ones. Architecture and technology must be tuned to find an optimum trade-off between clock frequency, degree of parallelism, total power in active mode and leakage power in idle mode.

Leakage power is especially problematic for state retention in SRAM's. Hence  $V_T$  scaling in memory cells is hardly possible, and this makes  $V_{DD}$  scaling below 1 Volt very challenging although desirable certainly for microwatt nodes.

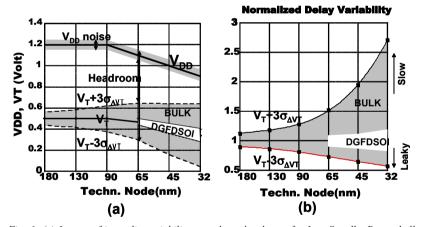


Fig. 6: (a) Impact of intra-die variability on voltage headroom for Low-Standby-Power bulk CMOS and dual gate fully depleted SOI [17] vs. technology node. (b) Resulting gate delay variability vs. technology node.

2. Coping with uncertainty: nano-level scaling increases the intra-die variability of threshold voltage, drive- and leakage current as they become dependent in the statistical distribution of doping atoms, molecules and photons. These effects can be modeled by the  $V_T$  variability  $\sigma_{\Delta VT}$ . Pelgrom's law states that  $\sigma_{\Delta VT} = A/\text{sqrt}(W.L)$  which shows its deterioration with scaling. Fig. 6a shows the 3 sigma  $V_T$  spread vs. technology node for minimum size, low standby power transistors for both bulk CMOS and metal gate Dual Gate

Fully Depleted SOI (DGFDSOI) [17]. Clearly, voltage headroom  $V_{DD}$ - $V_{T}$  (and thus  $I_{on}$  and  $t_{d}$ ) becomes very unpredictable even for neighbouring identical transistors. Fig. 6b shows that gate delay becomes a stochastic variable. This jeopardizes timing closure techniques, reduces parametric yield, requires statistical timing analysis methods and sizing transistors not only for performance but also for yield improvement.

In SRAM's, increasing transistor mismatch prevents  $V_{DD}$  scaling below 0.8 Volt during read/ write operation for yield and noise margin reasons especially for bulk CMOS [16]. The use of DGFDSOI can substantially improve this situation from 65 nm on [17]. There is a great need to come up with novel scalable non-volatile RAM with SRAM properties. So, in the coming years, CMOS technology will go through numerous changes that will strongly affect circuit, IP and architecture design.

Platform architects will have to live with this reduced predictability. New methods to design reliable electronics with unreliable components must be developed to avoid worst-case design. One way to do this is by providing a run-time controller that minimizes impact of the variability of the individual system component. Recent work in this direction can be found in [18]. The technique is based on first computing Pareto optimal schedules for a multitask, multiprocessor architecture. This delivers a discrete set of operating points for a simple run-time task scheduler that guarantees the required cycle budget for minimal power and selects optimal V<sub>DD</sub>, clock frequency and back gate bias for IP blocks [11]. Variability transforms the the nominal Pareto points into point clouds in which the correct point needs to be sampled by onchip monitors for IP block timing, leakage and temperature. If timing is not satisfied a move is made to the next higher Pareto point satisfying the timing constraints. In frame based processing, monitoring is done per frame period by sacrificing a small part of the million-cycle budget available per frame. This methodology impacts all stages of design and "More-Moore" will critically depend on availability of platform architects skilled in these new design methods.

3. Lithography challenges: using 193 nm litho to write features below 90 nm causes increased proximity effects requiring highly regular cell and interconnect architectures to reduce design cost. In addition, Line Edge Roughness (LER) causes about 5 nm variance in line width due to the granularity of resists and phonons. This effect is another contributor to the variability issues mentioned above and needs innovative solutions. One way could be to use nano-technology to assemble atomic layers instead of litho and etching techniques but this is far from exploitation today.

192 Hugo De Man

4. Interconnect challenges: scaling causes faster logic but slower global interconnect. Chemical polishing techniques cause thickness variability up to 40% depending on the wiring context and strong capacitive interline coupling leads to a poor signal integrity. This will impact the way to design and layout on-chip communication. Global bus structures as in Fig. 5 do not scale well to higher complexity and global synchronism will have to be abandoned in favour of Globally Asynchronous Locally Synchronous (GALS) architectures. Furthermore, in [19] it is shown that dynamic power in standard cell wiring will be 5 to 10 times higher than in the cells themselves. In contrast, in [20] it is shown that structured and abutment based data-path layout shows a five-fold higher energy efficiency than standard cell layout at the expense of design time. Hence a renewed EDA activity on automated structured layout generators at nano-scale level is needed if we do not want to loose at the circuit level what we gain at the architectural level.

### Future platforms: towards tile based network-on-a-chip (NoC)

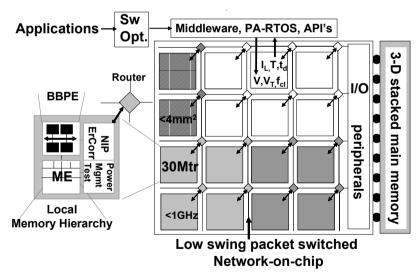


Fig. 7: Nano-scale platforms will be Globally Asynchronous, Locally Synchronous. Synchronous, Bus-Based-Multi Processors (BBPE) communicate over Networks-on-Chip. Network Interface Processor (NIP) decouples communication and computing. Error-correction (ErCorr) guarantees bit-error rate. Middleware, Power-Aware RTOS and Programmer Interfaces to be co-developed with the platform.

Based on the above, we can make a conjecture about future platform architectures, illustrated in Fig. 7. At the 45 nm node, even at a modest 500 MHz clock rate, 2 mm local copper wires represent a delay of 30% of the clock cycle. Hence iso-synchronous zones must be restricted to compute tiles of less than 4 mm<sup>2</sup> or about 30 Million transistors. Each tile can easily contain a synchronous bus-based multi-processor (BBPE) with local clocking, memory hierarchy, local power control and BIST test processor.

Synchronous tiles communicate globally in an asynchronous way over low swing interconnect to guarantee both low power and ease of design. Since global busses do not scale and interconnect (rather than transistor) becomes the scarce resource, Dally [21] has suggested to "route packets, not wires". This leads to the Network-On-Chip (NoC) concept [22]. Compute tiles are routing data-packets over a structured network fabric of shared wires while a standardized network Interface Processor (NIP) per tile decouples communication and computation. The NIP implements the communication protocol programmed upfront from a software service layer. It hides the network details from the computing tile and thus allows for a plug-and-play design strategy necessary for fast turn-around design of derivative platforms.

In [23] the first silicon implementation of synthesizable NoC IP is presented. A router IP block can be programmed for guaranteed and best-effort services. In 120nm an aggregate bandwidth of 80 Gbit/s in 0.26 mm<sup>2</sup> is reported for a 5\*5 router.

Low swing global interconnect is advantageous for low power but is more sensitive to supply and crosstalk noise. So, we must learn to live with errors by applying error coding/decoding (ErCorr) techniques that guarantee a bit error rate consistent with the required S/N ratio of the digital signals [24] as is normal practice in communication systems.

Finally power hungry communication to external DRAM memory can be reduced by 3D stacking of DRAM on top of the platform chip [3].

#### The devil is in the software

AmI systems must be adaptive to new software services, standards, communication protocols etc. As a result, not only the hardware must be delivered but also a number of software layers as shown in Fig. 7. First, similar to the JAVA virtual machine concept, a middleware layer is required to insure interoperability. Second, a platform specific, Power-Aware (PA) RTOS is needed to schedule tasks dynamically on the computing tiles and to minimize power consumption at run time. Finally low-level API's are needed for the

194 Hugo De Man

processors in the tiles. The development cost of this Hardware dependent Software (HdS) easily exceeds that of hardware development itself and adds considerably to the NRE cost. Therefore, the development of such complex systems will be restricted to a few grand industry alliances that can organize disciplined armies of engineers to design the AmI products of the future. To alleviate this problem, research is needed to come up with efficient methods for co-design of hardware and software platform architectures.

## 3. "More-than-Moore": ultra-creativity for ultra-low power and cost

Platform design of stationary and nomadic devices is all about managing giga-scale system complexity implemented in nano-scale CMOS. In contrast, design of wireless transducer network devices requires creative engineering to get to the ultimate limits of miniaturization, cost reduction and energy consumption.

This leads to the need for "More-than-Moore" i.e. a cost-effective integration of CMOS with MEMS, optical and passive components, new materials, bio-silicon interfaces, lifelong autonomous energy sources and grain-size 3D packaging. The complexity is not in the number of transistors but in combining technologies, circuit- and global networking architectures to obtain utmost simplicity for the sensor nodes themselves.

Microwatt devices are low duty cycle (< 1%), low throughput (1 b/s-10 kb/s) microsystems that unify nearly all design art in one package: sensor, signal conditioning, A/D conversion, signal processing (compression, interpretation, encryption), power-aware MAC layer, picoradio (wake-up Rx, data Tx), antennae, energy management and energy scavenging from the environment.

Fig. 8a shows an IMEC SiP realization of a 1.4 cm<sup>3</sup> 2.4 GHz EEC, ECG sensor mote using laminate packaging of bare dies, a solar-cell battery charger and integrated antenna. This system consumes 500 μW at 400 bps and 1% duty cycle. However further integration to e-grain size and lower power will be necessary. Indeed, for true energy scavenging, only solar cells, piezo-electric MEMS (vibrations, shocks) and thermal generators have proven to be successful but their average power capacity is limited to 100 microwatt/cm<sup>3</sup> [25]. This means less than 10 mW peak power during active periods for a 1% duty cycle. So peak power per subfunction should be below 2 mW. For 1% duty cycle and 90nm technology this allows for about 5M 8bit ASIP operations/sec for all data and signal processing and less than 2 nJ/bit transmission energy for 10 kbps. This requires an order of magnitude power reduction with

respect to Zigbee and Bluetooth, especially in the RF part. This can only be obtained by covering very short distances (< 10 m) and/or using multi-hop networking and RF architectures of utmost simplicity. Pioneering work in this direction can be found in [26] [27] (Fig. 8b).

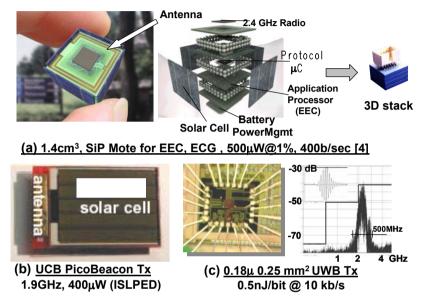


Fig. 8: Sensor radio's: (a) Example of a sensor mote SiP for wearable medical applications (IMEC); (b) Solar Cell Powered Ultra-Low-Power Transmitter (U.C. Berkeley) (c) Ultra-Low power Ultra-Wide Band transmitter for Body Area Network (IMEC).

For Body Area Networks and accurate positioning UWB radio could be a solution. Fig. 8c shows an IMEC design of a 180 nm 0.6\*0.6 mm<sup>2</sup> UWB transmitter in the 3-5 GHz band. All circuits are digital except the power output stage and a triangular wavelet shaper. This extreme simplicity leads to 0.5nJ/bit transmit energy at 10 kb/s and 10 pulses/bit. Active power is 2 mW. In [28] CSEM and Delft University approach UWB by ultra-wide band FM (UWB-FM) which leads to very simple TxRx architectures [28].

Clearly there are great engineering challenges in this domain which is so crucial for AmI. Not the least of the challenges is security of sensor networks which, together with network protocol and data storage and lightweight operating system [29] require most of the computational power. New ideas in efficient, safe and cheap encryption for sensors are urgently needed and will

196 Hugo De Man

require ultra low voltage (< 500 mV) low leakage computation such as proposed in [30][31]. In [32] a 32 bit adder in 130 nm reaches 0.3 pJ/add at 300 mV with forward body bias. With such a circuit technique and using massive parallelism, one would be able to reach about 1 Gops/mW which opens great perspectives if we can overcome the architectural and nano-scale challenges mentioned above.

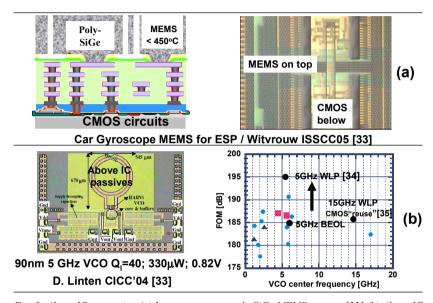


Fig. 9: Above IC processing (a) Low temperature poly-SiGe MEMS process [33] (b) Above IC Hi-Q inductors and capacitors lead to low power VCO, area savings and reuse of CMOS circuit design.

Massive deployment of sensors or RFID tags requires cost reduction to the single dollar or cent range but this conflicts with very cheap integration of standard CMOS with non-CMOS devices s.a. passive components and MEMS and even with biotissues. SiP techniques and techniques for low temperature wafer scale integration "above silicon" allow for the "reuse" of silicon wafers and for adding passive components and MEMS on top of them at low cost. In [33] and Fig. 9a an above IC poly-SiGe MEMS technology is reported and illustrated by a MEMS gyroscope on top of the CMOS signal processing.

Fig. 9b shows above IC processing for depositing high quality RF passives [34]. This allows to run a 90 nm CMOS VCO at 0.82 Volts for 330  $\mu$ W

power and  $-155~\mathrm{dBc/Hz}$  @ 1MHz phase noise. In [35] it is shown how "reuse" of the 5 GHz CMOS part with another above IC inductor leads to a 15 GHz oscillator with better figure-of-merit than with state of the art full CMOS integration.

Healthcare and wellness will be an important application domain of AmI and interfacing between electronics and living bio-tissues will be of crucial importance. In [37][38] new breakthroughs in coupling ionics to electronics and in cell manipulation are reported.

### 4. Conclusions

Ambient Intelligence is the next wave of information technology for enhancing human experience. It implies a consumer-oriented industry driven by software from the top, and enabled and constrained alike by nano-scale physics at the atomic level.

"More-Moore" will be needed to deliver Giga-ops computation and GHz communication capabilities for stationary and wearable devices. The grand challenge will be to design flexible multi-processor platforms with two-orders-of-magnitude lower power dissipation than today's microprocessors at one twentieth of the cost, while coping with the realities of nano-scale physics. We have presented a number of emerging techniques to cope with this challenge. Design of such systems will depend critically on our ability to create multi-disciplinary alliances able to cover the huge span between AmI dreams and their implementation in the interaction of billions of nano-scale devices.

On the other hand, "more-than-Moore" technology is needed for the design of autonomous wireless sensor networks. The complexity is not in the number of transistors but in clever combinations of technologies, circuits and system architectures to design ultra-low power, ultra-low cost, ultra-simple sensor motes for AmI.

Both "More-Moore" and "More-than-Moore" rely in the first place on the availability of creative engineers able to approach the problems from a holistic perspective. Engineering schools should reflect on the impact of this evolution on education and research by paying more attention to the application of technology to solve the grand societal challenges of the 21st century.

### References

 T. Basten et al., "Ambient Intelligence: Impact on Embedded System Design", Kluwer Academic Publishers. 2003 198 Hugo De Man

[2] J. Ostermann et al.,"Video Coding with H.264/AVC: Tools, Performance and Complexity", *IEEE Circuits and Systems Magazine*, pp. 8-28, First Quarter 2004

- [3] E. Beyne, "3D Interconnection and Packaging: Impending Dream or Reality" *IS-SCC Dig. Techn. Papers*: pp. 138-139, Feb. 2004
- [4] T. Torfs et al., "Wireless Network of Autonomous Environmental Sensors", Proc. IEEE Sensors 2004, Vienna, Oct. 2004
- [5] R. Gonzales et al., "Energy Dissipation in General Purpose Microprocessors", IEEE J. of Solid State Circuits, Vol. 31, No.9, pp. 1277-1284, Sept. 1996
- [6] Theo Claasen, "High Speed: Not the Only Way to Exploit the Intrinsic Computational Power of Silicon", *ISSCC Digest of Technical Papers*, pp. 22-25, Feb. 1999
- [7] F. Catthoor et al., "Code Transformations for Data Transfer and Storage Exploration Preprocessing in Multimedia Processors", *IEEE Design & Test*, Vol. 18, No. 3, pp. 70-81, May 2001
- [8] H. De Man et al., "Filling the Gap Between System Conception and Silicon/Software Implementation", ISSCC Dig. of Tech. Papers pp. 158-159, Feb. 2002
- [9] F. Catthoor et al., "Data Access and Storage Management for Embedded Programmable Processors", Kluwer Academic Publishers, 2002
- [11]P. Yang et al., "Energy-Aware Runtime Scheduling for Embedded Multiprocessor SoC's", *IEEE Design and Test*, Vol. 18, No. 3, pp.70-82
- [12]B. Mei et al., "ADRES: An architecture with tightly coupled VLIW processor and coarse-grained reconfigurable matrix" in *Field-Programmable Logic and Appli*cations, 2003
- [13]see e.g. www.retarget.com; www.coware.com; www.tensilica.com; www.arc.com
- [14]www.siliconhive.com
- [15]T. Sakurai, "Perspectives on Power-Aware Electronics", ISSCC Dig. Of Techn. Papers, pp. 26-27, Feb. 2003
- [16]K. Itoh et al., "Review and Future Prospects of Low-voltage Embedded RAMs", *Digest of CICC 2004*, Oct. 2004
- [17]M. Yamaoka et al., "Low Power SRAM Menu for SoC Application Using Ying-Yang Feedback memory Cell", *Dig. Symp. VLSI Circuits* pp. 288-291, June 2004
- [18]B. Colwell et al, "Better than Worst Case Design". Theme issue in *IEEE Computer*, Vol. 37, No.3, pp. 40-73
- [19]C.J. van der Poel et al., "On ambient intelligence, needful things and process technologies", *Proceedings of ESSCIRC 2004*, pp. 3-10
- [20]O. Weiss, M. Gansen, and T. G. Noll, "A flexible data path generator for physical oriented design," in *Proc. 2001 ESSCIRC*), pp. 476–479. Sept. 2001
- [21]W. Dally et al., "Route packets, not wires: On-chip interconnection networks", *Proc. Design Automation Conf. 2001*, pp. 684-689
- [22]A. Jantsch, H. Tenhunen (EDS.), "Networks on Chip", Kluwer Academic Publishers, 2003

- [23]E. Rijpkema et al., "Trade-offs in the design of a router with both guaranteed and best-effort services for networks on chip" *Proc. 2003 of DATE Conf.*, pp. 350-355, March 2003
- [24]D. Bertozzi et al., "Low Power Error Resilient Encoding For On-Chip Data Busses" *Proc.* 2002 DATE conf., pp. 102-109, March 2002
- [25]S. Roundy et al. "Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations", Kluwer Academic Publishers, Jan. 2004
- [26]J. Rabaey et al., "PicoRadios for Wireless Sensor networks: The Next Challenge in Ultra-Low Power Design", ISSCC Dig. Of Techn Papers, pp. 200-210, Feb. 2002.
- [27]S. Roundy et al., "A 1.9 GHZ Transmit Beacon using Environmentally Scavenged Energy", Proc. IEEE ISLPED'03, Seoul/Korea, 2003
- [28]J. Gerrits et al., "UWB Considerations for "My personal Global Adaptive Network" Systems", *Proc. Of 2004 ESSCIRC*, pp. 45-56, Sept. 2004
- [29]see e.g. http://www.tinyos.net/
- [30]A. Wang et al., "A 180mV FFT Processor Using Sub-Threshold Circuit Techniques", ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 292-293, Feb. 2004
- [31]B. Calhoun et al., "Ultra-Dynamic Voltage Scaling Using Sub-Threshold Operation and Local Voltage Dithering in 90 nm CMOS", ISSCC Dig. Of Techn. Papers, Feb. 2005
- [32]K. Ishibashi et al., "A 9 µW 50MHz 32b Adder Using a Self-Adjusted Forward Body Bias in SoCs", *ISSCC Dig. of Tech. Papers*, pp. 116-117, Feb. 2003
- [33]A. Witvrouw et al., "Processing of MEMS Gyroscopes on Top of CMOS ICs", *IS-SCC Dig. of Tech. Papers*, Feb. 2005
- [34]D. Linten et al., "A 328 μW 5GHz voltage-controlled oscillator in 90nm CMOS with high quality thin film post-processed inductor", *Proc. CICC*, Orlando, Sept. 2004
- [35]G. Carchon et al., "Thin Film as Enabling Passive Integration Technology for RF-SoC and SiP", ISSCC Dig. of Tech. Papers, Feb. 2005
- [36]M. Dubois et al., "Integration of High-Q BAW Resonators and Filters above IC", ISSCC Dig. Of Techn. Papers, Feb. 2005
- [37]P. Fromherz, "Joining Ionics and Electronics: Semiconductor Chips with Ion Channels, Nerve Cells and Brain Tissue", ISSCC Dig. Of Techn. Papers, Feb. 2005
- [38]H. Lee et al., "An IC/Microfluidic Hybrid Microsystem for 2D Magnetic Manipulation of Individual Biological Cells", ISSCC Dig. Of Techn. Papers, Feb. 2005

Wolf-Joachim Fischer, Hans-Günter Despang, Hans-Jürgen Holland, Daniele Wiedemuth

# Body Area Networks – Anwendung in telemedizinischen Systemen

### 1. Das kriselnde deutsche Gesundheitswesen

Die gewaltigen Fortschritte der Medizin in den letzten 20 Jahren, insbesondere der Einsatz von High Tech-Geräten, wie z.B. Beispiel Herzschrittmachern oder Kernspin-Tomographen, haben zu dramatischen Veränderungen der demografischen Entwicklung in den Industrieländern geführt. In Deutschland steigt die durchschnittliche Lebenserwartung pro Jahr um ungefähr 3 Monate an. Der Anteil der älteren Menschen über 65 Jahre an der Gesamtbevölkerung nimmt kontinuierlich zu (Abb. 1), während andererseits der der jüngeren unter 25 Jahren ständig abnimmt. Im Jahr 2020 wird es zum ersten Mal in der Geschichte mehr alte als junge Menschen geben.

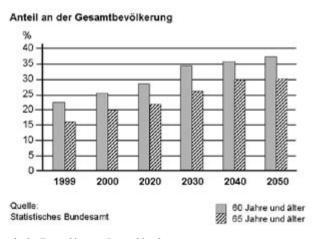


Abb. 1: Demografische Entwicklung in Deutschland

218 W.-J. Fischer et al.

Im Ergebnis dieser Entwicklung steigen die Krankheitskosten insbesondere im Alter stark an. Während die Kosten im Altersbereich von 65 bis 85 Jahren bei durchschnittlich knapp 6000 Euro pro Jahr liegen, betragen sie bei über 85 Jährigen fast das Doppelte.

Da die seitens der Gesellschaft die für die medizinische Versorgung zur Verfügung stehenden Mittel begrenzt bleiben werden, ist eine Beibehaltung oder sogar Verbesserung der Qualität der medizinischen Versorgung nur möglich, wenn die Kosten für die medizinische Betreuung gesenkt werden. Einen erheblichen Kostenfaktor stellen dabei die stationären Krankenhauskosten dar. Ein Erfolg versprechender Lösungsansatz besteht darin, die Verweildauer im Krankenhaus zu senken und medizinische Leistungen in den Heimbereich zu verlagern. Ohne Erhöhung des Risikos für den Patienten wird das nur möglich sein, wenn durch telemedizinische Systeme eine durchgängige Patientenüberwachung gewährleistet bleibt.

In Deutschland wurden laut einer Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes 2004 im Jahr 2002 223,6 Mrd. Euro für Krankheitskosten ausgegeben. Mit 35,4 Mrd. Euro lagen dabei die Kosten für Krankheiten des Kreislaufsystems an der Spitze. Gerade in diesem Bereich können damit neue technische Entwicklungen zu signifikanten Kostenreduzierungen führen.

## 2. Telemedizin – ein neuer technischer Lösungsansatz

Die Telemedizin ist ein Teilbereich der Telematik im Gesundheitswesen und umfasst sowohl die Diagnostik als auch die Therapie. Kennzeichnend für die Telemedizin ist, dass dabei eine räumliche oder zeitliche Distanz zwischen Arzt und Patienten oder zwischen zwei sich konsultierenden Ärzten mittels Telekommunikation überbrückt wird.

Die Telemedizin wird bereits heute in den Bereichen Telediagnostik, Teleradiologie, Telekonsultation, Telechirurgie, Telekardiologie, Telepathologie und Telemontitoring eingesetzt. Im Mittelpunkt dieses Beitrages stehen Anwendungen im Bereich des Telemonitorings.

In einer Studie von Korb [1] wurden die Anzahl von Krankenhauseinweisungen unter dem Leitsymptom "Brustschmerz" für eine Gruppe, die mit Diagnosegeräten (EKG) im Heimbereich ausgerüstet war und mit einem telemedizinischen Zentrum in Kontakt stand, sowie einer konventionellen Vergleichsgruppe untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass durch den Einsatz telemedizinischer Lösungen die Anzahl an Notarzteinsätzen sowie stationären Aufnahmen signifikant gesenkt werden konnte. Ver-

bunden damit sind eine Reduzierung der Kosten sowie eine Senkung der Mortalitätsrate.

Ein Netzwerk für die telemedizinische Versorgung von Patienten im Heimbereich (TeleHomeCare) besteht in der Regel aus drei Komponenten. Im Heimbereich des Patienten bzw. am Körper des Patienten befinden sich verschiedene medizinische Diagnosegeräte. Ein Gateway überträgt die medizinischen Daten über öffentliche Netze wie GSM, UMTS oder Internet zu einem telemedizinischen Auswertezentrum. Von diesem Zentrum wird entweder der Notarzt alarmiert oder die Daten werden an den Hausbzw. Facharzt oder ein Krankenhaus weitergeleitet (Abb. 2).

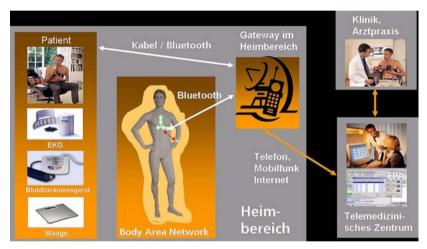


Abb. 2: Netzwerk für TeleHomeCare

Im einfachsten Fall befinden sich im häuslichen Bereich des Patienten medizinische Standarddiagnosegeräte, wie EKG, Blutdruckmessgerät oder Waage, die technisch so aufgerüstet sind, dass eine Datenübertragung über das stationäre Telefonnetz zum telemedizinischen Zentrum möglich ist. Moderner, weil im Einsatz wesentlich flexibler und leistungsfähiger sind so genannte Body Area Networks.

## 3. Body Area Networks

Ein Body Area Network ist ein Sensornetzwerk, dessen Knoten drahtlos miteinander sowie mit einer Basisstation (Gateway) kommunizieren können. Die Sensorknoten beinhalten medizinische Diagnosegeräte, die vom Patienten am 220 W.-J. Fischer et al.

Körper getragen werden. Zukünftig ist auch die Einbindung von Implantaten (intrakorporale Sensoren) in ein solches Netzwerk bereits angedacht. Die Kommunikation der Sensorknoten untereinander erfolgt drahtlos mittels Bluetooth, ZigBee oder proprietären Funksystemen. Für die Übertragung großer Datenmengen, wie sie bei einem Langzeit-EKG anfallen, zur Basisstation ist die Verwendung optischer Übertragungssysteme (High-Speed-IrDa) eine interessante Alternative.

Beim Einsatz von Sensoren, die außerhalb des Körpers getragen werden (extrakorporal), wird unterschieden zwischen Systemen [2], bei denen sich die Sensoren an der Körperoberfläche befinden bzw. in die Kleidung integriert sind (Abb. 3).

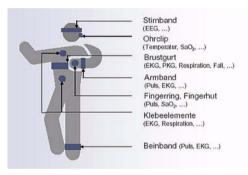


Abb. 3a: Sensoren an der Körperoberfläche

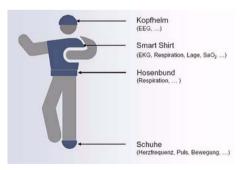


Abb. 3b: Sensoren in der Kleidung (wearable)

Die Einbindung von Implantaten, wie Herzschrittmacher, implantierbarer Defibrillator, künstliche Organe, Drug Delivery Systeme, Endoskop Kapseln oder Cochlear Implantate in Body Area Networks gewinnt zunehmend an Interesse. Die Firma Biotronik hat bereits einen Herzschrittmacher vorgestellt, der in der Lage ist, Daten über ein externes Mobilfunktelefon (Gateway) an ein medizinisches Auswertezentrum zu übertragen.

Bei der Funkkommunikation mit Implantaten muss berücksichtigt werden, dass mit zunehmender Frequenz die Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen in das Körpergewebe stark abnimmt (Abb. 4). Systeme wie Bluetooth oder ZigBee, die im Frequenzbereich von 2,4 GHz arbeiten, kommen schon aus diesem Grunde, selbst wenn man den relativ großen Energiebedarf dieser Systeme beim Senden vernachlässigt, für Implantate nur bedingt in Frage.

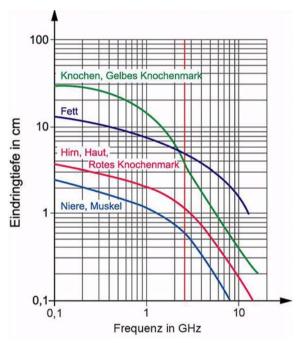


Abb. 4: Frequenzabhängige Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in Körpergewebe Quelle: Elektromagnetische Felder im Alltag, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

# 4. Beispiel für ein Body Area Network für die Herz-Kreislaufüberwachung

Im Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme Dresden wurde ein Body Area Network für die Überwachung von Patienten mit Herz-Kreislauf-

222 W.-J. Fischer et al.

Krankheiten entwickelt [3]. Dieses System besteht aus einem 3-Kanal-EKG mit Bluetooth-Übertragung, einem Photoplethysmographie-Sensor mit Bluetooth-Modul sowie einem Labtop oder PDA als Basisstation (Abb. 5). Damit ist es möglich, ein 3-Kanal-EKG über 48 Stunden aufzuzeichnen sowie modellbasiert über die Messung der Pulswellenlaufzeit vom Herzen (R-Zacke) bis zur Hand (Photoplethysmographie-Sensor) den systolischen und diastolischen Blutdruck kontinuierlich zu bestimmen [4]. Das Verfahren basiert darauf, dass die Geschwindigkeit der Blutwelle vom Herzen zu einer Extremität direkt vom Blutdruck abhängt. Näherungsweise wird dieser Zusammenhang durch ein lineares Gleichungssystem [5]

$$p_{svs} = m_{svs} * 1/t_{RP} + b_{svs}$$
 (1)

$$p_{dias} = m_{dias} * 1/t_{RP} + b_{dias}$$
 (2)

mit

p<sub>svs</sub>, p<sub>dias</sub> – systolischer bzw. diastolischer Blutdruck

t<sub>RP</sub> – Pulswellenlaufzeit

m<sub>svs</sub>, m<sub>dias</sub>, b<sub>svs</sub>, b<sub>dias</sub> – probandenspezifische Konstanten

beschrieben. Gegenüber der verbreiteten auskultatorischen Blutdruckmessung mit aufblasbarer Manschette nach Korotkoff hat das Verfahren den Vorteil, dass eine kontinuierliche, pulsschlaggenaue Blutdruckbestimmung möglich ist und keine für ein Langzeitmonitoring störende Manschette erforderlich ist. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die probandenspezifischen Konstanten vor der ersten Messung und in zeitlichen Abständen durch Vergleichsmessungen bestimmt werden müssen. Dazu sind am Probanden mindestens 2 Messungen bei unterschiedlichen Blutdruckwerten mit einem Vergleichsmessgerät, das z.B. auf dem auskultatorischen Blutdruckmessverfahren beruht, durchzuführen. Unterschiedliche Blutdruckwerte des Probanden lassen sich erreichen, wenn die Messungen in Ruhe und nach körperlicher Belastung durchgeführt werden. Abbildung 6 zeigt im oberen Teil einen Ausschnitt aus dem EKG, das mit der drahtlosen 3-Kanal EKG-Folie gemessen worden ist. Im unteren Bildteil ist das Messsignal des Photoplethysmographiesensors dargestellt. Aus beiden Signalen kann die Pulswellenlaufzeit t<sub>RP</sub> bestimmt werden. Der systolische bzw. diastolische Blutdruck wurde mit den Gleichungen 1 und 2 berechnet, nachdem die probandenspezifischen Konstanten experimentell bestimmt worden waren. Der Zusammenhang zwischen Pulswellenlaufzeit und Blutdruck ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen Blutdruck und Pulswellenlaufzeit wird in guter Näherung bestätigt. Die Messungen wurden an 5 gesunden Probanden durchgeführt und im Abstand von wenigen Tagen bis maximal 3 Wochen wiederholt. Für die Bestimmung der probandenspezifischen Konstanten wurden jeweils 30 Messwerte verwendet.



Abb. 5a: Patient mit drahtlosem 3-Kanal-EKG, PDA mit Bluetooth als Basisstation Ouelle: FHG-IPMS

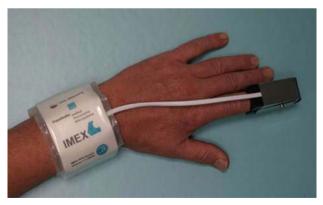


Abb. 5b: Photoplethysmographie-Sensor Quelle: FHG-IPMS

224 W.-J. Fischer et al.

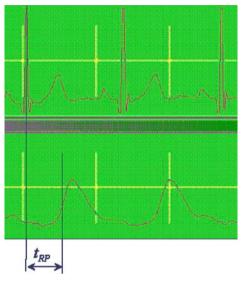


Abb. 6: Bestimmung der Pulswellenlaufzeit tRP aus dem EKG- und Photoplethysmographiesignal

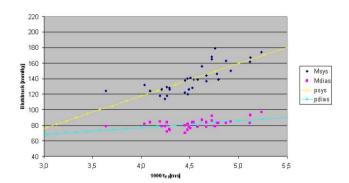


Abb. 7: Modellbasiert bestimmter systolischer und diastolischer Blutdruck in Abhängigkeit der gemessenen Pulswellenlaufzeit

Der Patient kann sich mit dem Body Area Network auch außerhalb seiner Wohnung frei bewegen. Alle Daten werden im Body Area Network für maximal 48 Stunden aufgezeichnet. Gelangt der Patient im Heimbereich in die Nähe des Gateways, so erfolgt automatisch die Datenübertragung zum Gate-

way und weiter über öffentliche Netze (GSM, UMTS) zum medizinischen Auswertezentrum. Dabei müssen teilweise erhebliche Datenmengen übertragen werden, wie das folgende Beispiel zeigt. Ein 24h-3-Kanal-EKG mit einer Abtastrate von 200 Samples pro Sekunde (Monitoring, DIN EN 60601-2-47) erzeugt mit einem AD-Wandler mit 12 bit Wandlungsbreite eine Datenmenge von 78 MByte. Die Tabelle 1 zeigt, welche Übertragungszeiten sich für die verschiedenen Übertragungsverfahren ergeben. Für den Fall, dass das gesamte 24h-EKG auf einmal vom Body Area Network zum Gateway übertragen wird, so ergeben sich nur mit dem High-Speed-IrDa akzeptable Übertragungszeiten. Eine Übertragungszeit von fast 15 Minuten bei Verwendung von Bluetooth liegt sicher an der Grenze dessen, was vom Patienten toleriert wird. Für die Übertragung vom Gateway zum medizinischen Auswertezentrum bietet sich eine Übertragung mit UMTS oder ADSL an. Deutlich günstigere Verhältnisse ergeben sich, wenn eine sensornahe Auswertung der Daten vorgenommen wird und nur medizinisch relevante Daten übertragen werden. Aus juristischen Gründen müssen aber in diesem Fall alle Messdaten im Body Area Network bis zum Abschluss der Befundung in einem zerstörungsfreien Speicher (Flash-Karte) gesichert werden.

Verfahren	Datenüber- tragungsrate	Minimale Übertragungsdauer für ein EKG von 78 MByte
WLAN	11 MBit/s	0,9 min
GSM (GPRS-Technologie)	53,6 KBit/s	194 min = 3,2 h
UMTS (HSDPA-Technologie)	1,8 MBit/s	5,8 min
ISDN	128 KBit/S	81,3 min = 1,35 h
ASDL	8 MBit/s	1,3 min
ZigBee	250 KBit/s	41,6 min
Bluetooth	723 KBit/s	14,4 min
16 MBit High-Speed-IrDa	12 MBit/s	0,9 min

Tab. 1: Übertragungsdauer für ein 24h-3-Kanal-EKG für verschiedene drahtlose Übertragungsverfahren

Für ein Langzeit-Monitoring der Patienten ist es zweckmäßig das Body Area Network in Textilien zu integrieren. Im Fraunhofer IPMS wurde dazu ein EKG-Shirt sowohl für Männer als auch für Frauen entwickelt (Abb. 8).

226 W.-J. Fischer et al.



Abb. 8: EKG-BH-Shirt mit integriertem 3-Kanal-EKG und Bluetooth-Modul Ouelle: FHG-IPMS

### 5. Ausblick

Gegenwärtig erfolgt ein Monitoring von Herz-Kreislauf-Parametern (EKG, Blutdruck) in der Regel über 24 Stunden. Künftige Systeme werden in der Lage sein, die Überwachung über mindestens eine Woche ohne Batteriewechsel durchführen zu können. Die dabei anfallenden großen Datenmengen erfordern eine sensornahe Signalverarbeitung. Damit ist sowohl eine Vorbefundung (Alarmfunktion) als auch eine erhebliche Datenreduktion möglich.

Die zurzeit im Einsatz befindlichen Systeme werden teilweise erheblich durch Bewegungsartefakte gestört. An der Erkennung und Unterdrückung solcher Artefakte wird gearbeitet.

Ein Langzeitmonitorinjg ist nur dann erfolgreich durchführbar, wenn eine hohe Patientenakzeptanz erreicht wird. Ein hoher Tragekomfort der Systeme

ist dabei eine wesentliche Voraussetzung. Ein Erfolg versprechender Ansatz stellt dabei die Integration von Body Area Networks in Textilien dar.

### Literatur

- [1] H. Korb, D. Baden, M. Wähner, T. Helms, Ch. Zugck: Telemonitoring bei "Akutem Koronarsyndrom"; Proc. Telemed 2006, 7.-8. April 2006, Berlin
- [2] W. Niederlag: Smart Home und Telemedizin. Ringvorlesung "Computeranwendungen in der Medizin"; RWTH Aachen, 2005 www.rwth-aachen.de/fi/Ww/aktuelles/Aachen-Ringvorlesung-05.12.2005.pdf
- [3] G. Despang, H. J. Holland, W. J. Fischer, B. Jettkant, B. Clasbrummel: Nichtinvasive kontinuierliche Blutdruckmessung mit drahtlosem EKG und Photo-Plethysmographie-Sensor; Proc. Telemed 2005, 8.-9. Mai 2005, Berlin, pp. 262-267
- [4] G. Despang, H.J. Holland, D. Wiedemuth, W. J. Fischer, P. Heymer, E. Wunderlich: Blutdruckmessung über Pulswellenlaufzeit mit Task Force Monitor, EKG-Folie und Photo-Plethysmographie-Sensor; Gemeinsame Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Biomedizinische Technik, 6.-9. September 2006, Zürich
- [5] D. Barschdorff, M. Erig: Kontinuierliche Blutdruckbestimmung während des Belastungs-EKG; Biomedizinische Technik 43(1998), 34-39

### Bernd Michel

# Zuverlässigkeitsprobleme im Hightech-Bereich – Lösungsansätze und Konzepte

Der Autor berichtet über seine Erfahrungen auf dem Gebiet der Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeits- und Lebensdauerbewertung als Leiter des Fraunhofer Micro Materials Centers Berlin sowie Präsident des European Centers for Micro- and Nanoreliability (EUCEMAN). Im Vordergrund stehen Fragen der mechanischen und thermischen Zuverlässigkeitsanalyse und Bewertung, wobei der Autor die enge Verbindung von Zuverlässigkeitskonzept, Simulation, experimenteller Verifikation und Anwendung vertritt. Auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsforschung gibt es heute noch sehr viele offene Fragen. Die Probleme der Zuverlässigkeit und Lebensdauer erlangen zunehmend eine größere Bedeutung, da von ihrer Lösung zahlreiche Fragen der weiteren Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft abhängen. Die zahlreichen Rückrufaktionen renommierter Firmen im Automobilbau oder die Unfälle im Zusammenhang mit den Space-Shuttle-Flügen der letzten Zeit zeigen nur, dass Forschungen zur Zuverlässigkeit auch künftig von erheblicher Bedeutung sein werden.

# 1. Neue Zuverlässigkeitsanforderungen im Mikro- und Nanobereich

Die klassischen Methoden der Zuverlässigkeitsbewertung von Komponenten, Bauteilen und Systemen basierend auf Festigkeitshypothesen, klassischer Bruchmechanik, Lebensdauerhypothesen auf der Basis von Manson-Coffin, Wöhlerkurven und zahlreichen verallgemeinerten Ermüdungs-, Kriech- und Schädigungskonzepten erfahren gegenwärtig neue Impulse durch die stärkere Einbeziehung der physikalischen Mechanismen unter Berücksichtigung der realen Mikro- und Nanostrukturen der Werkstoffe. Die Mikrosystemtechnik und die modernen Nanotechnologien haben in letzter Zeit maßgeblich mit dazu beigetragen, dass die Vorgänge in lokalen Werkstoffbereichen genauer untersucht werden und die vorwiegend phänomenologisch-makroskopischen Lebensdauerkonzepte ergänzt und z.T. deutlich erweitert werden konnten.

230 Bernd Michel

Dieser Zugang ist als eine Bereicherung der bisherigen Zuverlässigkeits- und Lebensdauerkonzepte anzusehen. Durch die Mikrosystemtechnik haben sich z.B. in Chipumgebung in den letzten Jahren moderne Zuverlässigkeitskonzepte etabliert, die das lokale Bruch- und Rissverhalten sehr viel genauer berücksichtigen als bisher. Im Electronic Packaging setzten sich zunehmend Konzepte und Kriterien eines sogenannten "Microreliability"-Zugangs durch, der nicht nur auf klassischen kontinuumstheoretischen Modellen basiert, sondern die lokalen Verformungsvorgänge einbezieht – inklusive lokale Defektstrukturen und Phänomene wie Diffusion, Delamination, Migration etc.. Die Möglichkeiten moderner, lokaler Feldmesstechniken wie AFM, FIB, AFAM, SPM etc. oder lokale Deformationsanalysen wie microDAC, nanoDAC etc. (DAC: Deformation Analysis by Correlation) tragen maßgeblich dazu bei, die Berechnungsverfahren mit wichtigen Werkstoffdaten zu "füttern" und so effektiv in Richtung "Design for Reliabity" voranzukommen.

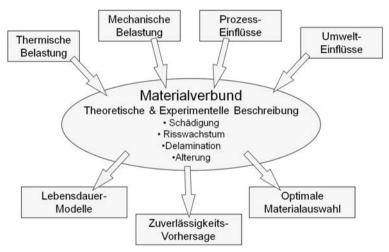


Abb. 1: Genaue Zuverlässigkeitsmodelle erfordern gute Werkstoffmodelle

# 2. Digitale Bildkorrelationsverfahren – neue Methoden zur experimentellen Verformungsanalyse im Mikro- und Nanobereich

Die Methoden der digitalen Bildkorrelationstechniken erfreuen sich einer ständig wachsenden Bedeutung in vielen Bereichen der modernen Naturwissenschaften und in der Technik. Ihr großer Vorteil ist es, dass sie mit zahlrei-

chen Bilderzeugungstechniken produziert und angewendet werden können. Lasermesstechnik, klassische, optische Methoden, aber auch die Bilderzeugung in sehr kleinen Werkstoffbereichen z.B. mittels Elektronenmikroskopie (SEM, TEM) oder im AFM, AFAM oder im Focus-Ion-Beam-Gerät (FIB) sind nutzbar zur digitalen Grauwertkorrelationsanalyse. Darüber hinaus sind neben den Deformationsmessungen auch andere Feldgrößen wie z.B. Temperatur, Diffusionsfelder, magnetische Strukturen etc. denkbar.

Am Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) wurden die DIC-Techniken (DIC: Digital Image Correlation Techniques) in den letzten Jahren vorwiegend im Bereich der lokalen Verformungsanalyse eingesetzt und weiterentwickelt. Die DAC-Verfahren sind spezielle DIC-Techniken, die z.B. mittels Lasermesstechniken (LaserDAC), im Elektronenmikroskop (microDAC) oder aber auch im Nanobereich z.B. mittels AFM, AFAM oder anderen SPM-Methoden (nanoDAC) zur hochgenauen Ermittlung von Deformationsfeldern bestens geeignet sind. Die direkte Verbindung derartiger Verfahren mit den Konzepten der Zuverlässigkeitsbewertung (Bruch-, Riss- und Schädigungskonzepte, Lebensdauer- und Prognosetools) führt zu einer neuen Qualität dieser Verfahren im Bereich der Mikrosystemtechnik und neuerdings auch der Nanotechnologie/Nanoanalytik ("Nanoreliability").

Neueste Untersuchungen mittels FIB gestatten z.B. die Ermittlung lokaler Eigendeformationen/Eigenspannungen im direkten Chipbereich mit höchsten Präzisionsansprüchen, die mit klassischen Methoden nicht erreichbar sind. Für das neue FIBDAC-Messverfahren, einer Variante von nanoDAC, wurde z.B. der Fraunhofer-Preis 2005 an ein Team des Autors vergeben. Die Methode gestattet es, z.B. die Lebensdauer von Chipverbindungen unter Berücksichtigung lokaler Eigenspannungen sehr viel genauer zu prognostizieren als mit herkömmlichen Methoden.

### 3. Innovative Messverfahren microDAC, nanoDAC und FIBDAC

Die genannten Verfahren basieren auf dem numerischen Vergleich von Bildern verschiedener Verformungszustände (thermisch, mechanisch u.a.) von Proben- oder Bauteilbereichen, die wesentlich für die Lebensdauer der jeweiligen Komponenten sind. Dieser Bildvergleich erfolgt heute natürlich mittels moderner Computertechnik anhand fortgeschrittener Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Die Bilder selbst können auf optischem Wege z.B. mittels Rasterelektronenmikroskopie oder Atomic Force Microscopy erhalten werden. Auch die Akustomikroskopie und andere bildgebende Verfahren sind

232 Bernd Michel

möglich. Eine speziell für die Mikro- und Nanotechnologie geeignete Spezialvariante des microDAC-Verfahrens ist die nanoDAC-Technik, die z.B. im Interface-Bereich um Mikrorisse bzw. den Grenzflächen- und Grenzschichtbereichen Ergebnisse liefern kann.

Worin besteht das Grundprinzip von microDAC und nanoDAC? Die Grundidee des Konzeptes basiert auf der Tatsache, dass Mikroskope der verschiedenen Arten in der Lage sind, lokale, charakteristische Muster aufzuzeichnen – neben der mehr globalen Form und Struktur. Falls diese Muster nun zeitlich stabil bleiben und in digitalisierten Bildern aufgezeichnet werden können, können sie sozusagen als lokale Markierung des Bildes dienen. Diese Muster-("Markierungen")-Mikrostrukturen bleiben nun sogar oft während nachfolgender thermischer/mechanischer Belastungen der Komponenten und Bauteile relativ stabil und können nach den Belastungen wieder gefunden und aufgezeichnet werden. Es ist nun möglich, mittels Bildverarbeitungsalgorithmen eine Reihe von lokalen Verschiebungsfeldern dieser Muster zwischen zwei oder mehreren verschiedenen Zuständen zu ermitteln. Man geht dabei von der unter bestimmten Voraussetzungen gültigen Hypothese aus, dass das reale Verschiebungsfeld einer Umgebung eines Bildpunktes P, der z.B. durch Verformung zum Bildpunkt P' verschoben wird, durch ein Maximum der Korrelation der Grauwertverteilungen dieser beiden Bildumgebungen P und P' charakterisiert wird. Natürlich sind hier zahlreiche technische Fragen zu beachten und auch einige experimentelle Bedingungen einzuhalten. In der Realität zeigt sich aber, dass man sehr genaue lokale Verschiebungsfelder erhalten kann. Mit geeigneten Bearbeitungsmethoden lassen sich daraus auch die Deformationsfelder hinreichend genau ermitteln. Bei bekanntem Werkstoffverhalten sind dann auch die thermischen bzw. mechanischen (lokalen!) Spannungsfelder bekannt. Interessant ist, dass man auch spezielle abgewandelte Methoden des microDAC-Verfahrens entwickeln konnte, wo Werkstoffkennwerte bestimmt werden können. Das gilt z.B. für die Ermittlung von CTE (thermischen Ausdehnungskoeffizienten), den sonst so schwer zu ermittelnden Poissonschen Zahlen usw., und das direkt im Lotbereich bzw. im Bereich der Grenzschichten zwischen den verschiedenen Werkstoffbereichen von Loten.

# 4. Zuverlässigkeitsbewertung durch Kopplung von Simulation und DIC-Messtechniken

Einem Team des Autors ist es gelungen, für zahlreiche praktische Anwendungsfälle die DAC-Verfahren mit Finite-Elemente-Simulationen zu koppeln

und unter Nutzung von Schädigungsmodellen (Bruchmechanik, Lebensdauerkonzepte) Lebensdauerprognosen für Lotstellen in Sensoren (z.B. Airbagsensoren, Druck- und Beschleunigungssensoren), MEMS-Lötstellen, Lötstellen in Packaging-Aufbauten (CSP, Flip Chip, BGA etc.) oder Lötstellen von SMD-Aufbauten sowie für zahlreiche weitere Mikro- und Nanobauteile zu erstellen, die sich durch sehr gute Übereinstimmung mit dem realen Schadensverhalten auszeichnen. Der große Vorteil der vorstehend genannten Herangehensweise besteht darin, dass für das Versagen von Mikrokomponenten die lokalen Deformationszustände von erstrangiger Bedeutung sind und nicht makroskopisch über das Bauteil gemittelte Zustände, wie das in vielen Versagensbewertungen der Fall ist.

Die genauere lokale Verformungsbewertung als Feld ermöglicht in der direkten Kombination mit den Feldberechnungen der FEM, für die gemessene Felder als Input dienen, einerseits eine zuverlässige Beurteilung der Schädigungskonzepte und anschließend nach Auswahl geeigneter Konzepte (wie z.B. verbesserte Coffin-Manson-Modelle u.a.m.) eine fundierte Bewertung der Lebensdauer. Selbstverständlich werden bei Bedarf weitere experimentelle Verfahren einbezogen, z.B. wenn zusätzliche Eigenspannungen zu charakterisieren sind (z.B. Röntgen-Mikroskopie), Delaminationen von Werkstoffen in den zu bewertenden Werkstoffverbunden auftreten (Akustomikroskopie). Die Kopplung mehrerer Verfahren erhöht die Sicherheit der Lebensdauer-Abschätzungen weiter und dient außerdem zur weiteren Verbesserung der Bewertungskonzepte selbst.

Das oben beschriebene DAC-Konzept ist gemeinsam mit zahlreichen Anwendern erprobt worden, z.B. in Projekten mit Motorola, Siemens, BMW, Bosch, Delco, British Aerospace, DaimlerChrysler, Temic, Intel u.a.. Dabei hat sich die Anwendbarkeit des Verfahrens insbesondere in Packaging-Aufbauten in Chipumgebung gezeigt, wo z.Z. kaum vergleichbare Methoden zur genaueren Mikroverformungsanalyse von Lotstellen zu Mikroverbindungstechniken zur Verfügung stehen.

# 5. Zuverlässigkeit und Sicherheit durch Miniaturisierung mittels Mikro- und Nanotechnologien?

Die in der heutigen Zeit vielfach gestellte Frage nach der Sicherheit von Mikro- und Nanotechnologien ist ein weiterer Gesichtspunkt, der sehr eng verbunden ist mit den Fragen der Zuverlässigkeit dieser Technologien. Der Sicherheitsaspekt wird einerseits verbunden mit der Frage: Wie sicher sind 234 Bernd Michel

die Mikro- und Nanotechnologien? Dabei denkt man z.B. auch an die Toxizität von Nanopartikeln, an Gefahren von "sich selbst organisierenden" Nanosystemen etc.. Dieser Aspekt bedarf sicher einer weiterführenden Diskussion nicht nur unter Fachleuten. Letztlich hängt an einer sinnvollen Beantwortung dieser "Sicherheitsfrage" auch die gesellschaftlich Akzeptanz der Nanotechnologien.

Die angelsächsische Bezeichnung "Safety" kennzeichnet diesen Punkt recht gut und wird deshalb auch vom klassischen Zuverlässigkeitsbegriff unterschieden (Reliability). Weiterhin haben wir für Sicherheit aber noch den Begriff "Security". Dieser kennzeichnet dann auch den anderen Aspekt der "Sicherheit" von Nanotechnologien. Die Sicherheit von Anlagen, Gebäuden, Systemen, Infrastrukturen, Veranstaltungen, Flugplätzen und von was auch immer wird heute ebenfalls sehr eng mit neuen Technologien in Verbindung gebracht.

Der Mensch will sicher leben. Er möchte zu diesem Zweck auch moderne Technologien einsetzen, ggf. auch zur Abwendung von Gefahren (z.B. vor Terroranschlägen etc.). Diese Techniken bergen aber auch Gefahren, die bei Missbrauch auch für den Menschen gefährlich werden können, wie das aus der Nutzung der Kernenergie ja auch bereits gut bekannt ist. Deshalb gibt es die Verbindungen Safety – Reliability – Security. Diese Diskussion wird in den nächsten Jahren noch intensiv zu führen sein. Möglichkeiten, Nutzung und Gefahren von modernen Mikro- und Nanotechnologien sind eng verbunden mit den Fragen von Zuverlässigkeit und Sicherheit dieser modernen Technologien.

## Abkürzungen

AFAM	Atomic Force Acoustic Microscopy
AFM	Atomic Force Microscopy

BGA Ball Grid Array CSP Chip Size Package

FEM Finite-Elemente-Methoden

FIB Focus Ion Beam

MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems
SEM Scanning Electron Microscopy
SMD Surface Mounted Device
SPM Scanning Probe Microscopy

TEM Transmission Electron Microscopy

#### Literatur

- [1] Michel, B.: Zuverlässigkeitsprobleme im Hightech-Bereich Lösungsansätze und Konzepte. Von Rückrufaktionen von Autos bis zu Havarien in der Raumfahrt; Vortrag vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät, 12. Oktober 2006.
- [2] Michel, B.: Experimental Mechanics on the Way from Micro to Nano, Experimental Technique 29 (2005) 2, 3-5.
- [3] Michel, B.; Winkler, T.: Microsecurity Sicherheit durch Miniaturisierung mit Sensorik und Mikrosystemtechnik, Proc. 2. Workshop des Bundesministeriums für Forschung und Bildung zur Sicherheitsforschung, Bonn, 2. 6. 2006, S. 48-49.
- [4] Michel, B.; Keller, J.: Nanodeformation Analysis New Small Cracks by Means of nanoDAC Technique, in: G. Wilkening and L. Koenders (Hrsg.), "Nanoscale Calibration Standards and Methods", Wiley-VCH, Weinheim 2005, S. 481-489.
- [5] Michel, B.: Reliability Research on the Way from Micro to Nano, in: Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Multi Materials Manufacture (4M), W. Menz und S. Dimor (Hrsg.), Elsevier, Oxford 2005, S. 43-45.
- [6] Michel, B. (Hrsg.): Micromaterials, Nanomaterials for Automotives, Proc. of MicroCar 2005, in: Micromaterials and Nanomaterials 4 (2005), Publication Series of Fraunhofer Micro Materials Center, IZM Berlin, Germany, 2005, 107 S.
- [7] Dual, J.; Mazza, E.; Michel, B.: Auf Biegen und Brechen Zuverlässigkeit von Mikro- und Nanosystemen, Bulletin der ETH Zürich, No 292, Febr. 2004, S. 57-60.
- [8] Keller, J.; Vogel, D.; Michel, B.: MicroDAC ein Messverfahren zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften im Mikro- und Nanobereich, VDI-Berichte Nr. 1829 (2004), S. 433-440.
- [9] Michel, B.; Winkler, T.: Microsecurity Important Capabilities for Homeland Security Challenges, mst news, Dec. 2004, S. 2.
- [10] Kühnert, R.; Vogel, D.; Kämpfe, B.; Dost, M.; Michel, B.: Verfahren zur feldmäßigen Bestimmung von Deformationszuständen in mikroskopisch dimensionierten Prüflingsbereichen, Deutsches Patent Nr. 14614896, München 2004.
- [11]Michel, B.; Keller, J.; Auersperg, J.: Risse in Packagingaufbauten von der Mikromechanik zur Nanomechanik, in: K.-J. Wolter u. S. Wiese: Interdisziplinäre Methoden der Aufbau- und Verbindungstechnik, Verlag ddp goldenbogen, Dresden, 2003, S. 245-254.
- [12]Michel, B.: Reliability of Micro- and Nanosystems, Proc. 2<sup>nd</sup> VDE World Microtechnology Congress, VDE-Verlag, Berlin 2003, S. 365-368.
- [13]Badri Ghavifekr, H.; Michel, B.: Generalized Mechanical Integral Concepts  $J_G$  and its Application in Microelectronic Packaging Technology, Sensors and Actuators, No. A99 (2002), S. 183-187.

236 Bernd Michel

[14] Michel, B.; Vogel, D.: Packaging and Thermomechanical Challenges for High Temperature Electronics, Proc. HITEN '99, European Conference on High Temperature Electronics, Berlin, Germany, 1999, S. 33.

- [15]Michel, B.; Großer, V.; Reichl, H.: Reliability Aspects of Microassembly in Microfactories, Proc. International Workshop on Microfactories IWMF '98, AIST Research Center, Tsukuba, Japan, 1998, S. 13.
- [16] Dudek, R.; Walter, H.; Auersperg, J.; Michel, B.: Numerical Analysis for Thermo-Mechanical Reliability of Polymeric Applications in Electronic Packaging, Proc. Polytronics Conference, Tokyo, Jan. 2007.
- [17]Michel, B.; Winkler, T.; Dost, M.: Security Assisted Systems Security Support by Integration of Sensorics, Miniaturization and Image Processing, Conference Safety and Security Systems in Europe, Potsdam, Nov. 2006.

### Gerhard Banse, Claudia Lorenz

Technikfolgenabschätzung und "Ubiquitous Computing" – Sensorsysteme im Spannungsfeld zwischen technischem Fortschritt und gesellschaftlicher Entwicklung<sup>1</sup>

### 1. Problemstellung

Die Allgegenwart von Sensor- und Computer-Netzwerken in unserer "Umgebung" bedeutet auch die Allgegenwart von Abhängigkeiten im positiven wie im negativen Sinne, d. h. hinsichtlich Chancen und Gefahren. Einige aktuelle Beispiele belegen das:

- positive Effekte von Lösungen, die auf RFID (Radio Frequency Identification) beruhen, z.B. in der Logistik bei der Rückverfolgbarkeit von Objekten in der Automobilindustrie (vgl. z.B. Meinberg 2006) und im Gesundheitsbereich (Echtheitsnachweis für Medikamente);
- der Start der US-amerikanische Raumfähre "Atlantis" wurde Anfang September 2006 mehrfach verschoben. Unklar scheint zu sein, ob das infolge
  (a) eines defekten Sensors oder (b) eines durch den Sensor signalisierten
  Defekts verursacht war;
- 3. die Diskussionen um die elektronische Fußfessel (vgl. z.B. Elektronische Fußfessel 2006).

Deutlich wird auch an diesen Beispielen die Ambivalenz (fast) jeglicher technischer Entwicklung, sowohl Chancen zu eröffnen, als auch Gefahren zu beinhalten. Dabei gilt allerdings eine Relativität von Chancen und Gefahren (Risiken), denn diese sind immer auf ein vorgängiges Wertesystem bezogen, wie man an Diskussionen um beliebige technische Lösungen sehr schnell erkennen kann. Mit Neil Postmann gilt: "Jede Technik ist beides, eine Bürde und ein Segen; es gibt hier kein Entweder-Oder, sondern nur ein Sowohl-Als auch" (Postmann 1992, S. 12).

Der Beitrag basiert auf dem Vortrag der Verfasser zur 3. Leibniz-Konferenz "Sensorsysteme 2006", Lichtenwalde, 11.-13. Oktober 2006: "Sensorsysteme im Spannungsfeld zwischen technischem Fortschritt und gesellschaftlicher Entwicklung".

"Bürde" und "Segen" sind indes keine technischen Kriterien, sondern soziale. Technik "ragt" in die Gesellschaft hinein,

- Ökonomisch, da sie in Wertschöpfungs- und Verwertungsprozesse eingebunden ist;
- *Politisch*, da es z. B. einen rechtlichen "Rahmen" gibt, in dem Herstellung und Nutzung erfolgen;
- Sozial, da sie Arbeitsprozesse, Kooperationsbeziehungen sowie Arbeit und Freizeit beeinflusst:
- Kulturell, da sie Handlungsmuster und -praxen verändern kann;
- *Individuell-mental*, da menschliche Vorstellungen (Erwartungen, Hoffnungen, Ängste, Befürchtungen) auch einen technischen Bezug haben.

Genau das ist mit der Unterüberschrift deutlich gemacht: Auf der einen Seite technischer Fortschritt, der zunächst an innertechnischen Kriterien wie Effizienz, Neuheit, Zuverlässigkeit usw. gemessen wird. Auf der anderen Seite gesellschaftliche Entwicklung, die durch solche Kriterien wie Selbsterhaltung, Selbstbestimmung und Selbstverwirklichung oder – in einer anderen Terminologie – durch Sozialverträglichkeit und Umweltverträglichkeit gekennzeichnet ist. Zwischen beiden besteht – zumal in unserer stark technisierten, d.h. technikgestützten bzw. technikbasierten und funktional ausdifferenzierten Zivilisation – eine Abhängigkeit, die jedoch nicht direkt bzw. lineardeterministisch, sondern nur über zahlreiche Zwischenstufen vermittelt ist.

Bezogen auf die Allgegenwart von Computer- und Sensor-Systemen soll dieses Spannungsfeld an wenigen Beispielen aufgezeigt werden (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Integrität, "Verletzlichkeit der Informationsgesellschaft", Recht auf informationelle Selbstbestimmung). Es gilt, "Bürde" und "Segen" bzw. technikinduzierte Gefahren und Chancen zu verdeutlichen, um diese Chancen zu befördern, diese Gefahren hingegen zu vermeiden, minimieren, kompensieren zu können.

Damit ergibt sich die Notwendigkeit, technische Entwicklungen systematisch(er) sowohl hinsichtlich technischer als auch hinsichtlich nicht-technischer (d.h. ökonomischer, politischer, rechtlicher, militärischer, sozialer, humaner/ethischer) Parameter bzw. Kriterien zu bewerten (vgl. auch BSI 2004; Hilty et al. 2003). Darauf wird im Folgenden auf einer mehr konzeptionellen Ebene eingegangen.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Das Folgende basiert teilweise auf Banse 2001, insbesondere S. 64ff., und Banse 2004b, insbesondere S. 19f.

# 2. Das Konzept Technikfolgenabschätzung - ein Überblick

Die Gegenwart ist durch eine hohe Dynamik des technischen Wandels nicht nur mit zahlreichen Interdependenzen zu Individuum und Gesellschaft, Politik und Recht, Wissenschaft und Ökonomie, Natur und Kultur, sondern auch durch vielfältige, global wirksame, höchst widersprüchliche und unterschiedlich eingeschätzte Effekte gekennzeichnet. Vorausschauend-planerische Aktivitäten und begründete Entscheidungen für eine "vernünftige" Technikgestaltung sind ein zeitgemäßes Gebot, auch zur eventuellen Vermeidung oder raschen Überwindung von Technikkonflikten. Das ist mit ein Grund dafür, dass sich der Bedarf an Aussagen über "die" Zukunft aus einer ex ante-Perspektive erhöht hat. Für das erforderliche systematische Abschätzen und Bewerten hat sich seit den achtziger Jahren eine Methode etabliert, die als Technikfolgenabschätzung bzw. Technikbewertung (im Folgenden mit TA abgekürzt) bezeichnet wird (vgl. näher Grunwald 1999, 2002b; Jischa 2004). Unterstellt ist dabei, dass Technikfolgen stets Folgen des technikgestützten Handelns unterschiedlicher Handlungssubjekte, Akteure sind, und dass es angesichts der quantitativen wie qualitativen Dimension dieser Technikfolgen gerechtfertigt ist, sie – möglicherweise im Unterschied zu anderen Effekten sozialen Handelns - einer spezifischen systematischen Denkbemühung in Form von TA zu unterziehen.

Zu bedenken ist dabei auch folgende Einsicht: Erfolgreiche Handlungen im Sinne ziel- und zweckgerichteter Tätigkeiten sind (auch im Umgang mit Technik) dadurch charakterisiert. dass

- das angestrebte Ziel erreicht, der angestrebte Zweck realisiert wird (erwünschte, intendierte Folgen, Folgen 1. Ordnung);
- zugleich weitere, nicht angestrebte (vorhersehbare wie nicht-vorhersehbare) Folgen, Effekte, Wirkungen eintreten (können) (nicht-erwünschte, nicht-intendierte Folgen);
- im Zeitverlauf sich die Folgen 1. Ordnung wandeln und damit unvorhergesehene (auch unvorhersehbare), zumeist unerwünschte Folgen, Effekte, Wirkungen eintreten (können), etwa additiver, kumulativer oder synergetischer Art (Folgen 2., 3., ... Ordnung).

#### 2.1 Sichtweisen auf TA

### 2.1.1 Was bedeutet TA?

Es existieren unterschiedliche Auffassungen über Aufgaben, Ziele, methodische Vorgehensweisen, Möglichkeiten usw. von TA. Das zeigt sich aktuell

u.a. in differierenden Begriffsbildungen: Technikbewertung, -begleitforschung oder -wirkungsforschung, Technikfolgen-Abschätzung, -forschung oder -beurteilung u.a. werden (häufig unreflektiert) verwendet, um unterschiedlichste Aktivitäten im Zusammenhang mit Voraussetzungen und Wirkungen technischer Hervorbringungen und technisch instrumentierten Handelns zu konzeptualisieren.

Ausgangspunkt war die angelsächsische Begriffsbildung "technology assessment", die zu Beginn der siebziger Jahre in den USA zur Kennzeichnung eines Konzepts der wissenschaftsgestützten Politikberatung im Bereich der technischen Entwicklung eingeführt wurde. Die Übersetzung mit "Technikfolgen-Abschätzung" ist insofern nicht glücklich, da "technology" auch Technik ohne eine scharfe Abgrenzung zu den Naturwissenschaften bedeutet, und "assessment" auch rationale Beurteilungsprozeduren nahe legt. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich (wohl nicht sehr glücklich) "Technikfolgen-Abschätzung" weitgehend durchgesetzt; diese Benennung ist gegenwärtig u.a. auch deshalb in der Diskussion, weil (m.E. kurzschlüssig) aus der Begriffsbildung und -verwendung auf konzeptionelle Grundlegungen (vor allem Einengungen) geschlossen wird. Das verwendete Kürzel "TA" umgeht diese Schwierigkeiten, denn es steht sowohl für "technology assessment" als auch für "Technikfolgen-Abschätzung".

Aus historischer Perspektive ist darauf zu verweisen, dass auch die Vorstellungen über diese Aktivitäten selbstverständlich einem Wandel unterliegen. Das wird z.B. an den folgenden Ausschnitten aus zwei Dokumenten sichtbar, der "Geburtsurkunde" für das us-amerikanische Office of Technology Assessment (OTA) aus dem Jahre 1972 und der Richtlinie 3780 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) "Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen" vom März 1991:

"Technology assessment is a term used to identify a process of generating accurate, comprehensive, and objective information about technology to facilitate its effective social management by political decisionmakers. Specifically, technology assessment is the thorough and balanced analysis of all significant primary, secondary, indirect and delayed consequences or impacts, present or foreseen, of a technology innovation on society, the environment or the economy ... it is essential that, to the fullest extent possible, the consequences of technological applications will be anticipated, understood, and considered in determination of public policy on existing and emerging national problems" (USS 1972).

"Technikbewertung bedeutet das planmäßige, systematische, organisierte Vorgehen, das den Stand der Technik und ihre Entwicklungsmöglichkeiten analysiert, unmittelbare und mittelbare technische, wirtschaftliche, gesundheitliche, ökologische, humane, soziale und andere Folgen dieser Technik und möglicher Alternativen abschätzt, aufgrund definierter Ziele und Werte diese Folgen beurteilt oder auch weitere wünschenswerten Entwicklungen fordert, Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten daraus herleitet und ausarbeitet, so daß begründete Entscheidungen ermöglicht und gegebenenfalls durch geeignete Institutionen getroffen und verwirklicht werden können" (VDI 1991).

Im Folgenden wird – als Verständigungsbasis – davon ausgegangen, dass TA das mehr oder weniger systematische und weitgehend umfassende Erfassen (Beschreiben) und Beurteilen (Bewerten) der Einführungsbedingungen (Voraussetzungen) sowie der Nutzungs- und Folgedimensionen (Wirkungen) technischen Handelns unter gesellschaftlichen, politischen, ökonomischen, ökologischen, technischen, wissenschaftlichen, militärischen und humanen (einschließlich ethischen) Aspekten in praktischer Absicht und nachvollziehbarer Weise bedeutet. Dadurch versucht TA – wie unten weiter ausgeführt wird – zwei miteinander verbundenen (weil aufeinander bezogenen) Anliegen gerecht zu werden (vgl. Gethmann/Grunwald 1996, S. 12ff.): erstens die entscheidungsbezogene Erstellung einer Zusammenschau sowohl des aktuellen technischen Entwicklungsstandes, der vorhandenen Handlungsoptionen und ihrer mutmaßlichen Effekte sowie deren Bilanzierung als auch möglicher (gesellschafts-)politischer Aus- und Rückwirkungen (politisches Rahmenkonzept), der nur entsprochen werden kann, wenn zweitens sowohl die Komplexität moderner Technik (einschließlich ihrer Folgen) und deren Umgebung als auch beider Wechselbeziehungen und abseh- bzw. abschätzbarer zukünftiger Veränderung in einer Problem angemessenen Weise Rechnung getragen wird (systemanalytischer Anspruch).

#### 2.1.2 Unterschiedliche Verständnisse von TA

Von diesen mehr oder weniger begründeten definitorischen Unterscheidungen sind stärker konzeptionell verursachte Differenzierungen abzusetzen, die z.B. aus unterschiedlichen Sichtweisen auf TA resultieren und damit sowohl unterschiedliche Problembereiche im Umfeld technischer Entwicklungen thematisieren als auch eigene Rationalitäten (die nicht immer kongruent oder komplementär sind) verdeutlichen. Mit "Rationalität" wird hier das Treffen

vernünftiger Entscheidungen sowie die Wahl effektiver Mittel und Wege, um Ziele und Zwecke zu verwirklichen, verstanden.

Zu nennen sind vor allem folgende Blickwinkel:

- Wissenschaftlich: Rolle von Experten und Spezialisten; Ursache-Wirkung- und Zweck-Mittel-Zusammenhänge; Erklärung, Vorhersage, Abschätzung u.a.;
- *Politisch*: Rolle von gesellschaftlichen Akteuren; Durchsetzbarkeit, Legitimation, Rechtfertigung; Akzeptanz, Akzeptabilität u.a.;
- Ökonomisch: Rolle von Wirtschaftssubjekten; Machbarkeit, Kosten-Nutzen-Verhältnis; betriebswirtschaftliche versus volkswirtschaftliche Dimension u.a.:
- Institutionell: Selbstverständnis von Institutionen; prozedurale, d.h. verfahrensmäßige Aspekte; symbolische und ritualisierte Handlungsmuster u.a..

### 2.1.3 Die Rolle des Philosophen innerhalb von TA

Fragt man nach den Aufgaben, die der Philosophie bzw. dem Philosophen innerhalb des TA-Prozesses zukommen könnte (bzw. sollte), dann ist zunächst das philosophische Selbstverständnis, d.h. der unterstellte Philosophieanspruch zu explizieren. Nach Immanuel Kant ist Philosophie "nicht etwa eine Wissenschaft der Vorstellungen, Begriffe und Ideen, oder eine Wissenschaft aller Wissenschaften, oder sonst etwas Ähnliches [...], sondern eine Wissenschaft des Menschen, seines Vorstellens, Denkens und Handelns" (Kant 1984, S. 71 – H.d.V.; G.B., C.L.). Indem Philosophie (auch) auf menschliches Handeln gerichtet ist und Technik sowohl (ein) Mittel wie (ein) Resultat menschlichen Handelns darstellt, geht es im hier interessierenden Zusammenhang um die Klärung wie die Einforderung der Bedingungen der Möglichkeit von TA. um die Geltungsansprüche wie um die Rechtfertigung von Begründungen. Der spezifische Anspruch ist mit solchen Stichworten wie Welterklärung, Lebens- und Entscheidungshilfe sowie Orientierungswissen verbunden; das damit korrespondierende methodische Instrumentarium lässt sich vor allem durch die Stichworte Analyse und Kritik, Normendiskussion und -konstruktion, Generalisierung statt Spezialisierung, Gesamtschau statt Detaileinsicht sowie möglichst weitgehende Komplexitätserfassung anstelle von Komplexitätsreduktion charakterisieren. Auf diese Weise gilt es, kognitive und normative Grundlagen für das Erfassen und Bewerten von Bedingungen und Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen bereitzustellen und zu rechtfertigen. Das schließt auch die Explizierung (notwendiger) konzeptioneller Grundlegungen für das Verständnis des Prozesses der Technikentwicklung (Technikgenese) ein, auf die hier jedoch aus Platzmangel nicht weiter eingegangen werden kann. Stichworte wären etwa: Technik – ein soziotechnisches System, Technikgenese – ein mehrstufiger Selektionsprozess, Akteursvielfalt mit je eigener Rationalität (vgl. dazu Banse 2002a, 2004a).

# 2.2 TA als strategisches Rahmenkonzept mit systemanalytischem Anspruch

### 2.2.1 Die Notwendigkeit von TA

Nach den Möglichkeiten und den Grenzen von TA zu fragen, setzt voraus (bzw. schließt ein), über deren Entstehungsbedingungen und aktuelle Wirkungszusammenhänge zu reflektieren.

Ein Nutzen aus TA wurde und wird erwartet infolge

- erkennbarer zunehmender Bedrohung vieler Bereiche der Gesellschaft und der natürlichen Umwelt durch unvorhergesehene Neben- und Spätwirkungen von Techniken mit beachtlichen Primäreffekten;
- wachsender Komplexität und Größenordnung neuer Technologien mit immer schwerer durchschaubaren und möglicherweise irreversiblen Auswirkungsketten;
- unabweisbarer Notwendigkeit der Schonung knapper werdender natürlicher und finanzieller Ressourcen (Prioritätensetzung);
- steigender Geschwindigkeit des technischen Wandels (vor allem in globaler Dimension und in den so genannten high tech-Bereichen) sowie
- der Infragestellung der Legitimität des wissenschaftlich-technischen Fortschritts angesichts zunehmender offenkundiger negativer Effekte.

Erforderlich ist deshalb in inhaltlicher Hinsicht<sup>3</sup>

- eine in die Zukunft gerichtete Analyse, die über die systematische Identifikation und Bewertung von möglichen Auswirkungen technischer Entwicklungen rechtzeitig entscheidungsrelevante Informationen liefert;
- die Identifikation und Bewertung alternativer Handlungswege (Optionen) zur Erreichung *definierter* Ziele;
- die Bereitstellung von Informationen für die Öffentlichkeit über wahrscheinliche Konsequenzen möglicher zukünftiger technologiepolitischer Entscheidungen.

In methodischer Hinsicht ist zusätzlich erforderlich

<sup>3</sup> Im Folgenden werden die entscheidenden bzw. weiter zu problematisierenden Anforderungen kursiv hervorgehoben.

- die transparente, nachvollziehbare und nachpr
  üfbare Gestaltung aller Schritte von TA infolge der Vielzahl zu treffender Annahmen und zu f
  ällender Werturteile;
- die Sicherstellung der aktiven Teilnahme (Partizipation) der durch die Technikanwendung betroffenen Gruppen, da das Fehlen echter Beteiligungsmöglichkeiten für diese Gruppen das Risiko der Manipulation und der Bevorzugung bestimmter Interessen erhöht.

Auf dieser Grundlage lassen sich jetzt als Prämissen einer idealen TA folgende Anforderungen formulieren:<sup>4</sup>

- Das verfügbare Wissen über Realisierungsbedingungen und potentielle Folgewirkungen technischer Entwicklungen ist (unter Nachweis der Wissenslücken) zu antizipieren (mit Blick auf Früherkennung/Frühwarnung vor bzw. Vermeidung/Einschränkung von negativen Folgen sich noch in der Planung, Entwicklung oder Erprobung befindlicher technischer Lösungen).
- Das Spektrum möglicher (positiv wie negativ bewerteter) Auswirkungen ist umfassend zu identifizieren, abzuschätzen und zu bewerten (mit Blick vor allem auf nicht-beabsichtigte Nebeneffekte, indirekte, kumulative und synergistische Effekte, institutionelle Voraussetzungen und soziale Folgen, Rückwirkungen und Interdependenzen).
- Die Analysen sind *entscheidungsorientiert* anzulegen (mit Blick z.B. auf die Erhöhung des Reflexions- und Rationalitätsniveaus von Entscheidungsträgern; Aufzeigen von Handlungsoptionen, z. B. hinsichtlich Monitoring, Evaluation, gesetzlicher Regelungen, steuerlicher Anreize, institutioneller Strukturen).
- Die Ergebnisse kommen partizipatorisch, nicht elitistisch zustande (d.h.
  eine breite Beteiligung der von den technischen Entwicklungen sowie ihren Voraussetzungen und Wirkungen Betroffenen ist trotz des damit verbundenen hohen Organisations- und Kommunikationsaufwandes anzustreben).
- Die einzelnen TA-Schritte sind nachvollziehbar und die Annahmen und Werturteile sowie deren Begründungen werden offen gelegt (mit Blick auf die Einschränkung bzw. Sichtbarmachung der – nichteliminierbaren – subjektiver Einschätzungen und Beurteilungsbasen der Projektbearbeiter bzw. ihrer Auftraggeber).

<sup>4</sup> Dabei wird weitgehend Überlegungen von Herbert Paschen und Thomas Petermann gefolgt; vgl. Paschen/Petermann 1992.

 TA-Prozesse werden rechtzeitig in Gang gesetzt und abgeschlossen (d.h. der Zeithorizont von TA-Prozessen ist sowohl hinsichtlich Zeitumfang als auch hinsichtlich des Start- und Endtermins angemessen zu berücksichtigen).

TA basiert vor allem auf folgenden Methoden:

- Trendextrapolation;
- Historischer Analogiebildung;
- · Brainstorming;
- · Delphi-Expertenumfrage;
- Morphologischer Klassifikation;
- Relevanzbaum-Analyse;
- · Risiko-Analyse;
- Verflechtungsmatrix-Analyse;
- Modell-Simulation;
- · Szenario-Analyse und -Gestaltung;
- Kosten-Nutzen-Analyse;
- Nutzwert-Analyse;
- Öko-Bilanzierung;
- Umweltverträglichkeitsprüfung.

#### 2.2.2 Zwischen Ideal und Wirklichkeit

Die Umsetzung dieser Prämissen, die eine ideale TA charakterisieren, führt in der Realität in vielfältige Schwierigkeiten, die hier zusammenfassend "Dilemmata" genannt werden sollen (vgl. Banse/Friedrich 1996):

- Prognose-Dilemma: Inwieweit sind Aussagen über mögliche Folgen technischer Hervorbringungen angesichts der Komplexität des Gegenstandes, der Offenheit der Zukunft und der Veränderung der Bedingungen rechtfertigbar?
- Kontroll-Dilemma: Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Informationsstand (d.h. Wissen über Technikfolgen) und den Beeinflussungsmöglichkeiten (als Verhältnis von Aufwand und Ergebnis siehe Abbildung 1)?
- *Pluralismus-Dilemma*: Wie können die Vielfalt von handlungsleitenden Wertvorstellungen, Präferenzen, Interessen, Technikbildern und Zielen sowie der Minderheitenschutz praktikabel berücksichtigt werden?
- Diskurs-Dilemma: Wie kann ein für Partizipation unumgänglicher Diskurs zwischen den unterschiedlichen Beteiligungsgruppen in hinreichender Zeit entscheidungsrelevant und verbindlich organisiert werden?

- Interdisziplinaritäts-Dilemma: Wie lässt sich das für Technikfolgenabschätzung notwendige interdisziplinäre Zusammenwirken methodologisch und organisatorisch angesichts vielfältiger Probleme und Hemmnisse bewerkstelligen?
- Werte-Dilemma: Gibt es allgemeinverbindliche wenn auch zustimmungspflichtige humane und soziale Werte als Zielorientierung und Anforderungsstrategie für technisches Handeln?

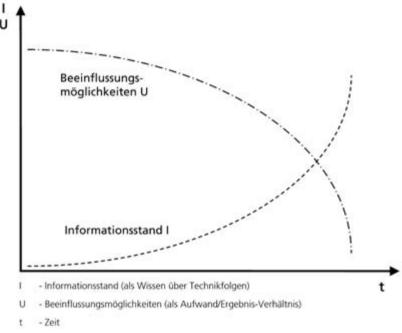


Abb. 1: Schematische Darstellung des Kontroll-Dilemmas<sup>5</sup>

Gemeint ist damit Folgendes: Zu dem Zeitpunkt, an dem die Beeinflussbarkeit der technischen Lösung (etwa hinsichtlich flankierender wissenschaftlicher Untersuchungen oder technischer Entwicklungen, rechtlicher Regelungen, Qualifikationsanforderungen) am größten ist, ist das Wissen über die möglichen Folgen dieser Lösung am geringsten; zu dem Zeitpunkt, an dem umfassende(re)s Wissen über die (tatsächlichen) ökonomischen, ökologischen, sozialen, human-ethischen, mentalen, ...Effekte und Wirkungen verfügbar ist, sind die Beeinflussungsmöglichkeiten nicht mehr so umfangreich, da etwa schon investiert wurde, eine gewisse Diffusion der Lösung in der Gesellschaft vorhanden ist, Infrastrukturen entwickelt wurden usw..

Einschränkend ist darauf zu verweisen, dass diese Problemkonstellationen bei konkreten TA in je themen- und situationsabhängiger Weise relevant werden (beispielsweise werden die einzelnen Dilemmata für die TA neuartiger Weltraumtechnologien jeweils einen anderen Stellenwert haben als bei der Beurteilung der Effekte einer konkreten Müllverbrennungsanlage). Diese Dilemmata verweisen weniger auf die Unmöglichkeit von TA, sondern vielmehr darauf, dass man sich einerseits dieser Schwierigkeiten stets bewusst sein und andererseits nach Wegen zum Umgang mit diesen Dilemmata suchen muss

### 2.3 Der "technologische Trichter"

In der oben genannten VDI-Richtlinie 370 werden folgende Werte als Bewertungskriterium und Anforderungsstrategie für technisches Handeln als entscheidend ausgewiesen:

- Funktionsfähigkeit;
- Sicherheit;
- Gesundheit:
- Umweltqualität;
- Wirtschaftlichkeit (einzelwirtschaftlich);
- Wohlstand (gesamtwirtschaftlich);
- Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität.<sup>6</sup>

Diese Kriterien sind mit Blick auf den jeweils zur Diskussion stehenden Technikbereich zu konkretisieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es zwischen ihnen neben "Folgebeziehungen" und "Gleichgerichtetheit" vielfältige Konkurrenzbeziehungen gibt, die darauf verweisen, dass jeweils Abwägungen vorzunehmen sind, die subjektiv unterschiedlich gewertet werden (können).

Im Arbeitskreis Allgemeine Technologie der Leibniz-Sozietät wurde vor diesem Hintergrund der "technologische Trichter" eingeführt (siehe Abbildung 2), mit dem visualisiert wird, dass jede technische Entwicklung einen Bewertungs- und Selektionsprozess durchläuft, in dem sukzessive die kom-

<sup>6</sup> Werte sind mehrstellige Relationen, die die Bedeutung von Sachverhalten für den Menschen bestimmen. Sie kommen in Wertungen zum Ausdruck und sind bestimmend dafür, dass etwas anerkannt, geschätzt, verehrt oder erstrebt (bzw. abgelehnt, verachtet oder nicht erstrebt) wird; sie dienen somit zur Orientierung, Beurteilung oder Begründung bei der Auszeichnung von Handlungs- und Sachverhaltsarten, die es anzustreben, zu befürworten oder vorzuziehen (bzw. auszuschließen) gilt. Der Inhalt eines Wertes kann aus Bedürfnissen hervorgehen. Er konkretisiert sich insbesondere in Zielen, Kriterien und Normen. – Jeder dieser acht Werte kann weiter differenziert werden.

plexe Frage zu beantworten ist, ob das, was naturwissenschaftlich möglich, technisch-technologisch realisierbar und ökonomisch machbar ist, sich auch als gesellschaftlich wünschenswert und durchsetzbar, ökologisch sinnvoll sowie human vertretbar erweist (vgl. Banse/Reher 2004, S. 6ff.).

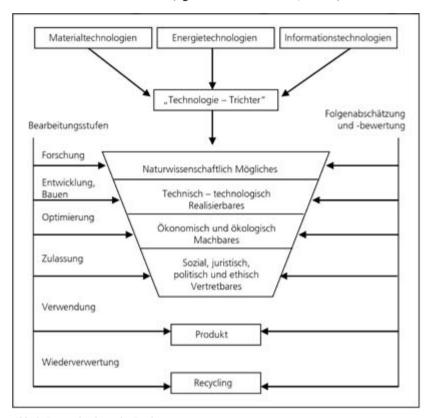


Abb. 2: Der technologische Trichter

Der technologische Trichter kann in zweifacher Weise interpretiert werden: *Erstens* im Sinne einer sukzessiven Einschränkung/Verkleinerung einer anfänglichen Schar von Lösungsmöglichkeiten durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Kriterien als Begrenzungen des technisch Realisierbaren. *Zweitens* im Sinne einer allmählichen Konkretisierung einer anfangs "unscharfen", zunächst nur denkbaren Lösung durch die Beachtung der unterschiedlichen Kriterien als Anforderungen an ein tatsächliches Produkt.

Mit dem Schema in Abbildung 3 wird schließlich verdeutlicht, dass die allgemeinen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen (vor allem politische Zielvorgaben, rechtliche Regelungen und ökonomische Mechanismen) ebenso wie die individuellen Dispositionen (Konsumverhalten, Erwartungen, Nutzungsmuster, Wertvorstellungen usw.) den technischen Entwicklungs- und damit auch Selektionsprozess maßgeblich beeinflussen.

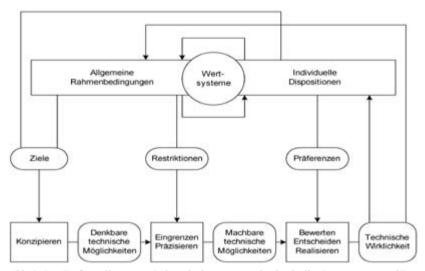


Abb. 3: Der Einfluss allgemeiner Rahmenbedingungen und individueller Dispositionen auf Entwicklung und Auswahl technischer Möglichkeiten (nach VDI 1991)

## 3. Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Integrität

#### 3.1 Definitorisches

Die eingangs bereits genannte Allgegenwärtigkeit von Computern bedingt auch eine Allgegenwärtigkeit von Sensorsystemen. Im Spannungsfeld zwischen technischem Fortschritt und gesellschaftlicher Entwicklung gewinnen auf diese Weise neben (technischer) Zuverlässigkeit solche Bewertungskriterien wie Verfügbarkeit und Integrität an Bedeutung.

Zuverlässigkeit wird technisch als Maß der Funktionserfüllung eines Sensorsystems und seiner Elemente in Abhängigkeit von Alter, Belastung und Umgebungsbedingungen gefasst. Das schließt auch den Ausschluss von Übertragungsfehler ein. Darauf sei hier nur verwiesen, etwa im Zusammenhang mit sensiblen Anwendungen (Medizin, Sicherheitstechnik, Umwelt-

oder Bauwerk-Monitoring), denn es gibt zahlreiche technische Standard-Lösungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit.

Verfügbarkeit bedeutet hier die Abwesenheit der Beeinträchtigung der Funktionalität des Sensorsystems. Verfügbarkeit hat eine technische Seite (etwa im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit). Bedeutsam sind in diesem Zusammenhang indes so genannte außertechnische Einflüsse. Verfügbarkeit bedeutet dann etwa die Verhinderung einer unbefugten Beeinträchtigung der Funktionalität. Man denke nur daran, dass es derzeit (noch) in Flugzeugen untersagt ist, Mobiltelefone zu benutzen. Oder man stelle sich vor, dass GPS gestört oder abgeschaltet wird....

Integrität schließlich bedeutet, dass die Messgrößen, Daten usw., die von Sensorsystemen registriert und evtl. weitergeleitet werden, weder systemintern noch systemextern (unbefugt) modifiziert oder gelöscht werden können. Man denke in diesem Zusammenhang etwa nur an die Insulingabe, die bei bestimmten Systemen automatisch auf der Grundlage der Messung des Blutzukker-Gehalts erfolgt, oder auch an eine polizeiliche Blutalkohol- oder Geschwindigkeits-Kontrolle. Integrität der (technischen) Systeme im oben genannten Sinne ist dafür eine notwendige Bedingung.

Schließlich sei noch auf das Kriterium der *Vertraulichkeit* verwiesen, mit dem ausgedrückt wird, dass nur Berechtigte Zugriff auf die Messgrößen, Daten usw. eines Sensorsystems haben dürfen. Das ist bei Raumtemperaturangaben sehr wahrscheinlich weniger bedeutsam als etwa bei unternehmensinternen Daten

Eine in den gesellschaftlichen Entwicklungsbereich ragende Problematik ist die der rechtlichen Regelungen im Umfeld der Nutzung von Sensorsystemen. Wie sind etwa die Haftpflicht- oder Schadenersatz-Regelungen bei Ausfällen von Sensoren bzw. Sensor-Netzen, etwa bei Fahr-Assistenz-Systemen, zu gestalten, wie bei Verlust von Verfügbarkeit, Integrität und Vertraulichkeit? Generell kann man immer auf die "letztendliche Zuständigkeit" der nutzenden Person, ihre Verantwortung verweisen. Ist das aber zukünftig ausreichend?

Die Allgegenwart von Computern und Sensorsystemen verweist nämlich erneut auf die so genannten Ironien der Automatisierung, darauf, dass sie – wenn manchmal auch sehr vermittelt – in Mensch-Technik-Systeme und -Interaktionen eingebunden sind. Mit den Ironien der Automatisierung hat Lisanne Bainbridge bereits 1987 darauf verwiesen, dass in der hochautomatisierten Industrie für menschliche Tätigkeiten die Voraussetzungen für

eine zuverlässige (d.h. fehler- und irrtumsfreie!) Tätigkeitsregulation oft nicht erfüllt sind (vgl. Bainbridge 1987):

- Indem Automatisierung dem Menschen den leichten Teil seiner Aufgabe wegnimmt, kann sie den schwierigen Teil der Aufgabe eines menschlichen Operators noch schwerer machen.
- 2. Auch ein hoch automatisiertes System braucht Menschen zur Überwachung des Systems und um auf Störfälle zu reagieren.
- 3. Systemdesigner versuchen den menschlichen Faktor als Fehlerquelle zu beseitigen. Doch (a) die Designer von Systemen sind auch Menschen und (b) lässt sich nicht alles automatisieren.
- 4. Die Teile eines Prozesses, von denen die Systemdesigner nicht wissen, wie sie automatisiert werden können, müssen weiterhin durch den Operator gesteuert werden.

## 3.2 Die "Verletzlichkeit der Informationsgesellschaft" – Kritische Infrastrukturen

Wendet man die gerade gemachten Überlegungen nicht nur auf einzelne Individuen oder soziale Gruppen, sondern auf die gesamte Gesellschaft vor allem im Zusammenhang mit der breiten Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnik (IuK-Technik) an, dann führt das zu Überlegungen, die bereits im Jahre 1989 zur Rede von der "Verletzlichkeit der Informationsgesellschaft geführt hatten (vgl. Roßnagel et al. 1989). Gemeint ist damit "die Möglichkeit großer Schäden für die Gesellschaft. Sie kann durch die IuK-Technik beeinflusst werden, indem sie das Schadenspotential oder die Fehler- und Mißbrauchsmöglichkeiten technischer Systeme verändert" (Roßnagel et al. 1989, S. 9).

Diese "Verletzlichkeit" von Gesellschaft und auch von Wirtschaft im Zusammenhang mit IuK-Technik, diese Herausbildung von so genannten kritischen Infrastrukturen – um einen anderen Terminus zu verwenden – wird in Fällen von Computerpannen und -ausfällen, in technischen Störfällen und Havarien, in Sabotage-Akten und man-made-Katastrophen schlagartig sichtbar. Man denke etwa an Viren, Hacker, DoS-Attacken, Spam, InfoWar. In diesem Zusammenhang hatten die Verfasser des genannten Buches u.a. folgende Thesen aufgestellt:

- Die Verletzlichkeit der Gesellschaft wird künftig ansteigen und zu einem zentralen Problem der so genannten Informationsgesellschaft werden.
- Die Struktur der Verletzlichkeit wird sich im Tatsächlichen wie im Wissen gegenüber heute verändern.

- Das Sicherheitsniveau könnte sehr hoch sein, wird in der Praxis aber deutlich unter den theoretischen Möglichkeiten liegen.
- Die Sicherungssysteme werden sich sehr unterschiedlich entwickeln und immer wieder Lücken aufweisen.
- Zahl und Intensität der Missbrauchsmotive nehmen überproportional zu.
- Das Schadenspotential von Systemen im IKT-Bereich wird deutlich zunehmen. Die Gesellschaft wird in nahezu allen Bereichen vom richtigen Funktionieren dieser Techniksysteme abhängig sein.
- Gesamtgesellschaftliche Katastrophen durch den Ausfall wichtiger sozialer Funktionen, die Techniksystemen übertragen wurden, sind nicht auszuschließen (vgl. Roßnagel et al. 1989, S. 208ff.).

Diese Überlegungen wurden in den zurückliegenden Jahren wenig oder kaum berücksichtigt. Vielleicht liegt bzw. lag das daran, dass es DIE Katastrophe bislang nicht bzw. noch nicht gegeben hat.

Erst seit Beginn des 21. Jh.s und der Vision des "Ubiquitous Computing", die auf Gedanken von Mark Weiser aus dem Jahre 1991 zurückgeht, wird über den Zusammenhang von Technisierung und Verletzlichkeit verstärkt reflektiert. Als Beispiel sei zum einen auf die am Anfang bereits genannte Publikation von Lorenz Hilty et al., zum anderen auf eine von Friedemann Mattern herausgegebene verwiesen (vgl. Hilty et al. 2003; Mattern 2003a). Im einführenden Beitrag von Friedemann Mattern etwa werden etwa im Abschnitt "Sensornetze" Gedanken geäußert, die sehr an das oben Dargestellte, auf Roßnagel et al. Zurückgehende erinnern (vgl. Mattern 2003b, S. 18ff.).

# 3.3 Das Recht auf informationelle Selbstbestimmung – Schutz der Privatsphäre

Der zuletzt zitierte Gedanke von Mattern verweist zugleich auf den letzten Problembereich, auf den hier kurz verwiesen werden soll, auf "privacy", zu deutsch "informationelle Selbstbestimmung". Informationelle Selbstbestimmung bedeutet, das jede Person wissen können muss, wer was wann und bei welcher Gelegenheit über sie weiß, in Erfahrung bringen oder speichern kann (vgl. auch Banse 2003, insbesondere S. 140ff.; EPTA 2006).

Die Gegenwart zeigt, dass dieses Recht auf Privatheit ("privacy") durch neue technische Lösungen wie Mobil-Telefonie und Internet einerseits zunehmend unterlaufen wird, ohne dass die Betroffenen oftmals ausreichendes Wissen darüber haben (vgl. Tichy/Peissl 2001). So können Personen über Handy-Netze geortet und Bewegungsprofile registriert werden; Gespräche

können leicht inhaltlich analysiert werden. Jede Internetnutzung (z.B Email oder WWW) hinterlässt so genannte Daten-Spuren. Diese Spuren können – in der Regel vom Verursacher unbemerkt – für Zwecke verwendet werden, an die der Verursacher nicht im geringsten denkt (vgl. z. B. Heinzmann 2000). Stichworte sind hier der "Gläserne Mensch" und das "Persönlichkeitsprofil". Es ist einsichtig, dass damit die Schwelle vom Tolerierbaren zum Nicht-Tolerierbaren überschritten wird.

Andererseits wird von vielen Nutzern dieses Recht auf informationelle Selbstbestimmung nicht mehr so eng gesehen, wenn wissentlich private Informationen (z.B. persönliche Daten, Kreditkartennummern, Rufnummeranzeigen) freiwillig preisgegeben werden. Das zwanglose Führen von Gesprächen mit privaten oder dienstlichen Inhalten per Mobil-Telefonie in der Öffentlichkeit deutet in die gleiche Richtung.

#### 4. Fazit

Mit diesen wenigen Überlegungen wurde deutlich, dass Technikentwicklung durch die vielfältigen Interdependenzen ihrer (Aus-)Wirkungen mit Individuum, Gesellschaft, Politik, Kultur, Recht, Arbeits- und Lebensweise sowie Weltsicht über das rein Artifizielle ein sozio-technisches Gebilde darstellt, ein menschliches Konstrukt, das in und mit dem Konstruktcharakter (dem "Entworfen-" und dem "Gemachtsein") seine anthropologische, seine soziale und vor allem seine kulturelle Dimension offenbart, Dimensionen, die in Überlegungen zu TA von Anfang an einzubeziehen sind.

Max Horkheimer prägte 1947 den Begriff "instrumentelle Vernunft" und charakterisierte damit den Zustand, dass Vernunft – dieses Mittel der Aufklärung – von der Möglichkeit, Wahrheit zu finden und die Natur zum Nutzen und Wohle des Menschen zu gestalten, zu einem Instrument der Machtausübung über die Natur – einschließlich der Natur des Menschen<sup>7</sup> – geworden sei. Das Programm der Aufklärung war die so genannte Entzauberung der Welt; Mythen sollten aufgelöst, Einbildung durch Wissen ersetzt, Glaubensbekenntnisse durch rationale Erklärungen verdrängt werden. Das tatsächliche Ergebnis – so Horkheimer – sei jedoch ein "eingeschrumpftes Ich", das den Gebrauch seiner intellektuellen Fähigkeiten vergisst, durch die es einst in der Lage war, seine Stellung in der Wirklichkeit zu verändern (vgl. Horkheimer

<sup>7</sup> Zum unterstellten Rationalitätsverständnis sei auf Banse 2002b und Grunwald 2002a, genereller auf Schnädelbach 1984 verwiesen.

1947. Herbert Marcuse nennt dieses Resultat den "eindimensionalen" Menschen; vgl. Marcuse 1964).

Mit Begriffen wie instrumentelle oder eindimensionale Vernunft wird das gegenwärtig vorherrschende Vorgehen kritisiert, allein (oder vorrangig) bei der Erzeugung und Anwendung von (technischen) Mitteln zweckmäßig und zielorientiert, mithin vernünftig vorzugehen, die Ziele und Zwecke selbst jedoch aus der rationalen Begründung auszublenden. TA macht deutlich, dass technische Instrumentalität stets an Zwecke (und Werte) rückgebunden ist und dass somit auch (oder vor allem?) diese Zwecke (und Werte) zu thematisieren, zu begründen und zu rechtfertigen sind. Bemühungen zur rationalen Beurteilung von Voraussetzung und Wirkungen technischer Entwicklungen mittels TA verweisen zum einen auf die Grenzen traditioneller separierender, disziplinorientierter methodischer Vorgehensweisen, deuten zum anderen jedoch Wege an, diese Grenzen (sowie die damit verbundenen Defizite) zu überwinden, indem auf echte trans- bzw. interdisziplinäre Kooperation gedrängt wird.

Geschlossen werden soll mit einem Bezug zum Zitat von Neil Postman am Anfang der Darlegungen: Die entscheidenden Fragen sind

- erstens die nach dem zugrunde liegenden Werte-Set: das darf nicht allein auf Werte technischer (etwa Effizienz) oder ökonomischer (etwa Effektivität) Art reduziert werden;
- zweitens die nach dem Maß zwischen dem "sowohl" und dem "als auch", d.h., welche Nachteile (bzw. Nebenwirkungen) werden um welcher Vorteile wegen bewusst in Kauf genommen bzw. müssen in Kauf genommen werden.

Die Antworten können/dürfen nur in einer sachkundigen öffentlichen Debatte in Form eines Aushandelungs-Prozesses auf der Grundlage interdisziplinärer Expertise gefunden bzw. gegeben werden.

#### Literatur

- Bainbridge, L. (1987): Ironies of Automation. In: Rasmussen, J.; Duncan, K.; Leplat, J. (Eds.): New Technology and Human Error. Chichester a. o., pp. 271-283
- Banse, G. (2001): Risiko Technikfolgenabschätzung Entscheidung. In: Caysa, V.; Seidel, H.; Wittich, D. (Hg.): Naturwissenschaftliches Weltbild und Gesellschaftstheorie – Entscheidungen im Spannungsfeld von Naturprozessen und humaner Lebensgestaltung. Leipzig, S. 53-74
- Banse, G. (2002a): Johann Beckmann und die Folgen. Allgemeine Technologie in Vergangenheit und Gegenwart. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Allgemeine Technologie. Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft. Berlin, S. 17-46

- Banse, G. (2002b): Über den Umgang mit Unbestimmtheit. In: Banse, G.; Kiepas, A. (Hg.): Rationalität heute. Vorstellungen, Wandlungen, Herausforderungen. Münster u. a., S. 211-234
- Banse, G. (2003): Was hat Technik mit Toleranz zu tun? In: Wollgast, S. (Hg.): Toleranz Ihre historische Genese, ihre Chancen und Grenzen im 21. Jahrhundert. Berlin, S. 129-148
- Banse, G. (2004a): Der Beitrag der interdisziplinären Technikforschung zur Weiterentwicklung der Allgemeinen Technologie. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie. Berlin, S. 35-48
- Banse, G. (2004b): Solarzeitalter Nachhaltigkeit Technikfolgenabschätzung. In: Blumenthal, G.; Öhlmann, G. (Hg.): Solarzeitalter – Vision und Realität. Berlin, S. 13-23
- Banse, G.; Friedrich, K. (1996): Sozialorientierte Technikgestaltung Realität oder Illusion? Dilemmata eines Ansatzes. In: Banse, G.; Friedrich, K. (Hg.): Technik zwischen Erkenntnis und Gestaltung. Philosophische Sichten auf Technikwissenschaften und technisches Handeln. Berlin. S. 141-164
- Banse, G.; Reher, E.-O. (2004): Einleitung. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie. Berlin, S. 5-16
- BSI (Hg.) (2004): Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. Trends und Entwicklungen in Technologien, Anwendungen und Sicherheit. Ingelheim
- Elektronische Fußfessel (2006). URL: http://www.google.de/search?hl=de&q=elektronische+Fu%C3%9Ffessel&meta= [14.09.2006]
- EPTA European Parliamentary Technology Assessment (2006): ICT an Privacy in Europe. Experiences from Technology Assessment of ICT and Privacy in Seven Different European Countries. Final Report October 16. URL: http://epub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte/e2-2a44.pdf [22.01.2007]
- Gethmann, C. F.; Grunwald, A. (1996): Technikfolgenabschätzung: Konzeptionen im Überblick. Bad Neuenahr-Ahrweiler (Europäische Akademie)
- Grunwald, A. (Hg.) (1999): Rationale Technikfolgenbeurteilung. Konzepte und methodische Grundlagen. Berlin u. a.
- Grunwald, A. (2002a): Rationalität in der gesellschaftlichen Gestaltung der Technik oder blinde Evolution? In: Banse, G.; Kiepas, A. (Hg.): Rationalität heute. Vorstellungen, Wandlungen, Herausforderungen. Münster u. a., S. 191-209
- Grunwald, A. (2002b): Technikfolgenabschätzung. Eine Einführung. Berlin
- Heinzmann, P. (2000): Datenspuren im Internet. In: Fakten. Die Zeitschrift für Datenschutz des Kantons Zürich, Sondernummer 2, S. 14-17
- Hilty, L.; Behrendt, S.; Binswanger, M.; Bruinink, A.; Erdmann, L.; Fröhlich, J.; Köhler, A.; Kuster, N.; Som, C.; Würtenberger, F. (2003): Das Vorsorgeprinzip in der Informationsgesellschaft. Auswirkungen des Pervasive Computing auf Gesundheit und Umwelt. Bern (TA-SWISS)
- Horkheimer, M. (1947): Eclipse of Reason. New York (dt.: Zur Kritik der instrumentellen Vernunft)

- Jischa, M. F. (2004): Ingenieurwissenschaften. Berlin
- Kant, I. (1984): Der Streit der Fakultäten [1798]. Leipzig
- Marcuse, H. (1964): One dimensional Man. Studies in the Ideology of Advanced Industrial Society. Boston (dt.: Der eindimensionale Mensch)
- Mattern, F. (Hg.) (2003a): Total vernetzt. Szenarien einer informatisierten Welt. Berlin u. a.
- Mattern, F. (2003b): Vom Verschwinden des Computers Die Vision des Ubiquitous Computing. In: Mattern, F. (Hg.): Total vernetzt. Szenarien einer informatisierten Welt. Berlin u. a., S. 1-41
- Meinberg, U. (2006): RFID-Technologie erhöht die Effizienz von Prozessen. In: automotive trends, S. 64-65
- Paschen, H.; Petermann, Th. (1992): Technikfolgen-Abschätzung: Ein strategisches Rahmenkonzept für die Analyse und Bewertung von Techniken. In: Petermann, Th. (Hg.): Technikfolgen-Abschätzung als Technikforschung und Politikberatung. Frankfurt am Main/New York, S. 19-41
- Postman, N. (1992): Das Technopol. Die Macht der Technologien und die Entmündigung der Gesellschaft. Frankfurt am Main
- Roßnagel, A.; Wedde, P.; Hammer, V.; Pordesch, U. (1989): Die Verletzlichkeit der "Informationsgesellschaft". Opladen
- Schnädelbach, H. (Hg.) (1984): Rationalität. Philosophische Beiträge. Frankfurt am Main
- Tichy, G.; Peissl, W. (2001): Beeinträchtigung der Privatspäre in der Informationsgesellschaft. Wien (Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Technikfolgen-Abschätzung) Dezember.
  - URL: http://www.oeaw.ac.at/ita/pdfita 01 01.pdf [30.01.2002]
- USS United States Senate (1972): Technology Assessment Act of 1972. Report of the Committee on Rules and Administration. Washington, D.C., 13. Sept.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1991): VDI-Richtlinie 3780 "Technikbewertung. Begriffe und Grundlagen". Düsseldorf, März

## Intelligente und nachhaltige Logistik

Der Beitrag setzt sich mit gesellschaftlich induzierten Herausforderungen an Produktions- und speziell an Logistiksysteme auseinander. Neue Technologien und Techniken wie Radio Frequency Identification (RFID) und Service Orientated Architectures (SOA) können entscheidende Enabler für eine intelligente, d.h. schnelle und adaptive Logistik sein, die den Wertschöpfungssystemen die Flexibilität verleiht, die sie in einer zunehmend digitalisierten Welt benötigen. Darauf aufsetzende neue Ansätze der Verplanung von Ressourcen können zudem zu einer ökologisch nachhaltigen Logistik führen.

### 1. Digitalisierung und Leistungsforderung

Wir sind in einer Gesellschaft angekommen, in der aufgrund der zur Verfügung stehenden Technologie und Technik alles als möglich erscheint. Wir betreiben Kommunikation global, jederzeit und überall. Wir sind ständig mit Informationen versorgt oder von diesen nur einen Klick entfernt. Auch komplexe Anwendungen, wie Simulation (Die Sims) oder Virtualität (Second Life), haben in unserem fast täglichen Leben einen Platz gefunden – wir fühlen uns bereits weitgehend in der digitalen Welt zuhause. Damit sind auch die Ansprüche an Produkte und Dienstleistungen gewachsen. Auch hier erwarten wir eine Digitalisierung. Wenn das Produkt sich nicht digitalisieren lässt – die Pizza kommt auch in Zukunft nicht aus dem Internet – so erwarten wir doch wenigstens, dass die Verkaufsprozesse von der Informationsbeschaffung und dem Produktvergleich über den eigentlichen Kauf mit der dazugehörenden formalen Abwicklung (Vertrag, Zahlung) bis hin zum anschließenden Kundenservice unserem aktuellen gesellschaftlichen Entwicklungsstand entsprechend digital erfolgen.

Damit sind Änderungen in unseren Wertschöpfungssystemen verbunden. Wer hätte noch vor einigen Jahren gedacht, dass ein Klingelton ein Produkt sein könnte, mit dem sich auch noch herausragende Umsätze und Gewinne erzielen lassen. Die Musikindustrie hat vollkommen übersehen, dass nach der

Musikkassette und der CD ein Standard namens MP3 zur weiten, nicht immer legalen Verbreitung einst teurer Musik beiträgt. Die Digitalisierung von Produkten hat den Anspruch entwickeln lassen, dass auch Produkte jederzeit und überall verfügbar sein müssen. Und sind die Produkte nicht in digitaler Form erhältlich – wie das bei einer Pizza oder einem Automobil offensichtlich der Fall ist – so spiegelt der Begriff ...24-Stunden-Service" deutlich eine weitere Herausforderung für die Wertschöpfungssysteme wider: Die Schnelllebigkeit unserer Gesellschaft erfordert eine schnelle Reaktion auf Kundenwünsche. Wir wollen die Pizza elektronisch bestellen und dann sofort und zwar heiß geliefert bekommen. Wir wollen unser Automobil im Internet konfigurieren, die Finanzierung abklären, die Bestellung auslösen und das Wunschfahrzeug in kürzester Zeit geliefert bekommen. Damit sind große Herausforderungen an Produktions- und Logistiksysteme skizziert, die zu gravierenden Veränderungen in diesem Bereich geführt haben. Apropos "Wunschfahrzeug": natürlich wollen wir ein Auto konfigurieren, das individuell auf unsere persönlichen Belange zugeschnitten ist und dies natürlich zu niedrigsten Preisen. "Geiz ist geil" gilt in weiten Teilen der Gesellschaft als attraktive Mentalität und setzt damit die Wirtschaft weiter unter Druck: dies gilt zumindest für Produkte, für die durch die Globalisierung bedingt leicht Substitute zu finden sind. Elektronikgeräte, Kraftfahrzeuge, aber auch die so genannte weiße Ware zählen zu dieser Kategorie.

Die Produktions- und Logistiksysteme müssen auf diese Herausforderungen ausgerichtet werden. Es müssen Organisationsformen für moderne Unternehmen gefunden und implementiert werden, die die Herstellung von hoch individualisierten Produkten, also von Produkten mit sehr hohen Variantenzahlen, in kürzest möglicher Zeit erlauben. Dazu gehört eine Logistik, die nicht nur das Endprodukt schnell und kostengünstig zum Kunden bringt, sondern auch die zur Herstellung benötigten Teile und Komponenten bedarfsorientiert in der Produktion bereitstellt. Die Logistik digitalisierter Produkte ist im Unterschied dazu nahezu trivial: der Klingelton kommt via UMTS auf das Handy, der MP3-Song über das Internet auf den PC – Daten lassen sich jederzeit und global in verschwindend geringer Zeit distributieren. Physikalisch existente Produkte müssen transportiert, gehandhabt und umgeschlagen werden; diese Prozesse benötigen Zeit, die sich in vielen Fällen kaum noch reduzieren lässt.

Die Distribution digitaler Produkte benötigt in einem vereinfachten Szenario lediglich einen einsamen Server, der die Verkaufs- und Verteilungsprozesse mittels entsprechender Software autonom und ohne maßgeblichen

menschlichen Aufwand abwickelt. Die Herstellung und die Verteilung physikalischer Produkte benötigt dagegen weitaus mehr menschliches Zutun sowohl im administrativen (z.B. Planung und Steuerung) wie auch im operativen (z.B. Herstellung Handhabung) Kontext. Die optimale Abwicklung dieser Prozesse setzt eine hohe Transparenz hinsichtlich ihrer dynamischen Zustände voraus; die Komplexität der Koordination der vielschichtigen Teileströme und die Steuerung kundenorientierter Produktionsprozesse lassen sich nur noch dann zeit- und kosteneffizient beherrschen, wenn jederzeit Kenntnis über der Verlauf und den Zustand eines jeden Prozessschrittes bei den Prozessverantwortlichen vorliegt.

Auch hier kommen den Anforderungen Technologie- und Technikentwicklungen entgegen, die grade im industriellen Umfeld zu erheblichen Effizienzsteigerungen führen werden: die Entwicklung von RFID (Radio Frequency Identification) und die Entwicklung serviceorientierter Strukturen (SOA: Service Orientated Architecture) bieten die Plattform, die hoch digitalisierte Prozesse zur Unterstützung physischer Produktions- und Logistiksysteme ermöglichen.

## 2. Transparenz durch Objektgebundene Datenflüsse

Die Operationalisierung von Maßnahmen zu Reaktionen auf die bereits angesprochenen Herausforderungen hat durch die Verlagerung von Fertigungsschritten und durch eine Konzentration der Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen zu Wertschöpfungsnetzen geführt, in denen eine Vielzahl von Unternehmen eng miteinander kooperiert, um gemeinsam Produkte zu entwickeln und diese zu fertigen. Die Logistik übernimmt bei der Umsetzung dieser Strategie eine tragende Rolle. Sie ist mit ihrer Organisation und den eingesetzten (technischen) Ressourcen dafür verantwortlich, die mit der Bildung von Wertschöpfungsnetzen einhergehenden Versorgungsstrategien – wie beispielsweise Kanban, just-in-time oder just-in-sequence – mit hoher Zuverlässigkeit umzusetzen.

Dabei stellt insbesondere die kundenbezogene Individualisierung der Produkte eine große Herausforderung dar. Gehört die Beherrschung einer großen Variantenzahl ohnehin zu einem der dauerhaften Probleme in der Industrie, so kommt noch hinzu, dass die herkömmliche Belegung von Fertigungslinien mit einem Produkt und seinen Varianten bei den heute vorherrschenden Marktbedingungen immer häufiger zu starken Schwankungen der Kapazitätsauslastungen führt. Daraus abgeleitet entwickelt sich die Notwendigkeit, Produktderivate und neue Modelle in bereits bestehende Fertigungslinien zu

integrieren. So können hohe Investitionen für neue Linien vermieden und die Auslastung vorhandener Linien harmonisiert werden. Offensichtlich ist, dass diese Integration zu einer deutlichen Erhöhung der Anforderungen an ein effizientes Teilemanagement bereits innerhalb eines einzigen Unternehmens führt; auch hier ist die Logistik gefordert

Somit ist die Logistik auf der operativen Ebene in besonderem Maße gefordert: aus dem Aufbau der Wertschöpfungsnetzwerke resultiert ein nahezu unvorstellbar großer und weit verzweigter Materialfluss. Bauteile, Komponenten oder ganze Systeme müssen ebenso zeitpunktgenau gehandhabt und transportiert werden, wie die entsprechenden Ladehilfsmittel (Behälter, Spezialladungsträger etc.). Die Bestands- und Bedarfspuffer moderner Fertigungssysteme sind als teure Ressourcen so knapp dimensioniert, dass sich Mängel in den logistischen Prozessen unmittelbar auf die Auslastung der Puffer auswirken und ein Überlaufen (Bestand) bzw. ein Leerlaufen (Bedarf) als Folge sofort zu Störungen in den vorhergehenden und nachfolgenden Fertigungssystemen führt.

Werden verschiedene Produkte auf einer Linie gefertigt, ergeben sich hohe Anforderungen an das linienbezogene Teilemanagement. Die Teilevielfalt steigt erheblich, die mengenbezogenen Volumina nehmen im gleichen Zuge drastisch ab. Die Sicherstellung der optimalen Auslastung für Transport- und Ladehilfsmittel erfordert neben dem bedarfsorientierten und zeitpunktgenauen line-feeding eine neue Qualität der Planungs- und Steuerungssysteme.

Materialflüsse im Allgemeinen und erst recht im Zusammenhang mit den dargestellten Szenarien sind nur durch lückenlose und mit den dezidierten Materialflüssen synchronisierte Informationsflüsse beherrschbar. Diese Erkenntnis begleitet die Logistik schon seitdem sie systematisch erforscht wird als dogmatische These. Obgleich die heute eingesetzten Informationssysteme sehr weit entwickelt sind, gelingt die Umsetzung dieser These nur bedingt; die zur exakten Planung und Steuerung erforderliche Informationsqualität entlang der Lieferketten wird nach wie vor in vielen Fällen nicht erreicht. Bei der Vielzahl der ineinander verzahnten Objektflüsse (Teile, Behälter etc.) in den Wertschöpfungsnetzen treten immer wieder Fehler auf, die in einfachen Fällen zu Überlieferungen, in kritischen Fällen zu Bandstillständen durch Falsch- oder Unterlieferungen führen. Auf Folgeschäden durch Fehllieferungen, die sich erst im Markt beispielsweise durch Rückrufaktionen bemerkbar machen, wird später noch einmal eingegangen. Die Informationsqualität ist häufig deswegen nicht ausreichend, weil eben die Synchronisation zwischen

den Objektflüssen und den sie in Informationssystemen begleitenden Datenflüssen nicht oder nur unzureichend erfolgt. Damit sind die Abbilder der Realität in den Modellen, die den Planungs- und Steuerungssystemen als Basis dienen, zu ungenau oder sogar falsch, was schließlich zu korrekt errechneten, aber dennoch falschen Ergebnissen führt. Daraus abgeleitete Entscheidungen sind folgerichtig ebenso falsch. Damit besteht die große Herausforderung nach wie vor darin, die Informationsqualität zu erhöhen, die Synchronisation zwischen Material- und Informationsfluss Realität werden zu lassen.

RFID weist das Potenzial zur Lösung dieser Problemstellungen auf. Bei dieser Technik handelt es sich um Speicherchips (tags), die in nahezu beliebiger Bauform physikalisch an Objekten befestigt werden können. In den Speichern abgelegte Daten bleiben dort auch ohne weitere Energiezufuhr erhalten und können aus größerer Distanz gelesen und verändert werden. Die Technik ermöglicht die gleichzeitige sichtkontaktlose Identifizierung von mehreren Objekten auf Distanz und zusätzlich auch das Speichern von Daten unmittelbar an Objekten. Die Schreib- und Lesefunktionen können während der Objektbewegung ausgeführt werden, was damit ihre Integration in unterschiedliche Prozessschritte in der Fertigung und in der Logistik erlaubt.

#### 3. Material- und Datenflüsse

Das Management von Objekten ist insbesondere eine Aufgabe des Managements von Daten und Datenflüssen. Daten, die physikalisch mit den Objekten verbunden die Produktions- und Logistiksysteme durchlaufen, sind zu jeder Zeit und an jedem Ort verfügbar. Aufgrund der besonderen Eigenschaften der RFID-Technik sind die Daten unaufwendig und, da kein Sichtkontakt notwendig ist, sogar nach der Verbauung der Objekte zu lesen. Damit ergeben sich gegenüber den heute zur Identifikation eingesetzten Systemen, wie beispielsweise Barcode, erhebliche Vorteile. Der Einsatz von RFID-tags ermöglicht die Realisierung von objektgebundenen Datenflüssen; objektbegleitende Datenflüsse können reduziert oder eliminiert werden. Damit ist auch die Synchronisation zwischen Material- und Informationsfluss inhärent gegeben. Die Objekte bringen "ihre" Daten physikalisch gebunden mit. Objektgebundene Datenflüsse bilden damit die Basis effizientere, reduzierte und kostengünstigere Prozesse zu implementieren.

Dabei sind allerdings noch einige Fragestellungen hinsichtlich der Gestaltung des Datenmanagements der in den Wertschöpfungsnetzen zusammengeführten Unternehmen zu beantworten. Die jeweiligen aus den unternehmensbezogenen Erfordernissen und Prozessabläufen resultierenden

Datenhaushalte stellen sich inhaltlich und organisatorisch sehr unterschiedlich dar und werden sehr unterschiedlich organisiert. Die die Objektflüsse begleitenden Datenflüsse erfordern daher häufig hohe Aufwendungen im Hinblick auf ihre Implementierung und ihre Administration. Dies trifft in besonderer Weise kleine und mittlere Unternehmen, die sich projektbezogen sehr schnell in Wertschöpfungsnetze integrieren und laufend ihre Informationssysteme anpassen müssen.

Die objektbegleitenden Datenhaushalte sind heute zentral organisiert. Das bedeutet, dass sämtliche Daten, die zu einem Objekt gehalten werden müssen, in entsprechenden Datenhaltungssystemen gespeichert sind; die Objekte selber tragen lediglich identifizierende Referenzen (z.B. Teilenummer oder Behälternummer), die als Zugriffsschlüssel auf die in den Informationssystemen abgelegten Daten dienen. Diese Daten begleiten den Objekt- bzw. Materialfluss in den Informationssystemen. An ausgewählten Transaktionspunkten, wie beispielsweise an Fertigungseinrichtungen oder an Entscheidungspunkten in Materialflusssystemen, werden die Daten mit dem Objektfluss synchronisiert

Mit der Realisierung objektgebundener Datenflüsse entstehen dezentrale Datenhaushalte, welche dieselben Funktionen der Datenhandhabung (Schreiben, Ändern, Lesen, Löschen) zulassen, wie wir es bei zentralen Datenhaushalten gewohnt sind. Die Objekte führen die für ihre Bearbeitung in den Fertigungs- oder ihre Handhabung in Logistiksystemen benötigten Daten unmittelbar physikalisch gebunden mit sich. In der Folge ergeben sich nunmehr vollkommen neue Möglichkeiten der Prozessgestaltung. Die Interaktionen zwischen der technischen Logistikebene und den Informationssystemen können deutlich reduziert werden. Allerdings müssen die installierten Softwaresysteme an die objektgebundenen Datenflüsse angepasst werden: wo Informations- und Steuerungssysteme heute eine Referenznummer aus dem Prozess erwarten (z.B. Barcodelesung), können sie im Zusammenhang mit objektgebundenen Datenflüssen zukünftig vollständige Datensätze erhalten.

Die allgemein anerkannten Gestaltungsebenen der Logistik (Administration, Disposition, Steuerung und Operation) müssen hinsichtlich der ebenebezogenen Datenhaushalte und der resultierenden Datenflüsse einer erneuten Betrachtung unterzogen werden. Den Ebenen sind Objekte bzw. Funktionen zugeordnet, die durch Modelle und dedizierte Datenhaushalte in Informations- und Steuerungsebenen abgebildet werden. Theoretisch, d.h. zunächst einmal ohne Betrachtung der Wirtschaftlichkeit (s.u.), erlaubt der Einsatz der RFID-Technik die aufwandsarme Identifikation jedes einzelnen Objektes auf

der operativen Ebene. Zugleich können diesen einzelnen Objekten theoretisch alle notwendigen Stamm-/Beschreibungs- und Bewegungsdaten unmittelbar mitgegeben werden. Damit können Aufwendungen auf der Steuerungsebene reduziert werden. Die Disposition kann erheblich detaillierter auf Objektebene erfolgen, die administrativen Systeme könnten in einer Idealvorstellung möglicherweise sogar vollständig entfallen.

Diese theoretischen Denkmodelle müssen durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten jedoch noch weiter unterstützt werden. Die bislang im industriellen Umfeld durchgeführten Pilotprojekte decken einen so geringen Teil der theoretischen Möglichkeiten ab, dass aus der Auswertung der Projekte derzeit noch keine belastbaren und vor allem verallgemeinerbare Konzepte ableitbar sind. Mit einer Reihe von Forschungsarbeiten widmet sich das Fraunhofer-Anwendungszentrum Logistiksystemplanung und Informationssysteme aktuell diesen Fragestellungen. Ein besonderer Fokus liegt neben der technischen und organisatorischen Gestaltung auf objektgebundenen Datenflüssen basierender Logistiksysteme auf der Absicherung eines wirtschaftlichen Einsatzes der RFID-Technik.

In diesem Zusammenhang entstehen auch vollständig neue Konzepte, die Mehrwertfunktionen und Mehrwertdienste, die unmittelbar mit dem Technikeinsatz verbunden sind, zum Inhalt haben.

## Mehrwertfunktionen

Als wichtigste Mehrwertfunktion kann die Ergänzung der RFID-tags um Sensoren angesehen werden. Die Integration von Mikrosensoren erlaubt die Erfassung von Umgebungsbedingungen, denen die Teile während des Durchlaufens der Produktions- und Logistikprozesse oder aber nach ihrer Verbauung ausgesetzt sind. Dies ist im Zusammenhang mit den ökologisch bedeutsamen Kreislauf- und Recyclingprozessen von großer Bedeutung. Die Auswertung von Betriebsdaten, die beispielsweise ein demontiertes Bauteil zukünftig mit sich führen kann, wird die Aufwendungen für heute noch notwendige Qualitätssicherungsmaßnahmen vor der Wieder- oder Weiterverwendung der Bauteile deutlich reduzieren.

#### Mehrwertdienste

In den Wertschöpfungsnetzen und Lieferketten ist heute nicht in ausreichender Detailtiefe bekannt, wie einzelne Objekte durch die verschiedenen am Wertschöpfungsprozess beteiligten Produktions- und Logistiksysteme fließen. Zur Optimierung der Materialflüsse und um die Potenziale, die mit einem medienbruchfreien durchgängigen objektgebundenen Datenfluss verbunden sind, zu identifizieren, können Dienste zur Flussanalyse aufgesetzt werden.

Auf der Basis der tag-Daten kann nicht nur der Fluss einzelner Teile durch die Wertschöpfungsnetze dargestellt werden. Es lassen sich auf der Basis dieser Daten auch strukturelle Aspekte, zugehörige Einflussfaktoren – z.B. Fertigungstechnologien und Entstehungs- sowie Bedarfs-orte für objektgebundene Daten – transparent darstellen.

Die Analyse der objektgebundenen Datenflüsse kann dazu genutzt werden, Objekt- und Datenflüsse hinsichtlich Plausibilität, Vollständigkeit und Bedarfsorientierung entlang der gesamten Produktions- und Logistikkette zu bewerten. Von großem Interesse ist dabei, qualitative Aussagen hinsichtlich des jeweiligen Nutzenpotenzials durch quantitativ nachvollziehbare und belastbare Kennzahlen zu ersetzen. Hier kommen somit technische, organisatorische und wirtschaftliche Betrachtungsweisen zueinander. Der Simulation kommt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle zu. Objektgebundene Datenflüsse liefern eine bislang nicht erreichbare Datenqualität, die wiederum zu einer neuen Qualität von Simulationsergebnissen führen wird.

## 4. Prozesse und Services – Agilität und Flexibilität durch IT

Die Transparenz in Produktions- und Logistikprozessen, die auf der Basis des RFID-Einsatzes erreicht werden kann, bildet die Grundlage für hoch flexible Abläufe in den Unternehmen. Die Marktsituation, gekennzeichnet durch bereits genannte Begriffe wie Globalisierung, Schnelllebigkeit, Kundenindividualität etc. erfordert agile Unternehmen, die in kürzester Zeit auf Veränderungen in ihrem Umfeld, speziell in Wertschöpfungsnetzen, angemessen reagieren können. Sie benötigen ihrerseits agile Informationssysteme, die ebenso schnell angepasste werden können.

Die Entwicklung von objektorientierten Programmiersprachen und Werkzeugen sowie Softwareentwicklungsmethoden, wie beispielsweise die Komponententechnologie, erlauben es, die Geschäftsprozesse und die dezidierten Objekte immer exakter im Rechner zu beschreiben. Es entsteht ein immer vollständigeres digitales Abbild der Geschäftsprozesse.

Je exakter die Abbildungen und Modelle werden, je "intelligenter" die Softwarelösungen hinsichtlich der Entscheidungsfindung werden, desto autonomer – also ohne Eingriff des Menschen – können Informationssysteme arbeiten. Diese wachsende Autonomie beinhaltet selbstverständlich auch, dass der Mensch als Systemanwender letztlich keinen Einblick mehr in die Entscheidungsfindung hat; bei vernetzten Systemen fehlt ihm die Kenntnis über die Eingangsparameter, die tatsächliche Prozessabbildung ist ihm genauso unzugänglich wie die implementierten Optimierungs- und/oder Planungsme-

thoden. Er wird mehr und mehr zum Beobachter, der schließlich die Entscheidungen, die von Informationssystemen getroffen werden, hinnehmen und als "richtig" ansehen muss.

Moderne Informationssysteme müssen unternehmerische Entscheidungen unter Berücksichtigung aller angesprochenen Facetten unterstützen. Dies in einem hoch dynamischen Umfeld, das eben durch schnell und häufig wechselnde Partnerschaften (z.B. Entwicklung, Produktion), technologische Innovationen (z.B. Werkstoffe, IT) und durch laufend anzupassende Prozesse gekennzeichnet ist.

Das Datenmanagement und das Prozessmanagement bekommen in dem dargestellten Szenario eine besondere Bedeutung. Neben der technischen Fertigkeit, die einem Unternehmen zugeschrieben werden muss, zeichnet es sich dann als besonders kompetent aus, wenn es seine Geschäftsprozesse optimal "im Griff" hat – ein großer Wettbewerbsvorteil, der durch ein konsequent eingeführtes und genutztes Prozessmanagement erreicht und gehalten werden kann. Prozesse können über Kennzahlen bewertet und letztlich einer laufenden Optimierung zugeführt werden. Ein auf die Netzwerkbedürfnisse zugeschnittenes Datenmanagement liefert hier die Basis. Klassische Datamining-Systeme werden den zukünftigen Anforderungen nicht mehr gerecht werden, da sie zwar auf die Analyse schwach strukturierter Datenhaushalte ausgerichtet sind, die durch die Interdisziplinarität bedingten verschiedenen Sichtweisen einzelner Domänen auf das jeweilige Prozessobjekt jedoch nicht überbrücken können.

Die Basis agiler Informationssysteme stellen die Prozesse der Produktentstehung sowie die Prozesse der Entwicklung dezidierter Produktionssysteme dar. In beide Prozesslinien finden unterschiedliche Kompetenzen mit wechselnder Intensität und zeitlicher Abfolge Eingang. Da davon ausgegangen werden kann, dass die notwendigen Kernkompetenzen in den Wertschöpfungsnetzen verteilt sind, kommt der Nutzung von Wissen und Erfahrung eine bedeutende Rolle zu. Hier steht weniger die Frage im Vordergrund, wie Wissen verfügbar gemacht wird, sondern welches verteilte Wissen wann unter welchen Konditionen in die Prozesse einfließt oder im Sinne einer pushFunktion propagiert wird. Agile Informationssysteme müssen also den bedarfsgerechten Abruf, die Bereitstellung aber auch den Schutz von Wissen und Erfahrung gleichermaßen unterstützen. In diesem Zusammenhang werden Systeme vermehrt Methoden und Verfahren der künstlichen Intelligenz (beispielsweise neuronale Netze zur Bedarfsanalyse und Agententechnologie zur Akquisition und geschützten Bereitstellung) nutzen müssen. Während das

Prozess- und das Datenmanagement die Geschäftsprozesse in ihrer Operation zu treiben und zu optimieren sucht, werden die inhaltliche Qualität und Stabilität der Prozesse über das Wissensmanagement gestützt. Auch dies ist ein kontinuierlicher Prozess, da nicht nur bereits vorhandenes Wissen genutzt, sondern auch laufend neu entstehendes Wissen zugänglich gemacht wird. Das Unternehmen muss über ein collaboration portal auch auf externes Wissen zugreifen können.

Gerade in den Bereichen, in denen Informationssysteme in starkem Maße eine Realität zeigen sollen, ist die Gefahr eines Realitätsverlustes derjenigen Menschen, die mit diesen Systemen und den angebotenen Handlungsalternativen arbeiten sollen, zu beachten.

Im Bereich Konstruktion und Entwicklung werden beispielsweise computeranimierte Simulationen verwendet (Digital Mock Up), um im virtuellen Raum zu überprüfen, ob bestimmte Montageprozesse realisierbar sind. Der feste Glaube an die Richtigkeit der Simulation wirkt sich hier nur gering aus: spätestens bei der Aufnahme der prototypischen Produktion wird ein möglicher Fehler erkannt. Was ist, wenn mit ähnlichen Mitteln die Funktion sicherheitsrelevanter Teile ermittelt wird? Auch das Verhalten von Märkten wird in Informationssystemen abgebildet, um beispielsweise die Absatzmöglichkeiten von Produkten oder das Kaufverhalten in dezidierten Märkten simulativ vorhersagen zu können. Entscheidungen, die auf der Basis rechnergestützt erzeugter Informationen getroffen werden müssen, werden an rechnergestützte Systeme zwecks Validierung delegiert (Beispiel: Simulation). Schnell stellt sich hier die Frage nach der Rolle des Menschen in derart gestützten Entscheidungsprozessen - trifft er wirklich Entscheidungen, oder setzt er Vorgaben der Informationssysteme letztlich nur um? Es besteht das grundsätzlich wachsende Risiko, dass die den Entscheidungen zugrunde liegenden Modelle nicht korrekt sind, die Entscheidungen in der Modellwelt aber schon. Komplexe Produktionssysteme werden häufig mittels aufwändiger Informationssysteme, die einzelne Prozesszustände zu übersichtlichen Prozessabbildern aggregieren, gesteuert. Das Verhalten der Werker und Maschinen in der Produktion wird anhand weniger aussagekräftiger Kennzahlen beurteilt. Immer häufiger werden über Kameras Livebilder in die Steuerleitstände eingespielt. um dem Bedienpersonal neben den abstrakten Prozessschaubildern und kennzahlenorientierten Diagrammen auch einen Eindruck bezüglich des "echten" Prozessablaufes zu geben.

Aufgrund der wachsenden Fülle von Informationen, die als Grundlage von Entscheidungen dienen müssen, werden die Entscheidungssituationen kontinuierlich komplexer. Schon die Selektion der "richtigen" Informationen, ihre Einordnung und die Beurteilung gegenseitiger Abhängigkeiten fordern den entscheidenden Menschen mehr und mehr heraus.

Eine zentrale Aufgabe agiler Informationssysteme besteht somit darin, eine Konvergenz zwischen der Leistungsfähigkeit der modernen IT und der Verständnisfähigkeit der Anwender herzustellen. Erreicht werden kann dies durch die Integration von coaching-Funktionen, die individualisierte Unterstützung für unterschiedliche Benutzergruppen und Anwendungsszenarien anbieten.

## 5. Objektgebundene Datenflüsse und agile Informationssysteme

An dieser Stelle ist es hilfreich, die Potenziale objektgebundener Datenflüsse und die Anforderungen an agile Informationssysteme zusammen zu führen.

Wenn objektgebundene Datenflüsse zu einem hohen Maß an Transparenz auch und gerade durch die Dezentralisierung der Datenhaushalte führen, ist der nächste folgerichtige Schritt, die Komplexität der Prozessabläufe und der entsprechenden Modelle in den Informationssystemen aufzulösen. Serviceorientierte Strukturen bieten sich in diesem Zusammenhang als Lösungsraum an.

Die Prozessorientierte Denkweise ist mittlerweile fester Bestandteil der Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen. Diesem Ansatz folgend, bezeichnet eine serviceorientierte Architektur (Service-Oriented Architecture, SOA) ein Architekturkonzept, das sich im Wesentlichen aus Diensten zusammensetzt, die von den Prozessobjekten angefordert werden können. Konnektoren erlauben dabei die Interaktion zwischen den implementierten und registrierten Diensten. Serviceorientierte Architekturen setzen konsequent das Paradigma der Trennung von Dienstbeschreibung und seiner Realisierung um und stellen damit ein hohes Maß an Transparenz sicher. Zu jedem Dienst existiert eine separate Schnittstelle, über die der Dienst eindeutig adressiert und angefragt werden kann

Das Konzept SOA weist im Wesentlichen drei Komponenten auf:

- Service Provider
   Diese Komponenten stellen Dienste (services) bereit;
- Service Requestor
   Anwendungen, oder in hier dargestelltem Zusammenhang Objekte, die Dienste anfordern;
- Service Registries
   Hier werden die angebotenen Dienste zentral registriert und das Suchen nach Diensten unterstützt.

Hinzu kommen Basisinteraktionen, die zur Registrierung eines Dienstes, zum Suchen und Finden eines Dienstes, zum Herstellen der Bindung zu einem Dienst und zur Anforderung an einen Dienst notwendig sind.

Das Konzept SOA führt damit unmittelbar zur Auflösung von Komplexität, was für agile Informationssysteme von entscheidender Bedeutung ist. Im Informationssystem müssen nicht mehr die Prozessabläufe vollständig mit allen Eventualfällen modelliert werden, sondern es sind lediglich die für die einzelnen Prozessschritte erforderlichen Dienste zu definieren und zu implementieren. Die Abfolge ihres Abrufes ergibt sich nicht durch eine vorweggenommene Modellierung, sondern durch das jeweilige Prozessgeschehen unmittelbar.

Dieser konzeptionelle Ansatz lässt sich nun hervorragend mit dem Ansatz der objektgebundenen Datenflüsse kombinieren; die Leistungsobjekte in den Produktions- und Logistiksystemen führen ihren Datenhaushalt mit sich und rufen entlang der Prozessschritte die jeweils notwendigen Dienste ab. Diese wiederum beziehen die relevanten Daten unmittelbar vom anfordernden Objekt. Da eine starre Modellbildung und -implementation entfällt, sind auf dieser konzeptionellen Plattform agile Informations- und Steuerungssysteme aufzubauen, die den Anforderungen im Hinblick auf eine hohe Flexibilität entsprechen.

## 6. Ökologie als Zukunftsthema der Logistik

Nicht unmittelbar ersichtlich, aber doch zwingend mit der Thematik agiler Unternehmen in Wertschöpfungsnetzen verbunden, ist das Thema Ökologie.

Aktuell nimmt die Diskussion um die durch den Menschen verursachte Klimaänderung an Eindringlichkeit und Schärfe zu. Der Logistik kommt in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle zu, wenngleich hier derzeit eher negative Aspekte im Vordergrund stehen. Die Themen der Atomisierung von Warenströmen im Handel und die Unterstützung bestandsminimaler Produktionsstrategien in Wertschöpfungsnetzen führen zwangsläufig zu einem hohen Aufkommen an Wirtschaftsverkehren. Die politischen und gesellschaftlichen Diskussionen gehen verstärkt in die Richtung, Individualverkehre durch gesetzliche Regelungen, die im Nachgang einer strengen Kontrolle hinsichtlich ihrer Umsetzung bedürfen, ökologischer zu gestalten. Ohne die Erfolgsträchtigkeit dieser Bemühungen in Zweifel zu ziehen, stellt sich aber doch die Frage, ob eine stärkere Fokussierung auf die Logistik nicht schneller und effizienter Beiträge zum Klimaschutz leisten kann.

Die Gestaltung logistischer Prozesse ist seit langer Zeit Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Es sind hoch effiziente Methoden der Planung und Steuerung entwickelt worden, die zur Optimierung der Logistik in der Beschaffung, der Produktion und der Distribution geführt haben und auch weiterhin führen. Auch Bereiche der Logistik, die das tägliche Leben tangieren, wie die Entsorgungslogistik, sind umfassend erforscht. Auf dieser Basis kann nun unter ökologischen Gesichtspunkten bestens aufgesetzt werden. Es sind umfangreiche Kennzahlenwerke entstanden, die zur Analyse und Optimierung logistischer Prozesse herangezogen werden können. Alle diese Kennzahlenwerke haben eines gemeinsam: sie orientieren sich an ökonomischen Aspekten. Die Minimierung von Durchlaufzeiten, die Sicherung einer hohen Termintreue oder die Reduzierung von Beständen sind typische Zielvorgaben, deren Erreichen mittels der Kennzahlensysteme analysiert und optimiert werden. Auch der Einsatz von Ressourcen wird dabei selbstverständlich in die Überlegungen und Optimierungsstrategien mit einbezogen. Zu den Ressourcen gehören natürlich technische, wie Fahrzeuge oder Fördertechniken. Auch Personal oder Flächen werden betrachtet. Dabei stehen jedoch ausnahmslos Investitions- und Betriebskosten im Vordergrund.

Die ökologische Dimension bleibt nahezu vollständig außen vor. Am Beispiel der Herstellung eines Erdbeerjoghurts zeigte Stefanie Böge in ihrer Diplomarbeit schon 1992, dass mehr als 9.000 LKW-Kilometer nötig sind, damit ein deutscher Joghurt im deutschen Ladenregal stehen kann. Die Erdbeeren stammen aus Polen, die Bakterien kommen aus Schleswig, das Glas wird in Bayern produziert, der Aluminiumdeckel wird im Rheinland gefertigt [BÖGE 1992]. Zwar wurde durch diese Arbeit ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit erzeugt, nachhaltige Überlegungen, wie umweltbezogene Aspekte berücksichtigt werden können, sind daraus jedoch nicht entstanden.

Logistische Prozesse laufen zumindest in der Idealvorstellung geplant, koordiniert, gesteuert und kontrolliert ab. Es liegt also nahe, in die diesbezüglichen Planungs- und Steuerungssysteme ökologische Parameter zu integrieren, um auch unter diesem Gesichtspunkt zu optimierten Ergebnissen zu kommen.

Dabei geht es nicht nur darum, Prozesse der Kreislaufwirtschaft logistisch zu unterstützen, sondern die Forderung besteht darin, die Logistik selbst ökologischer zu gestalten. Energieverbrauch, Schadstoffausstoß und Flächenverbrauch müssen in die Optimierungsstrategien eingebunden werden.

Betrachten wir als ein Beispiel in diesem Zusammenhang den Transport von Biomasse, die zur Energieerzeugung eingesetzt werden soll: Bisher exi-

stieren nur rudimentäre Ansätze und Modelle, um die zum Transport von Energieträgern aufzuwendenden Ressourcen vollständig in eine Berechnung der Energiebilanz oder auch der Wirtschaftlichkeit (Volkswirtschaft!) aufzunehmen. Der Wirkungsgrad der Energieträger wird sicher neu zu bewerten sein, wenn entsprechende Modelle den tatsächlichen Ressourcenaufwand transparent werden lassen. Auch auf die Produktion lassen sich derartige Fragestellungen abbilden: über welche Distanzen und mit welchen Ressourcen ist beispielsweise eine JIT/JIS-Anlieferung ökologisch noch vertretbar. Und natürlich kommt auch hier die Frage auf, in wie weit intelligente IT-Lösungen hier Unterstützung leisten können. Gerade diese Frage ist dann besonders kritisch zu stellen. Denn nicht alles, was technisch möglich ist, muss unbedingt Vorteile – hier in ökologischem Zusammenhang – mit sich bringen. Beispielsweise ist zu hinterfragen, ob die Forschungsarbeiten, die sich mit intelligenten Objekte, die sich ihren Weg durch Produktions- und Logistiksysteme selbständig suchen, auseinandersetzen, wirklich zielführend sind. Oder ob diese Forschung nicht ein eher einen Weg ins Suboptimale beschreiten, da sie zwar lokale respektive individuelle Optimierungen im Fokus haben, diese dem Gesamtzusammenhang also überordnen.

#### Literatur

[Böge 1992] Böge, Stefanie, Diplomarbeit an der Universität Dortmund: "Die Auswirkungen des Straßengüterverkehrs auf den Raum – Erfassung und Bewertung von Transportvorgängen in einem Produktlebenszyklus" am Beispiel von Milchprodukten ("Der Weg eines Erdbeerjoghurts")

#### Lutz-Günther Fleischer

#### Aus Partikularitäten soll wieder ein Ganzes entstehen

Leibniz' Wissenschaftsverständnis und seine Haltung zur Wissenschaftsorganisation war – wie mannigfaltig in Wort und Tat belegt – von der Ganzheit der Wissenschaft in ihren Teilen und dem Willen bestimmt "gleich anfangs das Werck samt der Wissenschaft auf den Nuzen (zu) richten". Diesem herausragenden Anliegen fühlte und fühlt sich – gerade wegen der gänzlich gewandelten Bedingungen der Wissenschaft des 21. Jahrhunderts – das Leibniz-Institut für interdisziplinäre Studien (LIFIS) verpflichtet. Gert Wangermann hat in diesem Band die tradierten Ziele und opportunen Mittel sowie Erfolge, Erfahrungen und Probleme dieses "virtuellen" Institutes seit seiner Gründung im Mai 2002 detailliert vorgestellt.

Logisch schließen sich daran Fragen nach der bewährten Kontinuität und dem notwendigen Wandel, nach den Bedingungen und Erfordernissen der weiteren Entwicklung an, danach was wir nach dem Resümee in der Gegenwart in die Zukunft übernehmen können.

"Unser Wissenschaftssystem ist auf eine beunruhigende Weise unübersichtlich geworden", stellt Jürgen Mittelstraß fest. "Das gilt nicht nur hinsichtlich eines sich immer stärker beschleunigenden Wachstums des Wissens, sondern auch in organisatorischer und institutioneller Hinsicht. Eine fachliche und disziplinäre Partikularisierung nimmt zu; die Fähigkeit noch in Disziplinaritäten, d.h. in größeren wissenschaftlichen Einheiten, zu denken, nimmt ab. Grenzen der Fächer und Grenzen der Disziplin, wenn man sie so überhaupt noch wahrnimmt, drohen dabei mehr und mehr nicht nur zu institutionellen Grenzen, sondern auch zu Erkenntnisgrenzen zu werden". Die unaufhaltsame Entwicklung zum Spezialistentum ist ein markantes Resultat. Interdisziplinarität, die aufeinander abgestimmte Bearbeitung eines Objektbereichs, dessen Analyse, Interpretationen, gegebenenfalls die Lösung komplexer, wissenschaftlicher und lebenspraktischer Probleme aus den unterschiedlichen Perspektiven, mit den Theorien und den jeweiligen Metho-

den verschiedener Wissenschaftsdisziplinen, kann zwar als unverzichtbares *Korrektiv der Partikularisierung*, aber kaum als Therapeutikum fungieren.

Aus den interferierenden Teilen entstehen – wo die *Interdisziplinarität im systematischen* oder u.U. sogar *im institutionellen Sinn* gelingt – tatsächlich Ganzheiten, wenn auch unterschiedlicher Integrationsgrade, aber tatsächlich Integriertes.

Nach den Erfahrungen des LIFIS lassen sich deutlich über Additionen des Disziplinären hinausgehende Ergebnisse bisher nur schwer erzielen, wenn das komplementäre, problemrelevante geistes- und sozialwissenschaftliche Gedankengut sowie Problembewusstsein in wertebasierten Diskursen mit natur- und technikwissenschaftlichen Erkenntnissen und Methoden integrativ verbunden werden soll.

Damit wirft sich die Frage auf, ob das lediglich subjektiv bedingt ist oder prinzipielle Schwierigkeiten existieren, in die Kooperation mit den charakteristisch reduzierten Objektbereichen und Methoden der weitgehend formalisierten und mathematisierten Natur- und Technikwissenschaften den *Menschen* als Objekt der Humanwissenschaften einzubeziehen und dabei seiner *biopsychosozialen Komplexität* gerecht zu werden.

Wegen der Begrenztheit der Interdisziplinarität hat Jürgen Mittelstraß schon 1986 das dazu komplementäre, fachübergreifende Konzept der *Transdisziplinarität* vorgeschlagen, um vor allem institutionell verursachte, allerdings auch aus wissenschaftlichen Notwendigkeiten resultierende "fachliche und disziplinäre Engführungen" aufzuheben und adäquater jenen komplexen und komplizierten Problemstellungen zu entsprechen, für die die historisch gewachsenen disziplinären Wissenschaftsstrukturen und Wissenschaftsprinzipien allein nicht mehr ausreichen oder sich die Probleme gar dem Zugriff einzelner Wissenschaftsdisziplinen zu weitgehend entziehen.

"The world has problems; universities have departments" – heißt es lakonisch. Die disziplinär strukturierte Wissenschaft beantwortet wesentliche gesellschaftliche Fragen nicht mehr befriedigend. Dazu gehören gerade solche, für das Wirken des LIFIS wichtigen Probleme, wie die Tendenzen, Triebkräfte und Implikationen wissenschaftlich-technischer und gesellschaftlicher Entwicklungen, die Möglichkeiten und Notwendigkeiten der Wissenschaft sich als Produktiv- und Humankraft zu entfalten, die Rolle der Technologie sowie Probleme, die mit Stichworten wie Energie, Rohstoff, Nahrungsmittel, Information, Umweltqualität, Gesundheit, generatives Verhalten der Menschen umrissen werden. Diese gesellschaftlichen Problemstellungen haben wesensgemäß nicht nur wissenschaftliche, sondern auch

zahlreiche außerwissenschaftliche Facetten und Komponenten. Sie bedürfen zur Problemanalyse und -lösung des Forschungs- und Wissenschaftsprinzips der Transdisziplinarität, das wissenschaftliches Wissen und nicht zuletzt "lebensweltliches" Wissen von Praktikern – die praktische und theoretische Transdisziplinarität (Mittelstraß) – in Verhaltens- und Handlungsalgorithmen legiert. Diese Strategie resultiert zwingend aus der Problementwicklung und deren Strukturen.

## Transdisziplinarität - ein weiterer Schritt zu Ganzheiten

Auf der Basis disziplinärer Kompetenzen strebt die Transdisziplinarität die gegenseitige Verständigung, den Erkenntnisgewinn und Handlungsempfehlungen in wissenschaftlicher Zusammenarbeit – darunter im produktiven Diskurs – mit anderen Wissenschaftsdisziplinen für solche fachübergreifenden Probleme an, die die gesellschaftliche Entwicklung selbst generiert, die der Wissenschaft bedürfen und auf sie zurückwirken. Das Gebot der Interdisziplinarität offenbart in dem Kontext seine Grenzen. Dass das vor allem die Prozesse und Resultate des tiefgreifenden und folgereichen wissenschaftlichtechnischen Wandels betrifft, liegt im Wesen der Sache und bestimmt demgemäß auch zukünftig sowohl die Themenwahl als auch die Arbeitsprinzipien des LIFIS. Partikularität und Universalität bedingen dabei einander.

Wissenschaftstheoretisch wird hervorgehoben, dass die Transdisziplinarität einer, die jeweiligen Methoden prägenden "allgemeinen Rationalität" mit all ihren Bestimmungsstücken, Maßstäben und den Kriterien logischer Systeme folgt. Trotz des dabei praktizierten reduktionistischen Vorgehens, einzelwissenschaftliche Methoden zweckbewußt, planvoll und begrifflich fassbar – eben rational – zu selektieren, kombiniert sie methodische Teile, Leitgedanken... transdisziplinär unter der skizzierten finalen Orientierung auf innerund außerwissenschaftliche Probleme zu einer nachhaltig kooperierenden wissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweise.

Als für den transdisziplinären Wissenschaftsansatz typisch gilt – allen voran – die mit den verschiedenartigsten, dynamischen, selbstorganisierenden und selbstregulierenden Systemen befasste *Kybernetik* und in noch ausgeprägterer Weise die Kybernetik der Kybernetik, die Second-Order-Cybernetics oder New Cybernetics. "*Cybernetics is a way of thinking, not a collection of facts*", heißt es, diese Strategie generell charakterisierend, in der Deklaration der "American Society for Cybernetics".

Während die systemtheoretisch bewährte "klassische Kybernetik" die Regelung der Systeme hinsichtlich der Stabilität, der Adaption, des Wachstums,

274 Lutz-Günther Fleischer

der Selbstorganisationen... unter hierarchischen Bedingungen verfolgt und nutzt, meistert die Kybernetik der Kybernetik für ihre Untersuchungen und Projekte zur Architektur, Organisation und Prozesssualität komplexer Systeme die Bedingungen der Heterarchie. Der Begriff "komplexes System" charakterisiert den logischen Komplextätigkeitsgrad ihrer wissenschaftlichen Beschreibung. In solchen Systemen kooperieren über- und nebengeordnete Strukturen, bedingen sich Hierarchie und Heterarchie. Heterarchie bedeutet, dass verschiedene, zueinander disjunkte, hierarchische Systeme – unter Beibehaltung ihrer Autonomie – zu kooperativen Einheiten verflochten werden können, die zudem (wie von biotischen Systemen bekannt) selbstreferentiell sind. Das ist eine neue Qualität, ein weiterer Schritt auf dem Weg zum Erkennen und Beschreiben von Ganzheiten.

Vergleichbares gilt beispielsweise für die *Nanotechnologie*, die fachübergreifend mehr und mehr über Strukturen der Größenordnung 10<sup>-9</sup> m begriffen und definiert wird. Es dominiert nicht die physikalische, chemische, biotische ... technische Spezifität der Strukturen mit ihren disziplinären Hierarchien.

Entscheidend ist, dass die Strukturen und Prozesse im Nanometerbereich etabliert sind und in diesem Übergangsbereich zwischen der atomaren und mesoskopischen Strukturebene der Einfluss von Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften wächst, u.U. sogar bestimmend wird, zunehmend quantenphysikalische Effekte auftreten und Prozesse der Selbstorganisation wirken. Dieser Band enthält dafür überzeugende Beweise sowie Anregungen und verdeutlicht, wie einzelne Nanostrukturen gezielt nach dem Top-downoder Bottom-up-Ansatz hergestellt, manipuliert und genutzt werden.

In seinen Funktionen eines Initiators, Koordinators und Organisators hat sich das LIFIS mit seiner 7. Augustusburger Konferenz zur Nanotechnologie und mit seiner 1. Konferenz der Reihe "Leibniz Conferences of Advanced Science", tradierte Grenzen sprengend, der Nanoscience zugewandt. Fortsetzungen werden zwingend folgen müssen, denn angesichts der gesellschaftlichen Bedeutung der Nanotechnologie sowie ihrer überragenden und heterogenen Potentiale bedarf es sowohl der qualifizierten innerwissenschaftlichen Kooperation als auch neuer Allianzen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Diese Schlüsseltechnologie generiert und trägt innovative Entwicklungen stark differenter Zeithorizonte in zahlreichen und verschiedenartigen technologischen Bereichen, dehnt ihre gesellschaftlichen Anwendungsfelder vor allem in der Wirtschaft, hinsichtlich der menschlichen Gesundheit und der Umweltqualität aus. Nicht zu vernachlässigen sind aber auch die ethischen Probleme, die des humanwissenschaftlichen Engagements bedürfen.

#### Focusthemen einer Allianz von Wissenschaft und Wirtschaft

Um nicht der Versuchung zu unterliegen, auch nur ausgewählte Bestimmungsebenen des unerschöpflichen gesellschaftlichen Phänomens Wissenschaft zu erörtern, sei unter pragmatischen Gesichtspunkten eine Kurzcharakteristik übernommen, die Reinhard Mocek verwendet: "Wissenschaft ist der in der Praxis gefundene theoretische Maßstab zur Erklärung und Beherrschung der Welt". Natürlich ist damit nicht das für fremde Eroberer typische Beherrschen gemeint, sondern das möglichst umfassende und effektive Nutzen der wissenschaftlichen Potentiale sowie der verschiedenartigsten Funktionen der Wissenschaft – ganz im Sinne von G. W. Leibniz für die "Wohlfahrt des Gemeinwesens" und in der Verbindung von Theorie und Praxis.

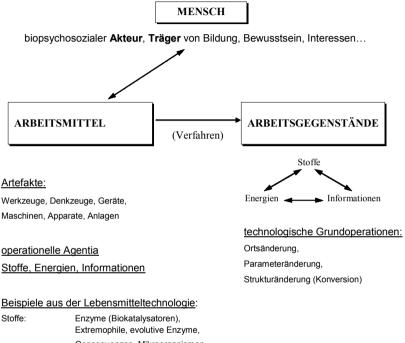
Aus dem hauptsächlichen Anliegen des Leibniz-Instituts für interdisziplinäre Studien, zwischen der Leibniz-Sozietät mit ihren hervorragenden wissenschaftlichen Kompetenzen und vor allem der Wirtschaft, produktive Verbindungen zu knüpfen und systematisch zu Netzwerken zu verflechten. resultiert die anspruchsvolle Verpflichtung, immer wieder entwicklungsrelevante Problem- und Themenfelder zu erkennen, Perspektiven und Optionen zu erörtern sowie geeignete Kooperationsformen zu kreieren. Dazu sollte das kritisch begleitete Experiment gehören, ein Expertsystem aufzubauen und zu erproben, dass das unbefriedigende und unzureichende bloße Nebeneinander einzelner Expertenmeinungen – aus mehr oder minder kompatiblen Perspektiven – inter- und transdisziplinär in problemadäguaten Expertisen aufhebt, um einem gesellschaftlichen Bedarf (einer zahlungsfähigen Nachfrage) zu entsprechen, projektorientiert Innovationen und den Technologietransfer. insbesondere in mittelständigen Unternehmen, zu fördern. Damit sind einerseits fundamentale Prozesse des wissenschaftlich-technischen Wandels, wie die fortschreitende, sozioökonomisch durchaus ambivalente Technisierung, die permanente Ausdehnung und Qualifizierung des Einsatzfeldes der artefaktischen und maschinenlosen Technik in der Produktion und über sie hinausgehend als dynamischsten Element der Technologie sowie die Technologien selbst angesprochen und unserer fokussierenden Aufmerksamkeit empfohlen. Die Technologie derart zu favorisieren bedeutet keineswegs sich unvertretbar einzuengen.

Wenn von *Technologien* die Rede ist, dann sind damit mindestens zwei fundamentale Sachverhalte einer beträchtlichen Universalität, hoher Komplexität und von überragender gesellschaftlicher Bedeutung hervorgehoben. Der *Begriff Technologie* charakterisiert

276 Lutz-Günther Fleischer

Erstens: ein Prozess-System, das "Wie", die produkt- und/oder prozess-bezogenen, praktischen Verfahrensweisen, die es Menschen ermöglichen, die Gegenstände ihrer Arbeit auf der Grundlage bestimmter Wirkprinzipien, mit eigens dafür geschaffenen Arbeitsmitteln, in bestimmten Kooperations- und Organisationsformen so zu verändern, wie es ihrenBedürfnissen und Interessen entspricht. In diesem Sinne gehören Technologien als objektiv-reale Bestandteile zu jeder Produktionspraxis. Mehr noch: Von der Art und Weise der Prozessgestaltung, der Verfahrensführung – von der Qualität der technologischen Produktionsweise – hängen auf allen Entwicklungsniveaus der Produktivkräfte und denen ihrer Wechselwirkungen mannigfaltige und widersprüchliche gesellschaftliche Effekte ab. Jede sozialökonomische Epoche bringt unter ihren Verhältnissen im System der Produktivkräfte – und mit deren Entwicklung unauflösbar verbunden – für sie typische Technologien hervor.

Zweitens: ein Wissens-System. Seit Johann Beckmann (1739–1811) umschließt der Begriff Technologie eine Gruppe von Wissenschaftsdisziplinen, die nunmehr gemeinsam mit den Konstruktions- und Material (Werkstoff)wissenschaften die Technikwissenschaften bildet. Die Wissenschaft Technologie hat die Elemente und Verflechtungen der materiell-technischen Seite der komplexen Produktionsprozesse zum Gegenstand. Sie strebt nach Hypothesen, Regeln, Prinzipien, allgemeinen und spezifischen Gesetzen, Gesetzmäßigkeiten sowie Theorien, die wesentliche (den Charakter bestimmende), innere objektive, allgemein-notwendige Zusammenhänge der Strukturen, Prozesse und Entwicklungen technologischer Systeme bzw. ihrer kooperierenden Bestandteile erfassen, um dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und der Produktionspraxis zu dienen. Aus der neuen Qualität des komplexen Erkenntnisobjektes, aus den methodischen Konzepten, der finalen Orientierung der Technologien folgt die Eigenständigkeit technologischer Gesetze. Das zweckbestimmte rationelle und effektive Zusammenwirken des Menschen mit den Arbeitsmitteln (das sind technische Konstruktionen und Verfahren sowie operationelle Agentia: Stoffe, Energien und Informationen zur Veränderung der Arbeitsgegenstände (also Stoffen, Energien und Informationen) ist eine charakteristische multipotente Integrationsebene von Produktivkräften und deren Interaktionen. Zu berücksichtigen sind dabei überdies soziale Aspekte, der Inhalt und Charakter der Arbeit, solche Verhältnisse von Mensch und Technik, wie die Funktionsteilung im Arbeitsprozess, die Bedien- und Fehlerfreundlichkeit der Technik, ökologische Bedingungen und Notwendigkeiten der Produktion sowie die technischen und technologischen Wirk- und Verfahrensprinzipien, die der Einflussnahme des Arbeitsmittels auf die Arbeitsgegenstände zugrunde liegen. Die eingefügten zwei Abbildungen sollen dem interessierten Leser helfen, das skizzierte Komprimat aufzulösen (Abb. 1).



Genseguenzen, Mikroorganismen

Energien: elektrische Hochspannungspulse,

Ultraschall.

Hochdruckzustände (pV), hochfrequente Wechselfelder

Informationen: Softwaresysteme zur on-line Steuerung und Regelung,

zur prospektiven Qualitätssicherung,

Gensequenzen

Abb. 1: Wechselbeziehungen in Technologien

Für jede reale Prozessgestaltung und Verfahrensführung wird unter den erörterten Gesichtspunkten aus einem – mehr oder minder bekannten, empirisch und/oder wissenschaftlich beschriebenen, aber stets von Naturgesetzen objektiv determinierten – naturgegebenen Möglichkeitsfeld, nach Maßgabe des

technisch Gestalt- und Beherrschbaren, des technisch, ökonomisch sowie ökologisch Betreibbaren, das ausgewählt, was die jeweilige Gesellschaft braucht und toleriert. Das Tolerieren ist als gesellschaftliches Kriterium ebenso wichtig wie die Nützlichkeit, denn Technologien sind zwar mit minimierbaren, aber selten gänzlich auszuschließenden Neben-, Fern- und Gegenwirkungen verbunden.

In erster Linie sind es die *Schlüsseltechnologien*, die die gegenständlichen Existenz- und Entwicklungsbedingungen der Gesellschaft tiefgreifend und nachhaltig wandeln, die es gestatten, bisher limitierende Produktivitäts-, Effektivitäts- und Kreativitätsschranken zu durchbrechen, das Leistungsvermögen der Menschen zu potenzieren, die Funktionsteilung zwischen der hochentwickelten Technik und den Menschen (und damit zugleich deren Arbeitsbedingungen) zu verändern, die Arbeitsteilung im gesamten Reproduktionsprozess grundlegend zu beeinflussen.

Mindestens vier (frei nach Horst Wolffgramm wiedergegebene) Funktionen zeugen von der hervorragenden gesellschaftlichen Rolle der Technologie:

- vermittelt sie, denn nur über die Technologien werden wissenschaftliche Ergebnisse – gleich welchen Fachgebietes (ebenso wie empirische Produktionserfahrungen) – produktionswirksam und damit in ökonomische Effekte wandelbar;
- 2. *integriert sie*, denn sie verkettet, koordiniert, kombiniert, koppelt ihrem dynamischen Erkenntnisniveau entsprechend die Elemente des Produktionsprozesses zu rationellen und effektiven technologischen Prozessen und Systemen;
- 3. *verändert sie*, indem sie alle Elemente der materiell-technischen Basis aber auch wie in zahlreichen Auseinandersetzungen spürbar das Denken und Handeln der Produzenten beeinflusst, mit Basisinnovationen u.U. sogar revolutioniert;
- 4. stimuliert sie, indem sie die Herausbildung und den Fortschritt sie tragender wissenschaftlicher Erkenntnisse, ja, sogar neuer Wissenschaftsdisziplinen, fördert und erzwingt. Sie forciert zudem die Entwicklung der technischen Mittel und Verfahren sowie der Organisationsstruktur und Arbeitsweisen.

Das "Wie" der Produktion, das *Prozess-System*, hängt – wie jeder Blick in die Geschichte der Menschheit und die ihrer Produktivkräfte bestätigt – entscheidend vom Niveau, der in ihr (im dialektischen Wortsinn) aufgehobenen Technik ab. Das Produktionsniveau wird maßgebend vom Entwicklungsstand der

"zweiten Natur", der vom Menschen erdachten, gestalteten und genutzten "künstlichen Umwelt" geprägt.

Technische Gebilde: Werkzeuge, Vorrichtungen, Geräte, Maschinen, Apparate, Ausrüstungen, Anlagen... repräsentieren technische Strukturen. Jene in ihnen ablaufenden Prozesse, für die die technische Konstruktion, das Artefaktische, eigens geschaffen wurde, charakterisieren die technische Funktion, der das technologische Primat zukommt.

Die revolutionierenden technologischen Prozesse und Systeme basieren gegenwärtig und in der näheren Zukunft in erster Linie auf leistungsstarken technischen Mitteln und Methoden zur Einwirkung auf die Arbeitsgegenstände. Das sind vor allem

- die Elektronik (in Sonderheit die Mikroelektronik), die Photonik und die Sensorik;
- Energien als Arbeitsmittel (Laser, Kernstrahlung, Ultraschall, Hochspannungspulse);
- die produktionspraktische Anwendung extremer Energiedichten (von Zuständen mit höchsten sowie tiefsten Temperaturen und Drücken);
- Werkstoffe und neue Materialien mit maßgerechten funktionellen Eigenschaften, Grenzwert- und Grenzflächeneigenschaften;
- die Nutzung vielfältiger chemischer und biotischer Mittel und Methoden (darunter Plasmareaktionen, die Chemo- und Biokatalyse, die mikrobielle Fermentation, die Produktion mit isolierten pflanzlichen sowie tierischen Zellkulturen und mit biotischen Objekten – vor allem Bakterien, Hefen, Pilzen – deren genetischer Code gezielt manipuliert wurde);
- die Realisierung verschiedener Methoden des stofflichen und energetischen Verbundes und Recyclings.

Zudem sei generell angemerkt, dass das Schlüsselwort zum Verständnis der Funktionen und des überragenden Stellenwertes der Mikro- und Optoelektronik INFORMATION heißt. In allen zu meisternden materiellen und immateriellen Prozessen müssen wachsende Mengen komplexer werdender Informationen ganz verschiedener Art rationell, effektiv, schnell und zuverlässig erzeugt, aufgenommen, übertragen, gewandelt, logisch und arithmetisch verknüpft, gespeichert, abgerufen und für die Steuerung und Regelung raumzeitlicher Abläufe in zweckmäßiger Form wieder eingesetzt werden. Elektronische Wirkprinzipien und Systeme dominieren heute in der dafür eingesetzten Informations-, Kommunikations- und Automatisierungtechnik. Außerdem sind derartige Systeme untereinander und in der Regel mit anderen physikalischen, chemischen und zunehmend biotischen Systemen kompati-

bel. Wegen der günstigen Preis-Leistungsverhältnisse, der hohen Zuverlässigkeit, des geringen Energieverbrauchs und ihrer miniaturisierten Ausführung bieten sie neue Problemlösungen und Optionen für nahezu alle gesellschaftlichen Anwendungsfelder. Davon zeugen u.a. Rechnerhierarchien zur Steuerung und Regulierung komplizierter Produktionsprozesse sowie ihnen vor- und nachgelagerter Hilfs- oder Nebenprozesse, aber auch die Verkehrstechnik, die Haushaltstechnik, die Unterhaltungstechnik, die Militärtechnik...

Jede *Technik* fungiert als Mittel, vergegenständlicht Wissenschaft, verkörpert Organe des menschlichen Willens. Wenn oben festgestellt wurde, dass die materiell-technischen Elemente des Produktionsprozesses und ihr optimales Zusammenwirken Kernstücke der Produktionstechnologien bilden, und dass bestimmte natürliche und gesellschaftliche Bedingtheiten zu ihrem ureigensten Beziehungsgefüge gehören, dann soll das heißen:

- Die Technik (im erörterten engeren Wortsinne) ist die entscheidende materielle Bedingung jeder Technologie, sie ist überdies ihr dynamischster Bestandteil. Gegenwärtig entsteht ein neuer, die informationellen Aspekte integrierender Techniktyp.
- 2. Jede produktionspraktische Technologie beinhaltet die konkrete Arbeit mit (mehr oder minder entwickelten) Produktionsmitteln, verfolgt das Ziel, im Arbeitsprozess rationell und effektiv Gebrauchswerte zu schaffen, das Natürliche für menschliche Bedürfnisse anzueignen, strebt die Verausgabung menschlicher Arbeitskraft in besonders effektiver und produktiver Weise an.
- 3. Die Technologie vereint nicht nur materielle Produktivkräfte, sie nutzt zudem die geistigen Produktivkräfte, umfasst zugleich die Art und Weise ihrer Kooperation in der Produktion und bestimmte darüber hinausgehende Wechselwirkungen. (Gemeint sind damit vor allem geistig-kulturelle, ökologische und ökonomische Gesichtspunkte der dialektischen Beziehungen von Mensch-Bildung/Bewusstsein, Mensch-Gesellschaft, Mensch-Technik, Mensch-Natur sowie Wissenschaft und Produktion.). Demgemäß bringt die Technologie innere und äußere Widersprüche hervor und wird in ihrer Entwicklung von beiden beeinflußt.
- 4. In keinem Fall ist ein technologischer Prozess mit dem Produktionsprozess identisch. Jede Produktion weist neben ihrem materiell-technischen Inhalt eine sozialökonomische Form auf. Diese gesellschaftliche Seite des Produktionsprozesses umfasst vor allem die Beziehungen des Menschen in ihm und die Partizipation am Ergebnis. Ebenso grundsätzlich ist der

Sachverhalt, daß die Bearbeitungsvorgänge und Herstellungsverfahren zu allen Zeiten von natürlichen, technischen sowie gesellschaftlichen Bedingungen und Potenzen abhängig waren und es auch zukünftig bleiben (Abb. 2).

Technologie



Abb. 2: Struktur der Technologie

Dass gesellschaftliche und technologische Entwicklungen eng verwoben sind, zeigt sich vor allem in den Implikationen der technologischen und gesellschaftlichen Produktionsweise. Die Innovationen, die heute zumeist aus einer Vielzahl von Resultaten verschiedener Wissenschaftsdisziplinen hervorgehen, äußern sich in der Art, Menge, Qualität und den Kosten der Erzeugnisse, in der Produktionstechnik und der Produktionstechnologie. In der Regel steigen die Ergiebigkeit und Nachhaltigkeit der voneinander abhängenden Neuerungen in gewichteter Folge vom Produkt über die technischen Mittel bis zur Hochtechnologie.

In erster Linie sind es die *Schlüsseltechnologien*, die die gegenständlichen Existenz- und Entwicklungsbedingungen der Gesellschaft tiefgreifend und nachhaltig wandeln, die es gestatten, bisher limitierende Produktivitäts-, Effektivitäts- und Kreativitätsschranken zu durchbrechen, das Leistungsvermögen der Menschen zu potenzieren, die Funktionsteilung zwischen der hochentwickelten Technik und den Menschen (und damit zugleich deren Ar-

beitsbedingungen) zu verändern, die Arbeitsteilung im gesamten Reproduktionsprozess grundlegend zu beeinflussen.

In der Konsequenz bedürfen Technologien sozio-ökonomisch-technischer Analysen, der komplexen Bewertung, der antizipativen Technikfolgenabschätzung und sie sind Herausforderungen für unser Selbstverständnis. "Bleibt man bei den Konstruktions-, Material- und Verfahrensregeln stehen", betont Herbert Hörz, "dann wird die wachsende Komplexität von Aufgaben und Entscheidungssituationen nicht beachtet, die natürliche, technische, gesellschaftliche, kulturelle und mentale Faktoren verknüpft. *Technologieentscheidungen* sind nicht nur politische und ökonomische, sondern auch kulturelle und soziale Entscheidungen, die die Entwicklung und die Existenz soziokultureller Identitäten prinzipiell beeinflussen. Eine Allgemeine Technologie muss sich auch dem Verhältnis von Humanität und Effektivität widmen."

Die *Allgemeine Technologie* oder – formulieren wir es bewusst in einer Analogie zur Kybernetik – die Technologie der Technologie, muss notwendigerweise unter ihren heterarchischen Bedingungen dem fachübergreifenden *wissenschaftlichen Konzept* der Transdisziplinarität folgen. Das im Kontext mit der Second-Order-Cybernetics Gesagte lässt sich dafür adaptieren. Für das Wirken des LIFIS stellt sich die Frage, wie unterschiedliche Sichtweisen und Rationalitäten noch erfolgreicher verbunden, strategisch genutzt und die Hindernisse für das Realisieren der Inter- und Transdisziplinarität überwunden werden können,

#### Literatur

- J. Mittelstraß, Methodische Transdisziplinarität. Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis, Nr. 2, Jahrgang 14, S.18-23, Karlsruhe 2005
- R. Mocek, Gedanken über die Wissenschaft. Berlin1980
- H. Wolfgramm, Allgemeine Technologie. Leipzig 1978
- H. Hörz, Technologie zwischen Effektivität und Humanität. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Jahrgang 2001, Band 50, Heft 7, S. 53-54, Berlin 2001