

Forschungszentrum Jülich



Energiezukunft 2030

Schlüsseltechnologien und Techniklinien

Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000
am 2. / 3. Mai 2000

U. Wagner, G. Stein (Hrsg)



VDI
GET

IKARUS

Instrumente für
Klimagas-Reduktionsstrategien



Umwelt
Environment



Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und
Technologische Entwicklung

Energiezukunft 2030

– Schlüsseltechnologien und Techniklinien –

Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000
am 2./3. Mai 2000

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, Dr. rer.nat. Gotthard Stein

Organisation und wissenschaftliche Begleitung

Forschungsstelle für Energiewirtschaft
der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V., München

Forschungszentrum Jülich

Verein Deutscher Ingenieure,
VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment

Band 26

ISSN 1433-5530 ISBN 3-89336-271-1

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Energiezukunft 2030 – Schlüsseltechnologien und Technikinien :

Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000 am 2./3. Mai 2000 / Hrsg.: Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung. Verant.: Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für Praktische Energiekunde, München ; Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf. Hrsg.: Ulrich Wagner ; Gotthard Stein. - Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2000

(Schriften des Forschungszentrums Jülich : Reihe Umwelt ; Band 26)

ISBN 3-89336-271-1

Herausgeber
und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
ZENTRALBIBLIOTHEK
D-52425 Jülich
Telefon (0 24 61) 61- 53 68 · Telefax (0 24 61) 61- 61 03
e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de
Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Umschlaggestaltung: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2000

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt/Environment Band 26

ISSN 1433-5530

ISBN 3-89336-271-1

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.



Energiezukunft 2030

– Schlüsseltechnologien und Techniklinien –

Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000
am 2./3. Mai 2000

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, Dr. rer.nat. Gotthard Stein

Organisation und wissenschaftliche Begleitung



Forschungsstelle für Energiewirtschaft
der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V., München



Forschungszentrum Jülich



Verein Deutscher Ingenieure,
VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf

IKARUS – Ein Entwicklungsvorhaben des Forschungszentrums Jülich
im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissen-
schaft, Forschung und Technologie (BMBF), Bonn

Projektleitung:

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)
des Forschungszentrums Jülich

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einführung	
Präambel <i>Prof. Dr.-Ing. U. Wagner, FfE München</i>	1
Das IKARUS-Projekt <i>Dr. techn. Ch. Holzapfel, Dr. rer. nat. G. Stein, Forschungszentrum Jülich, STE</i>	5
Einführung: Neue Energiepolitik im Dialog <i>Dipl.-Volkswirt W. Krause, BMWT Bonn</i>	13
1 Energieverbrauch und Ressourcen – Internationale Szenarien	
IKARUS-Statement „Identifizierung und Beschreibung von Techniklinien für Klimagas-minderungs-szenarien“ <i>Dr.-Ing. P. Markewitz; Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)</i>	15
Energie- und Technologieszenarien <i>Dr. Hanns-J. Neef; IEA Paris Cedex, France</i>	25
IPCC Weltenergieszenarien für das 21. Jahrhundert – CO ₂ -Reduzierung und nachhaltige Entwicklung <i>Dipl.-Phys. R.A. Roehrl; Herr Keywan Riahi; IIASA Laxenburg, Österreich</i>	39
2 Fossile und nukleare Energieumwandlung	
IKARUS-Statement „Entwicklung fossiler und nuklearer Energieumwandlungstechniken unter künftigen Bedingungen des Energiemarktes und notwendiger Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen <i>Dr. U. Fahl; Dr. rer.oec. D. Hermann; Prof. Dr.-Ing. A. Voß, IER Stuttgart</i>	57

Inhaltsverzeichnis

Perspektiven für die Energieumwandlungstechnologien bei Einsatz fossiler und nuklearer Brennstoffe 65

Prof. Dr.-Ing. R. Pruscek, Uni GH Essen

IKARUS-Statement „Regenerative Energien“ 95

Dr. Jochen Diekmann und Dr. H.-J. Hans-Joachim Ziesing

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

Der Beitrag erneuerbarer Energien in zukünftigen elektrischen Versorgungssystemen 111

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid^{1, 2}, Prof. Dr.-Ing. Werner Kleinkauf², Dipl.-Ing. Martin Hoppe-Kilpper¹, Dipl.-Ing. Michael Durstewitz¹, Dipl.-Ing. Uwe Krengel¹

¹ ISET, Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V., Kassel

² IEE, Institut für Elektrische Energietechnik, Universität Gesamthochschule Kassel

3 Klima

IKARUS-Statement „Klimaprobleme – Viele Fragen, wenige Antworten? 121

Dr. techn. Chr. Holzapfel; Forschungszentrum Jülich, STE

Wissenschaftlicher Stand der Klimaproblematik 127

Prof. Dr. C.-D. Schönwiese; Uni Frankfurt a.M.

4 Querschnittstechniken

IKARUS-Statement „Querschnittstechniken“ 141

Dr.-Ing. W. Mauch; Dipl.-Ing. J. Lilleike; Dipl.-Ing. A. Saller, FfE München

Inhaltsverzeichnis

Querschnittstechnik Telematik- Trends für Technologien und Anwendungen –	149
<i>Bernd Großkopf; Deutsche Telekom AG Bonn</i>	

5 Zukünftige industrielle Technologien

IKARUS-Statement „Zukünftige industrielle Technologien“	161
<i>Dr.-Ing. H. Bradke; ISI Karlsruhe</i>	
The Challenge of Major Improvements in Industrial Energy Efficiency	167
<i>Prof. Dr. K. Blok; Department Science, Technology and Society, Utrecht University, Netherlands</i>	

6. Innovative Konzepte für Gebäude

IKARUS-Statement „Innovative Konzepte im Gebäudebereich“	173
<i>Prof. Dr.-Ing. L. Rouvel; IfE TU-München</i>	
Innovative Konzepte für Gebäude im Neubau	181
<i>Prof. Dr. Th. Herzog; TU München</i>	

7. Verkehr

Mobilität sichern, Ressourcen schonen:	187
- Verkehrsdeterminanten des 21. Jahrhunderts –	
<i>Dipl.-Ing. Josef Brosthaus, TÜV Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH (TIE);</i>	
<i>Dipl.-Wirt.-Ing. Ralf Kober, TÜV Energie und Umwelt GmbH (TEU)</i>	

Energiezukunft 2030

Schlüsseltechnologien und Techniklinien

von Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, TU München / FfE München

Ausgehend von der Erklärung der Bundesregierung aus dem Jahre 1990, die CO₂-Emission in Deutschland nachhaltig zu reduzieren, haben verschiedene deutsche Forschungseinrichtungen im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Forschung und Technologie gemeinsam ein umfassendes Instrumentarium unter dem Namen IKARUS (Instrument für Klimagas-Reduktions-Strategien) entwickelt. Ziel ist es, das nationale Energiesystem und dessen Emissionsquellen für Treibhausgase zu erfassen sowie unterschiedliche Ansätze zur Klimagas-Minderung zu bewerten.

Im Laufe der derzeitigen Aktualisierungsphase im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie hat das Forschungskonsortium sich weiteren Herausforderungen zu stellen: Welchen Einfluss nimmt die Liberalisierung auf die Entwicklung von Energieeffizienz und Energieträgersubstitution und den Einsatz erneuerbarer Energien? Wie stellen sich die technischen und ökonomischen Rahmendaten der heute bekannten Technologien im Jahr 2030 dar? Gibt es neue „Schlüsseltechnologien“, die die energiewirtschaftliche Entwicklung binnen drei Jahrzehnten deutlich verändern können?

Das Anliegen dieser Veranstaltung ist eine Diskussion um die IKARUS-Techniksznarien im Jahr 2030 aus dem Bewußtsein, dass sich durch reine Fortschreibung der bisherigen bewährten technischen und ökonomischen Ansätze keine befriedigenden und belastbaren Ergebnisse erwarten lassen.

So ist neben der Erfassung und Beschreibung technischer Visionen z.B. auch eine Vorstellung über das gesellschaftliche Umfeld mit seinen Strukturen der Wohn-, Arbeits-, Produkt- und Verkehrswelt zu entwickeln. Dabei werden ganz besonders neue Formen der Informations- und Telekommunikationstechnologie eine wichtige Rolle spielen, die Auswirkungen auf fast alle Lebensbereiche des Menschen haben werden.

Über die aktuellen und zukünftig absehbaren energie- und umweltpolitischen Entwicklungen hinaus wie:

- der Energiemarkt-Liberalisierung,
- der deutschen und globalen Klimapolitik

- den Konsequenzen eines möglichen Kernenergieausstiegs in Deutschland,
- der derzeitigen Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien

ist der Blick dabei auf die Verursacher des Energieverbrauchs und der energiebedingten Emissionen zu richten.

Bild 1 zeigt die Primärenergiebilanz in Deutschland in ihrer Aufteilung nach Anwendungsarten und –sektoren. Die Verluste im Umwandlungssektor sind in dieser Darstellung verursachergerecht den Anwendungen Kraft, Raumheizung, Prozesswärme, Beleuchtung, Kommunikation bzw. den Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalt und Kleinverbrauch zugeordnet.

Stellvertretend für viele Einzeleinflüsse auf den Energieverbrauch unserer Volkswirtschaft sind im folgenden drei Beispiele aus dem energietechnischen Umfeld exemplarisch aufgeführt, in denen sich (bemerkt oder unbemerkt) besonders drastische Entwicklungen bereits vollzogen haben oder noch vollziehen werden.

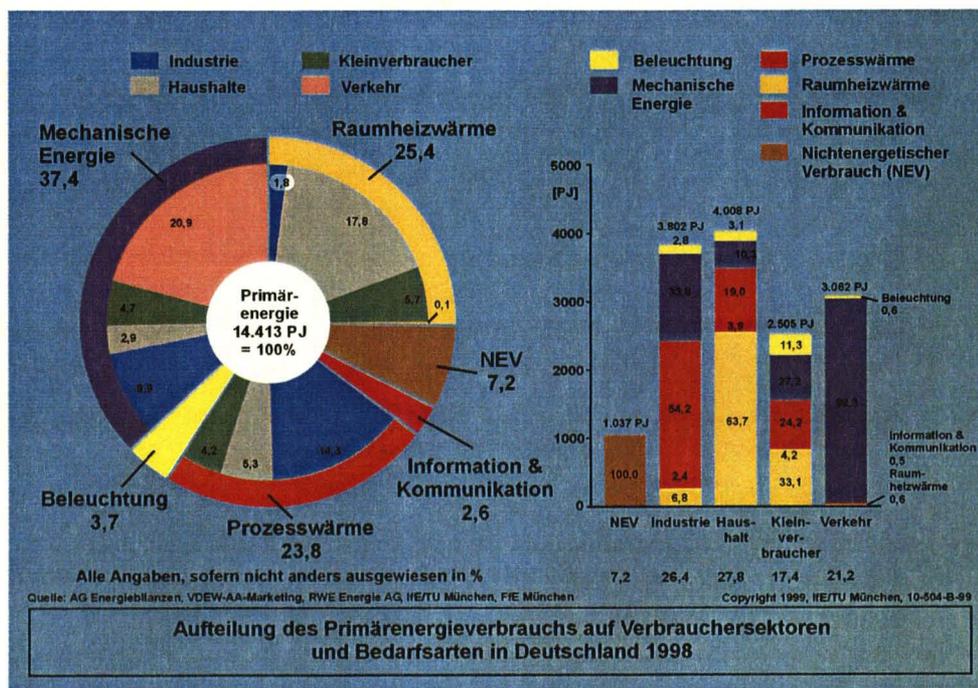


Bild 1: Aufteilung des Primärenergieverbrauchs auf Verbrauchersektoren und Bedarfsarten in Deutschland 1998

Elektrizitätswirtschaft:

Im Bereich der Stromerzeugung vollzieht sich derzeit im Zuge der liberalisierten Märkte ein sehr offensichtlicher Strukturwandel, den nur sehr wenige Personen in dieser Konsequenz und Geschwindigkeit vorhergesehen haben. Mittelfristig werden niedrige Energiepreise ein wirtschaftliches Hemmnis für rationellere Energienutzung auf der Verbraucherseite darstellen. Dafür steigt der Druck auf der Erzeugerseite, zu noch günstigeren Kosten zu produzieren. Bei Neuanlagen erfordert dies zwar einen verbesserten Nutzungsgrad der Anlagen, im Anlagenbestand zählt allerdings im wesentlichen nur der buchhalterische Zustand und nicht die energetische Qualität.

Die IKARUS-Ansätze zur langfristigen Entwicklung der Energiepreise und ihre Rückwirkungen auf die Erzeugungsstruktur in Deutschland und Europa sind daher kritisch zu hinterfragen.

Neben der durch die Liberalisierung erreichte räumliche Erweiterung der Netze wird zunehmend ein Trend zur dezentralisierten Stromerzeugung (z.B. mittels Kraft-Wärme-Kopplung durch Brennstoffzellen, Mikro-Gasturbinen und erneuerbarer Energien) erwartet. Es werden völlig neue Leittechniken für den Netzbetrieb erforderlich sein, mit Zugriff auf viele kleine dezentralisierte Einheiten und sofern wir dem Global Link zu diesem Zeitpunkt nicht schon ein gutes Stück nähergekommen sind, auch Speichersysteme in großtechnischem Maßstab.

Industrie:

Der Anteil des industriellen Endenergieverbrauchs in Deutschland ist innerhalb von 40 Jahren zwischen 1950 und 1990 von 45% auf 30% gesunken. Diese Entwicklung hat vielfältige strukturelle, konjunkturelle und technische Hintergründe, von der Stilllegung energieintensiver Industrien in Deutschland bis zur aktiven Energieeinsparung durch technische und organisatorische Maßnahmen.

Natürlich läßt sich diese Entwicklung nicht linear fortschreiben, was bedeuten würde, daß nach weiteren 40 Jahren, also im Zieljahr 2030, der Anteil bei nur noch 15% läge. Dennoch gibt es gute Gründe für die Annahme, daß das Ergebnis einer linearen Fortschreibung in diesem Fall so verkehrt gar nicht wäre: der weitere Rückbau ganzer Industriezweige und die zunehmende Hinwendung zum Dienstleistungsbereich als wichtigster Bereich der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung wird von vielen maßgeblichen Institutionen prognostiziert (und gewollt).

Es ist also erforderlich, die Industrie im Jahr 2030 nicht nur mit Blick auf die mögliche Technologie abzubilden, sondern auch das gesamte gesellschaftliche Umfeld unserer Volkswirtschaft zu analysieren.

Gebäude:

Die Raumheizung ist ein klassisches Beispiel dafür, wie technischer Fortschritt durch zunehmendes Raum- und Komfortbedürfnis ziemlich exakt kompensiert werden kann. Vielleicht ist es eine zu wenig gewürdigte technische Leistung (auch politisch in Form der Heizungsanlagen VO u.ä.) gewesen, trotz einer Verdoppelung der Wohnfläche in Deutschland innerhalb von 40 Jahren den Heizenergieverbrauch nicht zu steigern.

Das heisst natürlich nicht, dass hier die Welt bereits in Ordnung ist; die erheblichen Einsparpotentiale vor allem im Altbau bedürfen weiterer intensiver Betrachtung. Trotzdem soll es eine Bemerkung wert sein, dass auch bei dieser Anwendung die Technik, der Nutzer, ggf. der Eigentümer und natürlich die Politik ein integriertes System mit mannigfaltigen Wechselwirkungen und „Störfaktoren“ bilden.

Diese Beispiele verdeutlichen, vor welcher Herausforderung IKARUS in den nächsten Jahren steht: auch IKARUS kann zwar keine Politikprognose leisten, soll aber politische Entscheidungen durch zielorientierte Information mit technischem und ökonomischem Hintergrund beeinflussen. Die Beiträge dieser Veranstaltung sollen dazu dienen, mit der hier versammelten Fachkenntnis und Phantasie vielen interessanten Gedanken freien Lauf zu lassen, aus denen der Stoff für IKARUS 2030 gemacht wird.

Das IKARUS-Projekt

Dr. techn. Christian Holzapfel und Dr. rer. nat. Gotthard Stein
Forschungszentrum Jülich, STE

1 Hintergrund und Randbedingungen

Anstrengungen zum Klimaschutz stehen in Deutschland seit Mitte der 90'er Jahre auf der Prioritätenliste der politischen Agenda. Pionierarbeit ist hierbei von der Enquete-Kommission des deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ von 1987 bis 1990 und 1991 bis 1994 geleistet worden.

Die Bundesregierung hatte auf die Ergebnisse dieser Diskussionen reagiert und schon 1990 einseitig erklärt, CO₂ Emissionen um 25 % bis zum Jahre 2005 reduzieren zu wollen. In der internationalen Klimadiskussion stellte nach dem Abschluss der Klimakonvention 1995 die Klimakonferenz in Kyoto 1997 einen wesentlichen Meilenstein dar. Mit dem erfolgreichen Abschluss des Klimaprotokolls ist nun eine quantitative Festlegung im Reduktionsziel möglich geworden.

Alle diese Entwicklungen machen deutlich, dass in Deutschland ein Instrumentarium geschaffen werden musste, mit dem optimale Klimagasreduktionsstrategien analysiert werden können. So wurde in den 90'er Jahren das Forschungszentrum Jülich vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie mit der Durchführung des IKARUS (Instrumente für Klimagas-Reduktions-Strategien)-Projektes beauftragt.

Seit 1999 ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für das IKARUS-Projekt zuständig.

Ziel von IKARUS ist die Erarbeitung und Bereitstellung eines Instrumentariums bestehend aus Computer-Modellen und Datenbanken, mit dessen Hilfe verschiedene Strategien zur Reduktion der energiebedingten Emissionen von klimarelevanten Gasen, insbesondere CO₂, gegeneinander abgewogen und hinsichtlich des verwendeten Technikmix nach bestimmten Kriterien – beispielsweise Minimierung der energiewirtschaftlichen Kosten – optimiert werden können. IKARUS soll damit dazu beitragen, das Gesamtverständnis der Funktions- und Reaktionsweise unseres stark vernetzten Energiesystems, aus dem der weit überwiegende Anteil unserer

Treibhausgasfreisetzungen herrührt, zu vertiefen und die weiteren Strategieüberlegungen auf eine gut abgesicherte Grundlage zu stellen.

2 Wesentliche Aktivitäten

Die 1. Phase beinhaltete die Strukturierung der verschiedenen Einzelaufgaben und die Fertigstellung der Elemente des Instrumentariums. Während der 2. Phase wurden erste Anwendungen und Ergebnisse der Rechenläufe diskutiert und vorgestellt. Die 3. Phase hat als Schwerpunkte die Softwareaktualisierung sowie die Anpassung der Daten an die neuen Entwicklungen, die sich aus dem Kyoto-Protokoll ergeben haben. Das gilt insbesondere für die Treibhausgase des Kyoto-Protokolls sowie für die neuen Stützjahre 2010 und 2030 und für die Basisjahre 1995 und 2000.

Folgende Randbedingungen wurden für das Instrumentarium vereinbart:

- Untersuchungsgegenstand ist das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland mit den Basisjahren 1989, 1995 und 2000.
Analysenjahre sind 2005, 2010, 2020 und 2030.
Bis zum Stützjahr 2005 soll das Instrumentarium auch getrennt nach alten und neuen Bundesländern nutzbar sein.
- Das Instrumentarium soll in erster Linie Techniken von der Nutzungsenergie bzw. Energiedienstleistungs- bis zurück zur Primärenergieebene umfassen. Wirtschaftliche Einflußgrößen wie Kapitalverfügbarkeit und –kosten, Entwicklung von Rohstoff- und Güterpreisen, Außenhandel mit Energieträgern, Fragen der Innovationsdynamik und z.T. verfügbarer Kapazitäten (z.B. Obergrenzen für Förderkapazitäten von Bergwerken) sollen über die Rahmenbedingungen für Szenarien berücksichtigt werden.
- Die zu erfassenden unmittelbar und mittelbar das Klima beeinflussenden Gase sind vor allem Kohlendioxid (CO₂), aber auch Methan (CH₄), Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff (NMKW), Distickstoffoxid (N₂O), Stickoxide (NO_x) als NO₂, Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO₂), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und stratosphärischer Wasserdampf.
- Um eine vielfältige Nutzungsmöglichkeit zu gewährleisten, ist das Instrumentarium für Personalcomputer (IBM bzw. IBM-kompatibel) entwickelt worden. Auf Benutzerfreundlichkeit wurde besonderer Wert gelegt, ebenso auf Transparenz und Nachvollziehbarkeit der mit dem Instrumentarium ausgearbeiteten Strategien.

- Das Instrumentarium ist prinzipiell allen interessierten Nutzern zugänglich.
(siehe Abbildung)

Die IKARUS-Instrumente wurden in 8 Teilprojekten in enger Abstimmung untereinander von folgenden Institutionen entwickelt:

- Der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) des Forschungszentrums Jülich oblag die Modellentwicklung.
- Den Aufbau der Datenbank realisierte das Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe.

Die Datenbeschaffung leisteten folgende Institutionen mit 50 Unterauftragnehmern:

- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin (zuständig für Primärenergie),
- Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart (Umwandlungsbereich),
- Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der Technischen Universität München (Haushalte und Kleinverbraucher),
- Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) Karlsruhe (Industrie),
- TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH Köln (Verkehr) sowie die
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) der Gesellschaft für praktische Energiekunde München (Querschnittstechniken).

Die Programmgruppe Technologiefolgenforschung (TFF) des Forschungszentrums Jülich, die 1999 mit der STE zusammengelegt wurde, wurde mit der Koordination und Leitung des IKARUS-Projektes betraut.

Mit der genannten Projektzusammensetzung wurde das Ziel verfolgt, insbesondere hinsichtlich der Daten eine möglichst repräsentative, allgemein konsensfähige Wissensbasis zu schaffen und damit zu einer Versachlichung der Energiediskussion beizutragen. Neben mehr als 80 Veröffentlichungen werden seit Oktober 1997 die Hauptergebnisse von IKARUS auf zwei CD-ROM angeboten, die aktualisiert werden und die im folgenden vorgestellt werden.

3 Modell-CD-ROM

Die Modell-CD-ROM enthält 3 Modelle (siehe Abbildung):

Kernstück ist das technikorientierte **Optimierungsmodell**, das den Energiefluß der Bundesrepublik Deutschland von Primärenergieaufkommen bis zur Energiedienstleistung bzw. Nutzenenergie in ca. 2000 aggregierten Energietechniken in Form sog. „Platzhalter“ und deren Verbindungen abbildet. Das Modell arbeitet nach der Methode der linearen Programmierung. Optimierungskriterium ist in diesem Fall die Minimierung der Gesamtsystemkosten. Das Modell bewertet also den zur Änderung des Energiesystems (z.B. bei einer CO₂-Reduktionsvorgabe) notwendigen Aufwand in Form von Kosten. Im Gegensatz zu einem Simulationsansatz, bei dem die Auswirkungen einer vorgegebenen Strategie analysiert werden, errechnet das Modell einen optimalen Technikmix (bzw. –strategie) unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen (z.B. wirtschaftliche Entwicklung, Technikdaten etc.). Durch die Vernetzung im Modell werden die Wechselwirkungen innerhalb des Energiesystems berücksichtigt. Das Ergebnis einer Optimierungsrechnung entspricht dem Planungsergebnis eines „allwissenden energiewirtschaftlichen Planers“, der unter Berücksichtigung exogener Vorgaben (z.B. Nachfrage nach Energiedienstleistungen) entsprechend einem Zielkriterium eine energiewirtschaftlich insgesamt „optimale“ Struktur für ein Energiesystem entwirft; es kann damit für den Planer eine wesentliche Entscheidungsgrundlage und –hilfe sein. Das Modell arbeitet statisch und liefert Zustandsbeschreibungen für die Stützjahre 1989, 2005, 2010, 2020, bis zum Jahre 2005 differenziert nach alten und neuen Bundesländern. In der laufenden 3. Phase wird das Stützjahr 2030 mit einbezogen.

Die oben genannten Platzhalter stellen zunächst „leere Kästen“ dar, die mit Techniken, z.B. Kohlekraftwerken, belegt werden, die qualitativ den passenden Input (z.B. Kohle) und Output (z.B. Strom) haben. Dieses Konzept gewährleistet für den Benutzer eigene Belegungsmöglichkeiten und damit Flexibilität bei der Technikauswahl.

Das Modell verfügt über eine eigene Datenbasis, die aus der IKARUS-Datenbank hervorgegangen ist, und es kann somit unabhängig von letzterer betrieben werden. Neben den o.g. Eingriffsmöglichkeiten bei der Belegung der Platzhalter hat der Nutzer die Möglichkeit der Wahl von Schranken für den Einsatz von Platzhalter-Techniken, mit denen ihre Berücksichtigung erzwungen werden kann, auch wenn sie sonst – wie z.B. in der Regel die Photovoltaik – in der Optimierungsrechnung nicht in Lösung gehen würden. Ebenfalls können weitere exogene, von der Wirtschaftsentwicklung bzw. –prognose her bestimmte Größen wie Nachfrage nach

Energiedienstleistungen, Import- und Exportquoten, Importpreise oder inländische Gewinnungskosten für Energieträger und natürlich auch strategische Parameter wie Emissionsrestriktionen frei gewählt werden.

Zur Erleichterung der Modellhandhabung, aber auch zur Schaffung von Transparenz für die Ergebnisdiskussion sind Referenzbelegungen für die verschiedenen Raum/Zeit-Kombinationen im Datenspeicher des Modells enthalten. Alle Änderungen, die der Nutzer gegenüber der Referenzbelegung vornimmt, werden protokolliert.

Das zweite Modell ist das Teilmodell „**Technik-Ketten**“ oder kurz **Kettenmodell**. Es bietet die Möglichkeit, miteinander konkurrierende Verbindungen von Techniken mit gleicher energietechnischer Versorgungsaufgabe unter Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Technikketten hinsichtlich der Energieströme, Kosten und Treibhausgasemissionen zu vergleichen. Beispiele für solche Kettenvergleiche sind Braunkohlenförderung – Braunkohlenkraftwerk - Elektrospeicherheizung versus Erdgasimport – Verteilung - Zentralheizung oder der Vergleich Kraft-Wärme-Kopplung mit der Einzelproduktion von Strom und Wärme für die Versorgung von Haushalten.

Zum Aufbau der Technikketten und deren Bilanzierung wird auf die Topologie des Optimierungsmodells sowie die zugehörige Datenbasis zurückgegriffen. Das Kettenmodell hat aber eine eigene Datenbank, so dass es unabhängig vom Optimierungsmodell betrieben werden kann. Das Kettenmodell bietet nun die Möglichkeit, entweder, ausgehend von der Primärenergie bis hin zur Nutzenenergieebene oder auch umgekehrt, Folgen von Techniken aneinanderzureihen, durch die der Energiestrom seinen Weg nimmt. Die Ketten lassen bei Bedarf jeweils eine Verzweigung zu, so dass auch Techniken mit Koppelproduktion einbezogen werden können.

Das dritte Modell ist das **Makroökonomische Informationssystem MIS**, das im Auftrag der STE von der Arbeitsgemeinschaft Energie- und Systemplanung (AGEP) an der Universität Oldenburg entwickelt wurde und der makroökonomischen Analyse dient. MIS besteht aus einem dynamischen Input/Output-Generator und einem Wachstumsmodell. Die Volkswirtschaft ist gegliedert nach 30 Sektoren, darunter 9 Energiesektoren. Diesen Komponenten sind ein Elektrizitäts-, ein Verkehrs- und ein Wohnungsmodell angegliedert.

MIS stellt einerseits Rahmendaten der Wirtschaftsentwicklung bereit, die für sinnvolle Szenarienbildung und für die Optimierungsrechnungen benötigt werden und ermöglicht andererseits die Bewertung der Optimierungsergebnisse hinsichtlich volkswirtschaftlicher Widerspruchsfreiheit. Eine direkte Kopplung mit dem Optimierungsmodell besteht nicht; auf diese wurde aus methodischen und aus Gründen der Handhabbarkeit und Überschaubarkeit verzichtet.

Zur detaillierten Analyse sektor- oder auch einzeltechnikbezogener Fragestellungen, für die das Optimierungsmodell nur bedingt geeignet ist, sind die Simulationsmodelle **Verkehr, Raumwärme und Industrie, Kleinverbrauch** fertiggestellt bzw. befinden sich in der Entwicklung. Sie stehen auf eigenen CD-ROMs zur Verfügung.

Folgende **Minimalanforderungen an Hard- und Software**, ausreichend zum gleichzeitigen Betreiben der drei Modelle, müssen beim Nutzer erfüllt sein: IBM-kompatibler 80486 DX2/66 MHz-Rechner mit mindestens 16 MB RAM (oder Pentium P60 bzw. P90); Festplattenkapazität ca. 500 MB (IDE oder SCSI-II fast); Double Speed CD-ROM-Laufwerk; flimmerfreier 17" Farbbildschirm, der mit einer 1 MB Grafikkarte im 1024 x 768 Pixel/256-Farben-Modus betrieben wird; Betriebssystem DOS 5.0; Windows 3.11 (oder Windows 95).

4 Datenbank-CD-ROM

Ursprünglich lediglich als Quelle für Modelldaten vorgesehen, hat sich die IKARUS-Datenbank vor allem zu einem umfangreichen, eigenständigen, nicht an die Modelle gekoppelten Informationssystem entwickelt.

Hauptteil ist der Bereich **Technikdaten**. Er enthält alle relevanten technischen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Daten zu Einzeltechniken und technischen Systemen, die nach Expertenschätzung für die Stützjahre 1989, 2005 und 2020 repräsentativ sind – bis 2005 getrennt nach alten und neuen Bundesländern, mit der vorgesehenen Erweiterung auf 2030. Berücksichtigt sind die eingangs erwähnten Sektoren Primärenergie und Umwandlung sowie die Endenergiesektoren Haushalte, Kleinverbraucher, Industrie und Verkehr. Eine Sonderstellung nehmen die Querschnittstechniken wie z.B. elektrische Antriebe oder Beleuchtungstechniken ein. Sie stellen als sektorunabhängige Technikbeschreibungen einen wichtigen Teil des allgemeinen Informationssystems dar und sind ein wesentlicher Bestandteil der erwähnten technischen Systeme.

Zur Charakterisierung jeder Technik gehören neben technischen Daten Angaben zu Investitionen, festen und variablen Kosten, Art und Menge der eingesetzten Energieträger und Emissionen. Darüber hinaus sind weitere Informationen, z.B. zu Hilfs- und Betriebsstoffen oder Nebenprodukten, zu Unsicherheitsbandbreiten, zum Aktualisierungsbedarf, zu Literaturquelle etc. sowie teilweise auch Graphiken wie z.B. Schaltbilder, Kennlinien oder Abbildungen charakteristischer Gebäude enthalten.

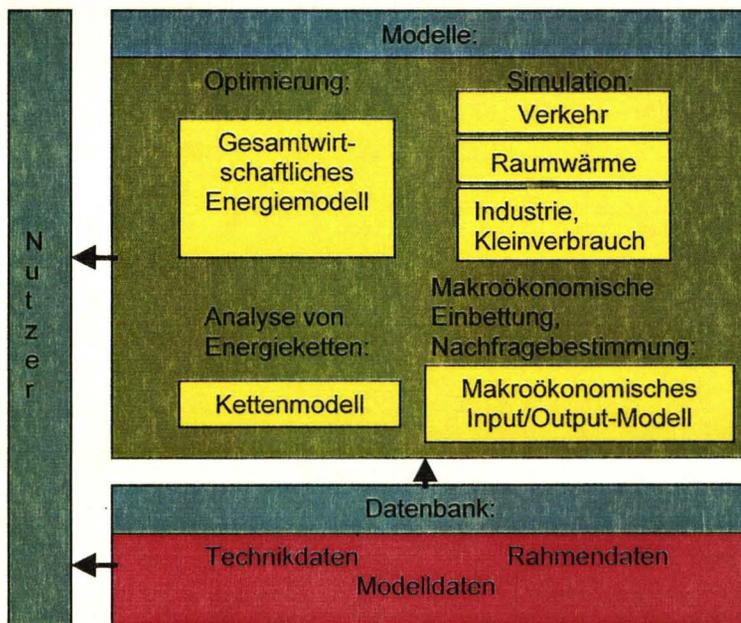
Der Bereich **Rahmendaten** enthält – ebenfalls für die genannten Stützjahre – Bestandsdaten und technische Potentiale der beschriebenen Techniken. Ferner sind zentrale makroökonomische und demographische Daten hinterlegt wie Bruttoinlandsprodukt, Weltmarkt-Energieträgerpreise oder Bevölkerung. Außerdem gehen Daten über die Industrie-, Wohnungs- und Verkehrsstrukturen ein, einschließlich der daraus abgeleiteten Bedarfsgrößen. Ebenfalls enthalten sind Energieträgerdaten, z.B. Heizwerte und auch die Treibhauspotentiale für die wichtigsten Treibhausgase.

Im Bereich **Modelldaten** schließlich sind die aggregierten Daten abgelegt, die für das Optimierungsmodell erzeugt wurden. Diese Daten sind – wie im Abschnitt 2 erwähnt – auch Bestandteil des optimierungsmodelleigenen Datenspeichers; die Funktion dieses Bereiches der IKARUS-Datenbank ist somit hauptsächlich die eines Zwischenspeichers.

Verschiedene Retrievalfunktionen ermöglichen ein von der graphischen Benutzeroberfläche her menügeführtes Navigieren durch den Datenbestand, das Durchführen von Technikvergleichen oder einfache Reporterstellung, Literaturanzeige und graphische Darstellungen in verschiedenen Retrievalebenen. Im Bereich Raumwärme wurde das Retrieval zusätzlich durch ein sog. „Tool“ ergänzt. Es erlaubt dem Nutzer, eine eigene Auswahl von Gebäudetyp, wärmetechnischem Standard, einzusetzender Heizungstechnik und von Verteilungssystemen für Heizung und Warmwasser zu treffen und dazu resultierende Werte für Kosten, Energieverbrauch, Emissionen u.a. zu berechnen und so die Datenbank zu erweitern.

Die Datenbank stellt folgende (Mindest-)Anforderungen an Hard- und Software des Nutzer-PC: IBM-kompatibler Personal Computer mit 486er Prozessor, 66 MHz; besser: Pentium-PC RAM-Speicher: mindestens 16 MB; empfohlen werden 32 MB; Festplattenkapazität: > 550 MB; Grafikkarte mit Auflösung 1024 x 768 Pixel und 256 Farben bei mindestens 70 Hz; Datenbanksystem: Personal Oracle V7 für Windows; Betriebssystem: DOS 5.0 oder höher; Windows 3.11 (oder Windows 95).

IKARUS Instrumentarium:



Einführung: Neue Energiepolitik im Dialog

Dipl.-Volkswirt Winfried Krause

**Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat IIIA6,
Bonn**

1 Einführung

Energiezukunft 2030: Bereits im Thema offenbart sich der hohe Anspruch, dem diese Veranstaltung gerecht zu werden versucht. Angesichts der rasanten Entwicklung der technischen Grundlagen ist die Perspektive auf die nächsten drei Dekaden ein gewagtes Unterfangen. Dieses umso mehr, als sich die Rahmenbedingungen der Energiepolitik gegenwärtig in atemberaubender Geschwindigkeit verändern:

- Wir erleben den Prozess der Globalisierung und des zunehmenden Wettbewerbs im europäischen Binnenmarkt.
- Wir beobachten die Umwälzungen der Marktstrukturen in Folge der Öffnung der leitungsgebundenen Energieversorgung.
- Wir realisieren die zunehmende Einbindung der nationalen Energie- und Umweltpolitik in den europäischen und sogar den weltweiten Rahmen.

Die Folgen dieser Veränderungen bekommen nicht zuletzt die Techniken zu spüren, von denen wir uns langfristig einen Beitrag zum Klimaschutzziel erhoffen: Erneuerbare Energien und Kraftwärmekoppelungsanlagen haben es schwerer, in den Markt zu kommen, wenn die Strompreise sich auf breiter Front nach unten bewegen, was unter dem Gesichtspunkt der Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft und aus Sicht der Verbraucher durchaus zu begrüßen ist.

Neben den Folgen der Liberalisierung ist das Thema Ressourcenschonung und Klimaschutz bei Maßnahmen der Energiepolitik mit zu berücksichtigen. Deutschland hat sich innerhalb der EU verpflichtet, den Ausstoß an Treibhausgasen bis zum Zeitraum 2008/2012 um 21% zu verringern. Über dieses Ziel im Rahmen des Kyoto-Prozesses

hinaus hat Deutschland erst im vergangenen Herbst sein nationales Klimaschutzziel bekräftigt, die CO₂-Emissionen bis 2005 um 25% gegenüber 1990 zu senken.

Wenn es gelingen soll, diese anspruchsvollen Ziele ohne gesellschaftliche Verwerfungen zu erreichen, müssen die Kosten für die Minderung der Treibhausgase möglichst niedrig gehalten werden. Welche Maßnahmen von staatlicher Seite hierzu einen geeigneten Beitrag leisten können, bedarf dabei gründlicher Abschätzung. Dabei kann das in den zurückliegenden Jahren für diese Zwecke entwickelte IKARUS-Instrumentarium eine große Hilfe sein. Aufgabe der am IKARUS-Projekt Beteiligten ist es, dieses Instrument auch in der geschilderten rasanten Veränderung des energiewirtschaftlichen Umfeldes einsatzfähig zu machen und aktuell zu halten.

Das Thema des Einstiegs in eine langfristig subventionsfreie und zukunftsfähige Energieversorgung ohne Kernenergie ist nicht nur unter zeitlichen Aspekten von weitreichender Bedeutung für die Entwicklung der Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland. Dabei kann es für die Regierung nicht darum gehen, „von oben“ die vermeintlich notwendigen Weichenstellungen vorzunehmen. Vielmehr hat für die Bundesregierung der breite und offene Dialog zwischen Politik, Wirtschaft und gesellschaftlichen Gruppen zu den Grund- und Zukunftsfragen der Energiepolitik ganz erhebliche Bedeutung. Diesen Dialogprozess hat die Bundesregierung im Juni des vergangenen Jahres mit dem Energiedialog 2000 eingeleitet. Die fruchtbaren und konstruktiven Diskussionen über eine deutsche Energiepolitik, die den Anforderungen des neuen Jahrhunderts genügt, nähern sich nunmehr ihrem Abschluss. Auf Basis der hierbei erarbeiteten Leitlinien wird die Bundesregierung ihre energiepolitische Gesamtkonzeption konkretisieren. Die Energiezukunft auf dem Wege zum Jahr 2030, dem Bezugsjahr dieser Veranstaltung, wird damit deutlich Konturen gewinnen.

Identifizierung und Beschreibung von Techniklinien für Klimagas-minderungsszenarien

**Dr.-Ing. Peter Markewitz
Forschungszentrum Jülich, STE**

1 Allgemeiner Rahmen

Die Beschreibung einer zukünftigen Energieversorgung setzt eine Vielzahl von Annahmen und Rahmendaten voraus. Von großem Einfluß für die Identifizierung sowie die Einschätzung der Entwicklung von Techniken und Techniklinien ist das jeweilige energiewirtschaftliche Umfeld. Dieses ist wiederum im wesentlichen charakterisiert durch

- die Entwicklung von Energieträger(import)preisen,
- die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung und dem damit verbundenen Strukturwandel,
- politische Vorgaben oder Restriktionen,
- sowie die zukünftige Entwicklung der internationalen Energiemärkte.

Ungeachtet der Unsicherheiten die mit einer langfristigen Vorhersage naturgemäß verbunden sind, müssen in einem ersten Schritt diese stark prognostischen und sich gegenseitig beeinflussenden Einflußgrößen zu einem in sich konsistenten Gerüst zusammengefügt werden. Auf dieser Basis erfolgen dann die Einschätzung und Beschreibung von Techniken und Techniklinien. In diesem Zusammenhang ist es vielleicht besser von sogenannten „Technikgeschichten“ zu sprechen. Eine massive Änderung dieser Rahmenbedingungen wie z.B. eine drastische Erhöhung von Energiepreisen oder eine stringente CO₂-Minderungsvorgabe erfordern eine neue Einschätzung einer Technik bzw. das Generieren einer neuen Technikgeschichte. Zielsetzung des IKARUS-Projektes ist die Bereitstellung eines Instrumentariums, mit dem Klimagas-minderungsstrategien analysiert werden können. Dies beinhaltet auch das Aufzeigen von möglichen Technikentwicklungen unter Vorgabe restriktiver CO₂-

Minderungsziele. Für die Entwicklung eines Szenarios bedeutet dies, daß für jede Technik mehrere Technikgeschichten erstellt und bereitgehalten werden müssen.

2 Technikbeschreibungen

Im Gegensatz zu den Energiewirtschaftsmodellen handelt es sich bei der IKARUS-Modellfamilie mit Ausnahme des Input-/Output-Modells MIS um technikorientierte Abbildungen. Technikbeschreibungen spielen somit eine zentrale Bedeutung für die Generierung von Szenarien. Die Modelldaten werden von den zuständigen Projektpartnern auf der Basis einer Vielzahl von Einzeltechnikdaten, die in der IKARUS-Datenbank enthalten sind, erhoben und in aggregierter Form angegeben. Sie spiegeln somit die Einschätzungen der in dem Projekt beteiligten Institute wider. Mit Hilfe von Modellen werden diese Daten in einem breiteren Kontext z.B. auf sektoraler Ebene oder auch für das gesamte deutsche Energiesystem analysiert.

Technikdaten werden in den Modellen in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzzweck mit einer Vielzahl von Attributen für die jeweiligen Stützjahre (zukünftig 2000, 2005, 2010, 2020, 2030) beschrieben. Dies sind Effizienzkriterien (z.B. Nutzungsgrade oder spezifische Verbräuche), Kosten, Emissionen, Bestandsentwicklungen (z.B. Sterbelinie des heutigen Kraftwerksbestandes) sowie die Angabe von Einsatzpotentialen.

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Randbedingungen gilt es, in einem ersten Schritt mögliche Techniken oder Techniklinien für bestimmte Einsatzzwecke generell einzuschätzen. Dies ist ebenfalls für das entsprechende Umfeld (z.B. Fortschritte in der Materialforschung etc.) zu leisten, das möglicherweise Auswirkungen auf die Weiterentwicklung von Techniken besitzt. Daran anschließend erfolgt eine Konkretisierung der Attribute, die auch Effizienz- sowie Kostenreduktionspotentiale beinhalten muß.

3 Technikbewertung mit Hilfe von Modellen

Eine Bewertung von Techniken im Rahmen eines einzelnen Energiesektors oder des gesamten Energiesystems gestaltet sich in der Durchführung als äußerst komplex. In diesen Fällen bietet sich der Einsatz von Modellen an, da er gegenüber einer Einzeltechnikbetrachtung verschiedene Vorteile besitzt.

- *Auswirkungen von Einzelmaßnahmen auf das Gesamtsystem*

Durch die simultane Bearbeitung der vernetzten energiewirtschaftlichen Prozesse werden die Wirkungen von bestimmten Einzelmaßnahmen auf das Energiesystem erfaßt. Hierbei werden auch Rückkopplungen innerhalb des Systems berücksichtigt.

- *Leichte Bearbeitung komplexer Vernetzungen*

Computergestützte Modelle besitzen eine in der Regel hohe Informationsverarbeitungskapazität, die es ermöglicht, große Datenmengen und komplexe Vernetzungen leicht zu verarbeiten. Darüber hinaus sind Ergebnisse leicht reproduzierbar, im Prinzip nachvollziehbar und innerhalb des Modells konsistent. Die Datenbasis kann beispielsweise laufend aktualisiert werden, um neue Entwicklungen zu berücksichtigen.

- *Präzisierung quantitativer Zusammenhänge*

Die Modellierung von energiewirtschaftlichen Fragestellungen sowie die modellgestützte Analyse verbessern das Verständnis für die quantitativen Zusammenhänge im Energiesektor, schaffen eine einheitliche Begriffsbasis und tragen somit zu einer wesentlichen Präzisierung energiepolitischer Argumente bei.

- *Szenarien und Sensitivitätsanalysen*

Verschiedene Szenario- und Sensitivitätsanalysen können zu einer bestimmten Fragestellung leicht durch eine systematische Veränderung von Eingabeparametern und Begrenzungen durchgeführt werden. Damit lassen sich bestimmte Hypothesen oder energiepolitische Zielsetzungen mit Hilfe des Modelleinsatzes z.B. im Hinblick auf die zu erwartenden Kosten oder die entstehenden Emissionen analysieren. Darüber hinaus ist es möglich, die Rolle von Techniken und Techniklinien in Form von Sensitivitätsbetrachtungen zu analysieren. Ein solches Vorgehen ermöglicht eine Aussage über die Robustheit eines möglichen Technikeinsatzes unter verschiedenen Randbedingungen.

4 Die IKARUS-Modellfamilie

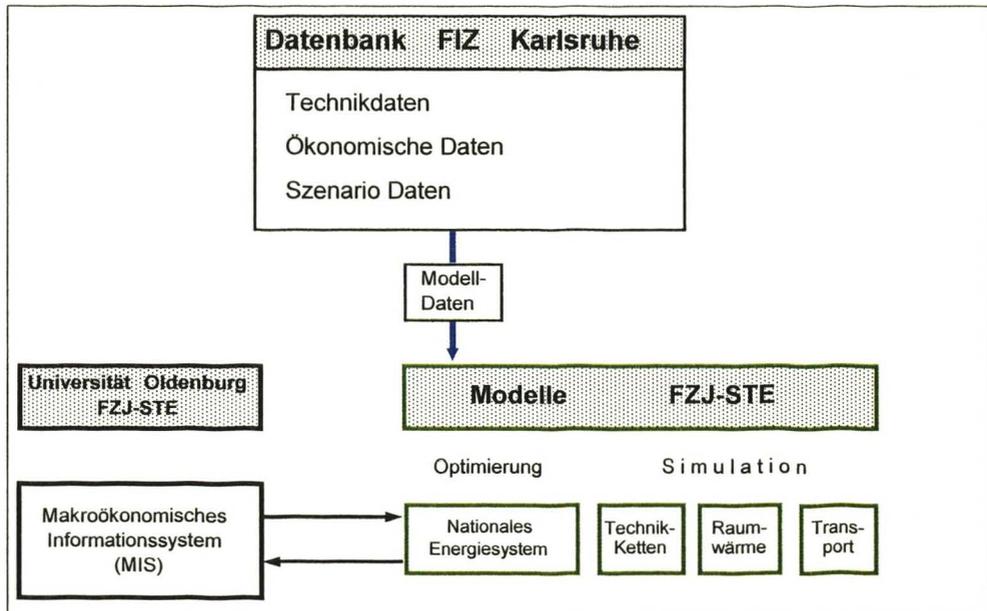
Das IKARUS-Instrumentarium (siehe Abb. 1), das aus verschiedenen Modellen und einer Datenbank besteht, wurde hinsichtlich der regionalen Auflösung für die Bundesrepublik Deutschland entwickelt. Zentrale Bausteine sind die Technikdatenbank sowie das Optimierungsmodell. Alle Elemente des Instrumentariums können unabhängig voneinander betrieben werden. Die vom Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe entwickelte Datenbank erfüllt im wesentlichen zwei Funktionen. Zum einen ist sie als eigenständiges Informationssystem konzipiert, und zum anderen stellt sie die originäre Datenbasis zur Generierung der Modelldatensätze dar. Die im Optimierungsmodell implementierten Basisdatensätze, die dem Nutzer standardmäßig angeboten werden, wurden von den IKARUS-Verbundprojektpartnern auf der Grundla-

ge der in der FIZ-Datenbank enthaltenen Daten erhoben. Zwischen dem Optimierungsmodell sowie der Datenbank besteht keine automatische Kopplung. Bei den im Optimierungsmodell enthaltenen repräsentativen Technologien handelt es sich um hoch verdichtete Technikaggregate, die aus einer Vielzahl von Einzeltechniken zusammengesetzt sind und deren jeweilige Anteile gewichtet sind. Die Aggregation erfolgt zum Teil mit Hilfe hierfür eigens geschaffener Tools, so daß sich der „Bauplan“ eines Technikaggregates prinzipiell nachvollziehen läßt. Das auf einem Input/Output-Ansatz basierende makroökonomische Informationssystem (MIS) liefert u.a. Rahmendaten (z.B. industrielle Wertschöpfung etc.), auf die zur Generierung der Nachfragen des Optimierungsmodells (z.B. Nettoproduktionswerte, Fahrleistungen etc.) aufgesetzt wird.

Die den Simulationsmodellen zugrunde liegenden Datensätze basieren ebenfalls auf der Technikdatenbank. Sowohl die Einzeltechnikdaten als auch die Modelldaten werden von den für die jeweiligen Bereiche zuständigen Projektpartner (Raumwärme im Haushaltssektor: TU-München, Verkehr: TÜV Rheinland) erarbeitet, so daß eine datenseitige Konsistenz zwischen Einzeltechnikdaten sowie Modelldaten gewährleistet ist. Eine automatische Verbindung zwischen Einzeltechnikdatenbank und Modellen besteht nicht. Neben der Beantwortung von Detailfragen, die aufgrund der aggregierten Auflösung des Optimierungsmodells nur bedingt möglich ist, besteht eine wesentliche Aufgabe der Simulationsmodelle darin, eine dynamische Betrachtung für die Zeitperioden zwischen den Zeitstützpunkten vorzunehmen. So ist es beispielsweise möglich, detaillierte Bestandsanalysen (z.B. Gebäudebestand, PKW-Flotte) auf Jahresbasis durchzuführen und für die betreffenden Bereiche eigene Szenarien aufzustellen. Die Ergebnisse dieser Szenarien lassen sich wiederum auf die Schnittstellen des Optimierungsmodells übersetzen, so daß ein sektorales Szenario auch in einem gesamtwirtschaftlichen Kontext bewertet werden kann. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit besteht darin, das Ergebnis eines Optimierungsmodelllaufes mit Hilfe der Simulationsmodelle für die jeweiligen Bereiche im Detail zu analysieren. Da das Optimierungsmodell als Punktmodell konzipiert ist, lassen sich mit diesem Modell nur bedingt Aussagen für die Zeiträume zwischen den Zeitpunkten treffen. Mit Hilfe der Simulationsmodelle lassen sich jedoch auf Jahresbasis Strategien entwickeln, mit denen Wege aufgezeigt werden können, die zu dem vom Optimierungsmodell errechneten Technologiemark führen.

Eine ausführliche Beschreibung der oben skizzierten Modelle findet sich in /Markewitz et al. 1998/.

Abbildung 1: Einbettung der IKARUS-Modelle in das Gesamtinstrumentarium



5 Anwendung des Optimierungsmodells

Das Optimierungsmodell bildet das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland in Form vernetzter Prozesse ab. Solche Prozesse sind z.B. die Gewinnung oder der Import von Primärenergie, die Umwandlung in Sekundärenergie (z.B. Stromerzeugung) und deren Verteilung sowie Nutzungstechniken (z.B. Heizungen, Wärmedämmmaßnahmen) in den Endenergiesektoren, um letztendlich die Nachfrage nach Energiedienstleistungen (z. B. Fahrleistungen, Wohnfläche, Industrieproduktion) befriedigen zu können. Dabei wird die Vielzahl der Optionen für verschiedene Techniken, die durch kosten- emissions- und effizienzseitige Attribute beschrieben werden, in ihren möglichen Vernetzungen der Energieflüsse erfasst. Neben ökonomischen und technischen Daten werden relevante energiepolitische Rahmenbedingungen (z.B. Umfang der inländischen Steinkohleförderung) berücksichtigt, indem diese als exogene Parameter vorgegeben werden. Das Energiesystem wird vom optimierenden Modell so gestaltet, daß die Nachfrage nach Energiedienstleistungen erfüllt wird. Die Nachfragen sind quasi die „treibenden Kräfte“ im Modell. Mit dem Verfahren der Linearen Programmierung wird die Deckung des zukünftigen Energiebedarfs vom Modell ermittelt, indem die gesetzten energie- und umweltpolitischen Ziele mit

volkswirtschaftlich minimalen Kosten erreicht werden. Dabei werden Art und Menge der zu verwendenden Energieträger sowie Typ und Kapazität der Energiewandlungstechniken bestimmt.

Ausgehend von der Fragestellung nach technischen Möglichkeiten der Reduzierung energiebedingter Klimagasemissionen sowie hierfür geeigneter Minderungsstrategien wurde das Optimierungsmodell Anfang der 90er Jahre konzipiert und entwickelt. Vor diesem Hintergrund wurde es im Rahmen zahlreicher Untersuchungen als Hilfsmittel eingesetzt. Beispielhaft seien an dieser Stelle die vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Untersuchungen *Politikszenerarien I und II* (Ziesing et al. 1997 und 1999/ genannt, in denen CO₂-Reduktionsstrategien bis zum Jahr 2005 sowie bis zum Jahr 2020 aufgezeigt wurden und deren Ergebnisse teilweise für die Erstellung des nationalen Klimaberichtes genutzt wurden.

Bereits 1990 verpflichtete sich die Bundesregierung die energiebedingten CO₂-Emissionen um 25% bis zum Jahr 2005 zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund wurde das Optimierungsmodell vielfach eingesetzt, mit dem Ziel, geeignete Minderungsstrategien zu erarbeiten. Von zentraler Bedeutung war in vielen Fällen die Frage nach den Kosten einer Minderungsstrategie. Tabelle 1 enthält eine Auflistung der durchschnittlichen spezifischen Minderungskosten verschiedener Szenarien, die eine grobe Bandbreite vermitteln soll. Bei Sensitivitätsrechnungen konnte festgestellt werden, daß die exogen gesetzte energierelevante Nachfrage einen großen Einfluß auf die Ausgestaltung einer Minderungsstrategie sowie auf die Kosten besitzt. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, kann eine Änderung der Nachfragen u.U. zu einer Verdopplung der spezifischen Kosten führen (vgl. Markewitz, Martinsen 1997/. Interpretiert man die 25%-Zielmarke als CO₂-Äquivalent und bezieht weitere Treibhausgase mit ein, liegen die Minderungskosten gegenüber den anderen in der Tabelle aufgelisteten Varianten am niedrigsten (vgl. Martinsen, Markewitz 1999a/. Ein Abbau der Kernkraftkapazität um 5 GW bzw. 10 GW bis zum Jahr 2005 führt zu einer deutlichen Erhöhung der Minderungskosten (Markewitz, Martinsen 1999b/.

Tabelle 1: Durchschnittliche spezifische CO₂-Minderungskosten in ausgewählten IKARUS-Szenarien (-25% bis 2005)

Szenariobeschreibung	DM/t CO₂ Niedrige Nachfrage	DM/t CO₂ Hohe Nach- frage
25%-CO ₂ -Reduktion nur in den alten Bundesländern	90	Keine Rechnung
ABL: Zusätzliche Minderungsmaßnahmen NBL: Emissionen wie Business as Usual, darüber hinaus keine zusätzlichen Maßnahmen	70	Keine Rechnung
ABL, NBL: Zusätzliche Minderungsmaßnahmen bei gleichen Grenzkosten	65	Keine Rechnung
D: 25%-Treibhausgasminderung als Äquivalent CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NMKWS	55	100
Kernenergieabbau um 5 GW	Keine Rechnung	155
Kernenergieabbau um 10 GW		200

Bei allen in der Tabelle aufgeführten Szenarien handelt es sich um Rechnungen, die in der zweiten Hälfte der 90er Jahre durchgeführt wurden und die sogenannte „lost opportunities“ von 1990 bis 1995 berücksichtigen. Würden die Rechnungen aus heutiger Sicht aktualisiert, dürften sich die „lost opportunities“ bis zum Jahr 2000 deutlich stärker auswirken, da die bislang erfolgten Minderungsanstrengungen weit hinter den Erwartungen zurückgeblieben sind und der bis zum Erreichen des Jahres 2005 verbleibende Zeitraum nur noch gering ist.

Da es sich bei dem IKARUS-Modell um ein Punktmittel mit den Zeitstützpunkten 1989, 2005 und 2020 handelt, konnten keine Rechnungen für das im Lichte der Kyoto-Verhandlungen wichtige Jahr 2010 durchgeführt werden. Darüber hinaus war es nicht möglich, über das Jahr 2020 hinauszugehen. Zu diesem Zweck wurde außerhalb des IKARUS-Projektes von der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung des Forschungszentrums Jülich das IKARUS-Optimierungsmodell mit Hilfe des MARKAL-Modellgenerators zu einem Mehrperiodenmodell umgeschrieben, wobei auf die gleiche Modellstruktur sowie Modelldaten aufgesetzt wird /vgl. Kraft 1997/. Mit dieser Modellvariante wurde unter anderem un-

tersucht, inwieweit die Restriktionsvorgabe einer über einen Zeitraum kumulierten CO₂-Minderungsmenge im Vergleich zu Restriktionen, die an Jahre gebunden sind, Auswirkungen auf die Minderungsstrategie, deren zeitlicher Verlauf sowie auf die Kosten besitzt.

Abbildung 2: Mehrkosten und CO₂-Reduktion im nicht kumulativen Reduktionsszenario im Vergleich zum kumulativen Reduktionsszenario /Kraft et al. 1999/

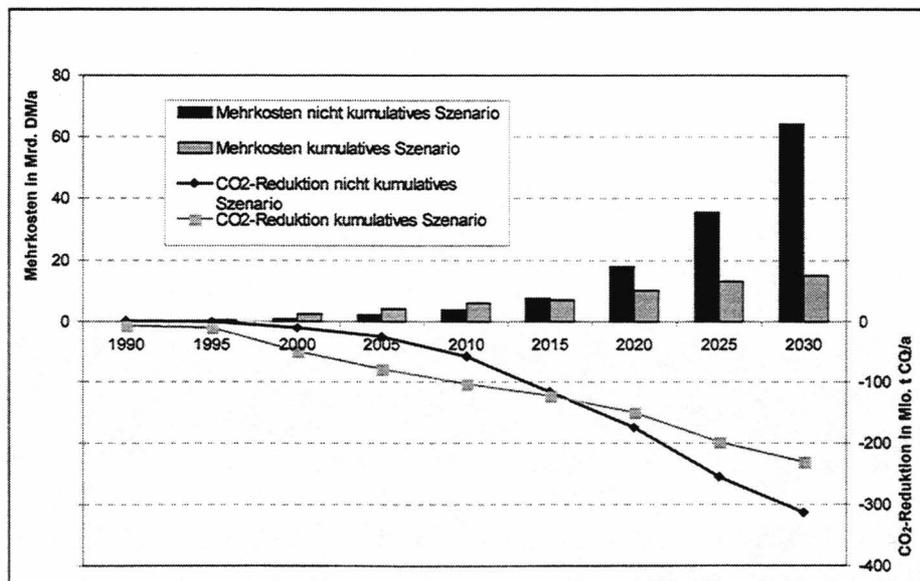


Abbildung 2 zeigt die zeitliche Entwicklung der CO₂-Emissionen sowie die Mehrkosten beider Strategien, deren CO₂-Minderungsmengen über den Betrachtungszeitraum identisch sind. Gegenüber einer an Minderungszielen orientierten Strategie (hier: -25% bis 2010, -40% bis 2020, -50% bis 2030) werden im kumulativen Szenario die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2015 deutlich stärker reduziert. Insbesondere handelt es sich hierbei um zusätzliche Maßnahmen im Umwandlungsbereich. Im Gegenzug kann nach dem Jahr 2015 bei der kumulativen Strategie auf zusätzliche Maßnahmen verzichtet werden. Dies führt in der Summe zu erheblichen Kostenentlastungen gegenüber einer an Jahreszielen orientierten Strategie, wie aus Abbildung 2 zu erkennen ist /vgl. Kraft et al. 1999/.

6 Schlußbemerkungen

Im Rahmen des IKARUS-Projektes wurde ein computergestütztes sowie nutzerfreundliches Instrumentarium geschaffen, mit dem es möglich ist, Klimagasminierungsstrategien detailliert zu analysieren. Das breite Anwendungsspektrum sowie die Tiefe des Analysegrades wurde in vielen Untersuchungen unter Beweis gestellt und dokumentiert.

Um das IKARUS-Instrumentarium auch zukünftig anwenden zu können, bedarf es einer Datenaktualisierung sowie die Implementierung neuer Stützjahre. Für den Szenariozeitraum bis zum Jahr 2030 sind Technikeinschätzungen und -bewertungen vorzunehmen. Die hierbei zu generierenden datenseitigen Technikbeschreibungen sind in die Modelle zu transformieren, wodurch auch in Zukunft der Einsatz der IKARUS-Modelle als Hilfsmittel zur Analyse von Klimagasminierungsstrategien gewährleistet ist.

7 Literatur

Kraft, A. (1997), Einsatz der Linearen Programmierung zur Analyse des energiewirtschaftlichen Potentials von Brennstoffzellen. Diplomarbeit an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Technische Informatik und Computerwissenschaften, Aachen Dez. 1997

Kraft, A., Markewitz, P., Martinsen, D. (1999), Das IKARUS-Markal Modell. In: Energiemodelle zum Klimaschutz, Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (Hrsg.), Reihe Umwelt und Ökonomie 33, Seite 248-276, Physica-Verlag, 1999

Markewitz, P., Martinsen, D. (1997), IKARUS-Minderungsstrategien für Deutschland. IKARUS-Workshop am 14./15. April 1997 in Bonn "Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien", Proceedings (Hrsg. J.-Fr. Hake, P. Markewitz), Forschungszentrum Jülich, Band 4200003, S. 37 - 61, Jülich 1997

Markewitz, P., Heckler, R., Holzapfel, Ch., Kuckshinrichs, W., Martinsen D., Walbeck, M., Hake J.-Fr. (1998), Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Umwelt Band 7, Jülich 1998

Martinsen, D., Markewitz, P. (1999a), Reduction of Energy Related Emissions of Greenhouse Gases in Germany. In: Greenhouse Gas Control Technologies (Ed. B. Eliasson, P.W.F. Riemer, A. Wokaun), Proceedings of the 4th International Conference on Greenhouse Technologies, 30 August – 2 September 1998, Interlaken, Pergamon Press, Elsevier Science Ltd. 1999

Markewitz, P., Martinsen, D. (1999b), Kernenergie und zielorientierte CO₂-Minderungsstrategie. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 49. Jg. (1999) Heft 1/2, S. 61 – 63

Ziesing, H.-J., Diekmann, J., Hopf, R., Kleemann, M., Kolb, G., Markewitz, P., Martinsen, D., Jochem, E., Ostertag, K., Schlomann, B., Cames, M., Matthes, F.Ch. (1997), Politikszenerarien für den Klimaschutz, Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Band 1: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005, herausgegeben von Stein, G., Strobel, B., Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 5, Jülich 1997

Ziesing, H.-J., Diekmann, J., Hopf, R., Katscher, W., Kleemann, M., Kolb, G., Kraft, A., Markewitz, P., Martinsen, D., Jochem, E., Schlomann, B., Cames, M., Matthes, F.Ch. (1999), Politikszenerarien für den Klimaschutz, Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Band 5: Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2020, herausgegeben von Stein, G., Strobel, B., Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 20, Jülich 1999

Energie- und Technologieszenarien

Dr. Hanns-Joachim Neef
Internationale Energieagentur (IEA), Paris

1 Einführung

Die Energie wird auch in Zukunft eine der tragenden Säulen der wirtschaftlichen Entwicklung und des gesellschaftlichen Wohlbefindens sein. Ökonomie, Technik, Umwelt und Geopolitik greifen ineinander, und es ist nicht einfach, weit in die Zukunft zu schauen. Die heutige Tagung hat als Horizont das Jahr 2030 gesetzt. Die Weltenergieprognose der Internationalen Energieagentur, IEA, [1,2] bietet globale Vorhersagen bis 2020 für Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Historisch gesehen sind 20 bis 30 Jahre ein kurzer Zeitraum. Die Einflüsse, die ihn bestimmen werden, sind doch schon recht klar und deutlich erkennbar [3].

Die Regierungen überlassen einen Teil ihrer Macht den Kräften des Marktes, insofern sie nationalstaatliche - und auch protektionistische - Barrieren entfernen; Strom und Gas, die vordem als Staatsmonopol betrachtet wurden, unterliegen zunehmend dem Wettbewerb.

Wie in anderen Wirtschaftszweigen kommt es auch in der Energiewirtschaft zu einer Fülle von Firmenübernahmen und -fusionen, durch die Riesenunternehmen wie BP-Amoco, Exxon-Mobil, TotalFina-Elf entstehen.

Die OPEC, die noch vor einem Jahr vielfach als todgeweiht galt, hat sich inzwischen mit anderen ölproduzierenden Ländern zusammengetan, mit dem Ergebnis, dass die Preise für Rohöl in den letzten Monaten auf 34 \$/Barrel geklettert sind. Das hat den Verwaltungsrat der IEA zu einem seltenen Schritt veranlasst: die Delegierten aus den 25 Mitgliedsländern haben im Februar 2000 eine Presseerklärung verabschiedet, in der sie ihre Besorgnis ausdrücken, dass die knapper werdende Versorgung die Inflation anheizen und das Wirtschaftswachstum verlangsamen könne. Dies stelle besonders für Entwicklungsländer ein Problem dar. Die für April 2000 angekündigte Erhöhung der Förderquote durch die OPEC um 1,45 Millionen Barrel wurde in einer weiteren Presseerklärung, diesmal des Chefs der IEA, als Schritt in die richtige Richtung bewertet.

Die Energiefrage verdeutlicht das Nord/Südgefälle. In Indien beträgt der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch von Energie gegenwärtig ein Sechzehntel des Energieverbrauchs der Vereinigten Staaten. Die Weltbevölkerung, die am 12. Oktober 1999 die Sechs-Milliarden-Grenze erreichte, nimmt weiter zu –eine zusätzliche Herausforderung für den Energiesektor. Ein Drittel der Menschheit ist bislang noch gänzlich ohne Zugang zu kommerziell erzeugter Energie. Die Bevölkerung der Entwicklungsländer entbehrt größtenteils immer noch der lebensnotwendigen Bedürfnisse: Nahrung, Unterkunft, reines Wasser und eine elementare Gesundheitsfürsorge. Vier Fünftel der Weltbevölkerung streben die Konsumgewohnheiten, den Lebensstil und die Technologien an, derer sich zur Zeit nur eine Ein-Fünftel-Minderheit erfreut. Mit der Wirtschaftsentwicklung und einer besseren Lebensqualität kommt es in den Entwicklungsländern aber auch zu einer unumgänglichen Steigerung des Energiebedarfs.

Umweltschäden durch Ölunfälle, durch die Luftverschmutzung in den Städten, sauren Regen, Reaktorunfälle und die Destabilisierung des globalen Klimas, rücken den Energiesektor ins Zentrum von Kontroversen und Protestaktionen. Wie immer Meinungen entstehen, wenn man dem einen oder anderen Wissenschaftler oder Politiker zuhört, die Treibhausgase sind politische Realität. Sie sind die größte Herausforderung für die Welt am Beginn des nächsten Jahrhunderts, so die in Davos versammelten Teilnehmer am World Economic Forum, im Januar 2000. Nüchtern betrachtet wird bei gleichbleibendem Trend des Energieverbrauchs erwartet, dass die globale Durchschnittstemperatur bis 2100 um ein bis 3,5 Grad Celsius zunimmt, mit der Folge, dass der Meeresspiegel steigt, dass kleinere Inseln und Küstenstädte im Wasser versinken und dass extreme Klimaverhältnisse entstehen, die ihrerseits die Landwirtschaft und das menschliche Habitat destabilisieren.

Gegenüber der Atomenergie kommt es zusehends zu divergierenden Meinungen, so daß manche Länder eine Beendigung ihrer Reaktorprogramme ankündigen, während andere Staaten hier ihr Engagement bekräftigen. Erstere betonen, dass Kernreaktoren im Betrieb keine Umweltverschmutzung und keine CO₂-Emissionen verursachen, und betrachten die Kernkraft als saubere Energieform. Für andere Länder hingegen stellt die nukleare Energie aufgrund der befürchteten Emission radioaktiver Strahlung, infolge eines Reaktorunfalls oder Problemen bei Transport, Lagerung und Beseitigung von Nuklearabfällen, keinesfalls eine nachhaltige Option dar. Der IEA-Weltenergieprognose zufolge wird die weltweite Stromerzeugung durch Atomreaktoren bei gleichbleibendem Trend im Jahre 2020 annähernd das Niveau von 1995 halten, doch dabei ihren Anteil an der Gesamtstromerzeugung mehr als halbieren. Innerhalb der OECD-Länder wird nuklear erzeugter Strom bis 2020 unter dem Niveau von 1995 liegen. Sein Anteil an der Gesamtstromerzeugung wird bis 2020 von gegenwärtig

einem Viertel auf ein Achtel sinken. Dieser Trend könnte allerdings gravierende Folgen für die Sicherstellung der Energieversorgung haben. Denn hier stellt sich erstens die Frage, ob es möglich sein wird, das seit der ersten Energiekrise aufgebaute hohe Niveau der Energieversorgungssicherheit zu halten, wenn die nukleare Alternative entfällt. Und die zweite Frage lautet: Welchen Einfluss wird dies auf die Höhe der CO₂-Emissionen haben?

2 Ziel und Annahmen der IEA-Weltenergieprognose 1998

Das Ziel der IEA-Prognose ist nicht eine bestimmte Vorhersage als die wahrscheinlichste auszusondern, sondern die wichtigsten Faktoren zu identifizieren, die das Energiesystem bis 2020 beeinflussen werden. Das "business-as-usual"- oder BAU-Szenario macht anschaulich wie Energienachfrage, Angebot und Preise sich entwickeln würden, falls heutige Trends anhalten und der Politikrahmen unverändert bleibt. Es schließt explizit die Wirkung neuer Politiken aus, wie etwa Maßnahmen, um Energieemissionen zu senken.

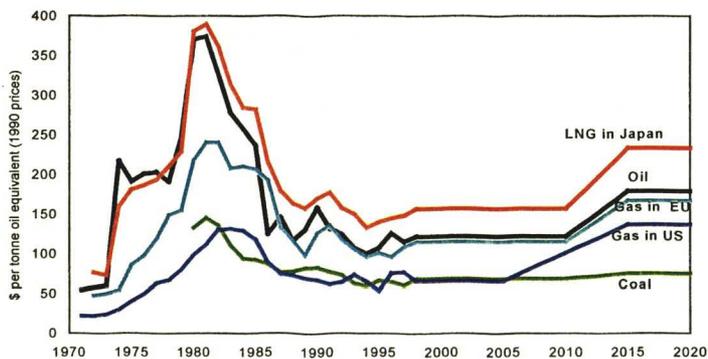
Im BAU-Szenario werden Annahmen für die Entwicklung des Bruttosozialprodukts, des Bevölkerungswachstums und der Brennstoffpreise verwendet, die derzeit (1998) von den Experten als wahrscheinlich eingeschätzt werden. Die Bruttosozialprodukte der verschiedenen Länder werden auf der Basis von Kaufkraftvergleichen (purchasing power parities) in Beziehung gesetzt. Unter der Annahme eines globalen Bevölkerungswachstums von 1,21 % pro Jahr (0,01 für die europäischen OECD-Länder) werden die folgenden Annahmen für das jährliche Wirtschaftswachstum spezifiziert:

Tabelle 2-1: Regionales Wirtschaftswachstum (% pro Jahr)

Region	1971-1995	1995-2020
OECD Nordamerika	2.6	2.1
OECD Europa	2.4	2.0
OECD Pazifik	3.5	1.8
Russland und Osteuropa	-0.5	3.3
China	8.5	5.5
Ostasien	6.9	4.5
Südasien	4.6	4.2
Lateinamerika	3.4	3.3
Afrika	2.6	2.5
Mittlerer Osten	2.7	2.7
Welt	3.2	3.1

Die Preise der verschiedenen Brennstoffe werden als exogene Größen auf der Grundlagen von Expertenmeinungen und Voraussagen marginaler Förderungskosten in das Model eingegeben. Diese Preisannahmen sind in der folgenden Graphik zu sehen.

Bild 2-1: Business-as-usual Annahmen für Brennstoffpreise



Sie beruhen auf der zentralen Annahme eines Rohölimportpreises von 17 USD pro Barrel Rohöl für die Periode 1998-2010. Dieser Preis steigt danach stetig auf 25 USD pro Barrel bis 2020 (stets in konstanten 1990 USD). Die teilweise extrem niedrigen Rohölimportpreise, wie sie 1998 und Anfang 1999 beobachtet werden konnten, werden in diesem Zusammenhang eher als Abweichungen von der langfristigen Entwicklung gesehen, denn als Zeichen eines neuen Zeitalters permanent niedriger Rohölpreise gedeutet.

3 Ergebnisse der IEA-Weltenergieprognose 1998

3.1 Welt

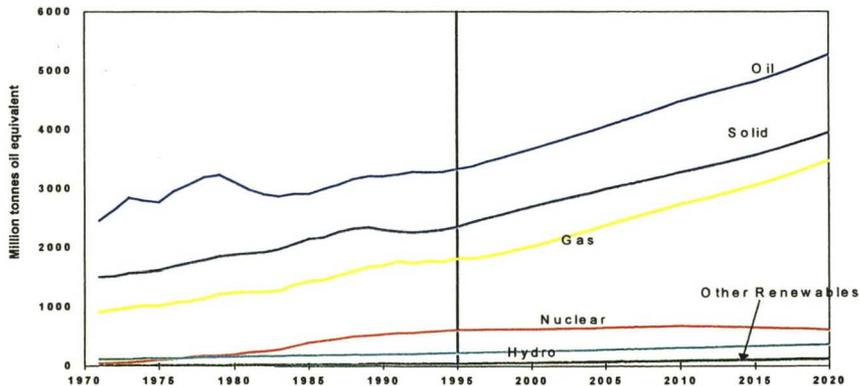
Die BAU-Prognose legt die Konsequenzen dar, die sich bei einer Politik des "weiterwie-bisher" für die kommenden zwanzig Jahre ergeben. Einige markante Ergebnisse für diesen Fall verdeutlichen den Trend (Bezugsjahr 1995):

- der Energiebedarf der Welt wird im Jahre 2020 um 65 % höher liegen,
- er wird zu 92 % aus fossilen Brennstoffen gedeckt,
- die energiebedingten CO₂ Emissionen aus den OECD-Staaten werden bis 2020 um mehr als 70 % ansteigen,
- in den anderen Ländern ist ein alarmierender Anstieg um 105 % zu erwarten.

Diese Projektion veranschaulicht die Kräfte, die dem wachsenden Energiebedarf zugrunde liegen.

Im folgenden wird ein detaillierterer Überblick über einige Ergebnisse geben.

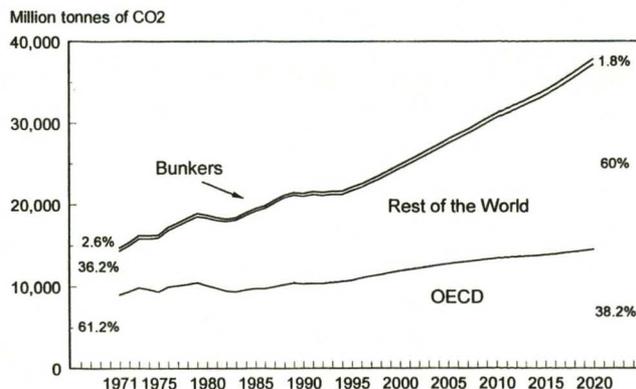
Bild 3-1: Weltprimärenergieverbrauch nach Brennstoffen 1971-2020



Dem in Bild 3-1 gezeigten nach Brennstoffen aufgeschlüsselten Weltenergieverbrauch entsprechen die Prognosen für die CO₂-Emissionen in Bild 3-2:

Bild 3-2: CO₂ Emissionen, Projektion bis 2020

World CO₂ Emissions



Von speziellem Interesse für die IEA, die 1974 als Antwort auf den ersten Ölschock gegründet wurde, sind stets die Projektionen der Ölnachfrage. Öl wird seine entscheidende Rolle sowohl für die industrialisierten als auch für die Entwicklungsländer beibehalten. Es wird die Energiebasis für den privaten Personenverkehr bleiben. Es bleibt auch der beliebteste Alternativbrennstoff für viele stationäre Formen wie Heizung oder Stromerzeugung.

Tabelle 3-1: Weltölnachfrage (Millionen Barrel pro Tag)

	1995	2010	2020	1995-2010	1995-2020
OECD	40.6	48.1	50.7	1.1 %	0.9%
Nordamerika	19.8	23.4	24.1	1.1%	0.8%
Europa	14.1	17.0	18.7	1.3%	1.1%
Pazifik	6.7	7.7	7.9	0.9%	0.7%
Nicht-OECD	29.5	46.0	59.9	3.0%	2.9%
Russl. und Osteuropa	6.0	7.2	8.5	1.2%	1.4%
Afrika	2.2	3.3	4.0	2.7%	2.5%
China	3.3	7.1	10.1	5.3%	4.6%
Asien	7.9	14.2	19.5	4.0%	3.7%
Lateinamerika	6.0	9.0	11.0	2.7%	2.5%
Mittlerer Osten	4.1	4.9	6.3	1.2%	1.7%
Gesamtnachfrage	70.1	94.2	111.0	2.0%	1.9%

Eine wichtige Maßzahl für die OECD ist die Importabhängigkeit vom Öl. Sie zeigt eine steigende Tendenz.

Tabelle 3-2: OECD Importabhängigkeit

	1996	2010	2020
OECD Nordamerika	45%	63%	63%
OECD Europa	53%	74%	85%
OECD Pazifik	90%	96%	96%
Gesamt OECD	56%	72%	76%

Stärker noch als für Öl steigt die Nachfrage nach Gas weltweit rasch an. Wo Gas geliefert werden kann und die entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, ist es der bevorzugte Brennstoff für Stromerzeugung, Raumheizung und Industrie. Schätzungen

der Weltenergieprognose 1998 zeigen, dass im Zeitraum 1995-2020 die weltweite Gasnachfrage jährlich im Durchschnitt um 2,6 % steigen wird

Die Steigerung der weltweiten Kohlenachfrage, hauptsächlich aus der Elektrizitätswirtschaft, wird jährlich auf 2,2 % geschätzt, mit deutlichen regionalen Unterschieden von minus 0,6 % in Europa bis zu plus 3 bis 4 % in Asien.

Zusammen werden die fossilen Brennstoffe Öl, Gas und Kohle ihre Vorrangstellung von über 90 % in der Energienachfrage während des gesamten Untersuchungszeitraumes beibehalten.

Der Beitrag der Kernenergie zur Weltenergieversorgung wird zwar absolut leicht ansteigen, prozentual wird er aber sinken.

Wasserkraft und erneuerbare Energien werden stetig ansteigen, allerdings startend von einer niedrigen Basis. Im BAU-Szenario wird prognostiziert, dass die jährliche Wachstumsrate 1,5 % ist. Das führt dazu, dass der Anteil der Erneuerbaren an der Weltenergieversorgung um 1,4 Prozentpunkte abnimmt.

3.2 Europa

1995 entfielen auf die OECD-Länder 35 % der Gesamtenergienachfrage der OECD und 19 % der globalen Nachfrage. Im BAU Szenario wird ihr Anteil bis 2020 auf 15 % sinken, da die Nachfrage der nicht-OECD-Länder deutlich schneller steigt.

Der Gesamtendenergieverbrauch wird zwischen 1995 und 2020 jährlich um 1,3 % steigen:

Tabelle 3-3: Entwicklung des Gesamtendenergieverbrauchs (Mtoe)

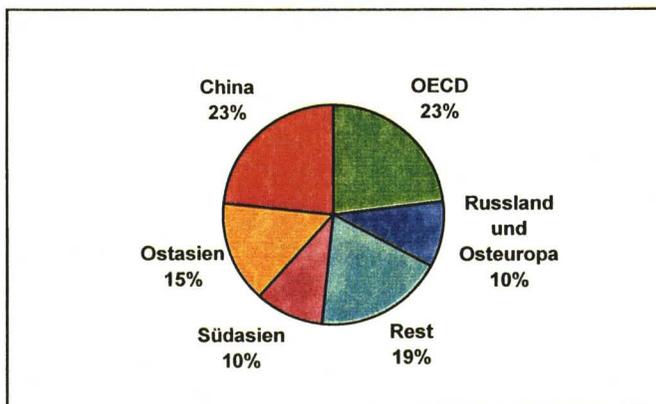
	1971	1995	2010	2020	1971 – 1995	1995 – 2020
Feste Brennstoffe	196	109	106	109	-2.4%	0.0%
Öl	523	567	701	768	0.3%	1.2%
Gas	71	225	280	274	4.9%	0.8%
Elektrizität	95	195	280	329	3.1%	2.1%
Heizung	3	23	36	48	9.5%	2.9%
Gesamt	887	1120	1403	1529	1.0%	1.3%

Gas wird seine Rolle in der Stromerzeugung kräftig ausbauen und die Ölnachfrage wird weiterhin vom Transportsektor vorangetrieben werden, zumindest bis die oft prognostizierte aber bisher unauffindbare Sättigung des Individualverkehrs einsetzt. Zusätzlich wird die Energieszene in Europa, möglicherweise mehr als in anderen Regionen, von politischen Entscheidungen beeinflusst werden. Der Ausstieg aus der Kernkraft, Kohlesubventionen, die Deregulierung des europäischen Strommarktes, der zunehmende Einfluss der Klimaschutzpolitik und die politikbestimmte Entwicklung der erneuerbaren Energieträger werden Entscheidungen der Energiewirtschaft weiterhin mitbestimmen.

3.3 Entwicklungsländer

Bis 2020 werden auf die Länder außerhalb der OECD zwei Drittel des zusätzlichen Primärenergiebedarfs entfallen. Dem entspricht auch ihr Anteil an der zusätzlichen Ölnachfrage, sowie an den energiebedingten Treibhausgasen. Die Entwicklung der Energiesektoren und der Energiepolitiken in den Entwicklungsländern werden somit weltweit entscheidende Bedeutung haben und verdienen große Aufmerksamkeit.

Bild 3-3: Regionale Anteile am Wachstum des Primärenergiebedarfs bis 2020



3.4 Die Weltenergieprognose 2000

Die IEA Weltenergieprognose 2000 ist gegenwärtig in Vorbereitung und wird im Vergleich mit der bisherigen Arbeit einige markante Änderungen ausweisen. Zunächst wird das bisherige BAU-Szenario um einige bereits beschlossene Politikmaßnahmen bereichert. Das neue „Referenzszenario“ ist somit näher an einer echten Vorhersage.

Die bisherigen BAU-Szenarien sind nützliche Entscheidungshilfen. Ihr spezieller Charakter war aber nicht immer in der oft nötigen Kürze vermittelbar.

Die Weltenergieprognose 2000 wird auch um ein Kapitel über den Handel mit Zertifikaten von CO₂-Emissionen im Rahmen des Kyoto Protokolls erweitert. Auf Grund detaillierter Studien werden mögliche Preise, sowie Kosten und Einnahmen der Käufer und Anbieter, auf einem solchen Zertifikatsmarkt berechnet. Die IEA hofft damit, den Diskussionen über die Einrichtung eines solchen Marktes eine solide quantitative Grundlage zu liefern.

Fortschritt wird es auch in der Berechnung der Vorhersagen im Verkehrs- und im Stromerzeugungssektor geben. Verkehrs- und Technologieexperten der IEA wurden herangezogen um den Vorhersagen auf der Sektorebene detaillierte technische Szenarios zu Grunde zu legen. Dies stützt nicht nur die Aussagekraft der Vorhersagen, sondern erlaubt auch eine differenzierte Diskussion von möglichen Politikmaßnahmen.

Eine spezielle Studie des immer wichtiger werdenden indischen Energiesektors wird die Weltenergieprognose 2000 abrunden.

Im Moment ist es noch zu früh ist über Einzelheiten der Vorhersagen zu berichten. Die Weltenergieprognose 2000 wird im November 2000 von dem Exekutivdirektor der IEA im Rahmen der 6. Vertragsstaatenkonferenz zum Klimaschutz vorgestellt werden.

Es ist nicht zu viel gesagt, dass wir uns von unseren neuen Prognosen einen deutlichen Fortschritt für das immer stärker werdende Zusammenwachsen der Vorhersagen von Ökonomen und Technologieexperten versprechen.

4 Technologieszenarien

Die IEA Weltenergieprognose, die alle zwei Jahre aktualisiert wird, macht implizit von Fortschritten bei den Energietechnologien Gebrauch. Dies wird aber in aggregierter Form getan, und im BAU-Szenario werden die Trends der Entkopplung des Energieverbrauchs vom Wirtschaftswachstum, aber auch die Verbrauchergewohnheiten –z.B. erhöhter Energieverbrauch bei steigendem Einkommen- bis 2020 festgeschrieben. Das BAU-Szenario setzt voraus, dass der Politikrahmen unverändert bleibt, dass neue Maßnahmen, um klimawirksame Emissionen zu reduzieren, nicht ergriffen werden. Um technologische Fortschritte im einzelnen und Technologieszenarien zu betrachten, müssen wir uns andern Aktivitäten der IEA zuwenden. Solche Szenarien sind immer im Zusammenhang mit politischen Maßnahmen zu sehen, die neue Technologien verstärkt in den Markt bringen.

Grundlage für die technologischen Arbeiten der IEA ist ein internationales Zusammenarbeitsprogramm, welches z. Zt. 40 aktive Projekte und mehrere Komitees mit einer Vielzahl von Teilaufgaben umfaßt. Diese „Implementing Agreements“ –die hier im einzelnen und in ihrer Wirkungsweise nicht beschrieben werden sollen [4]– bilden ein Netzwerk von Energieexperten, die im nationalen Rahmen an der technologischen Entwicklung und ihrer politischen Umsetzung aktiv mitwirken. Ihre internationale Zusammenarbeit im Rahmen der IEA erlaubt es, neben konkreter F&E-Kooperation, auch auf ihre Erfahrung zurückzugreifen, wenn es um die Bewertung technologischer Entwicklungen geht.

Ein IEA-Projekt aus dem vorigen Jahr, das zu einem gewissen Abschluss gebracht wurde, uns aber in Teilaspekten weiter beschäftigt, ist von Relevanz für das Thema der heutigen Tagung. In dem Projekt wird die Frage gestellt, welche Rolle Technologie bei der Reduzierung von Treibhausgasen spielt, die durch den Energiesektor verursacht werden [5]. Wer eine Frage stellt, muss auch definieren, für wen die Antwort gedacht ist. In diesem Fall sollte die Antwort an die Adresse der IEA Minister gehen, die sich alle zwei Jahre in Paris treffen. Die Initiative zum Projekt war vom IEA Committee on Energy Research and Technology (CERT) ausgegangen, in dem von deutscher Seite das Bundeswirtschaftsministerium vertreten ist.

Zwei Produkte sind aus dem Projekt hervorgegangen, ein analytischer Bericht und ein zwei-Seiten-Dokument mit der politischen Botschaft für die Minister. Minister nehmen meist nur diese Botschaft zur Kenntnis und berücksichtigen sie im günstigsten Fall bei ihren Entscheidungen.

Der Bericht enthält auch die Ergebnisse von Modellrechnungen zu Technologie-szenarien, auf die ich kurz eingehen möchte. Die Rechnungen hatten zum Ziel, den Beitrag der verschiedenen Technologien zur Reduzierung der klimarelevanten Emissionen zu bestimmen.

Diese Modellrechnungen wurden von einer Gruppe von Experten durchgeführt, die von den IEA-Mitgliedsländern und von der Europäischen Kommission gefördert wurden. Angefangen hatte das Projekt mit einem Seminar in Paris, 1997, [6], in dem die verschiedenen Modelle in einer Untersuchung gegenübergestellt wurden; auch IKARUS wurde einer kritischen Bewertung unterzogen. In der Folge wurden Modellrechnungen für den Fall von signifikanten Kosten- und Leistungssteigerung verschiedener Technologiegruppen durchgeführt. Diese Technologie-Stories wurden als Ergebnis eines erhöhten Investment in F&E angenommen. Es ist natürlich schwer, verschiedene Modellrechnungen mit exakt gleichen Basisannahmen durchzuführen. Deshalb wurden nur drei Modelle mit einem Zeithorizont bis 2030 ausgewählt: NEMS

für die USA, PRIMES für die EU und POLES für beide Gebiete und für 26 Weltregionen. Rechnungen mit anderen Modellen lieferten unterstützende Ergebnisse.

Folgende Fälle (Technologie-Stories) wurden betrachtet: Nuklear, Clean Coal, Gas, Brennstoffzellen und Erneuerbare. Zusätzliche Rechnungen konzentrierten sich auf Verbesserungen im Endverbrauch.

Was lässt sich als übereinstimmendes Ergebnis aus der Fülle von Daten herauskristallisieren?

- Signifikante technologische Verbesserungen - ohne Preissignale, ohne politische Maßnahmen - reichen nicht aus, um die Emission von CO₂ entsprechend den Kyoto-Vereinbarungen zu reduzieren.
- Technologische Verbesserungen bringen einen signifikanten, aber nicht ausreichenden Beitrag zur CO₂-Emissionsminderung.
- Verbesserungen auf der Angebotsseite sind genauso wichtig wie beim Endverbrauch, allerdings mit regionalen Unterschieden.
- Im einzelnen (ziemlich verkürzt, und hoffentlich nicht überinterpretiert): Der Beitrag der Kernenergie zur CO₂-Reduzierung ist begrenzt, maximal 5% CO₂-Reduzierung bis 2030; Erdgas dominiert in allen Fällen, auch schon im Referenzfall, d.h. der Zusatzeffekt ist gering; Clean Coal-Fortschritte können Erdgas verdrängen und die CO₂-Emissionen erhöhen; Brennstoffzellen im Kraftwerkseinsatz werden bis 2020 wegen der notwendigen Entwicklungszeit nur geringe Beiträge liefern; erneuerbare Energien werden verstärkt eingesetzt, bringen aber im betrachteten Zeitraum nur einen geringen Beitrag zur CO₂-Reduzierung.

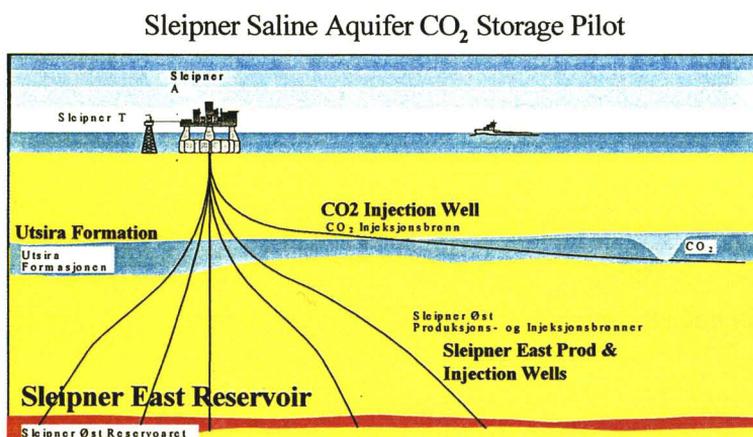
Das alles unterstützt die schon gemachte Aussage: nur mit technologischer Entwicklung kommen wir nicht vorwärts - aber ohne auch nicht.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnis wurden in dem CERT-Bericht in zwei weiteren Untersuchungen Technologielinien für den kurzfristigen Kyoto-Zeitraum, 2008-2010, und längerfristig, bis 2030-2050, analysiert. Die Ergebnisse sind eher qualitativ als quantitativ, eine Folge der Strategie, das IEA-Experten-Netzwerk zu befragen. Aber die Ergebnisse sind aus einem breiten Konsens entstanden und können im politischen Raum genutzt werden.

Ich möchte ein Beispiel herausgreifen aus der Vielzahl von Elementen in der Technologiestrategie des CERT. Die Informationen stammen zum größten Teil aus dem Implementing Agreement (ein Ausdruck, der die Kooperationsprojekte der IEA beschreibt) Greenhouse Gas R&D Programme [7]. Dieses Projekt, in dem 17 Länder, die EU und mehrere Industriefirmen zusammenarbeiten, bewertet Technologien, mit denen die Emission von Klimagasen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe reduziert

werden kann. In dem breiten Spektrum von Arbeiten nimmt die Sequestrierung von CO₂, also die Abtrennung von CO₂ aus Kraftwerksprozessen und die Verbringung in geologischen Formationen oder im Ozean, eine zentrale Rolle ein. Natürliche Salzwasser-Untergrundspeicher oder nicht mehr nutzbare Öl- und Gasreservoirs können CO₂ speichern. Es ist abgeschätzt worden, dass es in Europa solche Speicher gibt, die mindestens für 800 Jahre CO₂ Emissionen ausreichen. Diese Technik ist keine Theorie mehr, in Norwegen wird schon seit einiger Zeit ein Pilotvorhaben durchgeführt, in dem CO₂ in saline Aquifere eingespeist wird.

Bild 4-1:



Die Bewertung des CERT ist noch vorsichtig, aber es ist bemerkenswert, dass sich in dem zwei-Seiten-Papier des CERT der Satz befindet: In the longer term, the capture and sequestration of CO₂ may prove significant.

Die Folgeprojekte, die sich aus dem CERT Papier und dem IEA Ministertreffen 1999 ergeben, sind in Arbeit, - sie sind wiederum auf das erwartete nächste IEA-Ministertreffen 2001 ausgerichtet. Die beiden Elemente Marktbeschleunigung und langfristige F&E-Strategien stehen im Mittelpunkt. Bei den Fortsetzungen der Modellrechnungen ist vorgesehen, auf der Grundlage vereinbarter Annahmen über politische Maßnahmen, verschiedene Modellrechnungen zu vergleichen:

- Einfluss von Preismechanismen- oder Internalisierung externer Kosten
- Einfluss von Quotenregelungen für erneuerbare Energien
- Einfluss von Standards für Energieeffizienz

- Einfluss der Kyoto- (oder Flexibilitäts-) Mechanismen

Von deutscher Seite ist das IER Stuttgart beteiligt - und mehr als das: IER ist der Projektkoordinator für 11 weitere IEA-Partner, 7 von EU Mitgliedsstaaten und 5 andere.

Am Schluss möchte ich noch einmal auf die politische Botschaft zurückkommen. Ich hatte schon einmal das zwei-Seiten-Papier des CERT für die Minister erwähnt. Die Botschaft ist weder neu noch umwerfend, aber sie basiert auf einer sauberen Analyse der Situation, getragen von dem Konsens vieler Beteiligten aus dem IEA-Umfeld. Für mich sind die beiden folgenden Sätze der Kern der Botschaft:

- Current trends in technology adoption are insufficient to meet the Kyoto targets.
- Governments should increase investment in long-term R&D.

Die IEA hat sich im Technologiebereich diese Botschaft auf ihre Fahnen geschrieben.

Referenzen

- | | | |
|----------------------------------|---|---|
| [1] | IEA | <u>World Energy Outlook 1998</u> |
| [2] | F. Birol, J.H. Keppler | IEA Weltenergieprognose 1998
et, 49.Jg.(1999), Heft 10, 651 |
| [3] | R. Priddle | Der Sonne entgegen, in: Die Gegenwart der
Zukunft, Wagenbach Verlag, Berlin (2000) |
| [4] | IEA | <u>International Collaboration in Energy
Technology : a Sampling of Success Stories</u>
(1999) |
| [5] | IEA | The Role of Technology in Reducing Energy
Related Greenhouse Gas Emissions
(to be published mid-2000; available as 1999-
draft manuscript from neef@iea.org) |
| [6] | IEA | <u>Energy Technology Availability to Mitigate
Future Greenhouse Gas Emissions</u>
(1997) |
| [7] | <u>Greenhouse Gases R&D
Programme</u> | http://www.ieagreen.org.uk |
| Allgemeine Informationen zur IEA | | http://www.iea.org/ |

IPCC Weltenergieszenarien für das 21. Jahrhundert -- CO₂-Reduzierung und nachhaltige Entwicklung

Dipl.-Phys. R.A. Alexander Roehrl und Keywan Riahi
Environmentally Compatible Energy Strategies (ECS),
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA),
Schlossplatz 1, A-2361 Laxenburg, Austria
Email: roehrl@iiasa.ac.at and riahi@iiasa.ac.at

11 April 2000

Zusammenfassung:

Wir untersuchen eine Reihe neuer Weltenergie-Entwicklungsszenarien für das 21. Jahrhundert. Ein Teil dieser Szenarien sieht keine Anwendung expliziter Klima-Policies vor, und sind Teil einer neuen Studie des "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC) mit dem Titel "Special Report on Emissions Scenarios (SRES, 2000)". Auf diese Szenarien wenden wir Emissionsbeschränkungen an, um eine Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration bei 550 ppmv zu erreichen. Die resultierenden Szenarien gehören zu den sogenannten "Post-SRES"-Szenarien, die im "Third Assessment Report" (TAR) des IPCC erscheinen werden. Unter anderem analysieren wir die Robustheit von Technologie-Portfolios unter verschiedenen Annahmen über die zukünftige sozioökonomische und technologische Entwicklung. Die Annahmen für die Baseline-Szenarien bestimmen die Art und die Kosten optimaler Portfolios von Emissionsreduktionsmaßnahmen. Unsere Studie zeigt, daß in allen Szenarien traditionelle Technologien basierend auf fossilen Energieträgern, welche zur Stromerzeugung verwendet werden, im ausklingenden 21. Jahrhundert keine Rolle mehr spielen. Insbesondere Gas-Kombikraftwerke spielen bei dem Übergang von fossilen zu nicht-fossilen Technologien eine Schlüsselrolle. Als besonders robust erwies sich der Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen in Szenarien, welche den Schwerpunkt auf nachhaltige Entwicklungsstrategien setzen. Im Transportsektor wird die Dominanz von Mineralölprodukten gebrochen, wobei die Szenarien keine klare Aussage über das zukünftige Substitutionsprodukt für Öl zulassen.

Vorbemerkung: Dieser Vortrag beruht auf einem ausführlicheren Artikel in englischer Sprache (Riahi und Roehrl, 2000b).

1. Einleitung

Die Menschheit steht heute vor der großen Herausforderung, daß ihre Wirtschaftlichkeitsaktivitäten und die daraus resultierenden Emissionen von Gasen zu globaler Erwärmung führen könnten, mit erheblichen Konsequenzen für unseren Planeten. Wegen der potentiell großen ökonomischen Tragweite des Klimaproblems, sind in den letzten Jahren viele Studien erstellt worden um Antwortstrategien zu finden (z.B. EMF14, 1994; Wigley *et al.*, 1996). Viele dieser Studien haben jedoch entweder einzelne Technologien oder makroökonomische Effekte untersucht, jedoch selten das Zusammenspiel von Marktpotentialen verschiedener Technologiecluster. Letzteres ist um so interessanter, da die Entwicklung der letzten 200 Jahre seit Beginn der Industrialisierung uns gezeigt hat, daß technologische Innovationen und die Geschwindigkeit von Technologiediffusion das Wirtschaftswachstum stark beeinflussen, und umgekehrt (Barro and Sala-i-Martin, 1995; Maddison, 1993). Neue technologische Entwicklungen haben einerseits geholfen die aktuellen Umwelt- und Gesellschaftsprobleme zu mildern, andererseits haben sie aber auch in vielen Fällen zu neuen Herausforderungen geführt. Eine besondere Rolle im Umweltbereich haben dabei sicher Energietechnologien gespielt.

Um Klima-Policies zu entwerfen, die auf ganz bestimmte Technologiecluster abzielen, müssen wir versuchen die Umwelt- und Wirtschaftlichkeitsperspektiven von verschiedenen Technologie-Portfolios im nächsten Jahrhundert abzuschätzen, soweit das möglich ist. In diesem Vortrag analysieren wir die Robustheit einiger Technologie-Portfolios unter verschiedenen Annahmen über die zukünftige sozio-ökonomischen und technologischen Entwicklung. Wir illustrieren dies mit 13 Weltenergieszenarien, die auf weit verschiedenen Annahmen für das 21. Jahrhundert beruhen. Dieser lange Zeithorizont ist notwendig, da 100 Jahre auch der Größenordnung von Wechselwirkungen zwischen menschlichen Aktivitäten und Klimawandel entsprechen.

Wir vergleichen die folgenden Gruppen von Szenarien¹:

- ❖ Neun non-climate-policy Szenarien: Diese Szenarien sind Teil einer neuen Studie des "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC) mit dem Titel "Special Report on Emissions Scenarios (SRES, 2000)" (Nakicenovic (ed.), 2000). Im folgenden werden wir diese "IIASA SRES Szenarien" nennen.

Fünf Baseline-Referenzszenarien ("baseline reference scenarios"): Diese Untermenge der IIASA SRES Szenarien führt gegen Ende des 21. Jahrhunderts zu relativ hohen Treibhausgasemissionen (GHGs). Diese Szenarios sind nicht nachhaltig in bezug auf Ressourcenverbrauch, soziale Ausgewogenheit, Umweltkonsequenzen, oder aus anderen Gründen.

Vier Nachhaltige-Entwicklungsszenarien ("sustainable development scenarios"): Diese Untermenge der IIASA SRES Szenarien erforscht mögliche Pfade nachhaltiger Entwicklung, die zu relativ niedrigen GHG Emissionen führen, aufgrund einer Kombination von Policies, die üblicherweise nicht als Klima-Policies angesehen werden.

- ❖ Vier Kohlenstoffdioxidreduktions-Szenarien ("carbon dioxide mitigation scenarios"): Ausgehend von den IIASA SRES Szenarien ("baselines") untersuchen wir kostenoptimale Strategien zur GHG Emissionsreduktion, um bis zum Ende des 21. Jahrhundert die atmosphärische CO₂-Konzentration bei 550 ppmv zu stabilisieren. Wir beschränken uns auf die CO₂-Reduktion im Weltenergiesektor, da bisher CO₂ den größten anthropogenen Beitrag zum Klimawandel geleistet hat².

¹ Alle Szenarien, die in diesen Artikel behandelt werden, wurden von den Autoren modelliert.

² CO₂ aus historischen Emissionen ist derzeit verantwortlich für mehr als 60% des vom Menschen zusätzlich verursachten Treibhauseffekts (IPCC, 1996). Weitere anthropogene GHGs sind z.B. Methan (CH₄), N₂O, CFCs, troposphärisches Ozon, und andere Gase. Diese anthropogenen Emissionen haben die Zusammensetzung der Atmosphäre signifikant geändert. Während der letzten 10,000 Jahre vor der Industrialisierung hat der Kohlendioxidanteil um weniger als 10% variiert. Seit 1800 jedoch ist er um fast 30% gestiegen. Die Ozon-Precursors NO_x, CO, und NMVOCs sind selbst keine Treibhausgase, sind aber an einer komplexen Kette von Reaktionen in der Troposphäre beteiligt, die zur Erzeugung von Ozon führen, einem wichtigen Treibhausgas. Trajektorien für all diese Gase sind für die Szenarien in diesem Artikel modelliert worden.



Szenario/ Jahr	Szenariotyp (B: Baseline reference, M: Mitigation ³ , S: Sustainable development)	Bevölkerung [billion]		Weltbrutto- sozialprodukt [trillion (1990)US\$]		Verhältnis der Einkommen in DEV zu IND in 2100	Primärenergie [EJ]		Kumulative CO ₂ Emissionen [GtC]	Atmosphä- rische CO ₂ Konzentration ("S" für stabilisiert) [ppmv]	SO ₂ Emissionen [MtS]		Globale Temperatur änderung ⁴ (relativ zu 1990) [°C]
		2050	2100	2050	2100	2100	2050	2100	1990-2100	2100	2050	2100	2100
A2	B	11.30	15.07	82	243	0.24	1014	1921	1662	783	100	66	2.7
A2-550	M	11.30	15.07	81	236	0.23	959	1571	1210	~550 (S)	81	54	2.1
B2	B	9.37	10.41	110	235	0.33	869	1357	1143	603	54	45	2.0
B2-550	M	9.37	10.41	109	231	0.33	881	1227	971	~550 (S)	56	38	1.8
A1	B	8.70	7.06	187	550	0.64	1422	2681	1562	724	55	29	2.4
A1-550	M	8.70	7.06	186	547	0.63	1339	2505	1095	~550 (S)	47	19	1.9
A1C	B	8.70	7.06	187	550	0.64	1377	2325	2046	950	122	47	3.0
A1C-550	M	8.70	7.06	185	542	0.64	1269	2188	1093	~550 (S)	71	30	2.0
A1G	B	8.70	7.06	187	550	0.64	1495	2737	2092	891	68	38	2.8
A1T	S	8.70	7.06	187	550	0.64	1213	2021	1122	560	41	17	1.9
B1	S	8.70	7.06	136	328	0.59	837	755	842	486 (S)	28	9	1.7
B1G	S	8.70	7.06	166	350	0.60	911	1157	902	509	31	13	1.8
B1T	S	8.70	7.06	136	328	0.59	819	714	776	464 (S)	27	8	1.6

Tabelle 1: Überblick wichtiger Szenariodriver und Ergebnisse. Vergleiche mit den 1990 Zahlen für Weltbevölkerung (5.3 billion), BSP (20.9 trillion (1990)US\$), Equity-Verhältnis zwischen den heutigen Entwicklungs- und den Industrialisierten Regionen (0.06), Primärenergie (352 EJ), CO₂ Emissionen (7.5 GtC), CO₂ Konzentration (354 ppmv), SO₂ Emissionen (69.0 MtS), und Temperaturaenderung von 1765 bis 1990 (0.4°C unter der Annahme einer Klimasensitivität von 2.5°C (Wigley und Raper, 1997)). Abkürzungen: DEV: heutige Entwicklungsländer, IND: heutige industrialisierte Länder.

³ "M" steht fuer Kohlenstoffdioxidreduktionsszenarien ("mitigation scenarios").

⁴ Unter der Annahme einer Klimasensitivität von 2.5°C.

In der realen Welt sind die Trennlinien zwischen diesen drei Szenario-Kategorien natürlich sehr vage, da es eine Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung, Vulnerabilität von Ökosystemen, Armut, Umweltverschmutzung, Lifestyles, sozio-ökonomischer Ausgewogenheit, und Policy-Instrumenten besteht. Klima-Policies haben signifikante Auswirkungen auf die Perspektiven für nachhaltige Entwicklung. Und Policies, die nachhaltige Entwicklung ermöglichen sollen, werden unsere Möglichkeiten beeinflussen erfolgreich Klimapolitik zu machen. Eine detaillierte Beschreibung der hier verwendeten Szenarien und eine Diskussion obiger Problematik ist in Riahi und Roehrl (2000b) zu finden.

2. Weltenergie-Entwicklungsszenarien für das 21. Jahrhundert

Tabelle 1 bietet einen Überblick wichtiger Szenario-"Drivers" and Ergebnisse der oben angeführten 13 Szenarien. Anhang I fasst die Charakteristika der verwendeten, quantitativen Modelle zusammen. Zu diesen gehören der Szenariogenerator (SG) (Nakicenovic *et al.*, 1998a und b), das "bottom-up" Engineering-Model MESSAGE⁵ (Messner und Strubegger, 1995), das "top-down" makro-ökonomische Model MACRO (Messner und Schrattenholzer, 1999), das Klimamodel MAGICC⁶ (Wigley und Raper, 1997), und einige Datenbanken einschließlich der CO2DB (Messner und Strubegger, 1991).

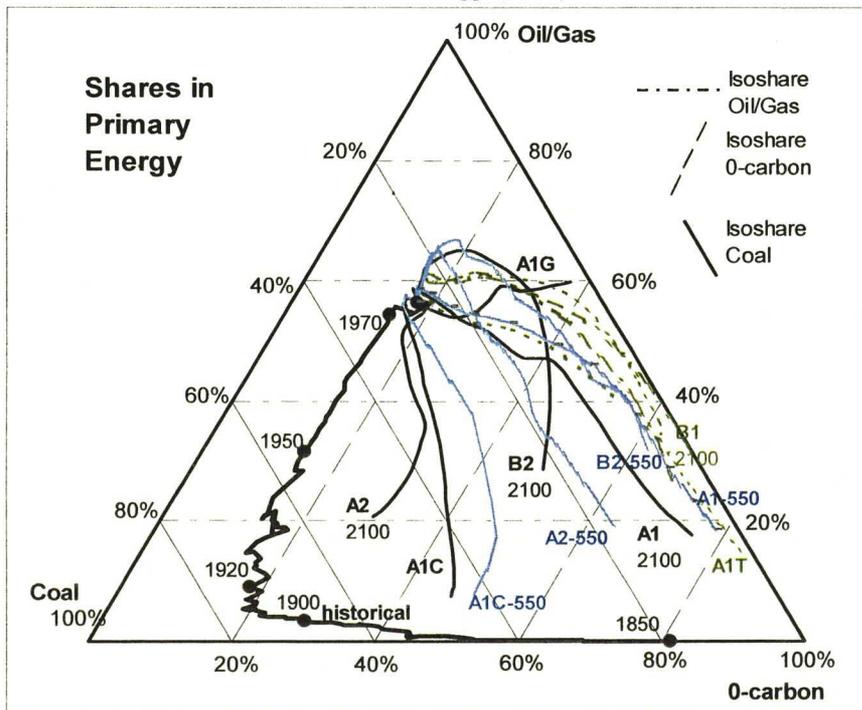


Bild 1: Weltprimärenergieanteile von Kohle, Öl/Gas, und von nicht-fossilen Energieträgern, dargestellt in einem "Energiedreieck" (in Prozent). Konstante Marktanteile von Kohle, Öl/Gas, und von nicht-fossilen (0-carbon) Energieträgern sind durch Isoanteillinien gekennzeichnet. Historische Daten von 1850 bis 1990 basieren auf Nakicenovic *et al.*, 1998a. Für die Jahre 1990 bis 2100 entfalten alternative Trajektorien für die fünf Baseline-Referenzszenarien ("baseline reference scenarios") A2, B2, A1, A1G, and A1C, and für die vier 550 ppmv CO₂-Konzentrations-Stabilisierungsszenarien A2-550, B2-550, A1-550, und

⁵ MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact.

⁶ MAGICC: Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change.

A1C-550. Die vier nachhaltige Entwicklungsszenarien ("sustainable development scenarios") B1, B1G, B1T, und A1T zeigen ähnliche Trends zunächst in Gas und danach in nicht-fossilen (0-carbon) Optionen.

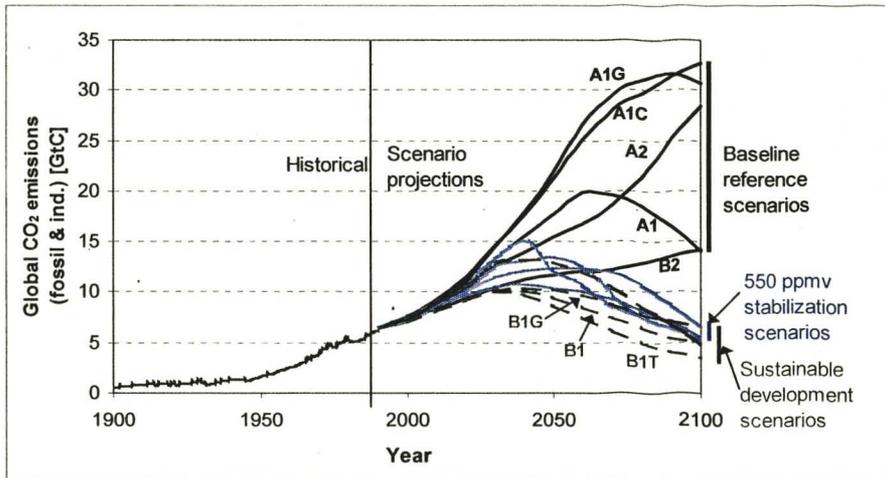


Bild 2: Globale CO₂ Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern und der Zementproduktion. Historische Daten von 1850 bis 1990 stammen von Marland *et al.* (1999).

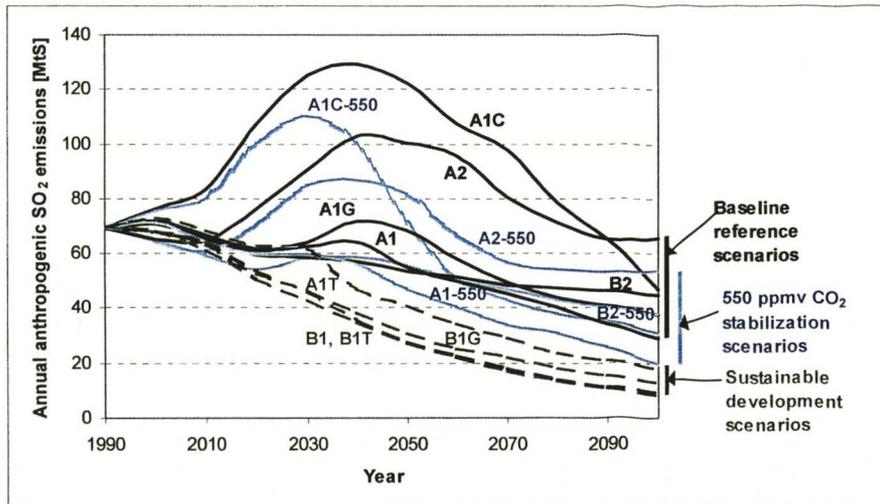


Bild 3: Globale, anthropogene Schwefeldioxid-Emissionen, in Mts.

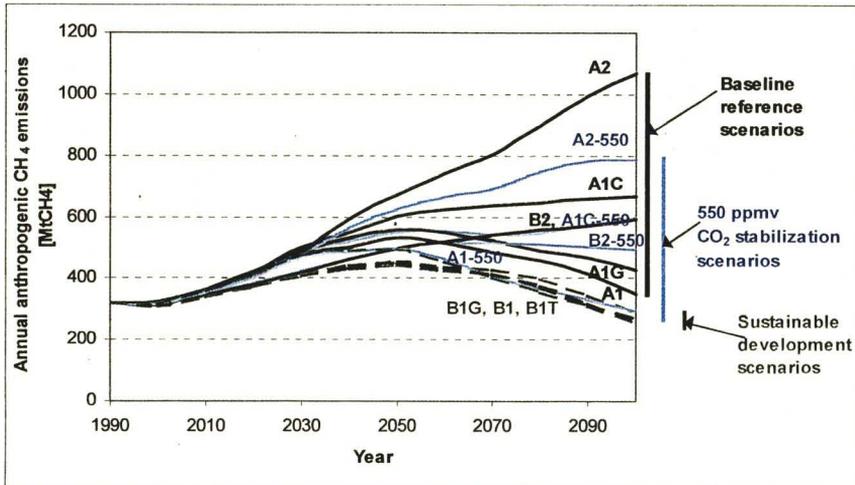


Bild 4: Globale, anthropogene Methanemissionen, in MtCH₄.

2.1. Non-Climate-Policy Szenarien

Annahmen über sozio-ökonomische Entwicklung, technologischen Fortschritt, und politischen Wandel führen in der Zukunft zu verschiedenen Weltenergiesystemen (Bild 1), die jedoch alle auf kostenoptimalen Strategien (unter den gegebenen Annahmen) beruhen, und ausserdem zu verschiedenen Emissionsmengen führen (siehe z.B. Tabelle 1, Bilder 2, 3, und 4).

- ❖ **A2:** Das A2 Szenario beschreibt eine Zukunftsentwicklung hin zu einer *sehr heterogenen Welt*, die sich durch hohes Bevölkerungswachstum in den Entwicklungsländern auszeichnet. In dieser Welt wird relative wenig Gewicht auf wirtschaftliche, soziale, und kulturelle Wechselwirkungen zwischen den Weltregionen gelegt wird. Schließendlich könnte dies zu einer auf Weltwirtschaftsblöcke aufgeteilten Welt führen.
- ❖ **B2:** Das B2 Szenario beschreibt eine Welt des verstärkten *Umwelt- und Sozialbewusstseins* im Vergleich zur A2 Welt. Es ist trotzdem eine *heterogene Welt* der "unterschiedlichen Geschwindigkeiten" im Hinblick auf technologischen Fortschritt, wirtschaftliche Entwicklung, und Umweltmaßnahmen. Statt globaler Lösungen für Umwelt- und Sozialprobleme, erfolgen meist lokale Lösungsansätze.
- ❖ **A1 (A1, A1C, A1G, and A1T):** Die A1 Welt beschreibt eine Welt des schnellen *wirtschaftlichen Wachstums* und des verlangsamten Bevölkerungswachstums, in dem Einkommenunterschiede zwischen den einzelnen Weltregionen langsam verschwinden. Andere Merkmale sind eine starker Betonung von *marktwirtschaftlichen Lösungen*, große Investitionen in Ausbildung, Ideen, und neue Technologien. Aufgrund verschiedener Annahmen über Ressourceverfügbarkeit und technologischen Fortschritt unterscheiden wir vier Fälle:
 - A1C: "Saubere Kohletechnologien";
 - A1G: "Öl und Gas Zukunft", in der sogar "Methane-Clathrates" im großen Stile abgebaut werden;

A1T: "Post-fossile Zukunft", mit verstärkter Entwicklung von Solar- und neuen Nukleartechnologien⁷ auf der Supply-Seite, und Mini-Turbines und Brennstoffzellen in End-use-Anwendungen;

A1: "Ausgewogener" Fortschritt in allen Technologien der Energiekette.

- ❖ **B1 (B1, B1G, B1T):** Die B1 Szenarien beschreiben eine nachhaltige Weltentwicklung hin zu einer *dienstleistungsorientierter (dematerialisierter) Gesellschaft gekennzeichnet durch wirtschaftlichen Prosperität*, in der Umwelt- und Sozialbewußtsein eine große Rolle spielen. Technologischer Wandel wird aktiv gefördert und spielt eine grosse Rolle.

B1G: "Gas and Nicht-fossile Zukunft";

B1T: Besonders erfolgreiche Wandel zu nicht-fossilen und dezentralisierten Technologien;

B1: "Ausgewogener" Fortschritt in allen Technologien.

Technologischer Fortschritt				
	Kohle	Öl	Gas	Nicht-fossil
A2	Mittel	Langsam	Langsam	Langsam-mittel
B2	Langsam	Average	Mittel-Schnell	Mittel
A1	Schnell	Schnell	Schnell	Schnell
A1G	Langsam	Sehr schnell	Sehr schnell	Median
A1C	Schnell	Langsam	Langsam	Langsam
A1T	Langsam	Schnell	Schnell	Sehr schnell
B1	Langsam-mittel	Mittel-schnell	Schnell	Schnell
B1G	Langsam-mittel	Mittel-schnell	Schnell	Schnell
B1T	Langsam-mittel	Schnell	Schnell	Sehr schnell

Tabelle 2: Annahmen über Technologiefortschritt in den Szenarien. Die Kategorisierung erfolgte relativ zu den anderen Szenarien, und *nicht* relativ zu den auf verschiedenen Energieträgern beruhenden Technologien. Für eine detaillierte Aufstellung der angenommenen Technologiekosten in den Szenarien, siehe SRES (2000).

Von den neun non-climate-policy Szenarien (A2, B2, A1, A1G, A1C, A1T, B1, B1G, B1T), führen fünf Szenarien (Baseline-Referenzszenarien: A2, B2, A1, A1C, A1G) zu recht hohen Emissionen (Tabelle 1, Bilder 2, 3, 4), und vier Szenarien zu relative niedrigen GHG Emissionen (Nachhaltige Entwicklungsszenarien: A1T, B1, B1G, B1T).

2.2. Kohlenstoffdioxid-Reduktionsszenarien (CO₂ Mitigation scenarios)

Aus den non-climate-policy Szenarien mit hohen Emissionsprofilen, A2, B2, A1, und A1C (Baseline Szenarien), konstruieren wir die CO₂-Stabilisierungsszenarien A2-550, B2-550, A1-550, und A1C-550⁸ (siehe Bild 5 und 2). Der Einfachheit halber diskutieren wir nur CO₂-Reduktionsmassnahmen im Energiesektor.

⁷ "Neue Nuklearanlagen" (advanced nuclear power plants) sind hier als Technologiecluster definiert, der Strom oder Wasserstoff mit einer höheren Effizienz und höherem Sicherheitspotential als heutige Anlagen produziert. Dazu könnten z.B. effiziente Hochtemperaturreaktoren, neue Fastbreeder-Reaktoren, oder Kernfusion gehören.

⁸ Um eine Stabilisierung der atmosphärischen Konzentration zu erreichen, werden globale, linearisierte CO₂-Konzentrationsbeschränkungen angewendet (via gewichteter Summen von kumulativen CO₂-Emissionen von 1990 bis 2100).

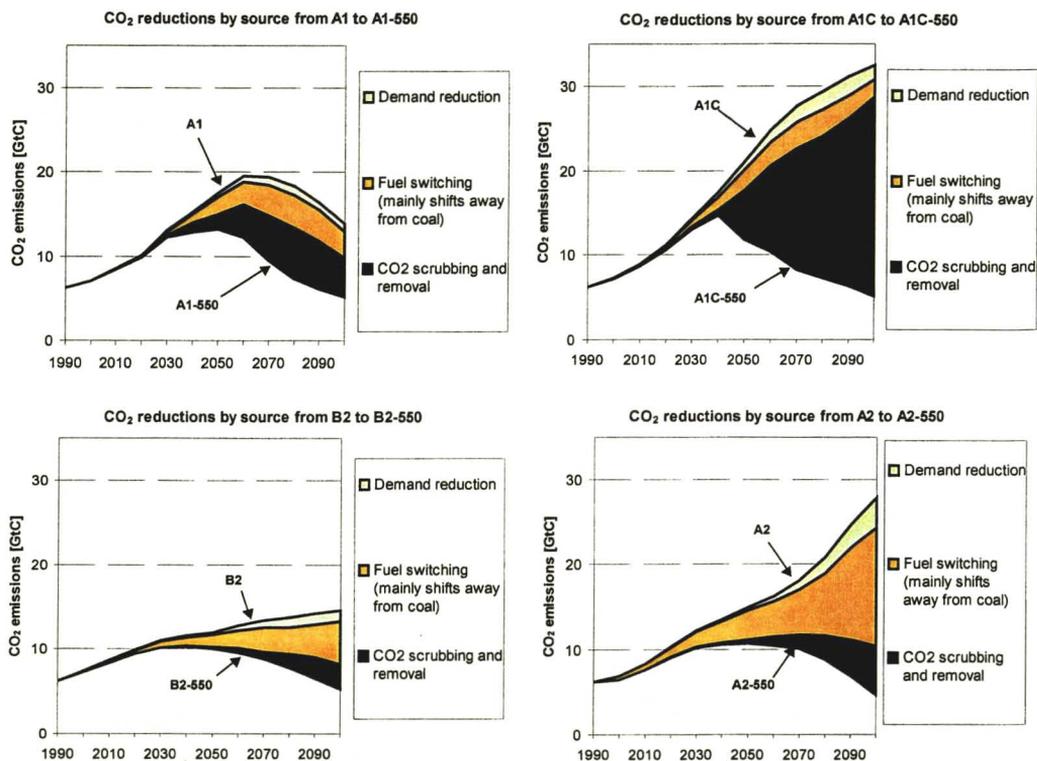


Bild 5: CO₂ Emissionen in den Baseline-Szenarien (A1, A1C, A2, und B2) und in den CO₂-Reduktions-Szenarien (A1-550, A1C-550, A2-550, und B2-550). Die farbigen Flächen zeigen die drei Hauptquellen für CO₂-Reduktionen: Strukturwandel weg von Kohle, "Kohlenstoffscrubbing", und verstärktes Energiesparen.

	GWP [trillion (1990)US\$]	Absolute Verluste [trillion (1990)US\$]	Verluste in Prozent [relativ zum Baseline GWP]
A1C-550	542	8.4	1.5%
A1-550	547	2.8	0.5%
A2-550	236	6.4	2.6%
B2-550	231	4.0	1.7%

Tabelle 3: Verluste im Weltbruttosozialprodukt (Gross World product: GWP) in den Kohlenstoffdioxid-Reduktionsszenarien im Vergleich zu den Baselines in 2100⁹.

⁹ Dies ist vergleichbar mit Ergebnissen ähnlicher Studien. Zum Beispiel berichten Edmonds und Richels (1995) Verluste von 0.5 bis 1% fuer eine 500 ppmv Stabilisierungsbeschränkung. Das 14. Energy Modeling Forum berichtet für vier verschiedene Modelle (CSERGE, CETA, PEF, und CONN) fuer eine 550 ppmv Beschränkung Verluste zwischen 0.4 und 3.4% des GWP (EMF14, 1994).

3. Robuste Energietechnologie-Strategien

In diesem Abschnitt untersuchen wir die *Robustheit* verschiedener Technologieportfolios in den Schlüsselsektoren Strom und Transport¹⁰. Aufgrund der grossen Anzahl von Technologien (etwa 400 pro Szenario) in MESSAGE (siehe Anhang I), untersuchen wir nur Ergebnisse für aggregierte Technologiedaten, für die wir Minimum, Maximum, und Mittelwerte zukünftiger Marktanteile zeigen (siehe Bilder 6, 7, 8, und 9). Riahi und Roehrl (2000b) geben eine genaue Diskussion der in diesem Abschnitt skizzierten Ergebnisse.

3.1. Welt-Stromsektor

Die Stromerzeugung in 1990 wurde mehrheitlich von fossilen Energieträgern (65%), Kernkraft (17%) und Wasserkraftanlagen (18%) dominiert.

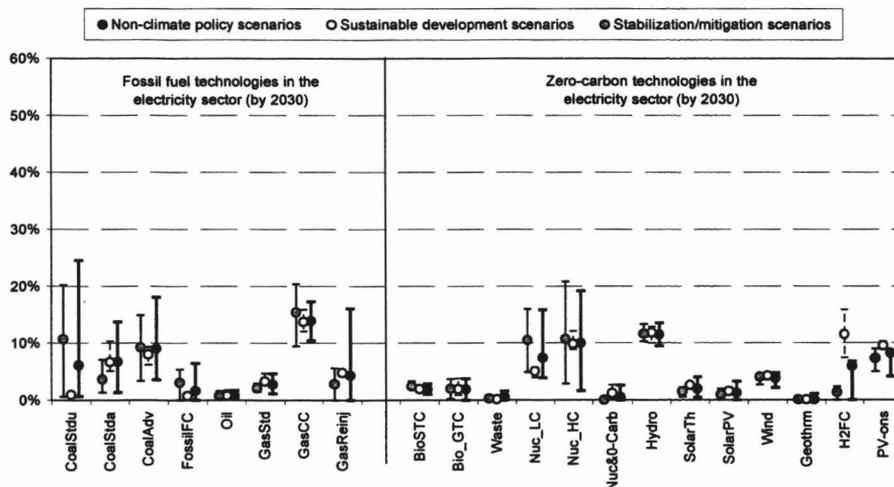


Bild 6: Minimum, Maximum, und Mittelwerte von Marktanteilen (in Prozent) für aggregierte Technologien im Welt-Stromsektor in 2030. Die verwendeten Abkürzungen für Technologien sind in Anhang II erklärt.

¹⁰ Die drei analysierten Szenariogruppen: non-climate-policy Szenarien (A1, A1T, A1C, A1G, B2, A2, B1, B1G, B1T), nachhaltige Entwicklungsszenarien (sustainable development scenarios) ohne explizite Klima-Policies (A1T, B1, B1G, B1T), und die CO₂-Reduktionsszenarien (CO₂ mitigation/stabilization scenarios) (A1-550, A1C-550, B2-550, A2-550).

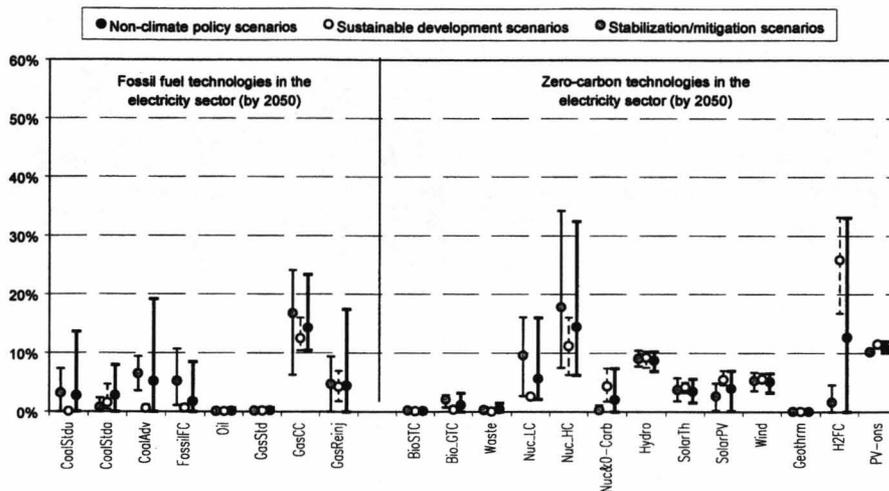


Bild 7: Minimum, Maximum, und Mittelwerte von Marktanteilen (in Prozent) für aggregierte Technologien im Welt-Stromsektor in 2050. Die verwendeten Abkürzungen für die Technologien sind in Anhang II erklärt.

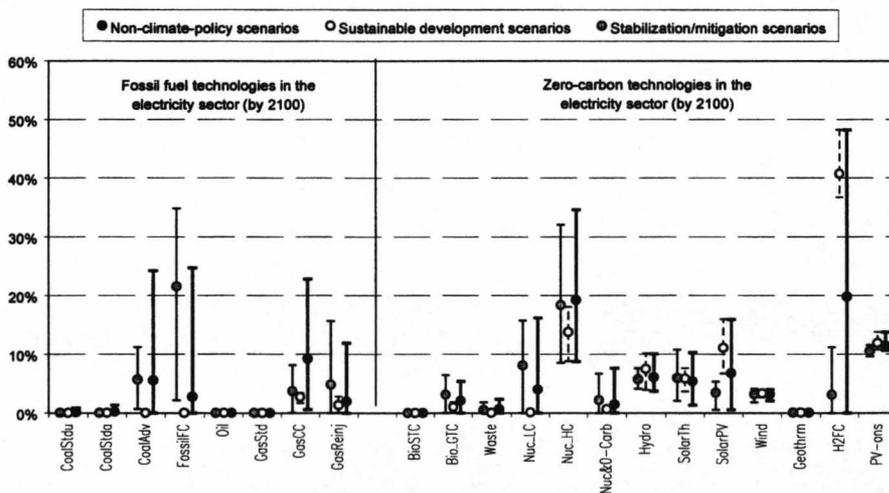


Bild 8: Minimum, Maximum, und Mittelwerte von Marktanteilen (in Prozent) für aggregierte Technologien im Welt-Stromsektor in 2100. Die verwendeten Abkürzungen für die Technologien sind in Anhang II erklärt.

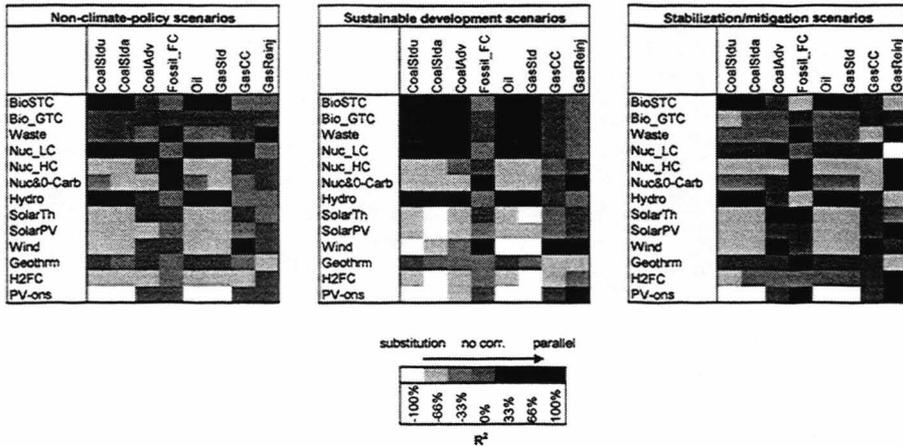


Bild 9: Korrelationsmatrizen (R^2) für Marktanteile im Weltstromsektor von 2000 bis 2100 für (aggregierte) nicht-fossile Technologien gegen auf fossilen Energieträgern beruhende Technologien. Die verwendeten Abkürzungen sind in Anhang II erklärt. Schwarze Quadrate (R^2 nahe bei 100%) stehen für Technologiepaare bei denen die Marktanteile positive linear verlaufen (d.h. in parallel und in dieselbe Richtung), wohingegen weisse Quadrate (R^2 nahe bei -100%) eine negativ lineare Beziehung darstellen, d.h. in letzterem Fall substituieren sich die zwei Technologien in dem Paar im Laufe des 21. Jahrhunderts.

3.2. Welt-Transportsektor

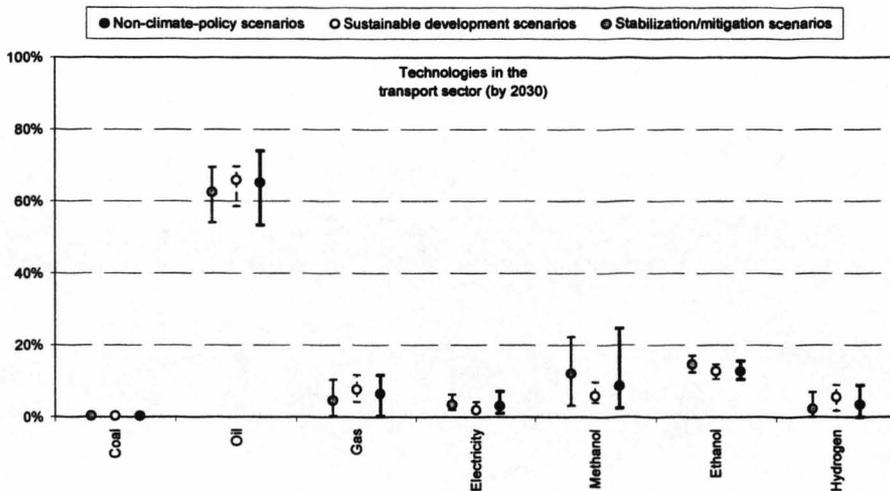


Bild 10: Minimum, Maximum, und Mittelwerte von Marktanteilen (in Prozent) im Welt-Transportsektor in 2030.

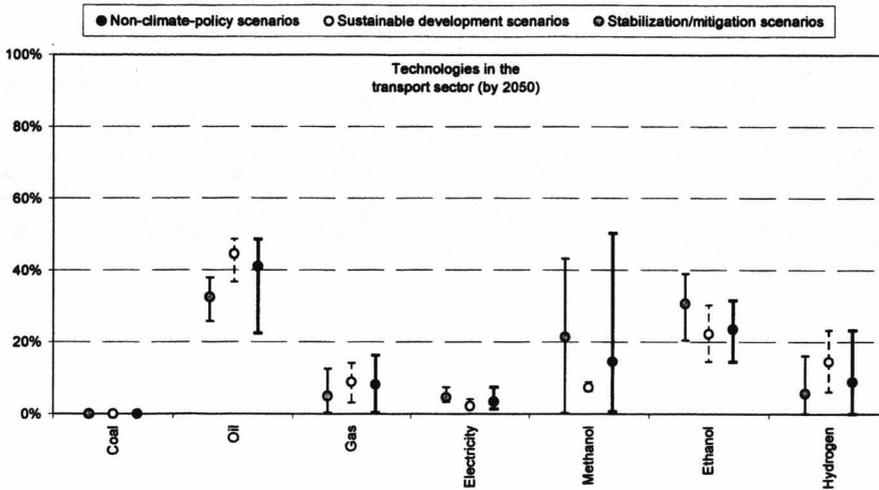


Bild 11: Minimum, Maximum, und Mittelwerte von Marktanteilen (in Prozent) im Welt-Transportsektor in 2050.

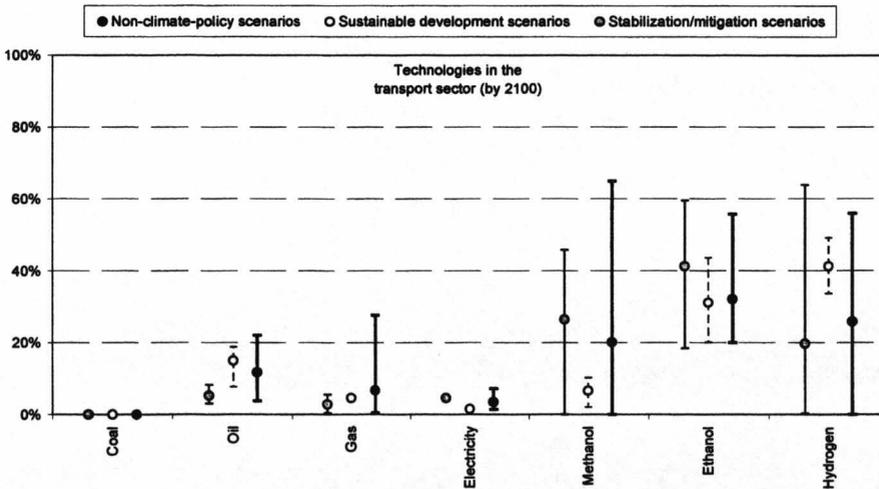


Bild 12: Minimum, Maximum, und Mittelwerte von Marktanteilen (in Prozent) im Welt-Transportsektor in 2100.

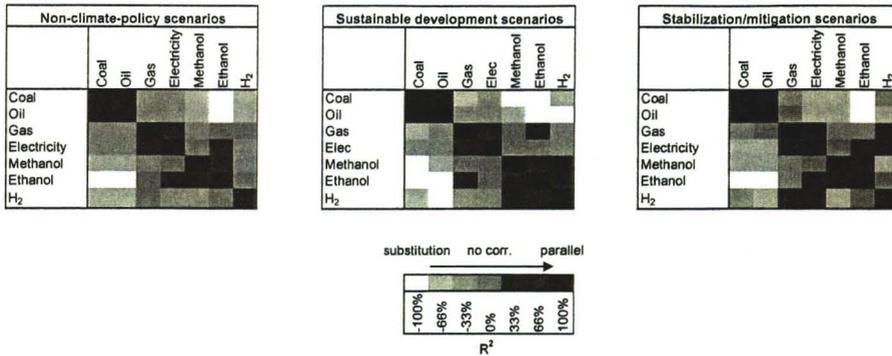


Bild 13: Korrelationsmatrizen (R^2) für Marktanteile im Welt-Transportsektor von 2000 bis 2100. Schwarze Quadrate (R^2 nahe bei 100%) stehen für Technologiepaare bei denen die Marktanteile positive linear verlaufen (d.h. in parallel und in dieselbe Richtung), wohingegen weiße Quadrate (R^2 nahe bei -100%) eine negativ lineare Beziehung darstellen, d.h. in letzterem Fall substituieren sich die zwei Technologien in dem Paar im Laufe des 21. Jahrhunderts. Energieträger, die eine "Brücke" auf dem Übergang von einem dominanten zu einem neuen dominanten Energieträger schlagen, sind erkennbar an kleinen Korrelationen (R^2 close to 0).

4. Klimawandel

Was sind nun die möglichen Klimakonsequenzen obiger Technologiestrategien? Ein üblicher Indikator ist die erwartete Erhöhung der mittleren globalen Temperatur.

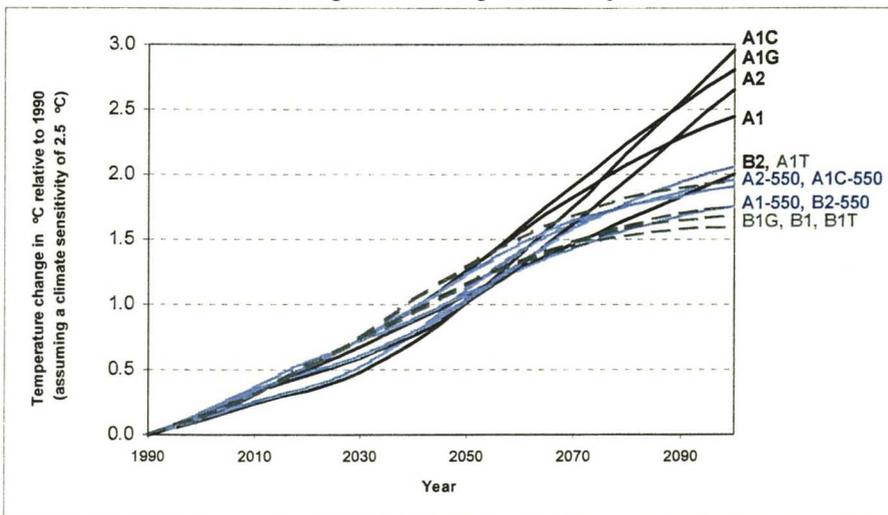


Bild 14: Erwartete Änderungen der mittleren globalen Temperatur in °C bei Annahme einer mittleren "best guess"-Klimasensitivität von 2.5°C für eine Verdopplung der CO₂-Konzentration.

5. Schlussfolgerung

Variationen der Annahmen über technologischen Fortschritt (z.B. von A1T zu A1C) führen zu einer ebenso großen Spannbreite von Emissionen wie Variationen der Annahmen über sozio-ökonomische Entwicklung (z.B. von B1 zu A2). Dies unterstreicht die Bedeutung von technologischem Wandel als wichtiger Determinante zukünftiger Emissionen.

Baseline-Annahmen über technologische Entwicklung, Ressourcenverfügbarkeit, und wirtschaftliche Entwicklung beeinflussen stark die Wahl der optimalen Emissionsreduktionsstrategien. Keine der verfügbaren Reduktionsstrategien allein ist ausreichend um die Zusammensetzung der Atmosphäre kostengünstig und schnell genug zu stabilisieren. Daher ist es notwendig ein Portfolio von Maßnahmen basierend auf technologischem Wandel, wirtschaftlichen Anreizen, und funktionierenden Institutionen zu unterstützen. Wir haben auch gezeigt, daß eine CO₂-Stabilisierung bei 550 ppmv im allgemeinen mit moderaten (relativen) GWP Verlusten verbunden ist, deren absolute Kosten jedoch erheblich sein können. Aufgrund eines starken "Lock-in" auf eine Kohle- und Methanol-basierte Ökonomie sind die GWP Verluste im A1C-550 Szenario am größten.

Der Hauptnutzen der vorliegenden Studie besteht in den resultierenden Aussagen über die Robustheit einzelner Energietechnologie-Portfolios unter einer großen Spannbreite möglicher, sozio-ökonomischer und technologischer Entwicklungen. Die Robustheitsanalyse zeigt, welche traditionellen Technologien zur Stromerzeugung (basierend auf fossilen Energieträgern) mit größter Wahrscheinlichkeit im Laufe des 21. Jahrhunderts ersetzt werden werden. Insbesondere die Gas-Kombikraftwerke scheinen eine Überbrückungsfunktion zu neuen fossilen und nicht-fossilen Technologien zu spielen. Ein robustes Ergebnis aus fast allen Szenarien ist auch, daß es offensichtlich keine wirklich dominante Technologie gibt, ausser unter Umständen Wasserstoffbrennstoffzellen. Relativ gleichmäßige Sektor-Diversifizierung führt zu schmalen Verteilungen der Marktanteile von Wasserkraft, Wind-, Solar- und Biomasse-Technologien. Mittel- und langfristig wird die heutige Dominanz von Ölprodukten im Transportsektor gebrochen werden. Jedoch ist recht unsicher was das Öl im Transportsektor langfristig ersetzen wird. Auch Szenarien, die hauptsächlich auf fossilen Energieträgern beruhen, sind langfristig auf technologische Fortschritte in nicht-fossilen Technologien und Gastechnologien und -infrastrukturen angewiesen. Attraktiv erscheinen auch innovative "Übergangs"-Strategien, die auf Gas als "Brücke" zu einer Kohlenstoffdioxid-freien Wasserstoff-Ökonomie setzen.

Um die erwartete globale Temperaturänderung abzuschätzen zu können, haben wir für alle Szenarien die anthropogenen Emissionen von CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, CFC/HFC/HCFC, PFC, SF₆, CO, VOCs, und NO_x berechnet. Aufgrund der Trägheit des Weltenergiesystems und des Klimasystems, und aufgrund des indirekten Kühleffekts von steigenden Schwefelemissionen, ist die erwartete mittlere, globale Temperaturänderung bis etwa 2050 ziemlich ähnlich für alle Szenarien. Temperaturänderungen in 2100 zeigen eine grosse Spannbreite, von 1.6 bis 1.9°C für die Nachhaltige-Entwicklungs-Szenarien ("sustainable development scenarios"), von 2.0 bis 3.0°C für die Baseline-Referenzszenarien ("baseline reference scenarios"), und von 1.8 bis 2.1°C für die CO₂-Reduktionsszenarien ("CO₂ mitigation scenarios"). Außerdem sind "Hedging"-Strategien besonders wichtig, da Unsicherheiten in den Klimasensitivitätsparametern größer sind als die Spannbreite der "best guess estimates" basierend auf unseren Emissionstrajektorien, die Ergebnis verschiedener sozio-ökonomischer, institutioneller, und technologischer Entwicklung sind.

Internationale Klimaschutzvereinbarungen und -verträge sollten auf einer langfristigen Strategie des aktiven Riskmanagement der sozio-ökonomische, institutionellen, und technologischen Entwicklung beruhen.

Quellenverzeichnis

Barro RJ, and Sala-I-Martin X. (1995) *Economic Growth*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.

Edmonds J, and Richels R. (1995) The economics of stabilizing atmospheric CO₂ concentrations. *Energy Policy* 23(4/5), 373-370.

EMF14 (Energy Modeling Forum). (1994) *Integrated Assessment of Climate Change Models*. First round of scenario results, available from L. Schrattenholzer, International Institute for Applied Systems Analysis, 2361 Laxenburg, Austria.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (1996) *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, and R.H. Moss (eds.), Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p.880.

Jiang K, Masui T, Morita T, Matsuoka Y. (2000) Long-Term GHG Emission Scenarios for Asia-Pacific and the World. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 63(3).

Maddison A. (1993) *Monitoring the World Economy 1820-1992*. Development Centre of the Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Marland G, Boden TA, Andres RJ, Brenkert AL, and Johnston C. (1999) *Global, Regional, and National CO₂ Emissions*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

Messner S, and Schrattenholzer L. (1999) MESSAGE-MACRO: Linking an Energy Supply Model with a Macroeconomic Module and Solving it Iteratively. Forthcoming in *Energy*, accepted for publication.

Messner S, and Strubegger M. (1995) *User's Guide for MESSAGE III*, WP-95-69, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Messner S, and Strubegger M. (1991) *User's Guide to CO2DB: The IIASA CO₂ Technology Data Bank Version 1.0*, Working Paper-91-31a, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Nakicenovic N, Grübler A, and McDonald A (eds.). (1998a) *Global Energy Perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 0521642000.

Nakicenovic N, Amann M, and Fischer G. (1998b) *Global Energy Supply and Demand and their Environmental Effects*. Report to the Central Research Institute of the Electric Power Industry, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Nakicenovic (ed.). (2000) *Global Greenhouse Gas Emissions Scenarios: Modeling Approaches and Implications*. Special Issue of *Technological Forecasting and Social Change on Global Greenhouse Gas Emissions Scenarios: Modeling Approaches and Implications*, Vol. 63(3).

Riahi K, Roehrl RA. (2000) *Greenhouse Gas Emissions in a Dynamics-as-usual Scenario of Economic and Energy Development*. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 63(3).

Riahi K, Roehrl RA. (2000b) *Robust Energy Technology Strategies for the 21st Century -- Carbon Dioxide Mitigation and Sustainable Development*, *Environmental Economics and Policy Studies*, accepted for publication, to appear in June or July 2000.

Roehrl RA, Riahi K. (2000) *Technology Dynamics and Greenhouse Gas Emissions Mitigation - A Cost Assessment*. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 63(3).

SRES (Special Report on Emissions Scenarios). (2000) Special Report on Emissions Scenarios (SRES) for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nakicenovic et al., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Wigley TML, Raper SCB. (1997) Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change (MAGICC Version 2.3). The Climate Research Unit, University of East Anglia, UK.

Wigley TR, Richels R, and Edmonds J. (1996) Economic and Environmental Choices in the Stabilization of Atmospheric CO₂ Concentrations. Nature 359(6562), 240-243.

Anhang I: Verwendete Modelle

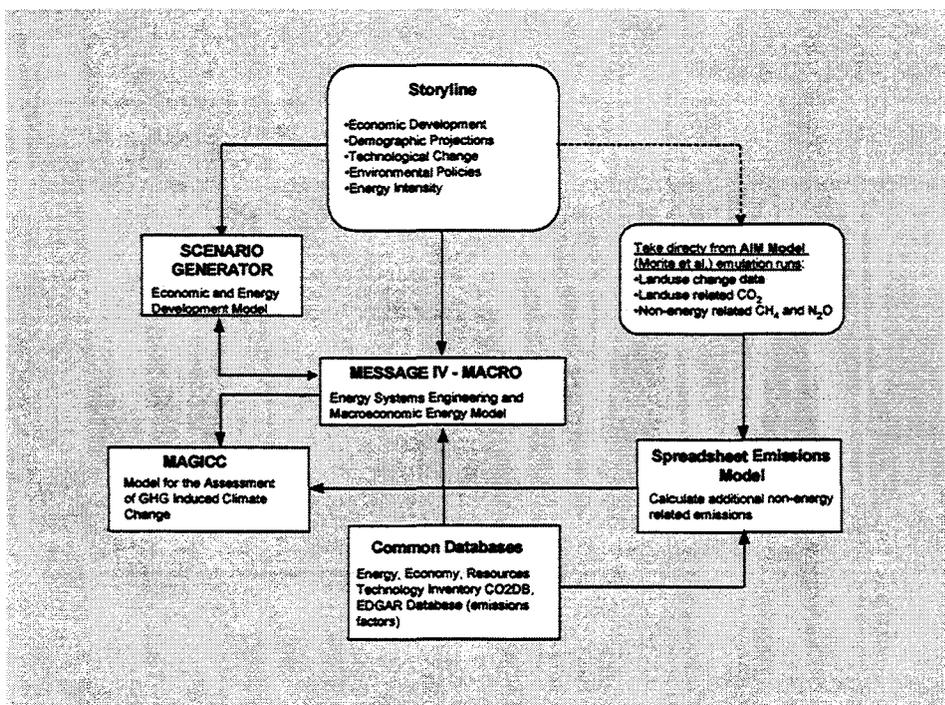


Bild 13: Überblick über Modelle, die von den Autoren verwendet wurden, um die in diesem Vortrag verwendeten Szenarien zu quantifizieren.

Anhang II:

Abkürzung	Technologiebeschreibung
CoalStdu	Coal power plant, no FGD, no DENOX
CoalStda	Coal power plant, 90% FGD, 50% DENOX
CoalAdv	Advanced coal power plants; e.g., integrated gasification combined- cycle (IGCC)
FossilFC	Gas- and coal-based fuel cells
Oil	Oil power plants
GasStd	Gas power plant (standard steam cycle)
GasCC	Gas combined-cycle power plant
GasReinj	Combined cycle power plant with no CO ₂ emissions (re-injected for enhanced oil recovery at field), efficiency reduced by 1%.
BioSTC	Biomass power plant (standard steam cycle)
Bio_GTC	Biomass gasification power plant
Waste	Waste power plant
Nuc_LC	Conventional nuclear power plant, low costs, low efficiency
Nuc_HC	Conventional nuclear power plant, high costs, high efficiency
Nuc&0-Carb	Other advanced 0-carbon technologies (including high temperature and fast breeder reactors)
Hydro	Hydroelectric power plant
SolarTh	Solar thermal power plant with storage, and solar thermal power plant for H ₂ production
SolarPV	Solar photovoltaic power plant (no storage)
Wind	Wind power plant
Geothrm	Geothermal power plant
H2FC	Electricity from hydrogen fuel cells in the industry and the residential sector, off-peak electricity production via hydrogen-based fuel cells in the transport sector.
PV-ons	Photovoltaic onsite electricity production

Tabelle 4: Aggregierte Technologien im Stromsektor. Aufgrund der grossen Menge von Technologien im MESSAGE Model ist es nicht möglich, Ergebnisse für jede einzelne Technologie zu berichten.

Entwicklung fossiler und nuklearer Energieumwandlungstechniken unter künftigen Bedingungen des Energiemarktes und notwendiger Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen

**Dr. U. Fahl, Dr. rer. oec. D. Herrmann, Prof. Dr.-Ing. A. Voß,
IER Stuttgart**

Stellung und generelle Entwicklungsmöglichkeiten des Energieumwandlungssektors

Der *Energieumwandlungssektor* (siehe Abbildung 1) hat die Aufgabe, mit möglichst hoher Effizienz sowie technisch hinreichend sicher, zuverlässig und umweltfreundlich die im Inland gewonnenen oder importierten Primärenergieträger stofflich zu veredeln bzw. energetisch in spezifisch nutzbare Sekundärenergieträger umzuwandeln und diese bedarfsgerecht zu den Endanwendern zu verteilen. Gegebenenfalls können weitere Schritte einer Zwischenspeicherung, Umverteilung und/oder sekundären Umwandlung erforderlich werden. Der Umwandlungssektor ist das notwendige Bindeglied zwischen Endenergienachfrage und Primärenergieangebot, wenn beide Seiten sachlich-inhaltlich bzw. räumlich und zeitlich nicht deckungsgleich sind. Je spezieller die Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Energieversorgung werden, desto wichtiger ist diese Funktion. Sie muß nicht zuletzt durch Weiterentwicklung und Vervollkommnung der im Umwandlungssektor eingesetzten Technik auf dem jeweils notwendigen hohen Niveau gewährleistet werden.

Volkswirtschaftlich werden zunächst nicht Endenergieträger, sondern *Energiedienstleistungen* nachgefragt. Letztere hängen von vielfältigen Einflußfaktoren ab und sind nur begrenzt gegenseitig substituierbar. Allerdings können viele Energiedienstleistungen, abhängig von der Qualität der Nutzungsprozesse, durch den Einsatz von mehr oder weniger Endenergie sowie auch auf Basis unterschiedlicher Endenergieträger erbracht werden. Wachsender gesellschaftlicher Bedarf nach Energiedienstleistungen führt somit

erst nach Ausschöpfen der wirtschaftlichen Einspar- und Substitutionsmöglichkeiten zu entsprechenden Zuwächsen der Endenergienachfrage bzw. zu Anforderungen an die Weiterentwicklung von Techniken des Umwandlungssektors. Bei geringem Zuwachs können derartige bedarfsbedingte Entwicklungsimpulse weitgehend ausbleiben.

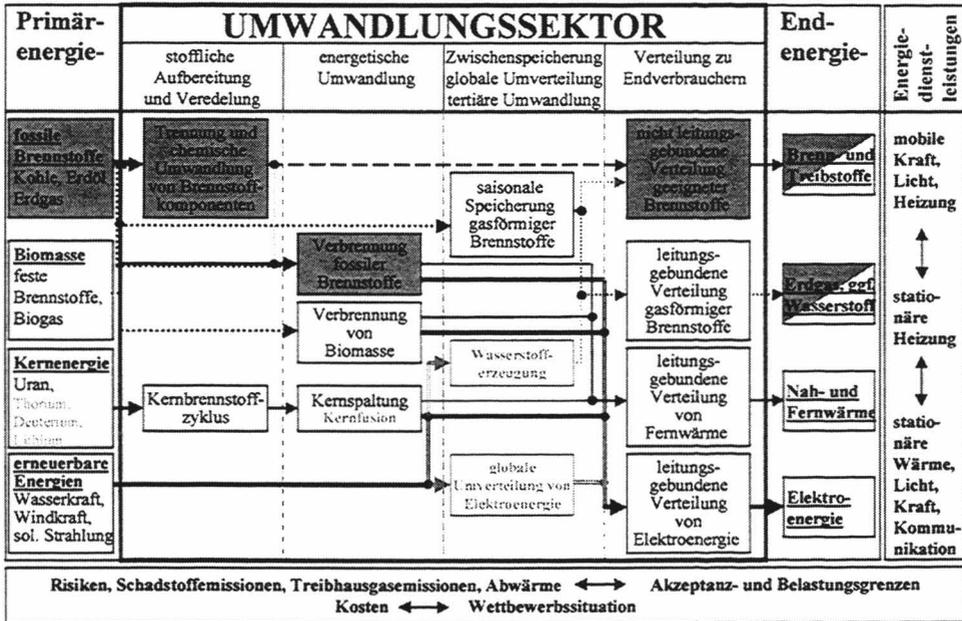


Abbildung 1: Grundstruktur und Einbindungen des Energieumwandlungssektors

Im Unterschied zur Nachfrage nach Energiedienstleistungen haben die technisch und wirtschaftlich verfügbaren *Primärenergiequellen* relativ großen Einfluß auf den Umwandlungssektor, bestimmen sie doch bei gegebener Endenergeträgerstruktur maßgeblich Art und Umfang notwendiger Umwandlungsschritte. Durch globalen Energiehandel werden grobe Unterschiede in der natürlichen Ausstattung einzelner Volkswirtschaften mit Primärenergiereserven kompensiert, wobei Marktrisiken bleiben. Auf längere Sicht ist für erschöpfbare Primärenergiequellen wichtig, inwieweit die Verschlechterung natürlicher Gewinnungsbedingungen jeweils durch Fortschritte bei Erkundung und Förderung kompensiert werden kann.

Die Energieversorgung insgesamt ist mit technischen und anderen Risiken sowie Schadstoff- und Treibhausgasemissionen verbunden. Um entsprechende *Akzeptanz- und Belastungsgrenzen* einhalten zu können, die vorwiegend gesellschaftlich determiniert sind sowie ständiger Veränderung und Weiterentwicklung unterliegen, können weitgehende Verbesserungen einzelner Techniken bzw. strukturelle Veränderungen der Energieversorgung notwendig werden. Beispielsweise können wachsende globale Zwänge zur Verminderung von Treibhausgasemissionen den Einsatz fossiler Energieträger, unabhängig von den verfügbaren Brennstoffreserven, einschneidend begrenzen und den Übergang zu einer im wesentlichen nicht mehr auf fossilen Primärenergiequellen beruhenden Energieversorgung erzwingen.

Unter sonst gleichen Anforderungen und Rahmenbedingungen entscheidet letztendlich die Effizienz der im Umwandlungssektor eingesetzten Techniken und geschaffenen Strukturen über die *wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit* der Energieversorgung.

- Diesbezügliche Fortschritte werden unter Nutzung des allgemeinen wissenschaftlich-technischen Fortschritts vor allem durch die *laufende Verbesserung etablierter Umwandlungstechniken* im Zusammenhang mit der Erweiterung, Erneuerung oder Modernisierung des Anlagenbestandes erreicht.
- In manchen Fällen werden *qualitativ neue Techniken* für den breiten Einsatz reif gemacht (z. B. Brennstoffzelle) bzw. *qualitative Erweiterungen der Nutzungsmöglichkeiten* bekannter Techniken angestrebt (z. B. Verbrennungsmotoren auf Basis Erdgas als BHKW). Auch in diesem Zusammenhang wird überwiegend der allgemeine wissenschaftlich-technische Fortschritt nutzbar gemacht.
- Ein Entdecken und Ausnutzen bisher unbekannter neuer Wirkprinzipien ist denkbar, wird aber hier ausgeschlossen.

Bisherige Abbildung der Entwicklung von Techniken des Umwandlungssektors in IKARUS

Nur durch Kostensenkungen kann sich *technischer Fortschritt im Umwandlungssektor* wirtschaftlich selbst tragen, und er wird hierdurch stimuliert. Hinsichtlich anderer Entwicklungsziele sind dagegen in der Regel spezifische äußere Anforderungen und Finanzierungsquellen erforderlich. Soweit Kostensenkungen aber durch Wirkungsgradsteige-

nung erreicht werden, sind diese bei Nutzung fossiler Brennstoffe gleichzeitig mit einer Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen verbunden. Ähnliche Nebenefekte können wirtschaftlich motivierte Strukturänderungen des Umwandlungssektors haben. Da bislang nicht von international verbindlichen Minderungsverpflichtungen ausgegangen werden konnte, aber auch seitens Energienachfrage und Primärenergiebereitstellung keine äußeren Impulse abzusehen waren, beschränkte sich die Abbildung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts bei den Techniken des Umwandlungssektors im IKARUS-Instrumentarium überwiegend auf jene sich selbst tragenden (autonomen) Verbesserungen. Indem diese auf der Anwendung des allgemeinen technisch-wirtschaftlichen Fortschritts beruhen, wurde angestrebt, die für die Modelljahre 2005 und 2020 gegenüber 1989 bzw. 1995 jeweils zu erwartenden Verbesserungen möglichst für alle Techniken des Umwandlungssektors sowie möglichst einheitlich darzustellen.

Im Hinblick auf Nebenwirkungen der Emissionsminderung mußten vor allem mögliche *Wirkungsgradverbesserungen und Kostensenkungen* erfaßt werden. Das war in bezug auf konventionelle Kraftwerkstechniken insofern möglich, als auf Daten zu unterschiedlichen Projekten der Firma Siemens-KWU zurückgegriffen werden konnte, die Wirkungsgradsteigerungen zum Ziel haben. Sie werden durch eine Kombination von Erhöhung thermodynamischer Parameter, weiterer Carnotisierung der Kreisprozesse, Verbesserung innerer Wirkungsgrade von Turbinen sowie Vergrößerung des nutzbaren Wärmegefälles mittels Kombiprozessen erreicht. Die ökonomischen Daten beruhen auf den entsprechenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen seitens KWU, wodurch von einer einheitlichen Methodik ausgegangen werden kann. In allen anderen Fällen mußten Daten von unterschiedlichen Quellen zusammengetragen werden, deren Konsistenz weitaus weniger sicher ist. In bezug auf die Verteilung von Fernwärme, die im Zusammenhang mit einer potentiell emissionsmindernden Kraft-Wärme-Kopplung und Fernwärmever-sorgung von Interesse ist, wurde durch eigene Modellrechnungen in sehr vereinfachter Weise versucht, Aspekte des wissenschaftlich-technischen Fortschritts zu berücksichtigen. Bei nicht wenigen Umwandlungstechniken aber war es gar nicht möglich, entsprechende Fortschritte zu prognostizieren.

Der „allgemeine wissenschaftlich-technische Fortschritt“ hat zwar sehr viele unterschiedliche Facetten, dennoch sind es zu bestimmten Zeitpunkten meist ganz spezielle Neuerungen, die breiten Eingang in die industrielle Praxis finden. Entsprechende Schwerpunkte waren bzw. sind die Computerisierung einschließlich Vernetzung von Informationsprozessen, zunehmende Roboterisierung industrieller Fertigungsprozesse

u. a., die jeweils unterschiedliche Möglichkeiten für die Weiterentwicklung von Techniken des Umwandlungssektors eröffnen. Dies wurde im Rahmen des bisherigen Konzeptes „autonomer Effizienzverbesserungen“ weder hinterfragt, geschweige denn explizit berücksichtigt. Im Zusammenhang mit der Ausweitung des Betrachtungshorizontes bis zum Jahr 2030 sowie der bereits in den letzten Jahren eingetretenen und noch mehr der für die Zukunft zu erwartenden Veränderungen von Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Energieversorgung muß diese bisherige Beschreibung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts im Umwandlungssektor kritisch hinterfragt werden.

Künftige Anforderungen und Rahmenbedingungen für Energieversorgung und Emissionsminderung

In den vergangenen Jahren haben sich eine Reihe grundlegender Veränderungen vollzogen oder sind in Ansätzen erkennbar, die weitreichende Auswirkungen auf die Energieversorgung in der Bundesrepublik Deutschland und darüber hinaus haben werden und voraussichtlich neue Ansätze für die Beschreibung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts im Umwandlungssektor erfordern werden:

- Bereits seit Mitte der 90er und z. T. früher Jahre verstärken sich die Tendenzen allgemeiner Globalisierung der Wirtschaft, was u. a. seinen Ausdruck in hohen Entwicklungstempi einer Reihe bevölkerungsreicher Entwicklungs- und Schwellenländer sowie in einem raschen Ausbau weltumspannender Informations- und Kommunikationssysteme findet bzw. diesen zur Grundlage hat.
- Die Marktliberalisierung setzt sich immer mehr auch für die leitungsgebundene Energieversorgung durch. Sie wurde in der Bundesrepublik Deutschland relativ spät eingeführt, wird aber sehr schnell und weitgehend wirksam. Dies führt zu einer deutlich stärkeren Gewichtung von Aspekten kurzfristiger wirtschaftlicher Konkurrenzfähigkeit und dient der Marktberreinigung.
- Mit dem Kyotoprotokoll wird international der Weg für die Implementierung verbindlicher Minderungsverpflichtungen für Treibhausgasemissionen freigemacht.
- In der Bundesrepublik Deutschland wird von der neuen Bundesregierung ein Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie angestrebt. Hierdurch wird es objektiv schwieriger, die mit Kyoto eingegangenen Minderungsverpflichtungen zu erfüllen.

Auf längere Sicht zeichnen sich Tendenzen ab, die es in bezug auf künftige globale wirtschaftliche, ökologische und politische Stabilität zu erkennen sowie im Sinne des Leitbildes „nachhaltiger Entwicklung“ zunehmend zu berücksichtigen gilt. Das betrifft:

- die Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine weiter wachsende Weltbevölkerung,
- das Vermeiden nicht tolerierbarer Umwelt- und Klimaveränderungen sowie
- die Sicherung der Zukunftsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes und Lebensraumes Deutschland vor dem Hintergrund weiterer Globalisierung.

Während es auf der Grundlage einer weiter rasch voranschreitenden Automatisierung von Produktionsprozessen grundsätzlich möglich erscheint, die mit diesen Herausforderungen verbundenen Anforderungen an das menschliche Arbeitsvermögen zu lösen, harren die mit der entsprechenden globalen Energieversorgung verbundenen Probleme durchaus noch ihrer Lösung. Eine entscheidende Rolle kann und muß hierbei der wissenschaftlich-technische Fortschritt in der Energieversorgung leisten.

Neue Anforderungen an den wissenschaftlich-technischen Fortschritt im Umwandlungssektor

Sofern das Energiesystem auf weitgehend veränderte Anforderungen und Rahmenbedingungen reagieren muß, geht es nicht mehr um autonomen Fortschritt, sondern um ganz gezielte, auf Problemlösungen orientierte Veränderungen und Verbesserungen. Diese werden dementsprechend nicht auf Wirkungsgradverbesserungen und Kostensenkungen begrenzt sein, sondern werden auch entsprechende andere „Antworten“ beinhalten. Beispielhaft sei hier die Möglichkeit genannt, Akzeptanzbarrieren gegenüber der Kernenergie durch deren gezielte technisch-wirtschaftliche Weiterentwicklung überwinden zu helfen.

Entsprechend weitreichende Ansätze werden aber bei weitem nicht mehr alle Techniken mehr oder minder gleichmäßig betreffen, sondern vorrangig solche Techniken bzw. Umwandlungsketten, die entscheidende Beiträge zum Erreichen des jeweiligen Zieles leisten. Im Rahmen derartiger Ketten können einzelne Techniken eine Schlüsselrolle spielen, die nur für sich genommen kaum zum Erreichen eines Entwicklungszieles beitragen. So ein Beispiel ist die Fernwärme, die in Verbindung mit einer nicht auf fossilen Brennstoffen beruhenden Wärmeerzeugung bedeutende Emissionsminderungspotenti-

ale erschließen hilft. Ähnliches gilt auch für qualitativ neue Endenergieträger wie Wasserstoff, ggf. auch Methanol u. a..

Wenn die Lösung ausgewählter Probleme abgebildet werden soll, die durch ganz bestimmte Anforderungen und Rahmenbedingungen hervorgerufen worden sind, dann müssen diese veränderten Bedingungen in sich konsistent sowie einheitlich für den gesamten Umwandlungssektor bzw. das gesamte Energiesystem dargestellt werden. So ist es z. B. wenig wahrscheinlich, daß es in Zukunft ein höheres Preisniveau für Energieträger auf den Weltmärkten gibt, ohne daß gleichzeitig auch die Rohstoffpreise entsprechend gestiegen sind. Damit aber werden materialintensive Lösungen der Angebotsverbreiterung, wie zusätzliches Erdgas aus Nordnorwegen oder den polaren Regionen Rußlands überdurchschnittlich belastet. Ebenso könnten hiervon künftige Schritte weiterer Wirkungsgraderhöhung betroffen sein, die in der Regel mit wachsenden Anforderungen an Qualität und Menge des Materialeinsatzes verbunden sind.

Auch gezielte Problemlösungen werden zunächst alle Möglichkeiten ausschöpfen müssen, die der jeweils aktuelle wissenschaftlich-technische Fortschritt gerade bietet, um möglichst kurzfristig und mit geringstem Aufwand wesentliche Verbesserungen zu erreichen. Die für ein spezielles Aufgabengebiet adaptierten neuen Lösungsmöglichkeiten haben aber gute Chancen, auch in allen anderen, ähnlich gelagerten Fällen umfassend angewendet zu werden. Gegenwärtig und für den weiteren Betrachtungszeitraum betrifft das insbesondere die bedeutenden Fortschritte bei der Automatisierung industrieller Fertigungsprozesse, die das wirtschaftliche Einsatzpotential kleiner bzw. modular aufgebauter Techniken wie BHKW oder Brennstoffzellen ausweiten helfen, die aber auch in der Komponentenfertigung für Großanlagen Kostensenkungen ermöglichen.

(Die grundlegenden Einflüsse auf Rahmenbedingungen und Anforderungen an die Energieversorgung sowie die entsprechenden Entwicklungsmöglichkeiten und –erfordernisse des Umwandlungssektors in Abhängigkeit von der Stärke jener Einflüsse sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt.)

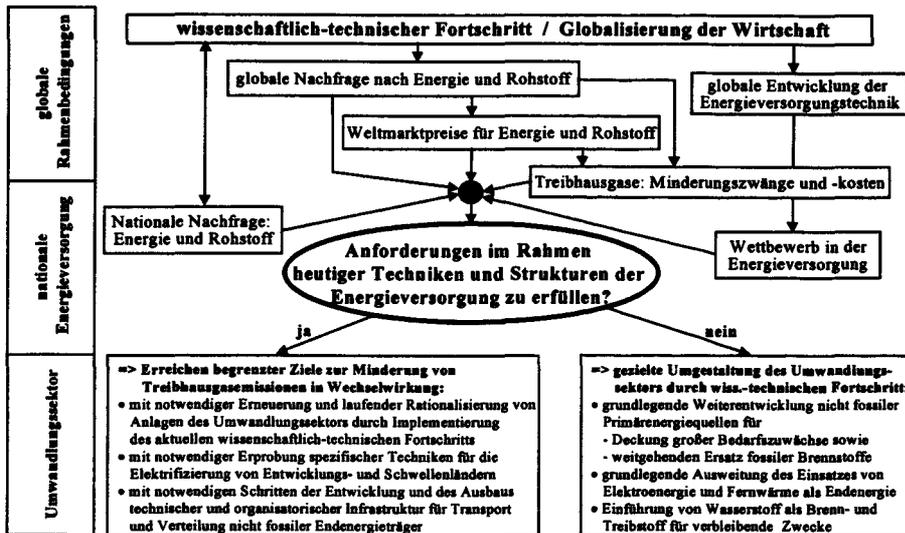


Abbildung 2: Entwicklungsmöglichkeiten des Energieumwandlungssektors in Abhängigkeit von Rahmenbedingungen und Anforderungen

Fazit

Es gibt gewichtige Gründe für die Annahme, daß die weitere *Entwicklung fossiler und nuklearer Energieumwandlungstechniken unter künftigen Bedingungen des Energiemarktes und notwendiger Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen* infolge *Globalisierung* sowie sich qualitativ erweiternder Möglichkeiten des allgemeinen *wissenschaftlich-technischen Fortschritts* keine bloße Fortsetzung bisheriger Rationalisierungstrends sein wird, die sich, ähnlich für alle Techniken, im wesentlichen durch Extrapolation beschreiben ließen. Im Vordergrund dürfte vielmehr das Lösen ganz bestimmter quantitativer und qualitativer Entwicklungsprobleme der Energieversorgung, unter gezielter Ausnutzung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts, stehen. Ein vorausschauendes Erkennen und grobes Bestimmen der neuen Tendenzen sind für die künftige Entwicklung der Energieversorgung wichtig. Durch zielgerichtete sowie hinreichend breite interdisziplinäre und interinstitutionelle Zusammenarbeit könnte hierzu, beispielsweise im Rahmen des IKARUS-Projektes, ein wichtiger Beitrag geleistet werden.

Perspektiven für Energieumwandlungstechnologien bei Einsatz fossiler und nuklearer Brennstoffe

Univ.-Prof. (i. R.) Dr.-Ing. Rudolf Pruscek
Bergisch Gladbach

(vormals Leiter des Fachgebiets Technik der Energieversorgung und Energiewirtschaft,
Univ. Essen)

1 Stand der Energieumwandlungstechnologien

In der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts wurden beachtliche Fortschritte bei Elektrizitäts- und Wärmeerzeugungsanlagen (Kraftwerken, Großfeuerungen), Motoren und Flugtriebwerken hinsichtlich Betriebssicherheit, Betriebsführung, Automatisierung, Leittechnik, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Lebensdauer erzielt. Gleichzeitig konnten die spezifischen Anlagen- und Betriebskosten gesenkt werden. Im Zusammenhang mit dem Tagungsthema sind die erreichten Wirkungsgrade und die Minderungen der Umweltbelastung von Interesse. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit Kraftwerkstechnologien.

Der Stand der Technik der für die öffentliche Elektrizitätsversorgung eingesetzten Kraftwerke ist das Ergebnis langjähriger Erfahrung und wirtschaftlicher Optimierung. Dabei beeinflussen Zeitgeist und energiepolitische Vorgaben den technischen Fortschritt. In der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts lassen sich mehrere "Zeitgeist-Phasen" mit Auswirkungen auf die Energietechnik aufzeigen:

- *Wiederaufbau, freie Marktwirtschaft, Pioniergeist, Kernenergie, Raumfahrt*: Neue Kraftwerke, Steigerung der Wirkungsgrade, Energie-Direktumwandlungsverfahren (Photovoltaik, Brennstoffzelle, Thermionik, MHD u. a.)
- *„Limits to Growth“ und Ölpreiskrisen*: Endlichkeit der Vorräte, Senkung der Energieintensität, Entkopplung des Energieverbrauchs vom Wirtschaftswachstum, Kernkraftwerke

- *Umweltschutz, Sicherheitsbewußtsein:* Rauchgasreinigung, Nachrüstung vorhandener Kohlekraftwerke (mit Wirkungsgradeinbußen), Forderung nach verstärkter Nutzung erneuerbarer Energien, rationelle Energieverwendung, Forderung nach Ausstieg aus der Kernenergie
- *CO₂-Problematik, Klimaschutzpolitik:* internationale Vereinbarungen über die Begrenzung der CO₂-Emissionen, Wirkungsgradsteigerung, CO₂-freie Energiequellen, gleichzeitig Auslaufen der Kernenergie
- *Liberalisierung des Strommarktes:* veränderte Rahmenbedingungen, Wettbewerb, neue Regelungen für den Netzzugang, Kostensenkung, Auswirkung auf Investitionsentscheidungen und auf die Entwicklung der Kraftwerkstechnologien

Die Kohlendioxidemission kann bei der energietechnischen Nutzung fossiler Brennstoffe nur durch Wirkungsgradsteigerung oder durch CO₂-Rückhaltung gemindert werden. Kostensenkungen werden i.a. durch Vereinfachung und Rationalisierung erreicht. Die von der Bundesregierung festgelegten CO₂-Emissionsreduktionsziele beschleunigen die Umsetzung von technisch durchführbaren Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung. Durch Verordnungen und Steuern lassen sich jedoch keine neuen Entdeckungen erzwingen. Vorschläge zur Wirkungsgradsteigerung setzen sich in der freien Wirtschaft durch, wenn sie eine Verringerung der Elektrizitätserzeugungskosten bewirken. Vor zehn Jahren wurde der Wirkungsgrad großer (> 600 MW) „wirtschaftlicher“ steinkohlebefeuerter Dampfkraftwerk-Blöcke mit 39,5 bis 39,7 % als Stand der Technik angegeben, für braunkohlebefeuerte Dampfkraftwerke wurden 36,2 % genannt [1]¹. Im Jahre 1995 legte die VDEW in ihrer Erklärung zum Klimaschutz dar, daß die Unternehmen der deutschen Elektrizitätswirtschaft bei künftig zu planenden Grundlast-Kondensationskraftwerken mit Leistungen > 300 MW auf der Grundlage der derzeit gültigen Umweltschutzvorschriften Nettowirkungsgrade im Bestpunkt von ca. 45 % (Steinkohle) bzw. ca. 42 % (Braunkohle) anstreben [2]. Drei Jahre danach geht in Dänemark (1998) ein Steinkohle-Kondensationskraftwerk (mit Seewasserkühlung) mit einem Wirkungsgrad von 47 % ans Netz [3]. Beim geplanten Steinkohlekraftwerk Westfalen D soll unter hiesigen Kühlbedingungen (Naßkühlturm, Rückkühlung) ein Wirkungsgrad von 47,2 % erreicht werden [4]. Das Braunkohlekraftwerk Niederaußem K mit optimierter Anlagentechnik (BoA) [5] wurde für einen Wirkungsgrad von 45,2 % ausgelegt. Kennzeichnend für diese Dampfkraftwerke ist die Verwendung von über-kritischem Frischdampf² mit Temperaturen bis ca. 600 °C.

¹ Jeweils unter Berücksichtigung des Energieaufwandes für Maßnahmen zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte, die den Vergleichsrechnungen mit 200 mg/m³ SO₂, 200 mg/m³ NO_x und 50 mg/m³ Staub im Rauchgas zugrunde gelegt wurden.

Dazu kommen Verbesserungen der Prozeßführung und Komponenten (z. B. 3D-Turbinenschaufeln) sowie die Senkung der Kondensationstemperatur bzw. des Kondensatordrucks. Zu Beginn des vorigen Jh. betrug der Wirkungsgrad ca. 10 %. Der spezifische Brennstoffverbrauch für die Erzeugung von Elektrizität in steinkohle-befeuerten Dampfkraftwerken konnte somit im Laufe von 90 Jahren um rund 79 % gesenkt werden! Bei Verwendung der gleichen Kohle gilt der gleiche Prozentsatz für die CO₂-Emissionsminderung.

Noch bemerkenswerter sind die Fortschritte bei erdgasbefeuerten Gas-Dampf-Kombi-Kraftwerken (GuD). Die jüngst ans Netz gegangenen Anlagen arbeiten im Bestpunkt mit Wirkungsgraden um 58 %. Für das GuD-Kraftwerk Otahuhu³, Neuseeland, wird von der Siemens AG ein Bruttowirkungsgrad von 59,1 % angegeben. Die Reduktion der spezifischen CO₂-Emission ist bei erdgasbefeuerten GuD-Kraftwerken noch größer als der Wirkungsgradvorteil indiziert. Für den Investor ist von Bedeutung, daß der spezifische Anlagenlieferpreis für GuD-Kraftwerke bei gleichzeitig wesentlich höherem Wirkungsgrad nur etwa die Hälfte vergleichbarer Kohlekraftwerke beträgt (GuD-Kraftwerke 600 bis 800 DM/kW, Steinkohle-Dampfkraftwerke 1700 DM/kW, unverbindliche Richtwerte aus der Literatur). Unter Wettbewerbsbedingungen im liberalisierten Strommarkt ist es naheliegend, daß bei Investitionsentscheidungen der niedrigere Anlagenpreis, die kürzere Bauzeit und Abschreibungsdauer den Vorrang vor Versorgungssicherheit (größere Reichweite der Kohlereserven im Vergleich zu Erdgas) haben.

In Bild 1-2 sind die spezifischen Einsatzstoffströme und Emissionen sowie die Wirkungsgrade heute und in naher Zukunft baubarer Kraftwerken eingetragen.

2 Perspektiven für Kraftwerkstechnologien mit fossilen Brennstoffen

Ökonomisch getriebene Wirkungsgradsteigerungen

Wirkungsgradverbesserungen bei eingeführten Kraftwerkstechnologien sind in der Regel durch „Zusatzinvestitionen“ zu erkaufen. Sie sollten kleiner sein als die dadurch bewirkten (im Abschreibungszeitraum diskontierten) Brennstoffkosteneinsparungen.

² Unter den Bedingungen der öffentlichen Elektrizitätsversorgungswirtschaft sind Dampfkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland mit überkritischem Frischdampfdruck und Frischdampftemperaturen um 600 °C erst durch die Qualifizierung neuer Werkstoffe (T 91/P 91, E 911 u.a.) „marktfähig“ geworden. In den USA wurde das 600 MW-Kraftwerk Eddystone mit überkritischem Frischdampf bereits 1958 in Betrieb genommen. Die Betriebsergebnisse waren nicht zufriedenstellend. Nach dem Kriege sind in der Bundesrepublik Deutschland bis in die achtziger Jahre rund 20 Hochtemperatur-Dampfkraftwerke kleinerer und mittlerer Leistung vorwiegend in der chemischen Industrie zur Grundlastdeckung erfolgreich betrieben worden (Endüberhitzer und andere Hochtemperaturbauteile aus austenitischen Werkstoffen). Auch bei den Anfang der 90er Jahre in Betrieb genommenen Blöcken Staudinger 5 und Rostock (Dampfzustände 262 bar/545 °C/560 °C, Nettowirkungsgrad 42,8 %) wurden für hochbelastete Bauteile im Hochtemperaturbereich austenitische Werkstoffe verwendet.

Alle bisher eingeführten Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung sind unter dieser Prämisse zustande gekommen. Für die „wirtschaftliche“ Zusatzinvestition⁴ gilt (vereinfacht)

$$\Delta k_A \leq T_a \cdot b \cdot \Delta \eta / (\alpha_e \cdot \eta_1 \cdot \eta_2).$$

Darin bedeuten Δk_A der Barwert der „wirtschaftlich zulässigen“ spezifischen Zusatzinvestition, b der spezifische (auf den Heizwert bezogene) Brennstoffwärmepreis, α_e der effektive Annuitätsfaktor, η_1 , η_2 die Wirkungsgrade zweier Kraftwerksalternativen 1 bzw. 2 und $\Delta \eta = \eta_2 - \eta_1$ (wobei $\eta_2 > \eta_1$). Für $b = 10 \text{ DM/MWh}$ ($= 2,8 \text{ DM/GJ}$), $T_a = T_{a1} = T_{a2} = 7000 \text{ h/a}$; $\eta_1 = 38 \%$, $\eta_2 = 45 \%$; Abschreibungsdauer 20 Jahre, $\alpha_e = 0,2 \text{ 1/a}$ (effektive Annuität einschließlich Steuern, Versicherung, Wartung u. a.) ergeben sich abgerundet $\Delta k_A \approx 143 \text{ DM/kW}$ bzw. rund 20 DM^5 je kW installierte Leistung und Prozentpunkt Wirkungsgradsteigerung. Bei einem 600 MW Kraftwerk und einem heizwertbezogenen spezifischen CO_2 -Emissionskoeffizienten von $0,333 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ (Steinkohle) werden im Abschreibungszeitraum (20 Jahre) $11,45 \text{ Mio t CO}_2$ eingespart. Die spezifischen CO_2 -Emissionsvermeidungskosten betragen somit $7,5 \text{ DM/t}$, eine Größenordnung, die auch von EVU für Vermeidungskosten durch wirkungsgradsteigernde Maßnahmen angegeben wird.

Neue Technologien führen in der Einführungsphase oft zu einer Minderung der Verfügbarkeit. Die durch Wirkungsgradsteigerung erzielten Einsparungen an Brennstoffkosten können durch ungeplante Stillstände zunichte gemacht werden. Unterstellt man, daß das Kraftwerk 1 mit 38 % Wirkungsgrad und das Kraftwerk 2 mit 45 % Wirkungsgrad gleiche Fixkosten haben, dann ergeben sich bei einem spezifischen Anlagelieferpreis k_A von 1700 DM/kW und mit den oben angegebenen Parametern gleiche Elektrizitätserzeugungskosten, wenn die Ausnutzungsdauer T_{a2} des Kraftwerks 2 während der Abschreibungszeit

$$T_{a2} = \left[\frac{1}{T_{a1}} + \frac{b}{k_A \alpha_e} \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \right]^{-1} = 6450 \text{ h/a}$$

beträgt. Je Prozentpunkt Wirkungsgradsteigerung darf die Ausnutzungsdauer in diesem Zahlenbeispiel nur um $550/7 = 78,57 \text{ h/a}$ geringer sein als bei Kraftwerk 1. Ist der

³ Bruttoleistung 403 MW.

⁴ Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsrechnung, die das Prinzip zeigt. Die rechte Seite der Gleichung ist der Barwert der durch Wirkungsgradverbesserung erzielten Einsparungen an Brennstoffkosten. Mit 8 %/a kalkulatorischem Zinssatz und $n = 20$ Jahre ist $\alpha = 10,2 \text{ a}^{-1}$. Zu den vom Hersteller genannten spezifischen Anlagelieferpreis k_A addieren sich u.a. noch die Bauhermeigenleistungen. In der vereinfachten Darstellung wurden alle weiteren Fixkostenanteile durch einen entsprechend erhöhten Annuitätsfaktor α_e berücksichtigt.

Anlagenlieferpreis für das Kraftwerk mit besserem Wirkungsgrad höher als für das Kraftwerk mit geringerem Wirkungsgrad, so ist die zulässige Reduktion der Ausnutzungsdauer entsprechend geringer. Daher sind Neuerungen bei Kraftwerken vor ihrem Einsatz eingehend zu erproben.

Der ökonomisch getriebene „autonome“ Fortschritt kann nicht durch Veränderung der Rahmenbedingungen (z. B. durch CO₂-Steuern) erzwungen werden, wenn die Technik dafür nicht „reif“ ist. Die angeführten Fortschritte wurden auf der Basis jahrzehntelanger Erfahrung erzielt und durch Vorleistungen auf anderen Technik-Gebieten ermöglicht. Diese Zusammenhänge sind bei Überlegungen über Lenkungsmaßnahmen zu bedenken!

Wirkungsgradsteigerung bei thermischen Kraftwerken

Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen bei thermischen, d.h. mit fossilen Brennstoffen beheizten Kraftwerken und Kernkraftwerken lassen sich an Hand von Bild 2-1 erläutern. Zum Vergleich sind dort auch die Wirkungsgrade von Brennstoffzellen eingetragen. Bei thermischen Energiewandlungsverfahren (nicht bei Brennstoffzellen) wird der maximal mögliche Wirkungsgrad durch die obere Prozeßtemperatur (d.h. die höchste Temperatur des Arbeitsmittels im Prozeß) begrenzt. Die Abweichung vom Carnot-Faktor ist ein Maß für die Verluste durch irreversible Prozesse. Diese Verluste können durch Carnotisierungsmaßnahmen und Komponentenverbesserungen verringert werden. Der Unterschied zwischen Carnot-Faktor und Brennstoffexergie hängt hingegen von der oberen Prozeßtemperatur ab. Er ist ein Maß für die Exergieverluste durch Verbrennung und Wärmeübertragung an das Arbeitsmittel. Diese Verluste nehmen mit zunehmender Prozeßtemperatur ab. Die maximal zulässige Prozeßtemperatur hängt vom Stand der Werkstofftechnik ab, aber auch von der Wahl des Energiewandlungsverfahrens. Z.B. stehen die Rohrwände eines Dampferzeugers unter hohem Innendruck (230 bis 300 bar, Entwicklungsziel 375 bar). Dagegen beträgt der Innendruck in der Brennkammer einer Industriegasturbine nur etwa 18 bar, bei Gasturbinen mit Zwischenheizung 26, bei Flugtriebwerken bis 40 bar. Die druckführenden Brennkammerwände und die Schaufeln der Gasturbine werden gekühlt. Bei Dampfturbinen ist das nicht möglich. Daher kann die Eintrittstemperatur bei Gasturbinen höher als bei Dampfturbinen sein (entsprechendes gilt für Verbrennungsmotoren).

Zur Verbesserung der Wirkungsgrade thermischer Energiewandler gibt es mehrere Optionen:

⁵ Dieser Wert hängt von der Art der Investitionsrechnung und von verschiedenen Parametern bzw. Rahmendaten ab. In der Praxis werden die durch Innovation bedingten Kinderkrankheiten nach einer Einlaufphase behoben. Das Zahlenbeispiel und die Formel zeigen die prinzipiellen Zusammenhänge auf.

- Erhöhung der oberen Prozeßtemperatur (Entwicklung geeigneter Hochtemperaturwerkstoffe)
- Carnotisierung (Steigerung der thermodynamischen Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme bei festgehaltener oberer Prozeßtemperatur; Absenkung der thermodynamischen Mitteltemperatur bei der Wärmeabfuhr)
- Komponentenverbesserung
- Ausnutzung der Temperaturspanne bis nahe Umgebungstemperatur

Perspektiven für das Dampfkraftwerk mit atmosphärischer Feuerung

Kraftwerkshersteller und Betreiber bemühen sich um weitere Verbesserungen der Wirkungsgrade konventioneller Dampfkraftwerke mit atmosphärischer Kohlenstaubfeuerung. Solche Kraftwerke eignen sich auf Grund ihres relativ guten Teillastverhaltens auch für den Einsatz in der Mittellast. Dampfkraftwerke gelten daher als Arbeitspferde in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung.

In dem vom Bundesminister für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekt "KOMET 650" werden Werkstoffproben für Armaturen, Dampferzeuger- und Turbinenkomponenten im Temperaturbereich bis 650 °C durchgeführt und die erforderliche Meßtechnik entwickelt [6]. Ab 2002 soll es möglich sein, Kohlekraftwerke für überkritischen Frischdampfzustand von ca. 300 bar/650 °C zu errichten.

Noch ehrgeiziger sind die Ziele des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts "Advanced ("700°C") PF Power Plant"[7], an dem 40 Partner beteiligt sind (Hersteller, EVU, Institute). Projektziel ist die Verwendung von Ni-Basis-Legierungen für Hochtemperaturkomponenten in Dampfkraftwerken und die Errichtung einer Demonstrationsanlage (gemäß Terminplan 8 Jahre nach Projektbeginn). Mit Frischdampf von 375 bar/700°C, zweifacher Zwischenüberhitzung auf je 720 °C und 8 bis 10 Regenerativ-Vorwärmstufen sollen dann - je nach Kühlbedingungen - Wirkungsgrade von 52 bis 55 % erreicht werden. Diese neue Dampfkraftwerksgeneration stünde bei erfolgreicher Entwicklung und Demonstration ab 2015 zur Verfügung.

Auch bei den mit Braunkohle befeuerten Dampfkraftwerken geht die Entwicklung über die BoA-Technik hinaus. Unter der Bezeichnung BoA⁺ wird bei der RWE Energie AG an neuen Braunkohletrocknungsverfahren gearbeitet [8]. Bei der klassischen Mahltrocknung wird zur Entfeuchtung der wasserhaltigen Braunkohle heißes Rauchgas (≈ 1000 °C) verwendet. Durch Trocknung mit Niedertemperaturwärme und Rückgewinn der Verdampfungswärme aus den Brüden läßt sich der Exergieverlust erheblich reduzieren. Alternativ wird auch die mechanische Trocknung untersucht. Mit

zukünftigen Braunkohlekraftwerken könnte dann die 50 %-Wirkungsgradgrenze erreicht werden.

Mit der erfolgreichen Entwicklung und Qualifizierung der Ni-Basis-Legierungen als Werkstoffe für Dampfkraftwerks-Komponenten dürfte der Trend zu immer höheren Frischdampfzuständen vorerst zu einem Ende kommen.

Perspektiven für Kombi-Prozesse mit vorgeschalteter Gasturbine für Erdgas und andere saubere Brennstoffe

Die ISO⁶-Gasturbineneintrittstemperatur (TET) beträgt bei modernen Maschinen (z. B. bei der Siemens-Gasturbine V94.3A) 1190 °C, die Temperatur nach der Expansion am Austritt der Turbine - je nach Druckverhältnis – 580 bis fast 600 °C (bei der GT 26 sogar 608 °C). Durch Nachschaltung einer Dampfturbine läßt sich der Bereich zwischen Feuerungstemperatur bzw. Gasturbineneintrittstemperatur bis nahe Umgebungstemperatur für die Energieumwandlung ausnutzen. Alternativ kann die Enthalpie der Gasturbinenabgase (Abhitze) auch zur Regenerativ-Vorwärmung (Rekuperation) oder als Heiz- oder Prozeßwärme verwendet werden, Bild 2-2.

In der Vergangenheit wurden Kombi-Kraftwerke mit nachbefeueren Dampfprozessen ausgeführt. Mit den heute verfügbaren Gasturbinen erreicht man höchste Gesamtanlagenwirkungsgrade, wenn die Gasturbine mit einer unbefeueren Dampfkraftanlage kombiniert wird (GuD-Kraftwerk) [9]. Gleiches gilt für die anderen in Bild 2-3 angeführten Prozesse. Der STIG-Prozeß (Steam Injected Gas Turbine Cycle) eignet sich für die Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK) mit flexibler Stromkennzahl, vom HAT-Prozeß (Humid Air Turbine Cycle) verspricht man sich eine Senkung der spezifischen Anlagenkosten, was möglicherweise für kleinere Anlagen zutreffen könnte [10]. Nachteilig ist der hohe Wasserverbrauch. Eine Anlage mit HAT-Prozeß wurde noch nicht ausgeführt. In Bild 2-4, Bild 2-5 und Bild 2-6 sind die Fließschemata mit den zugehörigen T,S-Diagrammen für den GuD-, STIG- und HAT-Prozeß dargestellt.

Der Wirkungsgrad des GuD-Kraftwerks und aller anderen Kraftwerke mit Gasturbine wird maßgeblich durch die realisierbare Gasturbineneintrittstemperatur TET und das Verdichterdruckverhältnis π bestimmt, Bild 2-7a. Das „optimale Verdichterdruckverhältnis“ wird bei Gasturbinen für den Solobetrieb (stand-alone operation, simple cycle) durch den Betriebspunkt für maximale spezifische Arbeit (niedrige Anlagenkosten) festgelegt, bei GuD-Anlagen und Kombi-Kraftwerken mit integrierter

⁶ ISO-Temperatur: Eine auf Grund der gemessenen Austrittstemperatur gemäß ISO 2314 (International Organization for Standardization) berechnete Vergleichstemperatur. Im englischen Sprachraum wird häufig die "firing temperature" oder die Temperatur des Gases am Turbineneintritt ohne Berücksichtigung der zur Schaufelkühlung beigemischten Luft angegeben. Diese Temperatur ist bei gleichen Verhältnissen um ca. 250 K höher!

Kohlevergasung (integrated coal gasification, IGCC) durch den Betriebspunkt für maximalen Wirkungsgrad. Bei heute üblichen TET (z. B. 1190 °C, ISO) betragen diese Druckverhältnisse für Solobetrieb $\pi_{\text{opt,w}} \approx 16$, bei Einsatz als Vorschaltmaschine im Kombi-Prozeß $\pi_{\text{opt,\eta}} \approx 18$.

Ni-Basislegierungen sind bis etwa 850 °C verwendbar. Damit die aus diesem Werkstoff gefertigten Turbinenschaufeln höheren Gastemperaturen ausgesetzt werden können, beschichtet man sie mit einer keramischen Schutzschicht (coating). Die zulässige Schutzschichttemperatur liegt immer noch deutlich unterhalb der Gastemperatur (firing temperature) von ca. 1450 °C (das entspricht etwa der ISO-Temperatur 1190 °C). Zur Kühlung auf die zulässige Schaufel-Werkstofftemperatur wird ein Teil (etwa 20 %) der verdichteten Luft durch feine Bohrungen in den Leit- und Laufschaufeln an die Schaufeloberfläche geleitet. Die Luft vermischt sich mit dem heißeren Arbeitsmittel. Die potentielle Wirkungsgradsteigerung hängt somit nicht nur von den verfügbaren Werkstoffen, sondern auch von der Kühltechnik ab. Bei GuD-Anlagen könnten die Schaufeln auch mit Dampf anstelle mit Luft gekühlt werden. Eine umfassende Untersuchung über verschiedene Gasturbinen-Kühltechniken hat Kail [11] durchgeführt. Alternativ oder zusätzlich besteht die Möglichkeit, den Wirkungsgrad der Gasturbine durch Carnotisierung zu verbessern. Dieser Weg wurde von der Fa. ABB mit der Gasturbine GT 26 mit Zwischenerhitzung (sequentieller Verbrennung) beschritten. Das Druckverhältnis erhöht sich durch diese Maßnahme auf 26, die Turbinenaustrittstemperatur auf 608 °C.

Verbesserungspotentiale sind auch bei der nachgeschalteten Dampfkraftanlage vorhanden. Mit steigender Abgastemperatur käme evtl. die Erzeugung von überkritischem Frischdampf in Betracht. Derzeit wird der Vorteil eines Zwangdurchlaufanstelle eines Zwangumlaufkessels eher in der Verbilligung als in der Wirkungsgradsteigerung gesehen. Den möglichen Wirkungsgradgewinn durch die genannten und weitere Maßnahmen hat Kloster [12] untersucht.

Im unteren Leistungsbereich (einige zehn MW) werden auch modifizierte Flugtriebwerke (aeroderivative gas turbine) für den stationären Betrieb verwendet. Diese Mehrwellen-Gasturbinen eignen sich als Heizkraftwerke zur kommunalen und industriellen Energieversorgung. In solchen Fällen kann der Regenerativ-Wärmeaustausch (Rekuperation) eine wirtschaftliche Maßnahme zur Wirkungsgradverbesserung sein. Mehrwellige Gasturbinen (Verdichterantriebsturbine und Arbeitsturbine auf separaten Wellen) weisen ein besseres Teillastverhalten auf als einwellige Maschinen.

Die von den verschiedenen Herstellern angebotenen Industrie-Gasturbinen erreichen im Solobetrieb Wirkungsgrade um 38 %, die damit ausgerüsteten GuD-Kraftwerke rund 58 %. Gelingt es, die ISO-Eintrittstemperatur auf 1400 °C zu steigern, errechnen sich

auch für GuD-Anlagen mit preisgünstigen einwelligen Gasturbinen ohne Zwischenerhitzung Netto-Wirkungsgrade von rund 63 % [12].

Perspektiven für Kombi-Prozesse mit vorgeschalteter Gasturbine für Kohle, Raffinerierückstände etc. (dirty fuels)

Man kann die in Bild 2-8 aufgeführten, z.T. bereits ausgeführten, z.T. vorgeschlagenen Kohle-Kombi-Kraftwerke in drei Hauptgruppen einteilen. Bei allen Verfahren treten bei gleichem Brennstoff und gleichem Zustand des Arbeitsmittels prinzipiell die gleichen Exergieverluste durch Umwandlung von Brennstoffenergie in thermische Enthalpie des Arbeitsmittels auf. Das Problem besteht darin, mit Kohle ein heißes, unter Druck stehendes gasturbinenverträgliches Arbeitsmittel zu erzeugen. Dazu gibt es verschiedene Ansätze:

- Kohledruckvergasung, d.h. Kohleumwandlung in ein Synthesegas (Brenngas, Kohlegas)
- Verbrennung der Kohle unter Druck und Beaufschlagung der Gasturbine mit dem heißen Rauchgas. Variante a) Druckwirbelschichtfeuerung DWSF, Variante b) DWSF mit Nachfeuerung (Pyrolyse, Teilvergasung: Hybridprozeß), Variante c) Druckkohlestaubfeuerung direkt, Variante d) Druckkohlestaubfeuerung - Wärmeübertrager
- Verbrennung der Kohle in einer konventionellen atmosphärischen Feuerung - Wärmeübertrager, gasseitig getrennte GuD-Anlage

Von der Art des Verfahrens hängen die erforderlichen Einrichtungen und die zusätzlichen Exergieverluste ab. Die vereinfachten Fliebschemata sind für ausgewählte Verfahren in Bild 2-9 zusammengestellt.

Im ersten Fall wird die Kohleenergie in chemische Energie eines Kohlegases umgewandelt. Ein vom Vergasungsverfahren abhängiger Teil der Kohleenergie findet sich als thermische Enthalpie (fühlbare Wärme) im heißen Rohgas und ein Teil in Form von Dampf (Rohgaskühlung, Vergaserwandkühlung) wieder. Diese Energie kann nur auf einem niedrigeren Temperaturniveau zurückgewonnen bzw. genutzt werden. Dadurch entsteht ein Exergieverlust. Von Vorteil ist, daß sich alle Verunreinigungen aus dem Kohlegas mit erprobten Gasreinigungsverfahren (Wäschen) entfernen lassen. Darüber hinaus können bei der integrierten Bauweise - bis auf die Anpassung der Brennkammer - die für Erdgas entwickelten Komponenten des GuD-Kraftwerks unverändert übernommen werden.

Bei der zweiten Gruppe ist die Reinigung der Rauchgase bei hoher Temperatur unter Druck erforderlich. In Druckwirbelschichtfeuerungen (a) wird Schwefeldioxid durch

Zuschläge gebunden. Auf Grund der Feuerungstemperatur von ca. 850 °C entstehen kaum thermische Stickoxide und keine dampfförmigen Alkaliverbindungen. Es genügt eine Heißgasreinigung zur Staubabscheidung. Die erreichbare Turbineneintrittstemperatur entspricht aber nicht dem Stand der Gasturbinentechnik. In einer Nachfeuerung kann bei der Variante b) das Rauchgas auf höhere Temperatur erhitzt werden. Zunächst findet wie im Fall a) eine Abscheidung der festen Partikel aus dem Rauchgas in einer Heißgasreinigungsanlage statt. Zur Erhitzung auf z. B. 1200 °C ist sauberer Brennstoff (Erdgas oder Kohlegas aus einer Pyrolyse oder aus einer Teilvergasung bei relativ mäßiger Temperatur) erforderlich. Diese Kombination einer DWSF mit einer Druckwirbelschicht-Teilvergasung oder Pyrolyse wird auch als „Second Generation“ bezeichnet. In Druckkohlestaubfeuerungen, Variante c), läßt sich die Verbrennungstemperatur auf beispielsweise 1400 °C (>Aschefließpunkt) einstellen, womit der Entwicklung der Gasturbine zu höheren Turbineneintrittstemperaturen Rechnung getragen wird. Damit die Gasturbine direkt mit dem Rauchgas beaufschlagt werden kann, ist eine Heißgasreinigung oberhalb der Aschefließpunkt-Temperatur erforderlich, die neben der Schlacke auch die dampfförmigen Alkali- und Halogenverbindungen abscheidet [13]. Bei der Variante d) erfolgt die Rauchgasreinigung nach einem Hochtemperatur-Wärmeübertrager bei etwa 800 °C. Die Wärmeübertragerwände sind nur gegen den (geringen) Differenzdruck zwischen „heißem“ und „kaltem“ Rauchgas auszulegen. Die dritte Gruppe (indirekt befeuerte Kohle-Kombi-Kraftwerke) ist durch eine konventionelle atmosphärische Kohlenstaubfeuerung gekennzeichnet. Der Hochtemperaturwärmeübertrager ist für volle Druckdifferenz und Gastemperaturen bis ca. 1200 °C auszulegen. Rauchgas und Arbeitsmittel sind durch Wärmeaustauscherwände getrennt. Die Gasturbine wird mit Luft beaufschlagt⁷, es ist keine Heißgasreinigung erforderlich. Zur Einhaltung der Emissionsvorschriften (SO₂, NO_x) erfolgt die Rauchgasreinigung am kalten Ende. Gleiches gilt auch für die Varianten 2 c) und d).

Von diesen Baulinien wurden bisher ausgeführt:

- Kombi-Kraftwerke mit Druckwirbelschichtfeuerung (DWSF) und
- Kombi-Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (IGCC)

Kombi-Kraftwerke mit Druckwirbelschichtfeuerung (DWSF)

Weltweit gibt es 6 Kohle-Kombi-Kraftwerke mit stationärer Druckwirbelschichtfeuerung. Man verspricht sich - insbesondere bei Einsatz im unteren Leistungsbereich - niedrige Investitionskosten. Hingegen ist der Wirkungsgrad auf < 45 % beschränkt (da TET ≤

⁷ Auch Anlagenkonzepte mit geschlossener Gasturbine und anderen Arbeitsmitteln sind denkbar

850 °C). Höhere Wirkungsgrade sind durch Erhitzung des Rauchgases mittels Zusatzfeuerung möglich. Mit solchen Hybrid-Kraftwerken oder Second Generation Kombi-Kraftwerken (Variante 2 b) könnte der Wirkungsgrad (rechnerisch) auf 54 % gesteigert werden. Für derartige Kraftwerke werden Planungsarbeiten durchgeführt.

Kombi- Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (IGCC)

Bild 2-10 enthält Angaben über IGCC-Kraftwerke, die bereits in Betrieb genommen wurden, errichtet oder geplant werden. Puertollano (Spanien) ist das derzeit größte IGCC-Kohlekraftwerk. Es erreicht mit Standardkohle einen Wirkungsgrad von 45 %. In Italien werden IGCC-Kraftwerke für die Verwertung von Raffinerierückständen errichtet. Bild 2-11 zeigt das Fließschema einer verbesserten Variante für ein IGCC-Kohlekraftwerk. Die Engineering-Studie wurde im Rahmen des EU-JOULE Programms unter der Bezeichnung "Advanced Cycle Technologies" erarbeitet und von der EC [14] gefördert. Mit Pittsburgh-Kohle Nr.8 erreicht ein solches Kraftwerk auf der Basis heute kommerziell verfügbarer Teilsysteme (Vergasungsanlage, Gasreinigung, GuD-Kraftwerk) einen Wirkungsgrad von (rechnerisch) 51.5 %. Dieser Wirkungsgrad könnte in den nächsten Jahren entsprechend den bei erdgasbefeuerten GuD-Kraftwerken erzielbaren Fortschritten gesteigert werden.

3 Brennstoffzellen

Niedertemperatur-Brennstoffzellen (AFC) mit wässrigem alkalischen Elektrolyten (KOH) wurden zur Energieversorgung von Raumfluggeräten und U-Booten eingesetzt. Für diesen Zellentyp sind reiner Wasserstoff und Sauerstoff erforderlich. Für die allgemeine und objektbezogene Energieversorgung hat die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) größere Bedeutung erlangt. Bei der Anwendung als BHKW wird der Wasserstoff durch externe Erdgasreformierung gewonnen. Auf Grund der vergleichsweise hohen Leistungsdichte, des einfachen Aufbaus und der langen Lebensdauer eignet sich die Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM) für den elektrischen Automobilantrieb. Als Brennstoff wird ebenfalls Wasserstoff, als Oxidationsmittel Luftsauerstoff verwendet. Shell denkt für eine Übergangsphase an die Gewinnung von Wasserstoff aus Benzin mit Hilfe eines kompakten Reformers an Bord der Fahrzeuge [15] (Benzin tanken, mit Wasserstoff fahren). Alternativ kann Wasserstoff aus Methanol oder Erdgas an Bord gewonnen oder in Speichern mitgeführt werden. Die Arbeitstemperatur der PEM-Brennstoffzelle beträgt ca. 100 °C. Bei stationärem Einsatz ließe sich die Abwärme zur Raumwärme- und Brauchwasserdarbietung verwenden (Kraft-Wärme-Kopplung). Übertrifft der elektrische Brennstoffzellen-Wirkungsgrad den Durchschnitts-Nettowirkungsgrad der öffentlichen Kraftwerke (unter Berücksichtigung der Netzverluste), könnte bei entsprechender Verbilligung der Aggregate im Sektor

„Kleinverbraucher und Haushalte“ eine Konkurrenzsituation für die öffentliche (zentrale) Elektrizitätsversorgung entstehen. Um eine Energieeinsparung im volkswirtschaftlichen Sinne zu erzielen, sollten Brennstoffzellen-Aggregate elektrische Wirkungsgrade (*bezogen auf die Primärenergie*) $> 45 \%$ erreichen. Bei der Beurteilung der Energieeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplung ist zu beachten, daß die Ausnutzungsdauer bei Einsatz zur Wärmeversorgung (Heizperiode) relativ niedrig ist. Die zu installierende elektrische bzw. thermische Leistung ist ein Optimierungsparameter, der die erzielbare Energieeinsparung durch KWK beeinflusst.

Bei Karbonatschmelzen-Brennstoffzellen und oxidkeramischen Brennstoffzellen (SOFC) kann die Abwärme für die "interne" Erdgasreformierung genutzt werden. Für eine mit Erdgas betriebene SOFC mit interner Reformierung (aber ohne externe Abwärmenutzung) errechnet Lokurlu [16] für ein 250 kW-Aggregat den elektrischen Wirkungsgrad zu 50 % (elektro-chemischer Umsatz: 80 % des im reformierten Gas enthaltenen Wasserstoffs, 30 % des Kohlenmonoxids). Auf Grund der hohen Abgastemperatur (800 bis 1000 °C), die durch eine Zusatzfeuerung erhöht werden kann, kommt dieser Brennstoffzellentyp auch als Vorschaltaggregat für Dampfturbinen, Gasturbinen oder sogar für GuD-Kraftwerke in Betracht. Bild 3-1 zeigt das Schema einer solchen Anordnung. Bezogen auf den Heizwert von Erdgas ließen sich (rechnerisch) mit solchen Systemen Wirkungsgrade bis fast 70 % erreichen. Die SOFC kann auch mit Synthesegas aus einer Kohlvergasungsanlage betrieben werden. Der Wirkungsgrad eines GuD-Kraftwerks mit vorgeschalteter SOFC und integrierter Kohlevergasung errechnet sich zu knapp 60 % [16]. Für die Kombination mit Gasturbinen oder GuD-Anlagen sind SOFC erforderlich, die unter Druck arbeiten. Es bleibt abzuwarten, ob sich große druckbetriebene SOFC-Systeme entwickeln und wirtschaftlich einsetzen lassen. Für die Anwendung im kW- bis und 100 kW-Bereich (KWK, BHKW) denkt man an die Kombination mit Mikrogasturbinen⁸. Siemens/Westinghouse arbeitet u.a. an der druckaufgeladenen SOFC. Eine Anlage mit für 250 kW Leistung wird bereits betrieben.

Perspektiven für die Brennstoffzelle als Mittel zur CO₂-Minderung

Für die elektrochemische Reaktion (kalte Verbrennung) eignet sich nur Wasserstoff, bei höheren Temperaturen auch Kohlenmonoxid (SOFC). Wird Wasserstoff aus Erdgas oder anderen fossilen Brennstoffen gewonnen, so entsteht CO₂. Zur CO₂-freien Erzeugung durch Elektrolyse oder Wasserzerlegung mittels thermochemischer

⁸ Mikroturbinen sind aus Abgasturbinen weiterentwickelte Gasturbinen. Das Verdichterdruckverhältnis ist wesentlich kleiner bei großen Industriegasturbinen.

Kreisprozesse⁹ ist elektrische Arbeit oder Hochtemperaturwärme erforderlich. CO₂-frei erzeugter Wasserstoff (Elektrolyse mittels Solarstrom aus Photovoltaik, Wind, Wasserkraft, Kernenergie) dient lediglich als Energiespeicher. Alle Energiedienstleistungen, die nicht eines Energiespeichers bedürfen, lassen sich unmittelbar mit der für die Elektrolyse aufgewendeten elektrischen Arbeit darstellen, ohne die Umwandlungsverluste bei der Wiederverstromung in Kauf nehmen zu müssen.

Ausgeführte Brennstoffzellen-Aggregate erreichen gegenüber Motoren im unteren Leistungsbereich bessere Wirkungsgrade, übertreffen jedoch nicht die Wirkungsgrade von GuD-Kraftwerken großer Leistung (vergleiche Bild 2-1). Bei der elektrochemischen Oxidation wird zwar die Exergievernichtung durch irreversible Verbrennung und Wärmeübertragung vermieden, es entstehen aber andere Exergieverluste. Bei der Verwendung für den Fahrzeugantrieb lassen sich Vorteile ausschöpfen, die der Elektroantrieb gegenüber dem Antrieb durch Verbrennungsmotoren bietet (z.B. Einzelantrieb der Räder, Energierückgewinn beim Bremsen).

4 Kraftwerke mit „CO₂-Rückhaltung“ – eine Option zur Minderung der Kohlendioxidemissionen bei weiterer Nutzung fossiler Brennstoffe?

Gemäß Kyoto-Protokoll und EU-Umweltministerkonferenz (Verständigung über burden sharing) sollen die energiebedingten CO₂-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Zeitfenster 2008/2012 um 21 % (bezogen auf 1990) reduziert werden. Auf der 5. Vertragsstaatenkonferenz hat die Bundesregierung in Bonn 1999 erklärt, daß sie an dem früher genannten Reduktionsziel - nämlich 25 % bis zum Jahre 2005 (bezogen auf 1990) - festhalten wolle. Laut Statistik (UBA, IBMU VDEW) ist die CO₂-Emission in der BRD von 1990 bis 1998 um knapp 13 % zurück gegangen, was z.T. auf rückläufige Konjunktur (Arbeitslosigkeit) und Verlagerung energieintensiver Produktionen ins Ausland zurückzuführen ist. Im verbleibenden Zeitraum müßte etwa der gleiche Prozentsatz noch einmal, aber ohne weiteren Konjunkturrückgang erreicht werden.

Die Elektrizitätswirtschaft hat in ihrer Selbstverpflichtungserklärung (Bericht 1999 zur Erklärung der VDEW zum Klimaschutz [2]) dargelegt, in welchem Ausmaß sie zur Erfüllung des Reduktionsziels beitragen kann. Sie setzt dabei den ungestörten Betrieb der bestehenden Kernkraftwerke voraus. Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung gehören zu den „Non-Regret“ Strategien. Zitat aus [2]: „Der Ersatz älterer Kohlekraftwerke durch neue Anlagen mit höherem Wirkungsgrad ist derzeit –

⁹ nicht Stand der Technik

zusammen mit der Kernenergie – die wichtigste Option zur Minderung der CO₂-Emission im Bereich der allgemeinen (öffentlichen) Elektrizitätswirtschaft“.

Längerfristig (2030 bis Mitte des Jh.) hält das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) die Reduzierung der energiebedingten globalen CO₂-Emissionen auf die Hälfte des derzeitigen Ausstoßes für notwendig. Dieses Minderungsziel ist bei gleichem Energieverbrauch¹⁰ und unverändertem Energieträgermix durch Effizienzsteigerung im Energieumwandlungssektor (anteilig) nicht zu erreichen. Unter diesem Blickwinkel sind Untersuchungen über die CO₂-Rückhaltung in Kraftwerken (CO₂-Abtrennung und Ausschleusung) zu sehen [17]. Diese Technik erlaubt die Nutzung fossiler Brennstoffe bei stringenten Reduktionsforderungen, setzt aber eine CO₂-Entsorgung voraus. Beim gegenwärtigen Kraftwerksmix beträgt die CO₂-Emission durch Stromerzeugung in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung allein in der Bundesrepublik Deutschland 266 Mio t/a (1998), das sind rund 30 % der durch Energienutzung verursachten Gesamtemission. In den weltweit installierten Kohlekraftwerken entstehen etwa 4 Gt/a CO₂. Nur ein geringer Teil dieser Menge könnte industriell verwertet werden (etwa 0,3 Gt/a, Ersatz für heute anderweitig gewonnenes CO₂ zur Verwendung in der Getränke- und Düngemittelindustrie, in Gewächshäusern, für Schutzgasschweißung u.a.). Eine größere Menge ließe sich zur Herstellung von Methanol oder Benzin verwenden, wozu allerdings CO₂-frei gewonnener Wasserstoff erforderlich wäre, um in der Gesamtbilanz eine Verminderung der CO₂-Emission zu erzielen.

Kohlendioxid wird heute bereits zur Ölförderung eingesetzt. Es könnte auch zur Methangewinnung aus Kohlelagerstätten genutzt werden. Aus dem Rauchgas des mit Erdgas befeuerten Kraftwerks Lubbock (Texas) wurde bereits in den 80er Jahren Kohlendioxid abgetrennt und zur Erdölgewinnung verwendet („enhanced oil recovery“, EOR). Ähnliche Zielsetzung hat das gegenwärtig in Norwegen ausgeführte Projekt „Sleiper“, wobei in diesem Fall die Vermeidung der CO₂-Steuer ein wichtiger Faktor für die Projektentscheidung war. Die Energetik von Rückhaltungsverfahren hat Göttlicher in seiner Dissertation [18] eingehend behandelt. In Bild 4-1 sind die Ergebnisse zusammengefaßt dargestellt. Es stehen eine Reihe erprobter Absorptions- und Trennverfahren zur Verfügung [19]. Geringste Wirkungsgradeinbußen und niedrigste CO₂-Emissionsvermeidungskosten sind bei Brennstoffzellen zu erwarten, da bei diesen eine Trennung der Stoffströme prozeßbedingt stattfindet. Die CO₂-Entsorgung dürfte bei dezentraler Anwendung allerdings größere Schwierigkeiten bereiten. Für Kohle erweisen sich IGCC-Kraftwerke mit CO-Shift und CO₂-Wäsche (mit gleichzeitiger Entschwefelung) als günstigste Variante [20]. Hierbei kämen ausschließlich erprobte

¹⁰ Fast alle Prognosen gehen von einem steigenden Welt-Primärenergieverbrauch aus (Bevölkerungszuwachs, Verbesserung des Lebensstandards in den Entwicklungsländern). Dabei wird sinkende Energieintensität bzw. Effizienzsteigerung unterstellt.

Rückhaltungstechniken zum Einsatz. Bei erdgasbefeuerten Kraftwerken ist die CO₂-Rauchgaswäsche am kalten Ende vorteilhafter als beispielsweise die Reformierung und Gastrennung vor der Brennkammer. Zu den in Bild 4-1 angegebenen Vermeidungskosten sind noch Entsorgungskosten von 12 bis 24 DM/t zu addieren. Diese Beträge schließen Kosten für 1000 km Pipelinetransport ein. Da die großtechnische CO₂-Deponierung (z.B. in der Tiefsee) nicht nur ökologisch, sondern auch technisch nicht abgesichert ist, handelt es sich um Schätzwerte. Insgesamt ist beim gegenwärtigen Wissensstand mit CO₂-Emissionsvermeidungskosten durch Rückhaltung und CO₂-Deponierung von etwa 80 bis 100 DM/t zu rechnen. Das sind mehr als gegenwärtig für wirkungsgradsteigernde Maßnahmen genannt (im eingangs angeführten Rechenbeispiel 7,6 DM je Tonne CO₂) oder für Emissionsrechte erwogen werden (Zertifikathandel bis 50 DM/t), aber deutlich weniger als die Kosten der CO₂-Vermeidung durch Photovoltaik und evtl. auch niedriger als Steuern (zur spürbaren Reduzierung durch Verteuerung werden Steuern in Höhe von 100 DM/t CO₂ diskutiert). Deswegen sollten Rückhaltungsmaßnahmen als langfristige Option für den Fall weitergehender CO₂-Reduktionsforderungen offen gehalten und im Rahmen von Forschungsarbeiten weiter verfolgt werden. Im Ausland beschäftigen sich zahlreiche Institutionen mit Rückhaltungstechniken (4th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies[20]).

5 Kernspaltenergie, Fusion

Kernspaltung

In der Bundesrepublik Deutschland wird in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung rund ein Drittel der elektrischen Brutto-Jahresarbeit in Kernkraftwerken erzeugt. Die Kohlekraftwerke tragen mit 54 % zur Bruttostromerzeugung bei. Sie sind die Hauptverursacher der CO₂-Emissionen im Elektrizitätserzeugungssektor. Ohne Kernenergie wären die CO₂-Emissionen durch Elektrizitätserzeugung um 183 Mio t/a höher (Angabe der VDEW [2] für das Jahr 1998 mit dem dort zugrunde gelegten Brennstoffmix).

Unabhängig von energiepolitischen Entscheidungen ist der Anreiz zum Bau neuer Kernkraftwerke in Deutschland und anderen Ländern der EU derzeit gering. Die Versorgungssituation kann sich aber rasch ändern, wie die Vergangenheit lehrt. Deshalb sollte auch in der Phase niedriger Preise für fossile Brennstoffe die Entwicklung von Kernreaktoren nicht behindert werden.

Die eingeführten Leichtwasserreaktor-Baulinien lassen systembedingt keine essentielle Verbesserung der Wirkungsgrade zu. Der EPR¹¹ soll nach Ausschöpfung aller Komponenten-Verbesserungspotentiale einen Wirkungsgrad von 35 bis 36 % erreichen. Die Entwicklung konzentriert sich auf die Beherrschung von Kernschmelzstörfällen und Verringerung der Anlagen- und Brennstoffzykluskosten. Für den EPR werden spezifische Anlagenkosten von 2300 DM/kW und Brennstoffzykluskosten von etwa 1 Pfennig/kWh angegeben [21]. Auf dieser Basis ließen sich konkurrenzfähige Elektrizitätserzeugungskosten erzielen.

Mit gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren (HTR) und Advanced Gas Cooled Reactor (AGR) Systemen können dank der höheren Kühlmitteltemperatur Frischdampfzustände realisiert werden, die denen bisheriger konventioneller Dampfkraftwerke entsprechen. Gleiches gilt für flüssigmetallgekühlte Reaktoren (z.B. SNR). Sie erreichen dann Wirkungsgrade um 40 %. Heliumgekühlte Hochtemperaturreaktoren könnten auch als Wärmequelle für geschlossene Helium-Gasturbinen und für GuD-Anlagen mit geschlossener Gasturbine eingesetzt werden, was Anlagenwirkungsgrade bis etwa 50 % ermöglicht.

Für die Akzeptanz der Kernspaltenergie ist die Herstellung des Vertrauens in die Sicherheit und die Lösung des Entsorgungsproblems von größerer Bedeutung als die Steigerung des Wirkungsgrads. In diesem Zusammenhang sei auf die Möglichkeit hingewiesen, die Zeiträume für die Endlagerung langlebiger Radio-Isotope durch Trennung der radioaktiven Spaltprodukte und Transmutation um den Faktor 1000 zu verkürzen [22].

Fusion

Das "Joint European Torus" (JET)-Projekt läuft im Jahre 2002 aus. Als Grundlage für die Entscheidung über die Weiterführung der Fusionsforschung hat eine international zusammengesetzte Gruppe von Fusions-Wissenschaftlern 1998 einen Bericht vorgelegt. Das in diesem Bericht beschriebene Vorhaben „International Thermonuclear Experimental Reactor" (ITER) wurde zwischenzeitlich überarbeitet und „abgespeckt“. Der neue Entwurf trägt die Bezeichnung „ITER-Fusion Energy Advanced Tokamak" (ITER-FEAT). Untersuchungsgegenstände sind u.a.: Plasmadichte, Einschlußzeit, Temperatur, Supraleitung, Divertor, Stabilität. Als Projektziele werden genannt: Nachweis einer positiven Energiebilanz (Verhältnis von freigesetzter Energie zu aufgewendeter Energie > 1), Nachweis der sicheren Beherrschung des Tritiumeinschlusses u.a.. Im Hinblick auf den Stand der Fusionsforschung und auf die Laufzeit des ITER-FEAT-Projekts ist bis zum Jahre 2030 kaum mit einem nennenswerten Beitrag der Kernfusion zur Energieversorgung zu rechnen.

¹¹ EPR: European Pressurized Water Reactor

6 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Fernwärme wird zu 78 % in Heizkraftwerken, also in KWK-Anlagen erzeugt. Ein extensiver Ausbau der Fernwärme ist unter den derzeitigen Marktbedingungen ohne Subvention kaum darstellbar. Blockheizkraftwerke zur örtlichen oder objektbezogenen Versorgung vermeiden aufwendige Fernwärmenetze. Die Ausnutzungsdauer von Heizanlagen beträgt in Deutschland meist weniger als 2000 h/a (Richtwert). Der für die Steuervergünstigung erforderliche Jahresnutzungsgrad (> 60 %) wird nicht erreicht, wenn ein BHKW in der übrigen Zeit im Auspuffbetrieb Strom erzeugt. In der Industrie wird die KWK überall dort bereits genutzt, wo sie eine wirtschaftlichere Versorgung ermöglicht als der Strombezug aus dem Netz und die Wärmeerzeugung in eigenen Wärmeerzeugungsanlagen. Bei sinkenden Strompreisen sind die Grenzkosten schnell erreicht.

Während im Einzelfall die Investitionsentscheidung für eine KWK-Anlage an Hand von Ganglinien und bekannten Rahmenbedingung getroffen werden kann, sind bei Potentialabschätzungen ein Reihe von Parametern anzunehmen [23]. Die Energieeinsparung wird durch einen Vergleich der Energieaufwendungen für die getrennte und gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme bestimmt. Die auf den Nutzwärmestrom \dot{Q} (bzw. Nutzwärme Q) bezogene (relative) Einsparung an Brennstoffleistung $\Delta\dot{w}_B$ (bzw. Brennstoffeneinsparung Δw_B) läßt sich mit den KWK-Kennzahlen σ (Stromkennzahl = P/\dot{Q}), β (Stromausbeute = P/\dot{W}_B = elektrischer Wirkungsgrad ohne Anrechnung der Koppelwärme), ω (Brennstoffausnutzungsgrad = $(P + \dot{Q}_{nutz})/\dot{W}_B$) und den Wirkungsgraden η_e (Wirkungsgrad für die getrennte Elektrizitätserzeugung in einem bestimmten Kraftwerk), η_s (Wirkungsgrad für die aus dem Netz bezogene elektrische Arbeit bei bestehendem Kraftwerksmix) und η_k (Wirkungsgrad der getrennten Wärmeerzeugung in einem Heizkessel) dimensionslos darstellen:

$$\Delta\dot{w}_{Brel} = \frac{\Delta\dot{W}_B}{\dot{Q}} = \sigma \left(\frac{1}{\eta_e} - \frac{1}{\omega} \right) - \left(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\eta_k} \right) \quad (\text{eingesparte Brennstoffleistung bezogen auf}$$

den Nutzwärmestrom) oder

$$\Delta \dot{W}_{B,el} = \frac{\Delta \dot{W}_B}{P} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\eta_k} - \frac{1}{\omega} \right) + \left(\frac{1}{\eta_e} - \frac{1}{\omega} \right)$$
 (eingesparte Brennstoffleistung bezogen auf die elektrische Leistung). Bezieht man die Brennstoffeinsparung durch KWK auf die Brennstoffleistung $\dot{W}_g = P \left(\frac{1}{\eta_s} + \frac{1}{\sigma \eta_k} \right) = \dot{Q} \left(\frac{\sigma}{\eta_s} + \frac{1}{\eta_k} \right)$ (bzw. auf die Brennstoffenergie W_g), die für die getrennte Erzeugung erforderlich ist, so erhält man die relative, d. h. auf \dot{W}_g bezogene Einsparung an Brennstoffleistung (oder Energieeinsparung in einem Betrachtungszeitraum)

$$\Delta \dot{w}_g = \frac{\Delta \dot{W}_B}{\Delta \dot{W}_g} = \frac{\Delta \dot{W}_{B,el}}{\frac{1}{\eta_s} + \frac{1}{\sigma \eta_k}} = \frac{\sigma \Delta \dot{W}_{B,th}}{\frac{\sigma}{\eta_s} + \frac{1}{\eta_k}} .$$

Die Kennzahlen sind leistungsbezogene Größen, also Momentanswerte. Die damit berechneten Energieeinsparungen gelten für den Fall, daß Strom und Wärme während des Betrachtungszeitraums mit dem durch die Stromkennzahl beschriebenen Verhältnis nachgefragt werden. Besteht kein Wärmebedarf, arbeiten Entnahme-Kondensations-Kraftwerke im Kondensations-Betrieb, BHKW und Brennstoffzellen ohne Abwärmenutzung und Gegendruckdampfkraftwerke werden abgestellt.

Die in Tab. 6-1 angeführten drei Zahlenbeispiele zeigen, daß die durch KWK erzielbaren relativen Energieeinsparungen stark von den zugrunde gelegten Daten abhängen. Im Mittel kann man von einer Energieeinsparung durch KWK gegenüber der getrennten Erzeugung von etwa 30 % ausgehen, wenn Strom und Wärme gleichzeitig nachgefragt werden.

Tab. 6-1: Zahlenbeispiele für die Energieeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplung bezogen auf die Energie für getrennte Erzeugung. Man beachte, daß die Stromausbeute β der KWK durch Wahl von σ und ω festgelegt ist: $\beta = \sigma \omega / (1 + \sigma)$. In den Fällen a) und c) ist $\beta = 0,45$, ein Spitzenwert für ein mit Erdgas betriebenes Dieselaggregat oder für eine Brennstoffzelle. Im Fall b) ist $\beta = 0,18$ eine für kohlebefeuerte Gegendruckkraftwerke zwar geringe, aber mögliche Stromausbeute (elektrischer Wirkungsgrad)

KWK-Technologie	Beispiel a) BHKW, Erdgas	Beispiel b) Gegen- druckdampf- kraftwerk, Steinkohle	Beispiel c) BHKW, Erdgas
Stromkennzahl σ	1	0,3	1
Brennstoffausnutzungsgrad ω	0,9	0,8	0,9
Getrennte Erzeugung der Elektrizität	Strombezug aus öffentlichem Netz	Strombezug aus öffentlichem Netz	Eigenerzeugung im GuD-Kraftwerk mit Erdgas
Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung η_k	0,9	0,9	0,9
Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung η_e bzw. η_k	0,35	0,35	0,58
Relative Energieeinsparung $\Delta W/W_g$ in %	44	17	22
Spez. CO ₂ -Emission des Brennstoffs für getrennte Wärmeerzeugung (auf Heizwert bezogen) ε_k kg CO ₂ /kWh	0,2 (Erdgas)	0,2 (Erdgas)	0,2 (Erdgas)
Spez. CO ₂ -Emission des Brennstoffs für getrennte Elektrizitätserzeugung (auf Heizwert bezogen) ε_e kg CO ₂ /kWh bzw. spez. CO ₂ -Emission $\hat{\varepsilon}_e$ kg CO ₂ /kWh (bez. Auf elektrische Arbeit)	$\hat{\varepsilon}_e =$ $\varepsilon_e / \eta_e = 0,6$	$\hat{\varepsilon}_e =$ $\varepsilon_e / \eta_e = 0,6$	$\varepsilon_e = 0,333$ $\hat{\varepsilon}_e = \varepsilon_e / \eta_e = 0,95$
Relative CO ₂ -Emissionsminderung $\Delta C / C_g$ in %	46	- 35* - 7**	22

* mit Strom aus den Kraftwerken der öffentlichen Versorgung (Mix); ** mit Strom aus Steinkohlekraftwerken der öffentlichen Versorgung.

Die Zahl der Parameter wird um die spezifischen CO₂-Emissionskoeffizienten ε_i der betrachteten Brennstoffe i erweitert, wenn die CO₂-Emissionsminderung zu berechnen ist. Bezogen auf die elektrische Arbeit ergibt sich die CO₂-Emissionsminderung durch KWK gegenüber der Emission bei getrennter Erzeugung zu:

$$\Delta c_{el} = \frac{\Delta C}{W_{el}} = \left[\varepsilon_s + \frac{\varepsilon_k}{\sigma \cdot \eta_k} \right] - \left[\frac{\varepsilon_{kWK}}{\omega} \left(1 + \frac{1}{\sigma} \right) \right] \text{ kg CO}_2 \text{ je kWh elektrische Arbeit } W_{el} (= P \cdot t)$$

und $Q (= W_{el} / \sigma)$ kWh von der KWK-Anlage erzeugten Wärme. Bezieht man die CO₂-Minderung auf die CO₂-Emission bei getrennter Erzeugung, so gilt

$$\Delta c_k = \frac{\Delta C}{C_k} = \frac{\Delta c_{el}}{\frac{\varepsilon_e}{\eta_e} + \frac{\varepsilon_k}{\sigma \eta_k}}$$

Wie man aus den in Tab. 6-1 angegebenen Zahlenbeispielen erkennt, hängt die CO₂-Emissionsminderung mehr von der Wahl der Brennstoffe ab als vom KWK-Einspareffekt (Erdgas verdrängt Kohle). Die in der öffentlichen Versorgung verursachte CO₂-Emission ist deutlich geringer (etwa 0,63 kg CO₂ je kWh elektrische Arbeit einschl. Netzverluste) als die Emission aus durchschnittlichen Steinkohlekraftwerken (0,9514 kg CO₂ je kWh elektrische Arbeit bei dem hier zugrunde gelegten niedrigen Jahresnutzungsgrad $\bar{\eta}_c = 0,35$, der die Verluste durch Transport und Verteilung einschließt). In Beispiel 2 wird trotz Energieeinsparung durch KWK die CO₂-Emission um 35 % erhöht.

Für die Ermittlung der Energieeinsparung und Emissionsminderung sind die oben angegebenen Formeln nicht ausreichend. Vielmehr sind die zeitlichen Verläufe von elektrischer Leistung und Wärmelast erforderlich (Ganglinien). Legt man eine KWK-Anlage nach der geordneten Dauerlinie der Wärmelast aus, so ist Strombezug oder Stromeinspeisung erforderlich, wenn – was allgemeinen der Fall ist – die Dauerlinie der elektrischen Last nicht mit derjenigen der Wärmelast zusammen fällt. Bei Investitionsentscheidungen und Berechnungen von Einsparpotentialen sind diese Zusammenhänge zu beachten.

Für die Versorgung einzelner Wohn- und Gewerbeobjekte kommen Blockheizkraftwerke in Betracht. Die heute kommerziell angebotenen Anlagen erreichen Brennstoffausnutzungsgrade von etwa 95 %, Stromkennzahlen >1 und Stromausbeuten bis 50 % (ergasbetriebne 4-Takt Diesel, Brennstoffzellen). PEM-Brennstoffzellen wären ideale KWK-Aggregate für den Einsatz im Hausbereich (elektrische Leistung ab 3 kW, geräuschlos, Koppelwärme mit 100 °C; Kostensenkung erforderlich).

Zur zentralen Fernwärmeversorgung werden vorwiegend Entnahme-Kondensationskraftwerke oder GuD-Kraftwerke mit entsprechender Nutzwärmeauskopplung eingesetzt. In den vergangenen Jahren wurden „asymmetrische“ Dampfturbinen

entwickelt, und es werden auch Zweigturbinen eingesetzt für die industrielle Energieversorgung kommen bei hoher Ausnutzungsdauer auch Gegendruckdampf-kraftwerke in Betracht..

Im oberen Leistungsbereich erreicht man die höchsten KWK-Kennwerte mit GuD-Anlagen, im mittleren (bis einige MW) mit Verbrennungsmotoren und im kW-Bereich mit Brennstoffzellen.

Im Zusammenhang mit Überlegungen über einen Umweltbonus für die KWK wird über eine Aufteilung der CO₂-Emission einer KWK-Anlage auf die Koppelprodukte diskutiert. In Bild 6-1 sind gängige Methoden für die Aufteilung an einem Beispiel aufgezeigt. Eine zwingende Bevorzugung einer Methode gibt es nicht¹².

7 CO₂-Emissionsminderung im Kraftwerkspark

Durch Erneuerung des Kraftwerksparks (Ersatz alter Kraftwerke durch neue) ergeben sich wegen der langen Laufzeiten in der Summe geringere relative Brennstoffeinsparungen und CO₂-Emissionsminderungen als beim Vergleich der Brennstoffverbräuche von einzelnen alten und neuen Anlagen. Wird beispielsweise im Jahre 2000 ein älteres Steinkohlekraftwerk (Inbetriebnahmejahr 1960, $\eta_1 = 36\%$) stillgelegt und durch das derzeit modernste¹³ Steinkohlekraftwerk mit $\eta_2 = 47\%$ ersetzt, so ergibt sich im Auslegungspunkt eine relative CO₂-Emissionsminderung von $1 - \eta_1/\eta_2 = 23,4\%$. Wird ein Kohlekraftwerk aus dem Jahre 1990 mit 40% Wirkungsgrad nach 40 Jahren Laufzeit vom Netz genommen, so ist dessen relative CO₂-Emission bis zum Jahre bis 2030 größer als die Emission des Kraftwerks, das im Jahre 2000 in Betrieb ging. Erst die Jahre danach beträgt die relative CO₂-Emissionsminderung ebenfalls 23,4%, wenn man unterstellt, daß im Jahre 2030 neue Kohlekraftwerke mit einem Wirkungsgrad von 52,2% errichtet werden können. Auf Grund der Altersstruktur, der Laufzeiten, der technischen Entwicklung und der Ersatzbaustrategie wird im Kraftwerkspark erst nach längerer Zeit die CO₂-Emissionsminderung erreicht, die sich im Einzelfall ergibt.

Die erwartete Wirkungsgradentwicklung zeigt Bild 7-1. Folke [25] hat Szenarien über die Entwicklung des Kraftwerksparks in der EU und die durch verschiedene Ersatzstrategien erzielbaren CO₂-Emissionsminderungen durchgerechnet. Für

¹² Lucas et al. [24] schlagen eine Aufteilung nach Exergieverlusten vor. Die getrennte Erzeugung der Wärme verursacht gegenüber der Erzeugung von Koppelwärme in Gegendruckturbinen höhere Exergieverluste. Zur Bestimmung dieser Exergieverluste und der Exergieverluste durch Verbrennung und Dampferzeugung werden Angaben über die Dampfparameter benötigt. Die in [24] angegebenen Formeln sind nicht unmittelbar auf Entnahmekraftwerke oder Blockheizkraftwerke anwendbar.

¹³ Moderne Anlagen heißt, daß zum Ersatzzeitpunkt die neuesten kommerziell verfügbaren Kraftwerke mit hohen Wirkungsgraden eingesetzt werden.

Steinkohlekraftwerke wird im Sinne einer Best-Abschätzung angenommen, daß sich die Wirkungsgrade von heute 47 % bis zum Jahre 2050 auf 58 % verbessern lassen. Den Betrachtungen wird ein Kraftwerkspark zugrunde gelegt, der jedes Jahr nach ökonomischen Kriterien optimiert wird, dessen Struktur sich also zeitlich ändert. Bis zum Jahre 2030 ergibt sich nur eine geringe Änderung der CO₂-Emission im struktur-optimierten Kraftwerkspark, danach kommt es zu einem Anstieg, weil auslaufende Kernkraftwerke durch fossil befeuerte Kraftwerke ersetzt werden. Wird vorgegeben, daß auslaufende Kohlekraftwerke nach einer Laufzeit von 40 Jahren ausschließlich durch moderne Kohlekraftwerke zu ersetzen sind, dann ist nach diesen Rechnungen die CO₂-Emission aus dem Kraftwerkspark der EU im Jahre 2030 um 16 % geringer als heute.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der spezifische Brennstoffenergieverbrauch, die spezifischen Emissionen, die inflationsbereinigten spezifischen Anlagenlieferpreise und Elektrizitätserzeugungskosten sind seit Einführung der allgemeinen Elektrizitätsversorgung zu Beginn des 20. Jh. bis heute drastisch gesunken. Im gleichen Zeitraum ist die Bevölkerungszahl angestiegen und die Energiedienstleistungen wurden ausgeweitet. Dadurch hat der absolute Primärenergieverbrauch trotz der beachtlichen Effizienzsteigerung bei der Energieumwandlung zugenommen.

Zur Stromerzeugung wurden in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1998 rund 32 % des Primärenergieverbrauchs aufgewendet (die Energie nicht-fossiler Energieträger wurde gemäß Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen nach der Wirkungsgradmethode bewertet). Am Endenergieverbrauch beträgt der Anteil an Elektrizität ca. 18 %. Die Erzeugung von Elektrizität verursacht im bestehenden Kraftwerksmix der öffentlichen Versorgung rund 30 % der energiebedingten CO₂-Gesamtemission). Bezogen auf die in das öffentliche Netz eingespeiste kWh (ohne Berücksichtigung von Netzverlusten) sind das rund 0,59 kg CO₂. Primärenergieeinsparung und Minderung der CO₂-Emissionen durch Verbesserung der Umwandlungswirkungsgrade wirken sich nur mit den genannten Anteilen auf den nationalen Energieverbrauch und die CO₂-Emission aus.

Kohlekraftwerke (z. B. IGCC) können für Wirkungsgrade > 50 % ausgelegt und ausgeführt werden. Längerfristig trifft das voraussichtlich auch auf Hochtemperatur-Dampfkraftwerke in konventioneller Bauweise mit atmosphärischer Kohlenstaubfeuerung und auf andere Baulinien zu. Die Wirkungsgrade von erdgasbefeuerten GuD-Kraftwerken betragen derzeit im Auslegungspunkt rund 58 %, die 60 %-Marke soll kurzfristig erreicht werden.

Je nach Bezug beträgt die mögliche spezifische Energieeinsparungen und CO₂-Emissionsminderung durch Verbesserung der Wirkungsgrade bei gleichen Brennstoffen und gleicher Brennstoffqualität 20 bis 30 % (z. B. Kohlekraftwerk $\eta_{alt} = 38 \%$, $\eta_{neu} = 50 \%$, $\Delta\eta = 24 \%$). Infolge der langen Bauzeiten und Laufzeiten wirkt sich der technische Fortschritt im Kraftwerkspark zeitlich verzögert aus. Die Ausschöpfung des noch verbleibenden Potentials wird immer schwieriger und aufwendiger (das gilt auch für Brennstoffzellen; die Exergiewirkungsgrade sind für alle Arten von Energiewandlern < 1). Größere Effizienzsteigerungen als im Energieumwandlungssektor sind im Anwendungssektor denkbar (z.B. Wärmedämmung, Raumwärme). Mit Brennstoffzellen ließe sich eine wesentliche Reduktion des derzeitigen Brennstoffverbrauchs bewirken, wenn sie an Stelle von Hausheizungsanlagen eingesetzt werden könnten. Voraussetzung ist, daß die Gesamtkosten der elektrischen Eigenerzeugung unter Anrechnung der Einspeisevergütung und der Koppel-Wärmerzeugung den bisherigen Kosten für Strombezug und Brennstoff entsprechen.

Die vom IPCC bis 2030/2050 geforderte Entcarbonisierung der Energieversorgung kann selbst bei weltweit stagnierendem Energieverbrauch durch Verbesserung der Energiewandlungswirkungsgrade nicht bewältigt werden. Zur Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung mit erschwinglicher Energie ist ein Quantensprung in der Energietechnik (Fusion, effiziente Energiespeicher, neue Methoden der Sonnenenergienutzung, Änderung der Haltung zur Kernspaltenergie u.ä.) erforderlich.

9 Schrifttum

- [1] Kohlekraftwerk der Zukunft, i.A. des Ministers für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr des Landes NRW (Autoren: R. Pruschek, u. Renz, E. Weber); Düsseldorf, März 1990
- [2] Bericht 1999 zur Erklärung der VDEW zum Klimaschutz
- [3] Kjaer, A.S. and Thomson, B. F.: Status of Advanced Super Critical PF Power Plants in the ELSAM Area. VGB-Kongreß "Kraftwerke 1998"
- [4] Stapper, B.: Wirkungsgradpotential steinkohlegefeuerter Kraftwerke. VDI Berichte 1321 (Tagung Fortschrittliche Energiewandlung und -Anwendung, Bochum 11. und 12. März 1997)
- [5] Kallmeyer, D., und Schippers, K.: Tendenzen in der Entwicklung der Energie- und Kraftwerkstechnik aus der Sicht des Betreibers. VDI Berichte 1495 (Tagung „Entwicklungslinien in der Energie- und Kraftwerkstechnik, Essen 22. und 23. Sept. 1999)
- [6] Kohlekraftwerke der Zukunft: sauber und wirtschaftlich. Dokumentation und Herausg. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Juli 1999 (Mitwirkung VGB, VDEW, FDBR)
- [7] Kjaer, S. und Thomson, F.: Stand der fortgeschrittenen überkritischen fossilbefeueten Dampfkraftwerke im ELSAM-Bereich. VGB KraftwerksTechnik 6/99, 79. Jahrgang, IssN Or72-5715

- [8] Elsen, R. O., Götte, C. und Wick, W.: Pilotrocknungsanlage Niederaußem. Technische Vorbereitung von BoA-Plus. VDI Berichte 1495 (Tagung „Entwicklungslinien in der Energie- und Kraftwerkstechnik, Essen 22. und 23. Sept. 1999)
- [9] Kail, C. und Rukes, B.: Fortschrittliche Gas- und Dampfturbinenprozesse zur Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung bei GUD-Kraftwerken. VDI Berichte 1182 (Tagung Fortschrittliche Energiewandlung und -Anwendung, Essen, 29. und 30. März 1995)
- [10] Shuang Li und Pruschek, R.: Thermodynamische Bewertung von IGHAT-Prozessen. VDI Berichte 1457 (Tagung Fortschrittliche Energiewandlung und -Anwendung, München, 16. und 17. März 1999)
- [11] Kail, C.: Bewertung der zur Zeit besten gasbefeuerten Kraftwerksprozesse mit Heavy-Duty-Gasturbinen. VDI Berichte 1321 (Tagung „Fortschrittliche Energiewandlung und -Anwendungen“, Bochum, 11. und 12. März 1997)
- [12] Kloster, R.: Thermodynamische Analyse und Optimierung von Gas-/Dampfturbinen-Kombi-Kraftwerken mit integrierter Kohlevergasung. Diss. Univ. Essen 1998, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 409
- [13] Hannes, K.: Entwicklungsprogramm Druckkohlenstaubfeuerung. VDI Berichte 1280 (Tagung „Entwicklungslinien in der Energie- und Kraftwerkstechnik, Siegen 1996)
- [14] Advanced Cycle Technologies, EC-Contract JOF3-CT95-0004, Brüssel 1998 (Univ. Essen, Siemens AG, Krupp Uhde GmbH, ECN Petten, Univ. Ulster. Koordinator R. Pruschek)
- [15] Vahrenholt, F.: Chancen erneuerbarer Energien, Internationales Forum E-world of energy, 8./9. Feb, 2000
- [16] Lokurlu A.: Simulation der Oxidkeramischen Brennstoffzellen "SOFC" mit nachgeschalteten Gas- und Dampfturbinen-Kombi-Anlagen für verschiedene Brenngase. Diss. Univ. Essen 1999, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 425
- [17] Coal-fired multicycle power generation systems for minimum noxious gas emissions, CO₂ control and CO₂ disposal, EC Contract JOU2-CT92-0185, Jan. 1996 (Univ. Essen, Siemens AG, ECN Petten. Koordinator R. Pruschek) und "An attractive option for CO₂ control in IGCC systems: Water gas shift with integrated hydrogen/carbon dioxide separation (WIHYS) process, EC Contract JOU2-CT92-0158. Jan 1996 (ECN Petten, Siemens AG, Univ. Essen, Univ. Limerick, NTU Athen. Koordinator P. Alderlisten)
- [18] Göttlicher, G.: Energetik der Kohlendioxidrückhaltung in Kraftwerken. Diss. Universität Essen 1998, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 421
- [19] Pruschek, R., Göttlicher, G., Oeljeklaus, G., Haupt, G., Zimmermann, G.: Best Option for CO₂ Reduction in Fossil-Fired Power Stations. POWER-GEN EUROPE, Milano, 9. bis 11. Juni 1998
- [20] Göttlicher, G. und Pruschek, R.: Analysis of development potentials for power stations with CO₂ removal/concentration. Proceedings of the 4th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 30 Aug.-2 Sept. 1998, Interlaken, Schweiz, Pergamon
- [21] Bürkle, W.: Entwicklungstendenz im Kernkraftwerksbau. Internationales Forum E-world of energy, 8./9. Feb, 2000
- [22] Kugler K. und Phlippen, P.-W.: Nuclear Energy Perspectives. World Engineers Convention, 19 –21 June, Hannover (Tagungsband Energy, VDI)

- [23] Pruscek, R., Lokurlu, A., Oeljeklaus, G. und Vogelsang, H.: CO₂-Emissionsminderung durch Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie – Ist-Stand und Potentiale. VDI Berichte 1182 (Tagung „Fortschrittliche Energiewandlung und – Anwendungen“, Essen 29. und 30. März 1995 Essen)
- [24] Lucas, K. und Fischer, Ch.: Aufteilung der Primärenergieeinsparung durch KWK auf die Koppelprodukte. EUROHEAT & POWER – Fernwärme international 11/1999
- [25] Folke, Ch.: Minderung der Kohlendioxidemissionen durch Erneuerung vorhandener Kohlekraftwerke in Europäischen Union und dadurch verursachte Kosten. Diss. Univ. Essen, Mai 2000, Druck in Vorbereitung

Abbildungen, Tabellen

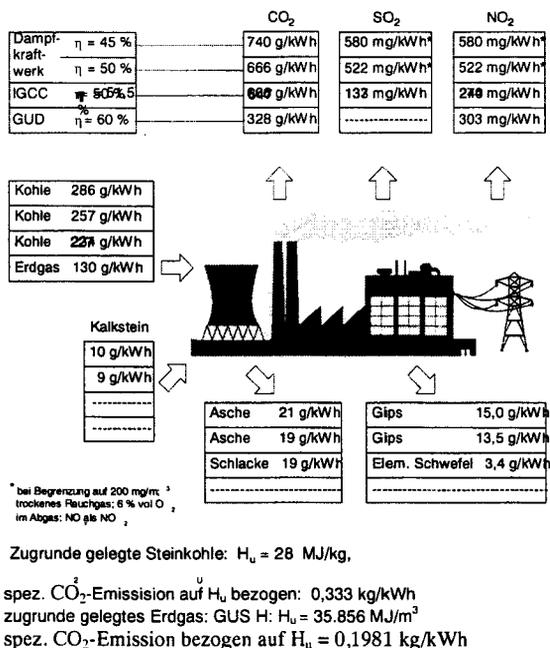


Bild 1-2: Wirkungsgrade, spezifische Einsatz-Stoffströme und spezifische Emissionen steinkohle- und erdgasbefuerter Kraftwerke

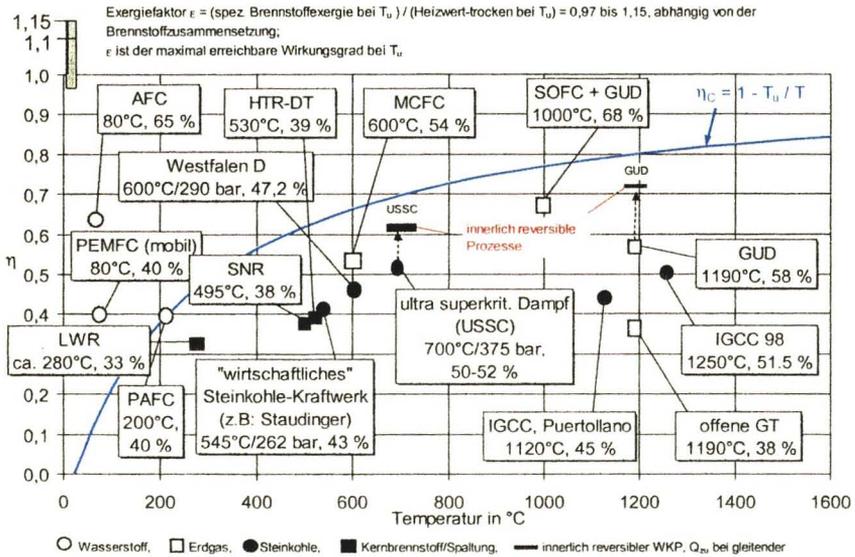
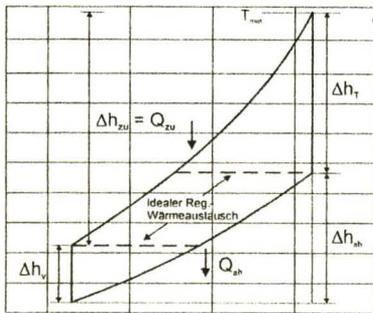


Bild 2-1: Carnot-Faktor über der maximalen Arbeitsmitteltemperatur (bzw. Zellentemperatur). Wirkungsgrade verschiedener Kraftwerkstypen (Bestwerte), Wirkungsgrade von Brennstoffzellen, Exergiefaktor von fossilen Brennstoffen. Obere Werte (Balken) für USSC (ultra supercritical steam cycle) und für GuD deuten Grenzwerte an, wenn alle inneren Verluste vermieden werden könnten.



- GT-Prozessverbesserungsoptionen:
- T_{max} (ISO)
 - ZE
 - ZK
- Abgasenthalpienutzung:
- Rekuperation
 - DT (GUD)
 - STIG
 - HAT

Bild 2-2: Optionen für die Verbesserung von Gasturbinenprozessen

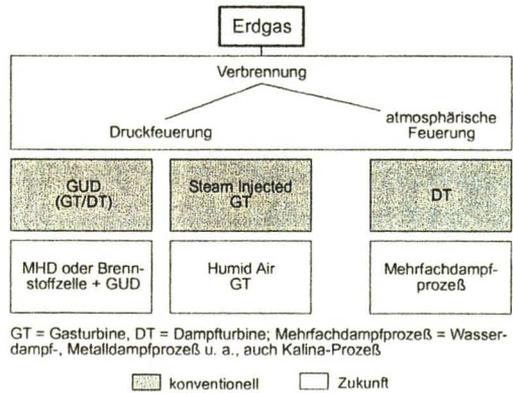


Bild 2-3: Erdgas-Verstromungsverfahren (auch für flüssige Brennstoffe)

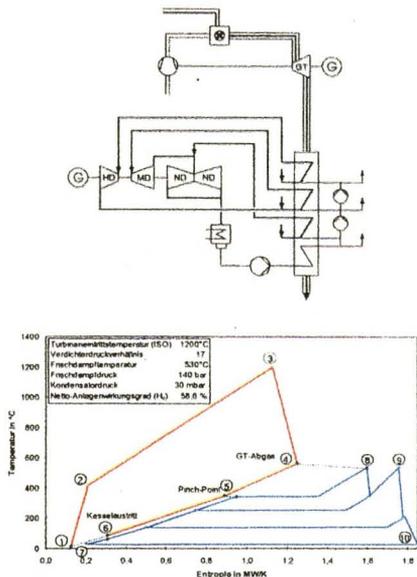


Bild 2-4: Fließschema und T-S-Diagramm für den GuD-Prozess (Entropieströme der Stoffe in MW/K aufgetragen)

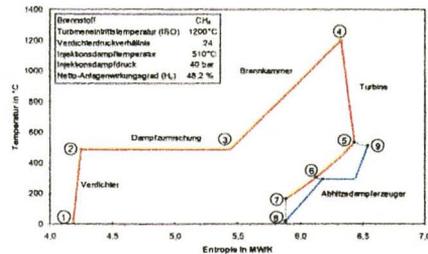
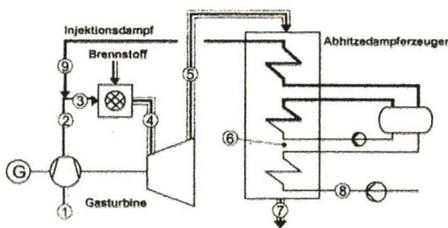


Bild 2-5: Fließschema und T-S-Diagramm für den STIG-Prozess (Entropieströme der Stoffe in MW/K aufgetragen)

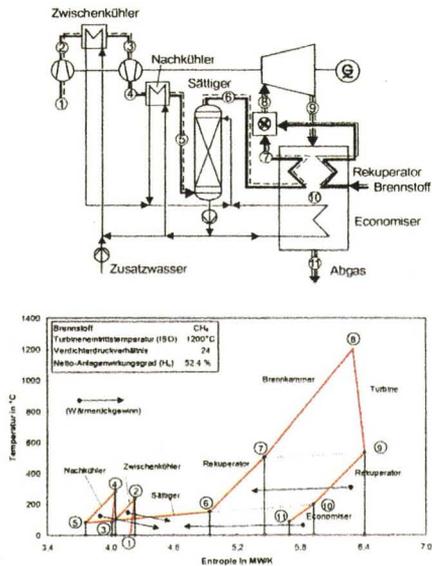
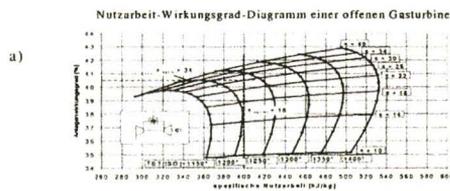


Bild 2-6: Fließschema und T-S-Diagramm für den HAT-Prozess (Entropieströme der Stoffe in MW/K aufgetragen)



Nutzarbeit-Wirkungsgrad-Diagramm des erdgasbefeuerten Kombiprozesses

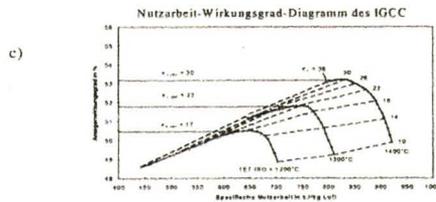
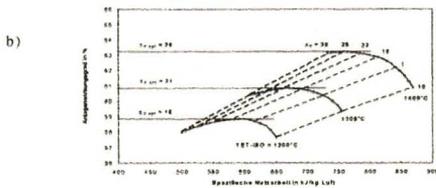


Bild 2-7: Nutzarbeit-Wirkungsgrad-Diagramme

- a) GT im Solo-Betrieb $\pi_{opt,w} \approx 16$ für TET 1190 °C
- b) und c) GT für GuD und IGCC $\pi_{opt,w} \approx 18$ (in den Diagrammen sind die Unterschiede nicht deutlich zu erkennen)

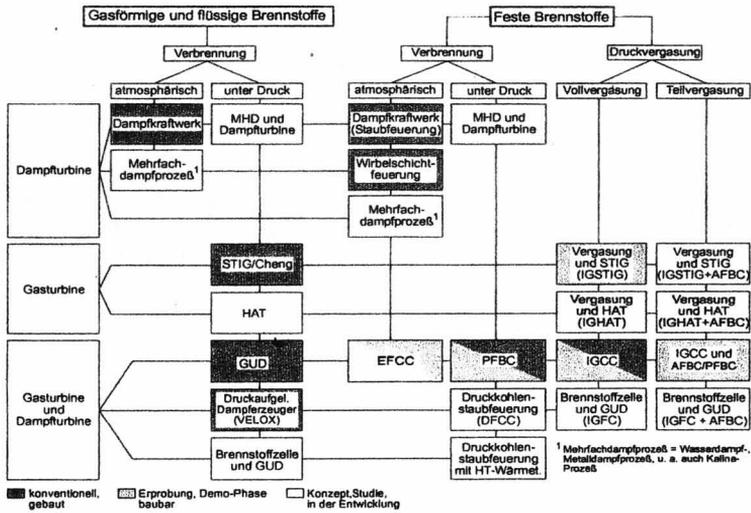


Bild 2-8: Kraftwerksprozesse für fossile Brennstoffe

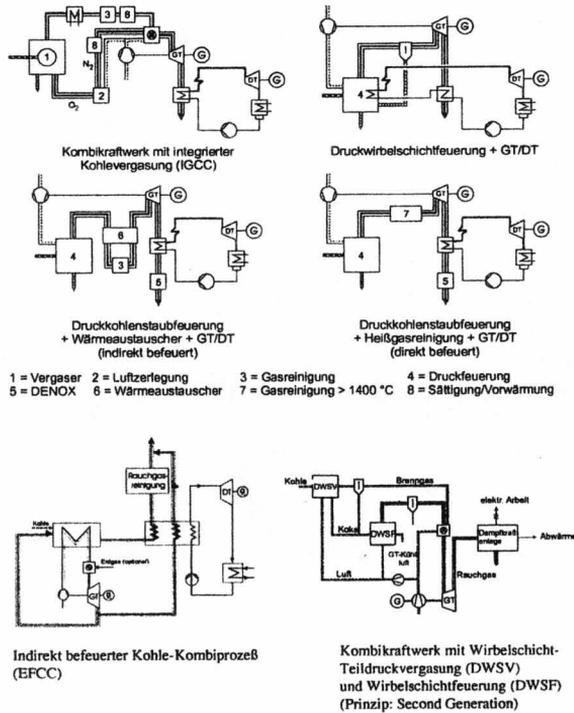


Bild 2-9: Übersicht über Kohleverstromungsverfahren mit Gas-Dampfturbinen-Kombi-Anlagen

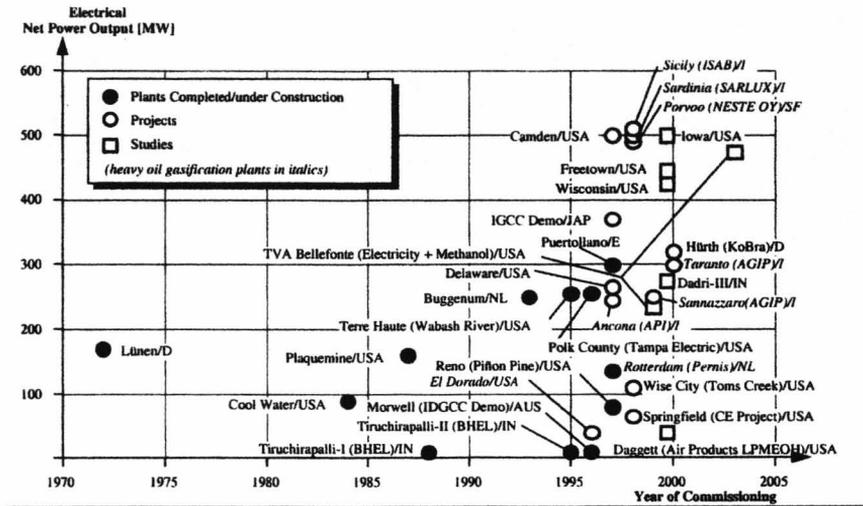


Bild 2-10: Kombi-Kraftwerke mit integrierter Vergasung = IGCC (für Kohle und andere feste Brennstoffe, auch Raffinerierückstände) [14]

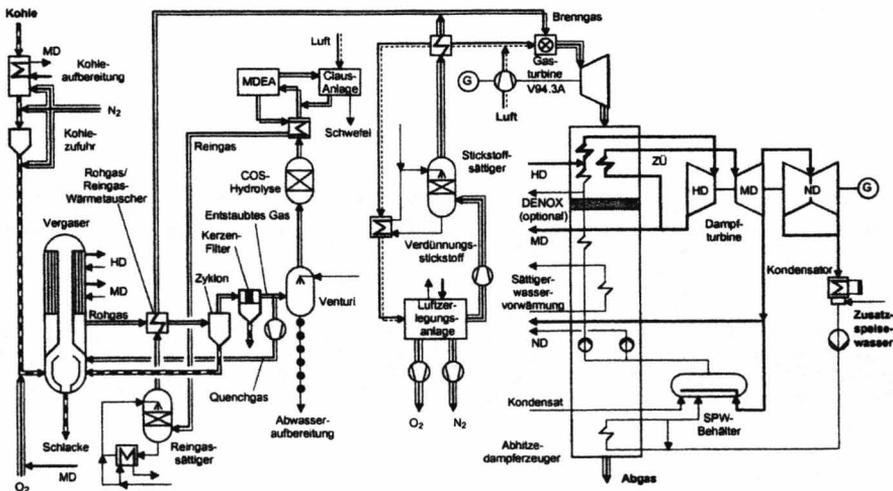


Bild 2-11: Fließschema für das optimierte IGCC-Kohlekraftwerk 1998 [14]

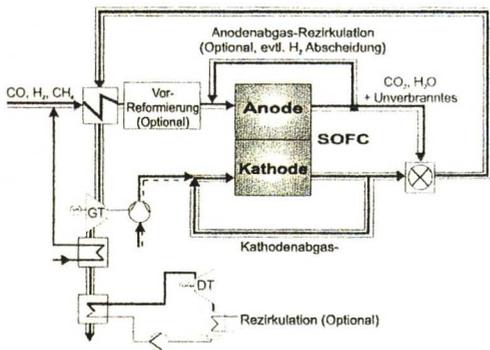


Bild 3-1: Vereinfachtes Fließschema für einen Dreifach-Prozess mit Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC und GuD

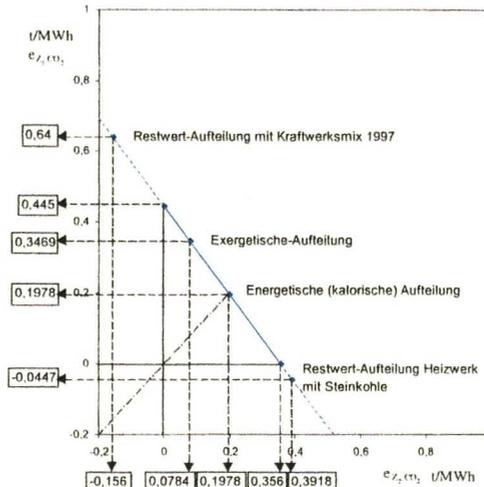


Bild 6-1: Aufteilung der CO₂-Emission auf die Koppelprodukte elektrische Arbeit und Wärme. Beispiel: KWK-Anlage BHKW, Erdgas;

$E_{b,CO_2} = 0,178 \text{ t/MWh (bez. auf Heizwert)}$
 $\omega = 0,9, \sigma = 0,8, \beta = 0,4$

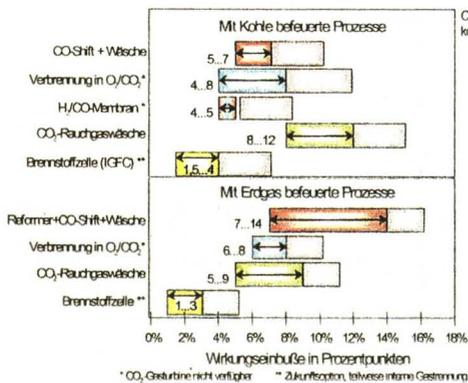


Bild 4-1: Wirkungsgradeinbuße und CO₂-Vermeidungskosten bei Rückhaltungsgrad > 90 %; ↔ Bandbreite für Wirkungsgradeinbuße bei Abtrennung im gasförmigen Zustand (Literaturswertung). Rechter Balken Aufwand für Verflüssigung.-Vermeidungskosten ohne Entsorgungskosten

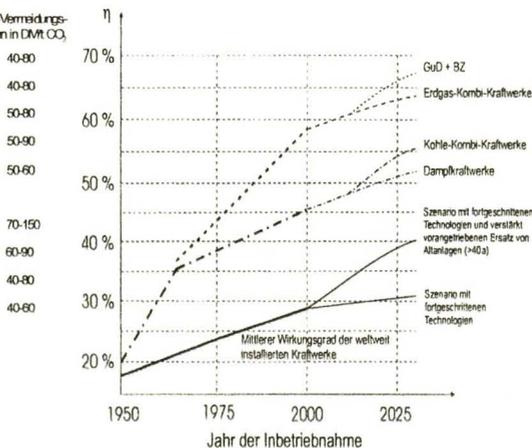


Bild 7-1: Entwicklung der Wirkungsgrade von Kraftwerken, die mit fossilen Brennstoffen befeuert werden (nach Angaben von Siemens und eigenen Recherchen)

Regenerative Energien

von Dr. Jochen Diekmann und Dr. H.-J. Hans-Joachim Ziesing
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

Vorbemerkung

Die stärkere Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist eine zentrale Option zum Klimaschutz und zur Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung. Im IKARUS-Projekt werden die für Deutschland relevanten regenerativen Techniken vor allem hinsichtlich ihrer künftigen Kosten und Potentiale beschrieben und systemanalytisch, d.h. im Vergleich zu anderen Möglichkeiten der Emissionsverminderung, bewertet. Für die Analysejahre 2005 und 2020 ergeben sich dabei allerdings insgesamt noch relativ bescheidene Beiträge. Mit der Ausweitung des Betrachtungshorizontes auf das Jahr 2030 stellt sich die Frage nach den längerfristigen Perspektiven für erneuerbare Energien. Welche Technikverbesserungen und Kostensenkungen können künftig erwartet werden und welche neuen Techniken bzw. Technikanwendungen kommen längerfristig in Betracht? Dabei stellt sich auch die Frage, ob für das Analysejahr 2020 Techniken übersehen worden sind, die energie-wirtschaftlich relevant werden könnten.

Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung in liberalisierten Märkten

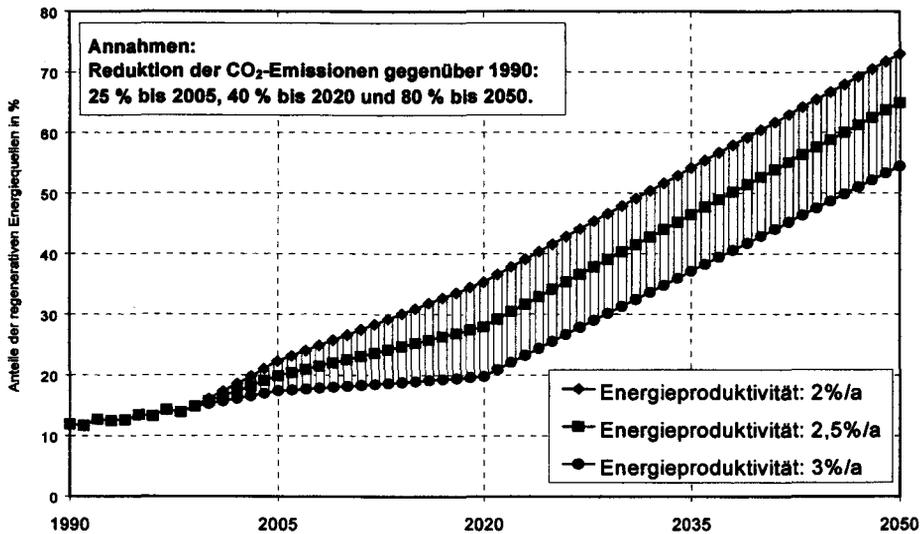
Die Notwendigkeit einer nachhaltigen Entwicklung wird mittlerweile weitgehend anerkannt. Bezogen auf den Energiebereich wird dementsprechend auch kaum bestritten, dass erneuerbare Energiequellen langfristig einen wesentlichen Beitrag, insbesondere zur Reduzierung der CO₂-Emissionen, leisten müssen. Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, die CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2005 gegenüber 1990 um 25 % zu reduzieren. Außerdem hat sich Deutschland im Rahmen des Kyoto-Prozesses und des europäischen "burden sharing" verpflichtet, die Emissionen von sechs Treibhausgasen bis zum Verpflichtungszeitraum 2008/2012 gegenüber 1990 um 21 % zu vermindern. Schließlich gibt es Empfehlungen der früheren Klimaschutz-Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages, die CO₂-Emissionen bis 2050 in den Industrieländern, also auch in Deutschland, um 80 % zu senken. Diese Forderung wurde in dem im Frühjahr 2000 vorgelegten Eckpunktepapier des Bundesumweltministers zum nationalen Klimaschutzprogramm wieder aufgenommen, in dem

es u.a. heisst, dass die "Treibhausgase bis zum Jahre 2020 um 40 Prozent und bis zum Jahr 2050 um 80 Prozent gegenüber 1990" gemindert werden müssen (BMU 2000).

Lässt man vereinfachend die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte der einzelnen fossilen Energieträger außer Acht, so müsste der Verbrauch der fossilen Energieträger entsprechend gesenkt werden, d.h. bis 2050 um 80 %! Je nach Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität müssen unter diesen Voraussetzungen die CO₂-freien Energieträger - und dies sind vornehmlich die erneuerbaren Energien – in unterschiedlichem Umfang zur Deckung der Primärenergienachfrage herangezogen werden (Abbildung 1). Sofern sich die gesamtwirtschaftliche Energieproduktivität im jährlichen Durchschnitt bis zum Jahre 2050 nur in der bisherigen Tendenz um rund 2 % erhöht, müsste der Versorgungsbeitrag der erneuerbaren Energiequellen auf etwa ein Drittel bis 2020 und auf nahezu drei Viertel bis 2050 gesteigert werden. Bei einer jahresdurchschnittlichen Zunahme der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität um 3 % würden sich Anteile von 20 % im Jahre 2020 und von 55 % im Jahre 2050 ergeben. Bei einer dann insgesamt deutlich geringeren Primärenergienachfrage würde in diesem Fall das absolute Niveau des notwendigen Einsatzes erneuerbarer Energien immerhin um mehr als die Hälfte niedriger ausfallen als bei einer nur trendmäßigen Verbesserung der Energieproduktivität. Insoweit hängen die letztlich erforderlichen relativen und absoluten Versorgungsbeiträge der erneuerbaren Energiequellen entscheidend von der Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität ab.

Abbildung 1

Anteil der Nutzung CO₂-freier erneuerbarer Energiequellen an der Deckung der Primärenergienachfrage in Abhängigkeit von der Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität



Angesichts der großen technischen Potentiale sind derartige Entwicklungen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts sicher vorstellbar, doch werden sie sich von allein nicht einstellen können.

Der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch liegt in Deutschland gegenwärtig noch bei 2 %. Dabei handelt es sich zudem überwiegend um die traditionelle Nutzung von Wasserkraft, Holz und Müll, während die neueren Systeme wie Solaranlagen vor allem aus wirtschaftlichen Gründen noch relativ wenig genutzt werden.

In der Vergangenheit ist der Ausbau erneuerbarer Energien durch unterschiedliche politische Maßnahmen gefördert worden. Dabei konnten die Kosten deutlich reduziert werden. Allerdings haben sich gleichzeitig auch die wirtschaftlichen Bedingungen der Konkurrenzsysteme verbessert. Die neueren regenerativen Systeme sind gegenwärtig noch mehr oder weniger weit von der Wirtschaftlichkeitsschwelle entfernt. Außerdem haben sich neben ökonomischen Problemen immer wieder auch institutionelle Hemmnisse und Akzeptanzprobleme gezeigt. Das Beispiel der Windenergienutzung in Deutschland belegt aber, dass Maßnahmen zur Förderung der Markteinführung erneuerbarer Energien erfolgreich sein können.

Für die künftige Entwicklung werden zunehmend die Bedingungen der Liberalisierung und Internationalisierung maßgeblich werden. Dies bedeutet zum einen, dass der Politik engere Gestaltungsräume gesetzt werden, und zum anderen, dass künftig

noch stärker als bisher wirtschaftliche Kriterien den Erfolg neuer Techniklinien bestimmen werden. Auf Dauer wird die Nutzung erneuerbarer Energien in erster Linie von ihren Kosten abhängen und davon, wie externe Umweltkosten durch politische Regulierung internalisiert werden.

Erneuerbare Energien im IKARUS-Projekt

Im IKARUS-Projekt steht die Schaffung von Informationsgrundlagen im Vordergrund, die für eine vergleichende Technikbewertung relevant sind. Hierzu zählen vor allem Daten zu technischen und ökonomischen Parametern der unterschiedlichen Systeme und Angaben zu den jeweils möglichen Versorgungsbeiträgen. Im Rahmen der Systemanalyse werden die Energiemengen, Emissionen und Kosten der unterschiedlichen Techniken miteinander vernetzt.

In Tabelle 1 sind die Techniklinien zur Nutzung erneuerbarer Energien aufgeführt, die bisher im IKARUS-Projekt berücksichtigt werden. Es werden vor allem solche Techniken behandelt, die bereits im größeren Umfang genutzt werden oder künftig für die Energieversorgung in der Bundesrepublik Deutschland von Bedeutung sein könnten.

Tabelle 1

Erneuerbare Energien im IKARUS-Projekt

Elektrische Energie	Wärme	Brennstoffe
Photovoltaik - netzverbundene Anlagen - kleine, mittlere, große Anlagen	Geothermie - Nahwärmeversorgung - mit/ohne Wärmepumpe	Biogas - Landwirtschaft, Industrie - Klär-, Deponiegas
Windkraft - Küsten, Binnenland - kleine, mittlere, große Anlagen	Solare Nahwärme - geringe, mittl., hohe Deckung - kleines, großes Netz	festе Biomasse - Restholz, -stroh - Getreide, Gräser, Hölzer
Wasserkraft - bis 1 MW - Neubau, Revitalisierung	Dezentr. Solarkollektoren (außerhalb von TP 3)	Bioöle - Rapsöl, RME - Pflanzenölimport
Solarstromimport - Solarthermik, Photovoltaik - Spanien, Nordafrika	Solararchitektur (außerhalb von TP 3)	Bioethanol - stärke- und zuckerh. Stoffe - Ethanolimport
Wasserkraft > 1 MW (außerhalb von TP 3)	Wärmepumpen (außerhalb von TP 3)	Wasserstoffimport - solarthermisch, photovoltaisch - Spanien, Nordafrika - LH2 aus Übersee
Differenziert nach Zeitzonen und Spannungsebenen	Differenziert nach Zeitzonen	Müll, Klärschlamm

Die betrachteten Nutzungssysteme lassen sich allgemein danach unterscheiden, ob mit ihnen elektrische Energie, Wärme oder Brennstoffe bereitgestellt werden. Diese Unterscheidung ist deshalb wichtig, weil hiervon in starkem Maße die Möglichkeiten der Speicherung und des Transportes abhängen. Je schlechter diese Möglichkeiten

sind, desto mehr spielen Aspekte der zeitlichen und räumlichen Verteilung des natürlichen Energieangebotes eine Rolle.

Als stromerzeugende Systeme im Inland werden im Teilprojekt „Primärenergie“ (TP3) Photovoltaik-, Windkraft- und kleine Wasserkraftanlagen behandelt; größere Wasserkraftwerke (mit einer Leistung ab 1 MW) werden im Rahmen von Teilprojekt 4 bearbeitet. Aufgrund der nahezu flächendeckenden Elektrizitätsversorgung in Deutschland werden im IKARUS-Modell explizit nur netzverbundene Anlagen abgebildet. Im Hinblick auf langfristige Perspektiven werden auch die Möglichkeiten eines Solarstromimportes aus südlichen Ländern wie Spanien und Nordafrika einbezogen.

Im Bereich der Wärmebereitstellung durch erneuerbare Energien werden in Teilprojekt 3 Daten zu geothermischen Heizwerken und zur solaren Nahwärmeversorgung bereitgestellt; außerhalb von Teilprojekt 3 werden dezentrale Solarkollektoren, Wärmepumpen und Maßnahmen zur passiven Sonnenenergienutzung berücksichtigt.

Besonders vielfältig sind Nutzungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Formen von Biomasse. Neben der Verwendung von (festen und gasförmigen) Reststoffen sind hierbei auch Energiefarmen und die Umwandlung von Pflanzen in flüssige Energieträger (Öle, Alkohole) einzubeziehen, wobei allerdings nicht nur eine Gewinnung im Inland, sondern auch Importe nachwachsender Rohstoffe zu betrachten sind.

Als weiterer Brennstoff wird Wasserstoff untersucht, soweit er elektrolytisch aus Solarstrom oder Wasserkraft gewonnen wird. Im Vordergrund stehen hierbei die Möglichkeiten eines Importes von Wasserstoff auf der Basis von Strom aus solarthermischen und photovoltaischen Kraftwerken in Spanien und Nordafrika sowie von flüssigem Wasserstoff aus Übersee.

Für die Bewertung der Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind die Kosten und Potentiale der einzelnen Techniken ausschlaggebend. Die Kostenangaben beziehen sich (in der aktuellen Version) allgemein auf den Geldwert im Jahr 1995. Für die Analysejahre 2005 und 2020 werden dementsprechend *reale* (inflationsbereinigte) Kostenänderungen geschätzt. Im Modell werden Investitionen und andere einmalige Ausgaben mit Hilfe der Annuitätenmethode in Kosten für den jährlichen Kapitaldienst in der gesamten Lebensdauer der jeweiligen Anlage umgerechnet. Hinzu kommen feste und variable Kosten für den Betrieb der Anlagen. Steuern und Subventionen werden generell nicht eingerechnet. Dadurch können sich entsprechende (gesamtwirtschaftlich orientierte) Kostenangaben von Ergebnissen einzelwirtschaftlicher Rechnungen unterscheiden.

Für Modellrechnungen im IKARUS-Projekt werden grundsätzlich keine wirtschaftlichen, sondern technische Potentiale geschätzt. Als Restriktionen sind Nutzungsgrade, Standortverfügbarkeit, Produktionsmöglichkeiten sowie strukturelle und ökologi-

sche Beschränkungen zu beachten. Die wirtschaftlichen Potentiale werden auf dieser Basis in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen modellendogen ermittelt.

Kosten- und Potentialangaben für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet. Bei den neueren Techniken, die heute schon genutzt werden, liegen häufig noch keine langjährigen Betriebserfahrungen vor, so dass z.B. Ausbeuten und Lebensdauern geschätzt werden müssen. Für künftige Technikanwendungen müssen über Kosten und Leistungsfähigkeit der neuen Systeme möglichst plausible Annahmen gemacht werden. Hierbei sind auch Kostendegressions- oder Lerneffekte einzubeziehen, die wiederum vom Ausmaß der künftigen Verbreitung der Systeme abhängen. Vor allem die verbleibenden Unsicherheiten über künftige Entwicklungen schränken die Belastbarkeit von Ergebnissen der Systemanalyse mehr oder minder ein. Andererseits wäre es falsch, die künftige Nutzung erneuerbarer Energien allein auf der Basis der gegenwärtigen Verhältnisse beurteilen zu wollen.

Von den zahlreichen Systemen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen sollen im folgenden Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen näher betrachtet werden. Windkraftanlagen weisen derzeit schon relativ niedrige Kosten auf und zeigen gegenwärtig vor allem aufgrund energiepolitischer Fördermaßnahmen den größten Zuwachs, während der bislang teuren Photovoltaik noch beträchtliche Kostensenkungsmöglichkeiten zugesprochen werden und die Anwendungsmöglichkeiten hier besonders groß sind.

Windkraftanlagen

Nach Angaben des DEWI gab es Ende 1999 in Deutschland insgesamt 7879 Windkraftanlagen mit einer Leistung von 4445 MW. Von der Gesamtleistung ist über ein Drittel (1568 MW) allein im Jahr 1999 installiert worden. Die Durchschnittsleistung je Anlage hat sich in den letzten Jahren auf 564 kW erhöht; bei den in 1999 errichteten Anlagen waren es sogar bereits 935 kW.

Den bisherigen Modellrechnungen für die Analysejahre 1995, 2005 und 2020 werden kleine, mittlere und große Windkraftanlagen an Standorten mit einer mittleren Windgeschwindigkeit (in 10 m Höhe) von 6,5 bis 3,5 m/s (Windklassen 1 bis 4) zugrunde gelegt. Wichtige Kennziffern dieser Anlagen, die in der IKARUS-Datenbank ausführlich beschrieben sind, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2

Ertrag und Stromerzeugungskosten von Windkraftanlagen

	Kleine WKA			Mittelgroße WKA			Große WKA		
	1995	2005	2020	1995	2005	2020	1995	2005	2020
Leistung kW	100	100	100	600	600	600	1000	1500	3000
Rotordurchmesser m	20	20	20	43	43	43	54	65	80
Nabenhöhe m	30	40	40	60	85	70	60	80	100
Investition DM/kW	3350	3100	2950	2310	2160	2060	2360	2460	2500
WKA DM/kW	2700	2450	2300	1750	1600	1500	1800	1900	2000
Sonstige DM/kW	650	650	650	560	560	560	560	560	500
Ausnutzungsdauer									
6,5 m/s (10 m) h/a	2972	3170	3170	3102	3151	3196	3100	3150	3200
5,5 m/s (10 m) h/a	2200	2383	2383	2339	2392	2441	2350	2400	2450
4,5 m/s (10 m) h/a	1405	1553	1553	1474	1518	1560	1500	1550	1600
3,5 m/s (10 m) h/a	685	781	781	700	727	753	730	750	770
Stromerzeugungskosten									
6,5 m/s (10 m) Pf/kWh	11,7	10,1	9,6	7,6	7,0	6,5	7,8	8,0	8,0
5,5 m/s (10 m) Pf/kWh	15,8	13,5	12,8	10,1	9,2	8,6	10,3	10,5	10,5
4,5 m/s (10 m) Pf/kWh	24,7	20,6	19,6	16,0	14,4	13,4	16,1	16,3	16,0
3,5 m/s (10 m) Pf/kWh	50,7	41,1	38,9	33,7	30,2	27,7	33,0	33,6	33,3
Allgemeine Annahmen zur Ertrags- und Kostenrechnung: Zeitverfügbarkeit 97 %, Feldwirkungsgrad 95 % (außer Kleinanlagen), Versicherung 1 %, Wartung 2 % (jeweils bezogen auf Investition ohne Netzanbindung), Revision nach 10 Jahren in Höhe von 8 % der WKA-Investition, Zinssatz 4 % (real), Lebensdauer 20 Jahre. Quelle: DIW.									

Unter Kostenaspekten sind mittelgroße Windkraftanlagen am günstigsten. Die hier betrachteten Modellanlagen dieser Klasse haben eine Leistung von 600 kW und einen Rotordurchmesser von 43 m. Abgesehen von der ungünstigen Windklasse 4 liegen die durchschnittlichen Stromerzeugungskosten im Basisjahr zwischen 7,6 und 16 Pf je kWh. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes vermindern sich diese Kosten auf 6,5 bis 13,4 Pf je kWh.

Große Windkraftanlagen mit einer Leistung von 1000 kW führen im Basisjahr in etwa zu gleich hohen Stromerzeugungskosten wie mittelgroße Anlagen. Ihr Vorteil besteht insbesondere in einer besseren Ausnutzung verfügbarer Aufstellflächen. In den vergangenen Jahren sind bereits noch größere Anlagen mit Leistungen von deutlich über einem 1 MW im Markt eingeführt worden. Die spezifischen Kosten solcher Großanlagen sind allerdings bisher noch deutlich höher. Es ist noch ungewiss, ob mit einem weiteren Upscaling in Zukunft Kostenvorteile erreicht werden können. Nach den in der Tabelle dargestellten Annahmen könnte sich die Anlagenleistung künftig bei in etwa real konstanten Stromerzeugungskosten weiter erhöhen.

Das Potential der Windenergienutzung in Deutschland hängt vor allem von den hierfür verfügbaren Flächen, der Größe der Windkraftanlagen, der Aufstellichte und von den Möglichkeiten der elektrizitätswirtschaftlichen Einbindung ab. Hierbei sind auch die Möglichkeiten der Produktion von Windkraftanlagen und Restriktionen des Natur- und Landschaftsschutzes zu beachten. Im Rahmen des IKARUS-Projektes ist ein technisches Potential der Windkraftnutzung von 39 bis 62 GW oder 63 bis 79 TWh/a ermittelt worden, wobei Standorte mit Windgeschwindigkeiten unter 4 m/s und Off-Shore-Standorte nicht berücksichtigt sind (Diekmann 1995, Diekmann u.a. 1995). Im Sinne von ausschöpfbaren technischen Potentialen wird die Windkraftnutzung in

Deutschland für Modellrechnungen auf 21 GW im Jahr 2020 begrenzt; dem entspricht - unter Berücksichtigung eines zunehmenden Anteils der Windkraftnutzung im Binnenland - eine jährliche Stromerzeugung von 35 TWh.

Hinzu kommen Möglichkeiten der Off-Shore-Nutzung, die sich allerdings bisher nur mit größeren Unsicherheiten abschätzen lassen. Nach einer Studie von ISET könnten bis zum Jahr 2020 in deutschen Küstengewässern 12 GW Windkraftleistung installiert werden. Bei vorsichtigerer Einschätzung könnte bis zum Jahr 2020 zumindest eine Off-Shore-Leistung von 2 GW installiert sein, so dass sich die gesamte Stromerzeugung aus Windenergie auf über 40 TWh erhöht (Diekmann 2000).

Die zusätzliche Ausbreitung der Windenergienutzung in Deutschland könnte zum einen durch den Ersatz von bestehenden durch modernere Anlagen an vorhandenen Standorten und zum anderen durch eine Expansion im Off-Shore-Bereich erreicht werden.

Photovoltaikanlagen

Im Vergleich zur Windenergie ist die Nutzung der Photovoltaik bisher noch sehr gering. Nach der Erhebung der VDEW waren Ende 1998 in Deutschland 9078 Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 49 MW am Netz; hinzu kommen nicht netzverbundene Kleinanlagen und mobile Anwendungen mit einer Leistung von etwa 6 MW (Wagner 1999). Die Stromerzeugung netzgekoppelter Anlagen im Jahr 1998 wird auf 35 GWh (0,007 % des Stromverbrauchs) geschätzt. Etwa 2100 Anlagen sind im Rahmen des sogenannten 1000-Dächer-Programmes gefördert worden. Im laufenden 100 000-Dächer-Programm soll eine Leistung von 300 MW durch günstige Kredite bzw. Zuschüsse gefördert werden. Nach dem Erneuerbare Energien Gesetz wird zunächst für eine Leistung von 350 MW eine degressive Mindestvergütung von anfänglich 99 Pf/kWh gezahlt.

Die Stromerzeugungskosten von Photovoltaikanlagen betragen gegenwärtig noch bis zu rund 2 DM/kWh. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit sind noch erhebliche technische Fortschritte und die Fertigung in großen Serien notwendig. Deshalb sind Angaben zu den künftigen Kosten derzeit noch recht unsicher. In Tabelle 3 sind die Stromerzeugungskosten für zwei Szenarien dargestellt. Nach Szenario I würden die Kosten bei den betrachteten Anlagen im Jahr 2005 noch über 1 DM je kWh liegen. Im günstigeren Szenario II könnten im Jahr 2020 Stromerzeugungskosten ab 35 Pf je kWh erreicht werden.

Das technische Potential der Photovoltaik in Deutschland beträgt allein auf Dächern (in Abhängigkeit von der Entwicklung der Wirkungsgrade) etwa 90 bis 150 GW; darüber hinaus könnten rund 400 bis 700 GW auf Freiflächen installiert werden (Diekmann u.a. 1995). Wenn bis 2020 von den Potentialen auf Freiflächen 1 % und von denen auf Dächern 5 % genutzt werden könnten, ergäbe sich daraus ein Stromer-

zeugungspotential von rund 20 TWh. Die tatsächlich erreichbare Solarstromerzeugung im Jahr 2020 und die weitere Entwicklung werden allerdings wesentlich davon abhängig sein, in welchem Maße Photovoltaikanlagen auf längere Sicht gefördert werden.

Tabelle 3

Modulkosten, Wirkungsgrade und Stromerzeugungskosten von Photovoltaikanlagen in Deutschland (Preisbasis 1995)

		2005		2020	
		Szen. I	Szen. II	Szen. I	Szen. II
Modulkosten 1)	DM/kW	6000	3000	4200	1800
Wirkungsgrad	%	13,5	15,2	14,4	19,0
Stromerzeugungskosten					
2 kW	Pf/kWh	140	58	101	44
5 kW	Pf/kWh	118	48	83	35
100 kW	Pf/kWh	133	92	115	82
500 kW	Pf/kWh	104	68	88	59

1) Für Kleinanlagen 7200 DM/kW in 2005 Szenario I.
Quelle: Diekmann u.a. (1999).

Gerade bei der Photovoltaik richten sich die Hoffnungen daneben aber nicht zuletzt auch auf weitere Erfolge in Forschung und Entwicklung. Schwerpunkte der anwendungsorientierten Grundlagenforschung liegen hier in den Bereichen Zellenmaterialien, Zellentechnologie und Modultechnik. Tabelle 4 skizziert den gegenwärtigen Stand der Wirkungsgrade verfügbarer PV-Technologien. Bei der Forschung geht es nicht allein um die Verbesserung der technischen Effizienz, sondern letztlich vor allem um Kostensenkungen und Umweltverträglichkeit. Wie die bisherige Entwicklung gezeigt hat, ist allerdings kaum mit kurzfristigen Durchbrüchen zu rechnen, sondern eher mit schrittweisen Verbesserungen.

Tabelle 4

Typische und maximale Modul- und Zellwirkungsgrade von kommerziell verfügbaren PV-Technologien (STC: 1000 W/m², 25 °C, AM 1,5)

Typ	Typischer (maximal erreichter) Modul-Wirkungsgrad (%)	Maximal erreichter Zellen-Wirkungsgrad im Labor (%)
Monokristallines Silizium	12-15 (22,7)	24,5
Multikristallines Silizium	11-14 (15,2)	19,8
A-Si-Verbindungen	6-7 (10,4)	13,5
Kadmium Tellurid	7-8 (9,2)	16,0

Quelle: IEA (1999)

Modellergebnisse bis 2020

Mit dem Optimierungsmodell werden für jedes Analysejahr zumindest ein Basisszenario und ein Reduktionsszenario ermittelt. Im Basisszenario wird im Unterschied zum Reduktionsszenario kein Ziel der CO₂-Verminderung vorgegeben. Der Technikmix ergibt sich in diesem Fall allein aus der Logik der Kostenminimierung und exo-

genen Vorgaben zu energiebedarfsbestimmenden Faktoren und zum Einsatz einzelner Techniken. Gerade in Bezug auf die Nutzung erneuerbarer Energien können die Ergebnisse solcher Basisszenarien deutlich von Prognosen abweichen, bei denen - anders als im Modell - Fördermaßnahmen und außerökonomische Motive berücksichtigt werden (vgl. Ziesing u.a. 1999).

Im Basisszenario geht die Nutzung erneuerbarer Energien nur in wenigen Fällen (Wasserkraft, Müll und Biogas) über die jeweils vorgegebene Mindesthöhe hinaus; d.h., dass die übrigen Techniken im Sinne des Modells allein unter Kostenaspekten nicht konkurrenzfähig sind. Dies ändert sich allerdings, wenn anspruchsvolle Klimaschutzziele berücksichtigt werden. So erhöht sich insbesondere der Beitrag der Windenergie im Modell wesentlich, wenn etwa eine Verminderung der CO₂-Emissionen um 40 % bis 2020 gegenüber 1990 vorgegeben wird. Damit wird bestätigt, dass die Windenergienutzung in Deutschland grundsätzlich zu den kosteneffizienten Optionen des Klimaschutzes zählt. Dies gilt zum Teil auch für Bioenergien. Hingegen sind die Stromerzeugungskosten von Photovoltaikanlagen selbst bei optimistischen Annahmen (Szenario II in Tabelle 3) im Jahr 2020 noch so hoch, dass das Modell von dieser Option keinen weiteren Gebrauch macht.¹

Die längerfristige Perspektive

Im Hinblick auf die längerfristigen Perspektiven erneuerbarer Energien sind neben den Aussichten für Effizienzverbesserungen und Kostensenkungen von bisher betrachteten Systemen auch andere technologische Möglichkeiten zu betrachten. In Tabelle 5 wird hierfür ein umfassenderer Techniküberblick dargestellt, wobei „marktnahe“ und „weitere“ Techniken unterschieden werden. Die (zumindest in bestimmten Anwendungsbereichen) marktnahen Techniken werden in der IKARUS-Datenbank beschrieben, allerdings mit Ausnahme von Kraftwerken, die geothermische Anomalien nutzen.

¹ Zu Ergebnissen des IKARUS/Markal-Modells für 2020 vgl. Ziesing u.a. (1999). Vorläufige Ergebnisse des IKARUS-Modells auf Basis der aktualisierten Datenbasis bestätigen die qualitativen Tendenzaussagen.

Tabelle 5
Marktnahe und weitere Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen

Quellen	Marktnahe Techniken	Weitere Techniken
Hydro/Ozean	Große, kleine, Kleinst-Wasserkraftwerke	Wellenkraftwerke, Gezeitenkraftwerke, Meerestemperatur
Biomasse	Bio-, Klär-, Deponiegas Müll, Restholz/-stroh Ethanol, Biodiesel	Energieplantagen (schnellwachsende Hölzer, Gräser)
Solar	Passive Systeme, Solarkollektoren, HT-Solarthermie (Turm, Rinne, Schüssel) Photovoltaikanlagen (stand alone, Netzverbund)	Aufwindkraftwerke, PV-Großkraftwerke Photochemische, photoelektrochemische photolytische Verfahren, Biomimetik
Wind	Onshore (Küstengebiet, Binnenland)	Offshore, Multi-MW (> 3 MW)
Geothermie	Geothermische Heizanlagen, Geothermische Kraftwerke (bei Wärmeanomalien)	Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR)
Sekundärenergien/-systeme	Strom, Wärme, Ethanol, Öl/RME	Wasserstofftransport/-speicher Transkont. Stromverbund Stromspeicherung

In Anlehnung an IEA (1997)

Bei den weiteren Techniken ist folgendes zu beachten:

- Strom- und Wasserstoffsysteme zum Import von Regenerativenergie werden bereits berücksichtigt, obwohl ihre mögliche Realisierung allgemein erst jenseits des Jahres 2020 erwartet wird.
- Dies gilt ähnlich auch für Energieplantagen und große PV-Kraftwerke.
- Nicht berücksichtigt werden bisher Wellenkraftwerke, Gezeitenkraftwerke, Meerestemperatur, Aufwindkraftwerke, da sie nicht oder zumindest nicht für Deutschland als relevant betrachtet werden.
- Unberücksichtigt bleiben auch alternative Verfahren der direkten Sonnenenergienutzung wie etwa biomimetische Verfahren, die sich derzeit noch im frühen Stadium der Grundlagenforschung befinden.
- Die Anwendung des HDR-Verfahrens für eine geothermische Stromerzeugung kommt grundsätzlich auch in Deutschland in Betracht. In der Datenbank wird eine Versuchsanlage beschrieben, die allerdings in Modellrechnungen nicht berücksichtigt wird.
- Für die Nutzung der Windenergie kommen zunehmend Off-Shore-Standorte auch in deutschen Küstengewässern in Betracht, die bisher noch nicht explizit einbezogen sind.

Mit zunehmendem Betrachtungshorizont nimmt zwangsläufig die Unsicherheit von Technikannahmen zu. Dementsprechend streuen die Erwartungen selbst von Experten bei der Einschätzung von Innovationen sehr stark. Es kann deshalb hilfreich

sein, bei der Diskussion von möglichen künftigen Entwicklungen breiter angelegte Befragungen zu berücksichtigen, wie sie im Rahmen der Studie Delphi '98 durchgeführt worden sind. Für die Nutzung erneuerbarer Energien relevante Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Hier sollen nur wenige Punkte hervorgehoben werden:

- Photovoltaik-Systemkosten unter 4000 DM je kW werden von 75 % der Befragten bis zum Jahr 2022 erwartet. Noch deutlich früher würden nach Ansicht der meisten Personen Dünnschichtzellen mit Wirkungsgraden über 20 % verwendet. Eine Mehrheit glaubt auch, dass Mehrschicht-Solarzellen mit Wirkungsgraden von über 50 % bis spätestens Mitte des dritten Jahrzehnts verwendet werden können, was 14 % der Befragten allerdings niemals für möglich halten. Eine Mehrheit kann sich auch (als Anwendung der Nanotechnologie) bis zur Mitte des zweiten Jahrzehnts die Verwendung von transparenten Solarzellen für Fenster vorstellen.
- Solarkraftwerke im Weltraum, die Energie mittels Mikrowellen auf die Erde senden, hält eine Hälfte der Befragten bis Mitte des dritten Jahrzehnts für möglich. Dagegen sehen 16 % dies als keine realistische Option an (unter den Befragten mit sehr hoher Fachkenntnis sind es sogar 40 %).
- Für die Windenergienutzung werden große Offshore-Parks von der Hälfte bis spätestens zum Jahr 2011 erwartet.
- Bei der Geothermienutzung mit HDR-Verfahren liegt der Median beim Jahr 2015.
- Wellenkraftwerke werden von 24 % der Befragten als unrealistisch betrachtet, die Hälfte der restlichen Befragten hält ihre Realisierung bis 2019 für möglich. (Hierzu sind in der Befragung von Japanern allerdings wesentlich optimistischere Antworten gegeben worden.)
- An die Nutzung der Temperaturgradienten in Ozeanen glaubt ein Drittel gar nicht, die meisten der übrigen Befragten erwarten dies erst nach dem Jahr 2025.
- Ein Ausbau eines Strom/Wasserstoff-Systems zur großtechnischen Nutzung von Solarenergie wird von vielen nach dem Jahr 2020 für möglich gehalten. Insgesamt werden stromseitige Elemente (abgesehen etwa von supraleitenden Speichern) deutlich eher erwartet als Elemente einer Wasserstoffversorgung. Eine flächendeckende Wasserstoffversorgung wird von den meisten (irgendwann) nach dem Jahr 2025 erwartet.

Solche Befragungsergebnisse sollten insbesondere im Hinblick auf genaue Jahreszahlen nicht überinterpretiert werden. Sie können aber als Orientierungshilfe dienen, um die eigenen Erwartungen über die künftige Entwicklung technischer Möglichkei-

ten vor dem Hintergrund eines größeren Meinungsspektrums kritisch bewerten zu können.²

Literatur

- Bayer, W. (2000): Erneuerbare Energien 1998 für die Bundesrepublik Deutschland. Statistisches Bundesamt Referat IV C 6. Wiesbaden, Januar 2000.
- BMU (1999): Erneuerbare Energien und Nachhaltige Entwicklung. Bearb. von O. Langniß u.a., DLR.
- BMU (2000): Nationales Klimaschutzprogramm – Eckpunkte für ein anspruchsvolles Ziel. <http://www.bmu.de/klima/klimaschutz.htm>.
- Diekmann, J. (2000): Erhöhung des Beitrags erneuerbarer Energiequellen. Stromorientierte Systeme. In: Wissenschaftliche Begleitung des Energiedialogs 2000. In Vorbereitung.
- Diekmann, J., Goy, G.C., Wittke, F. (1999): Die Rolle von erneuerbaren Energien in der Energieversorgung. In: Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland - Strategien für 2000-2020. Herausgegeben von H.-F. Wagner und G. Stein. Springer-Verlag Berlin u.a. 1999.
- Diekmann, J., Horn, M., Hrubesch, P., Praetorius, B., Wittke, F., Ziesing, H.-J. (1995): Fossile Energieträger und erneuerbare Energiequellen. Monographien des Forschungszentrums Jülich. Band 15. Jülich 1995.
- Diekmann, J. u.a. (1990): Sonnenenergie – Herausforderung für Forschung, Entwicklung und internationale Zusammenarbeit. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Arbeitsgruppe Langfristige Chancen der Sonnenenergienutzung. Forschungsbericht 1. Walter de Gruyter, Berlin, New York 1991.
- DLR, WI, ZSW, IWR, Forum (1999): Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des BMU und des /UBA. Bonn, Münster, Stuttgart, Wuppertal, Oktober 1999.
- FhG-ISI (1998): Delphi '98. Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Methoden- und Datenband. Karlsruhe Februar 1998.
- IEA/OECD (1997): Key Issues in Developing Renewables. Paris 1997.
- IEA (1999): Trends in Photovoltaic Applications in Selected IEA Countries between 1992 and 1998. Report IEA-PVPS 1-7:1999. October 1999.
- Kaltschmitt, M., Wiese, A. (Hrsg.) (1997): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 2. Auflage. Berlin u.a. 1997.
- Langniß, O. u.a. (1998): Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfrist-szenario für Deutschland. In: Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung. Forschungsverbund Sonnenenergie. Köln, April 1998. S. 7-64.
- Prognos, EWI (1999): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel, Oktober 1999.
- Rehfeldt, K. (2000): Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Stand 31.12.1999. In: DEWI-Magazin, Februar 2000.
- Wagner, E. (1999): Nutzung erneuerbarer Energien durch die Elektrizitätswirtschaft, Stand 1998. In: Elektrizitätswirtschaft 24/1999. S. 12-22.
- Ziesing, H.-J. u.a. (1999): Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2020. Politikszenerien für den Klimaschutz Band 5. Studie von DiW,

² Ein solcher Prozess ist auch schon Bestandteil der zweistufigen Befragungsmethode, wobei die Befragten ihre Ansichten ändern können, nachdem sie die Auswertung der ersten Runde zur Kenntnis genommen haben.

FhG-ISI, Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich im Auftrag des Umweltbundesamtes. Schriftenreihe des Forschungszentrums Jülich 1999.

Tabelle 6

Ergebnisse der Befragung Delphi '98 (Quelle: FhG-ISI 1998)

Ereignis/Technik	Q1: 25%	Q2: 75%	Median	Nie in %
Regen. Strom (ohne Wasserkraft) in D > 10%	2016	2026	2020	7
Solare Warmwasserbereitung 30 %	2017	2027	2021	14
PV Systemkosten < 4000 DM/kW	2012	2022	2017	4
Solar-fossile KW mit 100 MW	2010	2021	2016	4
Solartherm. betrieb. Stirlingmotoren in südl. Ländern	2011	2021	2015	5
Solarturm-KW mit Luft-/Salzkühlung	2013	2023	2018	15
A-Si-Zellen eta 15 % (> 10 a) entwickelt	2010	2019	2014	6
Dünnschicht-Zellen eta > 20 % verwendet	2009	2016	2013	1
WKA mit xMW < 2000 DM/kW	2003	2009	2005	3
Offshore WKA-Parks > 100 MW	2007	2015	2011	3
Hocheff. Biomassekonversion	2009	2019	2013	3
Biologische H ₂ -Erzeugung	2018	2028	2023	14
Biodiesel in BHKW und Motoren	2007	2017	2011	5
Wellenkraftwerke	2013	2027	2019	24
Temperaturunterschiede des Meerwassers	2019	2029	2026	34
Geothermie NTW weit verbreitet	2008	2018	2012	5
Geothermie HDR	2010	2021	2015	6
Sorptions-WP	2010	2018	2013	3
Hochtemp. Brennstoffzellen-GuD-KW eta 70 %	2012	2020	2015	3
Solare Wasser-Dissoziation	2015	2027	2020	14
Thermochem. H ₂ -Erzeugung	2015	2026	2020	9
Flächendeckende H ₂ -Versorgung	2021	2029	2027	13
H ₂ -Gasturbinen	2018	2028	2023	7
Methanol aus Abgasen und H ₂	2018	2028	2024	32
Dezentrale Brennstoffzellen (Feststoff-Polymere)	2015	2025	2020	8
Dezentrale HT-Brennstoffzellen	2014	2024	2019	2
Feststoff-Elektrolyt. Brennstoffzellen mit x*10 MW	2016	2025	2020	2
HT-Brennstoffzellen mit 200-300 MW	2017	2027	2023	7
Batterien mit hoher Energiedichte weit verbreitet	2008	2016	2012	1
Elektrolyt. H ₂ für Stromerzeugung	2016	2027	2022	10
Supraleitende Speicher im GWh-Bereich	2021	2028	2026	18
Preisgünstige NTW-Großspeicher	2013	2025	2020	7
Supraleitende Strombegrenzer	2009	2019	2013	9
Supraleitende Kabel (Transp., Verteilung)	2015	2026	2021	6
HGÜ (1000 kV) über große Distanzen	2008	2014	2010	0
Halbierung der FW-Leitungskosten	2009	2017	2012	7
Schnelle dezentr. Reserve-Vorhaltung	2006	2012	2009	1
Netzferne Hybrid-Systeme Sonne, Wind, Diesel	2006	2014	2009	0
Vernetztes Lastmanagement	2006	2011	2008	2
Internationales regen. Strom-/H ₂ -System	2018	2028	2024	17
Ost-West-HGÜ-Verbund für Solarstrom	2014	2026	2020	18
Solare Nahwärmekonzepte in Neubaugebieten	2012	2023	2017	7
Energieautarke Gebäude	2014	2026	2020	16
Solarbetrieb. WP	2007	2018	2011	4
Großflächige a-Si-Zellen eta > 20 % verwendet	2007	2016	2012	3
Mehrschicht-Solarzellen eta > 50 % verwendet	2013	2024	2019	14
Transparente Solarzellen für Fenster (Nanotechn.)	2008	2017	2013	8
Solarkraftwerke im Weltraum	2018	2030	2024	16

Die Antworten auf die Frage nach dem Zeitpunkt der jeweiligen Innovation werden als Median und Quartile dargestellt. Zusätzlich ist angegeben, welcher Anteil der Antwortenden der Meinung ist, dass es niemals zu einer Realisierung kommt.³

³ Die Angaben zu Jahresklassen sind bei der Auswertung zu exakten Jahreszahlen interpoliert worden. Dies führt für den Zeitraum „nach 2025“ allerdings zu Verzerrungen (Angaben größer 2025 sind nur als „nach 2025“ zu interpretieren).

Der Beitrag erneuerbarer Energien in zukünftigen elektrischen Versorgungssystemen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid^{1,2}, Prof. Dr.-Ing. Werner Kleinkauf², Dipl.-Ing. Martin Hoppe-Kilpper¹,
Dipl.-Ing. Michael Durstewitz¹, Dipl.-Ing. Uwe Krengel¹

¹ ISET, Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V., Kassel

² IEE, Institut für Elektrische Energietechnik, Universität Gesamthochschule Kassel

1 Einleitung

Die Bedeutung der erneuerbaren Energien für eine nachhaltige elektrische Energieversorgung findet zunehmend Anerkennung und wird durch Ausbauszenarien untermauert. Unterschiedliche Auffassungen bestehen im wesentlichen in den möglichen Beiträgen der verschiedenen regenerativen Energieträger sowie den Zeithorizonten.

Die Erfahrungen aus anderen technologischen Entwicklungsprozessen lassen darauf schließen, daß sich die Realisierung relevanter Anteile durch erneuerbare Energien über mehrere Jahrzehnte erstrecken wird. Dabei werden neue Versorgungsstrukturen entstehen, die sich durch dezentrale, d. h. verbraucher-nahe Erzeugung, auszeichnen. Die Nutzung ausgeprägter lokaler Ressourcen (z. B. Wind, Sonne, Biomasse etc.), Leistungssicherung auf unterschiedlichen Netzebenen durch Ergänzung verschiedener, unterschiedlich fluktuierender Erzeuger sowie interkontinentale Energieübertragung (Ausbau des Verbundnetzes) aus besonders ertragreichen Regionen sind dabei besonders relevant.

Am Beispiel der Windenergie und Photovoltaik soll im folgenden die Entwicklung, der derzeitige Stand sowie Trends und Optimierungspotentiale für zwei besonders aussichtsreiche Technologien aufgezeigt werden. Während die ökologische Verträglichkeit im Sinne der Nachhaltigkeit weitestgehend anerkannt ist, werden die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Nutzungstechniken sowie die gesellschaftliche Akzeptanz dieser Technologien darüber entscheiden, in welchem Maße die großen heimischen und weltweiten Potentiale dieser Energien ausgeschöpft werden können.

2 Windenergie

2.1 Anlagentechnik

Ende der 70er Jahre begann weltweit die Entwicklung der modernen Windkraftanlagentechnik in zwei sehr unterschiedlichen Leistungsbereichen. Einerseits wurden für private, zumeist landwirtschaftliche Betreiber Anlagen der 10 bis 50 kW-Klasse entwickelt und installiert. Andererseits strebten große Unternehmen Systeme der MW-Klasse an, die jedoch den Prototypstatus nicht überstanden.

Die Einführung der Anlagentechnik zu Anfang der 80er Jahre war von vielfältigen Problemen gekennzeichnet, da erprobte Berechnungsmethoden zur Systemauslegung fehlten und nicht auf Erfahrungen aus Konstruktion und Betrieb von Vorläufermodellen zurückgegriffen werden konnte. Weiterhin wurde deutlich, daß die Anlagen mit zunehmender Größe neue technische Herausforderungen mit sich bringen. [4]

Die überwiegende Zahl der derzeit auf dem Markt befindlichen Windenergieanlagen (WEA) sind Horizontalachsenturbinen mit Dreiblattrotor. Die mechanisch-elektrische Energiewandlung erfolgt typenabhängig je nach Hersteller mit Asynchrongeneratoren im nahezu drehzahlfesten Betrieb oder mit Synchrongeneratoren und Stromrichtern im drehzahlvariablen Betrieb. Die Leistungsbegrenzung erfolgt ebenfalls typenabhängig entweder passiv durch Strömungssabriß, dem Stalleffekt, oder aktiv durch Verstellung der Rotorblätter, der sogenannten Pitchregelung. [4]

Die kontinuierlich verbesserte Anlagentechnik wird an den inzwischen üblichen Verfügbarkeitswerten von über 98 Prozent deutlich, die von den marktgängigen WEA-Typen erreicht werden. Wenn diese bemerkenswert hohe Zuverlässigkeit der Anlagentechnik auch bei den Megawatt-Anlagen fortgesetzt werden kann, wird bei entsprechend größeren Nabenhöhen mit einer beachtlichen Steigerung der spezifischen Jahresenergieerträge zu rechnen sein. Weiterhin zeigen – nicht zuletzt durch verbesserte Fertigungsverfahren und die weitgehend eingeführte Serienproduktion – die Verkaufspreise von WEA eine fallende Tendenz. Die spezifischen Kosten der neuen Anlagengeneration um 1,5 MW Nennleistung liegen zur Zeit jedoch noch über den Kosten der 500 bis 600 kW-Anlagenklasse [5].

2.2 Absatz und Windstromproduktion

Forschungs- und Förderprogramme des Bundes und der Länder und besonders das Stromeinspeisungsgesetz als Mindestpreisregelung für regenerativ erzeugten Strom haben bewirkt, daß Deutschland im internationalen Vergleich mittlerweile den Spitzenplatz bei der Windenergienutzung einnimmt (s. a. Bild 1). So waren Ende 1999 in Europa etwa 9100 MW Windleistung installiert. Deutschland erreicht mit etwa 4400 MW davon knapp die Hälfte, gefolgt von Dänemark mit ca. 1800 MW und Spanien mit rund

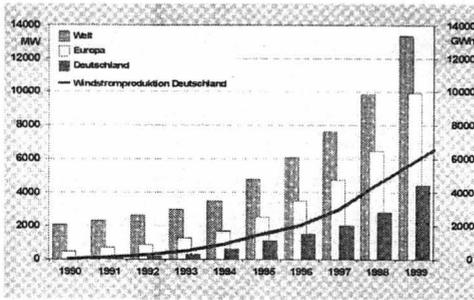


Bild 1: Entwicklung der installierten Windenergieleistung (MW) und der Stromproduktion (GWh)

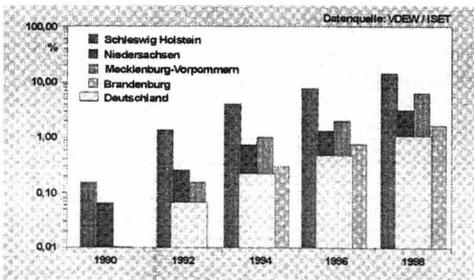


Bild 2: Entwicklung der Beiträge von Windenergie an der Stromproduktion [3]

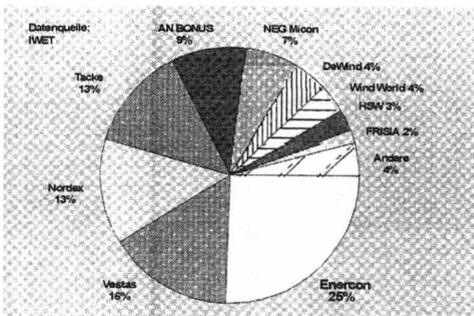


Bild 3: Marktanteile der WEA-Hersteller in 1999

1200 MW. Das Wachstum in 1999 betrug dabei durchschnittlich 41 % in Europa und 55 % in Deutschland. In diesen Ländern gelten Mindestpreisregelungen, während im windreichen Großbritannien mit einem Ausschreibungsverfahren (Mindestmengenregelung) lediglich ca. 350 MW Windleistung bis Ende 1999 errichtet werden konnte.

2.2 Stromgestehungskosten und Wirtschaftlichkeit

Die Investitionen für WEA setzen sich aus den Kosten für den üblicherweise komplett zu erhaltenden Konverter und etwa 30 % Nebenkosten für die Einrichtung des Betriebsortes und die Netzanbindung etc. zusammen. In Bild 4 sind exemplarisch für Anlagen der 0,5 MW-Klasse sowie für 1,0 MW- und 1,5 MW-Anlagen jeweils die berechneten Stromgestehungskosten über der Bezugsgröße "Jahresarbeit" dargestellt.

Bei der derzeitigen Einspeisevergütung von ca. 17,8 Pfennig je Kilowattstunde ist zur Finanzierung einer Windenergieanlage der 1,5 MW-Klasse über einen Zeitraum von 10 Jahren eine durchschnittliche Jahresarbeit von rund 3,2 GWh erforderlich. Diese Jahresproduktion, entsprechend etwa 2100 Volllaststunden, wird nur an windgünstigen Standorten, z. B. in Küstennähe, erreicht. Die Neuerrichtung von Windenergieanlagen zu den hier aufgeführten günstigen Zinsbedingungen spielte sich in den letzten Jahren jedoch überwiegend in den küstenerfernen und somit windschwächeren Regionen des Binnenlandes ab. Dort liegen die durchschnittlichen Volllaststunden deutlich niedriger. So beträgt der langjährige Mittelwert in der norddeutschen Tiefebene rund 1250 Volllaststunden, an den Mittelgebirgsstandorten werden im Durchschnitt etwa 1200 Volllaststunden erreicht. [5] Nach den bisherigen Erfahrungen mit Windenergieanlagen bis etwa 1000 kW Nennleistung werden bei zunehmender Anlagengröße günstigere Stromgestehungskosten erzielt. Diese Tendenz wird jedoch bei den Anlagentypen oberhalb von 1 MW noch nicht fortgeschrieben. Die spezifischen Stromgestehungskosten für diese Anlagenklasse liegen zur Zeit noch etwa 10 Prozent über denen der 0,5- bzw. 1,0 MW-Klasse [5], allerdings mit fallender Tendenz.

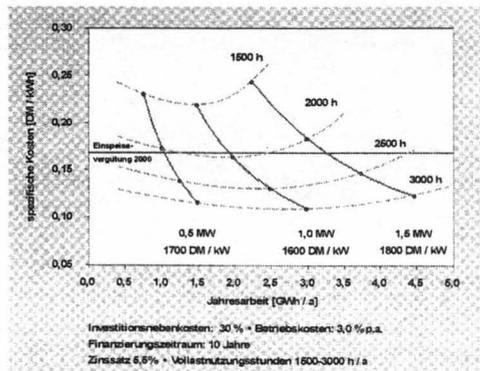


Bild 4: Stromgestehungskosten von WEA

2.3 Technikrends und Optimierungspotentiale

Bei größeren Einheiten erreichten in stärkerem Maße die Anlagen mit Pitchregelung und drehzahlvariablen Triebstrangkonzepthen, insbesondere in getriebeloser Ausführung, wachsende Marktanteile. So ist bei MW-Anlagen ein deutlicher Trend zu innovativen Konzepton mit entsprechend guten Aussichten für die anbietenden WEA-Hersteller zu erkennen.

Die vollzogenen technischen Weiterentwicklungen in den 90er Jahren, auch stimuliert durch den sich verschärfenden Wettbewerb, führten zu einer signifikanten Reduktion der Verkaufspreise für WEA in Deutschland. [5]

Obwohl Windenergieanlagen bereits heute einen hohen technischen Stand aufweisen, gibt es vor allem bei großen Anlagen noch erhebliches Entwicklungspotential. Angesichts des verstärkten Ausbaus der Windenergienutzung werden eine weitere Steigerung der Zuverlässigkeit, die Erhöhung der Lebensdauer sowie die Verringerung des Wartungsaufwands in Zukunft eine größere Rolle spielen. Verbesserte Regelungs- und Überwachungskonzepte bieten dazu einen vielversprechenden Ansatz. Neue Regelungsverfahren [11] können die mechanischen Belastungen von Anlagenkomponenten gezielt reduzieren.

Weiterhin bieten in Entwicklung befindliche Fehlerfrüherkennungssysteme (FFE) die Möglichkeit, mechanische Defekte an Windkraftanlagen rechtzeitig zu erkennen, um das Ausmaß von Schäden und die damit verbundenen Belastungen der übrigen Komponenten zu verringern. Darüber hinaus führt der Einsatz solcher Verfahren zu einer Reduktion des Wartungsaufwands und der Stillstandzeiten. Fehler in Windkraftanlagen (Rotor, Triebstrang, Turm) resultieren u. a. aus Ermüdung, Abnutzung und Effekten wie der Bauteillockerung. [12]

Insbesondere für die im großen Maßstab geplanten Offshore-Windparkprojekte wird der Einsatz von Fehlerfrüherkennungs- und Diagnosesystemen als wichtiges Instrument zur Steigerung der Verfügbarkeit gesehen.

Bei einigen Energieversorgungsunternehmen erreicht bereits heute die installierte Windleistung fast die Höhe der Minimallast der Netze und wird diese in den nächsten Jahren zum Teil sogar erheblich überschreiten. Bei dieser Entwicklung rücken Fragen zum Leistungsbeitrag der Windenergie und zu ihrem Einfluß auf die Kraftwerkseinsatzplanung zunehmend in den Vordergrund. Rechenmodelle ermöglichen die Übertragung von gemessenen Zeitverläufen der Leistung repräsentativer Windparks auf die Gesamteinspeisung von Windenergieanlagen aus einem Versorgungsgebiet (s. a. Bild 5). Damit kann einem Lastverteiler die in Echtzeit berechnete Summenganglinie zur Verfügung gestellt werden. [13]

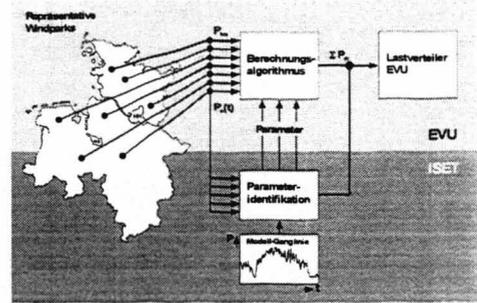


Bild 5: Online-Erfassung der Windstromspeisung repräsentativer WEA und Hochrechnung auf alle Anlagen im Versorgungsgebiet

2.4 Mittelfristige Ausbauperspektive für Deutschland

Die jährlichen Zuwachsraten liegen seit einigen Jahren bei etwa 500 MW. Unter der Voraussetzung, daß sich die derzeit positiven Rahmenbedingungen nicht grundlegend ändern, wird sich dieser Trend vermutlich auch in den kommenden Jahren prinzipiell fortsetzen. Welchen Beitrag dann die Windenergie mittelfristig zur Elektrizitätsversorgung in Deutschland leisten kann, ist in einem Szenario [5] (s. Bild 6) dargestellt. Den Abschätzungen liegen die folgenden Annahmen und Vereinfachungen zugrunde:

Für die kommenden Jahre wird von einer rückläufigen jährlichen Rate für die Anzahl neu installierter Turbinen ausgegangen. Durch den sich fortsetzenden Anstieg der Anlagenennleistung wird jedoch trotzdem insgesamt ein wachsender jährlicher Zubau erfolgen. Aufgrund der technischen Weiterentwicklungen wird eine Steigerung der durchschnittlichen Nennleistung von 0,8 auf 1,6 MW erwartet. Der Anteil der Binnenlandstandorte (d.h. der Standorte mit einer Entfernung von mehr als 10-15 km von der Küste) wird sich – wie in den zurückliegenden Jahren – weiter erhöhen. Für das Jahr 2007 wird ein Verhältnis Küste – Binnenland von 30% zu 70% erwartet. Merkliche Potentiale im Offshore-Bereich sind voraussichtlich in den nächsten fünf bis zehn Jahren noch nicht zu erschließen. Anwendungen in diesem Sektor sind auf Entwicklungen und Erfahrungen von Großanlagen angewiesen und werden in diesem Szenario nicht berücksichtigt. Die im Betrieb erreichten Vollaststunden werden zur Berechnung der WEA-Jahresarbeit als konstant angesetzt, da die erwartete Steigerung der Jahresarbeit durch technische Verbesserungen und größere Nabenhöhen eine zunehmende Erschließung von weniger windgünstigen Standorten ermöglicht. Für die zu erwartende Serienfertigung der WEA im Leistungsbereich von 1,5 bis 2,5 MW sowie

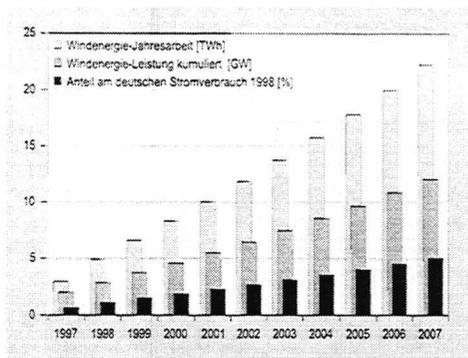


Bild 6: Szenario für den mittelfristigen Ausbau der Windenergie in Deutschland [5]

technische Weiterentwicklungen wird eine lineare Senkung der spezifischen Anlagenkosten um ca. 15 Prozent bis 2007 angesetzt.

Das Szenario zeigt als Ergebnis (s. Bild 6), daß innerhalb von zehn Jahren knapp 14000 Windenergieanlagen mit insgesamt etwa 12000 MW installierter Leistung in Deutschland in Betrieb sein werden. Die Jahresarbeit wird sukzessive von knapp 3 TWh (1997) auf 22 TWh (2007) ansteigen, so daß der Windstromanteil am insgesamt verkauften Strom (konstant bei ca. 440 TWh) bis zum Ende des Betrachtungszeitraums auf etwa 5 Prozent ansteigen wird. Das jährliche Investitionsvolumen liegt allein für die Neuerrichtung von Windkraftwerken zwischen 1,1 Milliarden DM (1997) und 2,2 Milliarden DM im Jahr 2007. Unter Annahme eines spezifischen Förderbetrages von rund 0,07 DM pro kWh Windstrom würde bei gleichmäßiger Verteilung auf den Gesamtabsatz elektrischer Energie in Deutschland eine Teuerung von 0,35 Pf/kWh bedeuten. Für einen privaten Haushalt mit rund 3000 kWh/a wäre das eine zusätzliche Belastung von ca. 10 DM pro Jahr. [5]

3 Photovoltaik

3.1 Solarzellentechnologien

Die Anfänge der Anwendung der photovoltaischen Energieversorgungstechnik liegen in der Raumfahrt in den 60er und 70er Jahren, bevor sich auch Aktivitäten im terrestrischen Bereich entwickelten.

Die direkte Wandlung solarer Strahlung in elektrische Energie ist mit verschiedenen Halbleitermaterialien möglich, die sich in ihren Wirkungsgraden, der Verfügbarkeit und Kosten der Ausgangsmaterialien, dem Produktionsaufwand, der Umweltverträglichkeit und der Langzeitstabilität ihrer Eigenschaften teilweise erheblich unterscheiden.

Leistungsmodule, die sich aus einer Vielzahl seriell und ggf. parallel geschalteter, unter Glas eingebetteter Zellen zusammensetzen und in einem Bereich von wenigen Watt bis zu einigen 100 W auf dem Markt verfügbar sind, werden derzeit überwiegend aus kristallinem Silizium gefertigt.

Mono- und multikristalline Zellen sind zuverlässige Produkte, die im Schnitt Wirkungsgrade von etwa 16 % bzw. 12 % haben und durch Sägen zu dünnen Scheiben aus gezogenen bzw. gegossenen Blöcken gewonnen werden. Nachteilig sind der hohe Materialeinsatz und die hohen Fertigungskosten. [8]

Amorphes Silizium hat einen stabilen Markt im Kleinleistungsbereich (z. B. Uhren, Taschenrechner), wo nur geringe Energien erforderlich sind. Auch mit komplexen Fertigungsverfahren lassen sich hierbei nur Wirkungsgrade zwischen 6 % und 8 % erreichen, die zudem noch nicht frei von Degradationserscheinungen sind [8]. Größere Module werden daher nur vereinzelt gefertigt und wegen ihres optischen Erscheinungsbildes bevorzugt in Fassaden eingesetzt.

3.2 Modulabsatz

Die Entwicklung des weltweiten Absatzes von Solarmodulen zeigt seit Anfang der 80er Jahre ein ständiges Wachstum, das in den letzten Jahren besonders

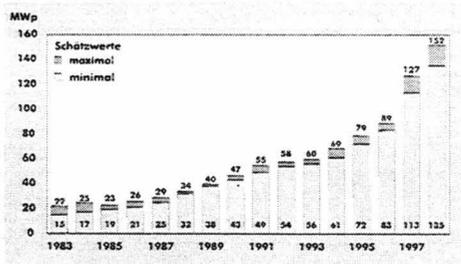


Bild 7: Entwicklung des weltweiten Absatzes von Solarzellen [8]

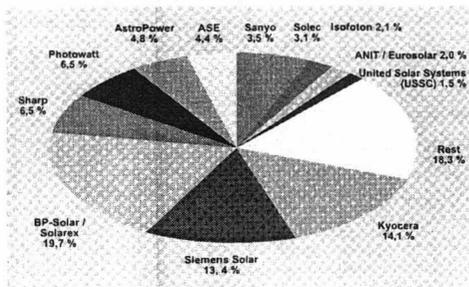


Bild 8: Marktanteile der Hersteller von Solarzellen in 1998 [8]

hohe Raten von bis zu 40 % erreichte (s. a. Bild 7). Derzeit werden jährlich rund 150 MW an Photovoltaik-Leistung installiert. Über 90 % davon in den USA, Japan und Europa. [9]

3.3 Trends und Optimierungspotentiale in der Modultechnik

Trotz innovativer Entwicklungen von Solarzellen aus anderen Materialien prognostizieren alle großen Hersteller zumindest mittelfristig noch einen Fortbestand der kristallinen Siliziumzellen. Optimierungspotentiale werden insbesondere in der Erhöhung des Wirkungsgrades und der Reduktion der Herstellungskosten bei neuen Fertigungsverfahren von dünnen Scheiben oder Bändern gesehen. [8]

Große Hoffnungen für kostengünstige Solarmodule liegen langfristig in der Dünnschichttechnik, die allerdings mehr Entwicklungsaufwand für die Verfahrens- und Produktionstechnik benötigt als dies noch vor etwa zehn Jahren eingeschätzt wurde. Amorphes Silizium hat hier einen gewissen Vorsprung. Zellen aus Cadmiumtellurid und Kupfer-Indium-Diselenid erreichen hervorragende Laborergebnisse und sind auch im Technikumsmaßstab erfolgreich. Erste Module mit diesen Zellen kommen gerade auf den Markt. Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium und farbstoffsensibilisierte Zellen haben ein hohes Entwicklungspotential, befinden sich aber noch im Laborstadium. [8]

Die Dünnschichttechniken werden langsam an Bedeutung gewinnen, wobei außer den verfahrens- und fertigungstechnischen Ansprüchen auch die notwendigen Kostenreduktionen zu realisieren sind. [8]

In der Fertigungstechnik von Modulen könnte die Realisierung der einseitigen Kontaktierung von Siliziumzellen einen höheren Automationsgrad ermöglichen. Eine große Herausforderung ist auch hier der Einsatz sehr dünner Zellen. [8]

3.4 Netzgekoppelte PV-Anlagen und Stromgestehungskosten

Die zur Einbindung von PV-Generatoren in bestehende Netze erforderlichen mechanischen und elektronischen Zusatzkomponenten sowie der Installationsaufwand können bis zu 50 % der Systemkosten ausmachen. Forschung und Entwicklung in diesem Bereich befassen sich mit Standardisierung und Normung, Ständer- und Haltesystemen, Installations- und Schutztechnik, Stromrichtern, Regelung und Betriebsführung, Auslegungswerkzeugen, Funktionssicherheit, Lebensdauer, Effizienz, Netzurückwirkungen, EMV, Kostenreduktion, Umweltauswirkungen, Recycling etc...

Gebäudeanlagen werden auf Dächern oder in Fassaden integriert in einem Leistungsbereich von knapp 1 kW bis zu einigen 10 kW und in Ausnahmefällen wie Hochhäusern, Industriebauten, Hallen und Stadien etc. bis zu 1 MW ausgeführt.

Freiflächenanlagen mit Kraftwerksstrukturen werden auch im MW-Bereich errichtet. Der Sonne nachgeführte und fokussierende Anlagen sind selten und können nur dort wirtschaftlich sein, wo große Anteile direkter Strahlung auftreten.

Während für die Energieaufbereitung in den Anfängen zunächst Stromrichter überwiegend aus der Antriebstechnik mit entsprechenden Modifikationen eingesetzt wurden, setzten sich in den 90er Jahren immer mehr Neuentwicklungen durch, die höhere Wirkungsgrade und angepaßteres Systemverhalten haben. Weitere Verbesserungen sind im wesentlichen durch innovative elektronische sowie passive Bauelemente möglich. Besonderes Augenmerk richten die Hersteller derzeit auf die Kostenreduktion bei gleichzeitiger Verbesserung der Funktionseigenschaften und Qualitätsmerkmale.

Die ideale Anpassung der Energieaufbereitung [1] an die sich laufend ändernden elektrischen Eigenschaften von Modulen ist mit Hilfe von modulintegrierten Wechselrichtern (50 - 300 W) möglich (s. a. Bild 9.C). Leider lassen sich mit den heutigen Komponenten und Stückzahlen noch nicht die erwünschten Kostenreduktionen umsetzen, so daß die verfügbaren Geräte mit 3 bis 5 DM/W relativ teuer sind. Am günstigsten (unter 1 DM/W) sind derzeit noch große Wechselrichter von einigen 100 kW für zentrale Strukturen, die allerdings aufwendige Gleichstrominstallationen und Sicherheitstechnik erfordern, keine am Zustand der einzelnen Zellen orientierte Regelung ermöglichen und Erzeugungseinbußen aufweisen (s. a. Bild 9.A). Den besten Kompriß für eine modular strukturierte, ausbaubare und kostengünstige Systemtechnik bieten derzeit sogenannte Stringwechselrichter, bei denen die Solarmodule bis zu einigen 100 V in Reihe geschaltet werden (s. a. Bild 9.B). Je nach Nennstrom der Module ergeben sich Leistungen

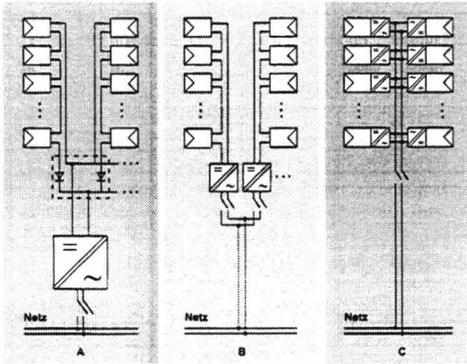


Bild 9: Strukturen netzgekoppelter PV-Anlagen mit zentralem Wechselrichter (A), Stringwechselrichtern (B) und Modulwechselrichtern (C) [1]

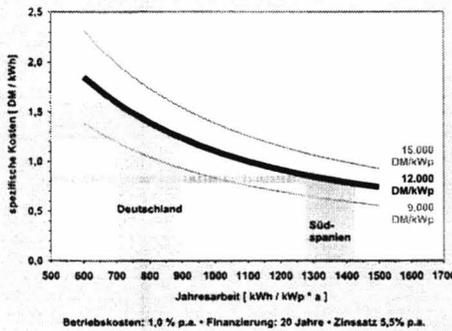


Bild 10: Stromgestehungskosten für netzgekoppelte PV-Anlagen

von etwa 700 W bis über 2 kW. Diese Kategorie ist bereits marktbeherrschend und liegt bei den Kosten zwischen 1 und gut 2 DM/W.

Die spezifischen Gesamtkosten für netzgekoppelte PV-Anlagen liegen in Deutschland derzeit etwa zwischen 12000 und 15000 DM/kWp. Unter deutschen Einstrahlungsverhältnissen läßt sich damit Energie für etwa 1,30 bis 1,60 DM/kWh bereitstellen. In sonnenreichen Regionen wie z. B. Südspanien, Süditalien, Türkei oder Griechenland ist dies bereits für die Hälfte möglich (s. a. Bild 10).

3.5 Autarke PV-Stromversorgung

Bei der Versorgung von Kleinst- und Kleinverbrauchern hat sich die Photovoltaik in den letzten Jahren erfolgreich etabliert. Uhren, Taschenrechner u. a. Kon-

sumprodukte werden in einer Vielzahl mit integrierten PV-Zellen angeboten. Mit PV-Modulen, Batterien und Laderegeln aufgebaute „Solar-Home-Systems“ für die Versorgung von Gleichstromlasten im Leistungsbereich bis ca. 100 W zählen zu den am breitesten eingeführten Anwendungen. Darüber hinaus ergeben sich dort, wo die Bereitstellung elektrischer Energie mit Hilfe von Dieselaggregaten hohe Kosten, technische Defizite und logistische Probleme aufweist, zahlreiche Anwendungsgebiete für die Versorgung von Kleinverbrauchern. Eine modular ausbaufähige Struktur [7] auf der Basis einer netzkompatiblen Wechsel- bzw. Drehstromkopplung zeigt Bild 11.

Zur Bereitstellung größerer Leistungen sind bei entsprechend günstigen Bedingungen häufig Windkraft- oder Biomasseanlagen wirtschaftlich besonders interessant.

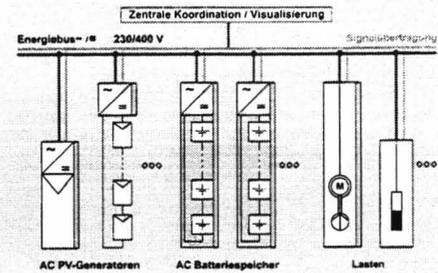


Bild 11: Ausbaufähige, autonome PV-Versorgung kleiner Leistung auf der Basis einer netzkompatiblen Wechsel- bzw. Drehstromkopplung [7]

3.6 Absatz in ausgewählten Anwendungen

Aus Erhebungen in den einzelnen Mitgliedsländern (hauptsächlich Industrienationen) ermittelt die International Energy Agency (IEA) [9] regelmäßig u. a. den Absatz von PV-Anlagen in den genannten Anwendungsbereichen (s. Bild 12). Sie deckt damit rund 50 % des Weltabsatzes ab. Autarke Anlagen finden danach überwiegend in Ländern mit geringer bzw. zerstreuter Besiedlung Verbreitung, während die Netzkopplung in Ländern mit dichter Besiedlungsstruktur vorherrscht.

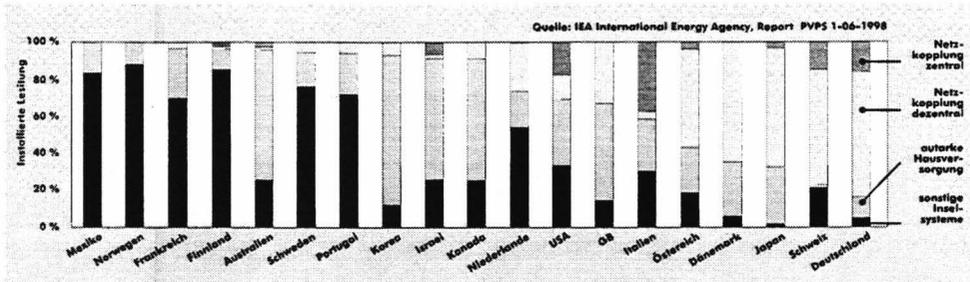


Bild 12: Anteile der 1997 in den IEA-Mitgliedsländern installierten PV-Anlagen nach Anwendungsbereichen (erfaßt ca. 50 % des weltweiten Absatzes) [9]

4 Hybridsysteme mit erneuerbaren Energien

Die vorwiegend meteorologisch bedingt schwankenden Leistungsangebote von erneuerbaren Energien lassen sich durch die Kombination verschiedener Energieträger in Hybridsystemen vergleichmäßigen. Zur Leistungssicherung bieten sich verschiedene Speichertechnologien und der Einsatz von speicherbaren, hochkonzentrierten fossilen und nachwachsenden Rohstoffen als Zusatzkomponenten an (s.a. Bild 14). [7]

Abhängig von der Versorgungsaufgabe und der Leistung lassen sich unter Berücksichtigung der üblichen Energieübertragungs- und allgemeinen Netzgestaltungsprinzipien verschiedene Energieträger mit unterschiedlichen Anteilen kombinieren (s. Bild 13). Die anwendungsorientierte Skalierung der Technik [7] in Bild 13 zeigt typische Einsatzbereiche und Übergänge. Mit geeigneten Systemstrukturen lassen sich erneuerbare Energien auf verschiedenen Spannungsebenen in bestehende Netze integrieren und insbesondere zur Elektrifizierung in netzfernen Gebieten einsetzen.

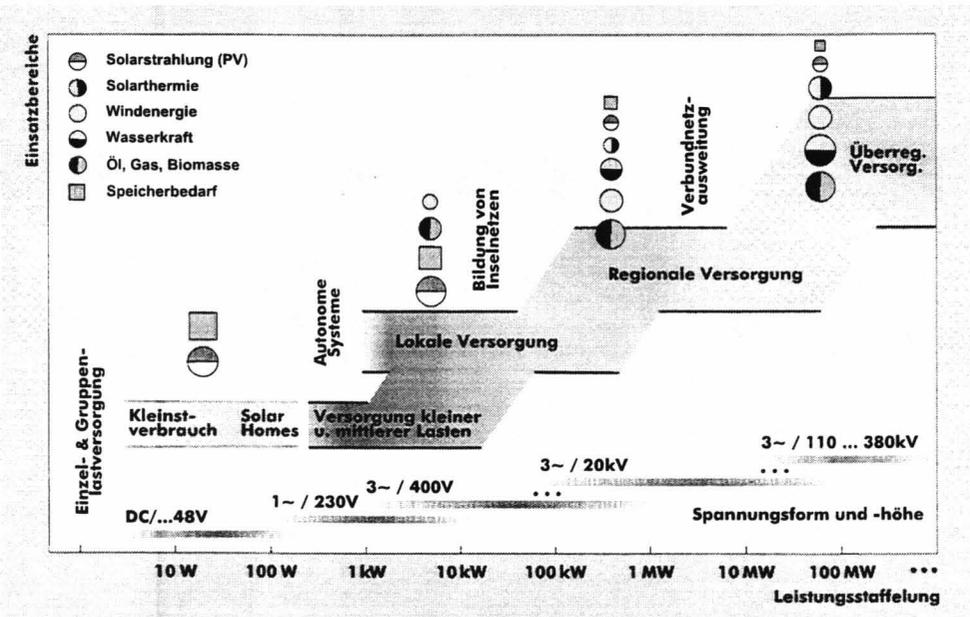


Bild 13: Techniken zur elektrischen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien – Einteilung nach Energieträgern, Leistungs- und Einsatzbereichen – [7]

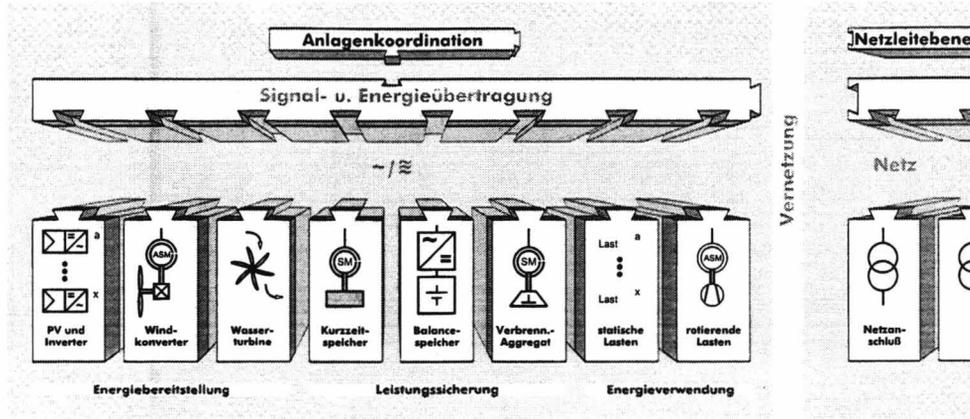


Bild 14: Modulare, ausbaufähige Hybridtechnik zur Stromversorgung mit erneuerbaren Energien – nach Funktionen geordnetes Baukastenprinzip – [7]

4.1 Modularer, funktionsgegliederter Aufbau

Der Systemaufbau beeinflusst maßgeblich die Flexibilität, Funktionstüchtigkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit von komplexen Anlagen.

Eine wesentliche Vergrößerung des Anwendungspotentials von Hybridsystemen ist funktionsbezogen zweifellos dann zu erreichen, wenn die Anlagenkonzeption auf einfache Weise sowohl Leistungserhöhung als auch Dynamikanpassung zulässt. Eine modulare Gerätetechnik, die aufgabenspezifisch gegliedert ist, z. B. Einhaltung der Parameter zur Netzbildung, dynamische oder mittelfristige Leistungssicherung usw., eröffnet auch die Möglichkeit eines schrittweisen Ausbaus der Anlage (s. Bild 14). [7]

Zur Energiebereitstellung können Wandler unterschiedlicher regenerativer Energieformen – wie z. B. Windkonverter und in beliebigen Leistungsgrößen skalierbare Photovoltaik-Generatoren – eingesetzt werden. Um die geforderte Leistungssicherung zu gewährleisten, sind Speicherkomponenten notwendig. Entsprechend ihres dynamischen Verhaltens und ihrer Speicherkapazitäten werden rotierende Massenspeicher im Sekundenbereich, Batterieaggregate im Tagesbereich und Verbrennungskraftmaschinen oder zukünftig Brennstoffzellen im mittel- und langfristigen Zeitbereich – auch für saisonübergreifende Aufgaben – eingesetzt. [7]

Der Grundansatz der hier verwendeten modularen Gestaltung von Hybridsystemen beruht auf der abschließlich parallelen Kopplung aller Komponenten nach den weltweit üblichen Wechsel-/Drehstromstandards, die als Voraussetzung für eine einfache Netzanbindung einzuhalten sind. [7]

4.2 Aufgabenspezifische Anlagenstrukturen

Hybridsysteme kleiner Leistung in Niederspannungstechnik eignen sich vorwiegend zur Versorgung netzferner Verbraucher mit geschlossener, eng abgegrenzter geographischer Struktur wie Ansiedlungen und kleine Ortschaften (s. a. Bild 13).

Wirtschaftsbetriebe wie Werkstätten und Bauernhöfe sowie gemeinschaftliche Einrichtungen wie Wasseraufbereitungs-, Kranken- und Polizeistationen stellen Inselnetz-Versorgungsziele mit einer Mindestleistung im kW-Bereich dar. Die Inselnetzversorgung umfasst auch zahlreiche Anwendungen hoher Leistung wie große Telekommunikationsstationen, Bahn-, Transportzentren, militärische Einrichtungen usw. Je nach Einsatzfall und geforderter Leistung bietet sich hier die einphasige oder dreiphasige Niederspannungstechnik an. Für die regionale, mittlere Spannungsebene bietet der Einsatz von Windkraftanlagen bis in den MW-Bereich insbesondere in Verbindung mit Gas (z. B. Biogas) betriebenen Verbrennungskraftmaschinen eine vielversprechende, umweltschonende Energieversorgung an. Während die Aufgabe der Netzbildung von den Verbrennungsaggregaten übernommen wird, können die Windkraftanlagen als Energielieferanten netzstützend arbeiten. Das Betriebsverhalten und insbesondere die Energienutzung lassen sich durch den Einsatz drehzahlvariabler Aggregate oder die Verwendung von Speichern – insbesondere im Kurzzeitbereich – optimieren. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in Gebieten mit hoher direkter Solarstrahlung durch Einbindung von solarthermischen Einheiten, z. B. als Kombi-Kraftwerke, den Einsatz fossiler Brennstoffe weiter zu senken. [7]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Deutschland hat in den vergangenen 15 Jahren sowohl in der Forschung als auch im industriellen Bereich erhebliche Anstrengungen unternommen, Technologien und Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien zu entwickeln. Dabei kommt der Systemgestaltung (z. B. Strukturierung der Anlagentechnik sowie Standardisierung und Schnittstellendefinition) große Bedeutung zu, die es insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen ermöglicht, zuverlässige Komponenten modernster Technologien kostengünstig zu produzieren und in Gesamtsysteme zu integrieren. Hier sei beispielsweise auf die Erfolge in der Entwicklung und Anwendung von Windenergieanlagen und der Systemtechnik für Photovoltaikanlagen zur Netzeinspeisung verwiesen.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [10] ist seit April 2000 in Kraft. Es löst das Stromeinspeisungsgesetz von 1991 ab und regelt die Abnahme und die Vergütung von Strom, der ausschließlich aus Wasserkraft, Windkraft, solarer Strahlungsenergie, Geothermie, Deponiegas, Klärgas, Grubengas oder aus Biomasse gewonnen wird. Wesentliche Neuerungen sind der bundesweite Ausgleich unter den verschiedenen Netzbetreibern, die Aufnahme von Erdwärme und gesteigerte Vergütungssätze für Strom aus Photovoltaik und Biomasse.

Die deutsche und europäische Industrie kann Ihre Position auf dem Gebiet der erneuerbaren Energietechnik nur weiter festigen und ausbauen, wenn der Inlandsmarkt einen signifikanten Absatz aufweist und auch der Export wesentlich intensiver angegangen wird.

Der Umfang, den regenerative Energien bei entsprechender Gestaltung der Anlagentechnik zukünftig auch zur Einspeisung in Verbundnetze leisten können, wird von großer Bedeutung sein. Neben der längst etablierten Wasserkraft mit Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen bis in den GW-Bereich werden hier vor allem die Beiträge der mit Biogas befeuerten Verbrennungskraftmaschinen und der Windkraftanlagen großer Leistung sowie der solarthermischen Großkraftwerke eine besondere Rolle spielen.

Basierend auf den gemachten Fortschritten sollten jetzt Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen auch verstärkt in Regionen Eingang finden, die aufgrund ihrer Struktur wesentlich höhere Stromgestehungskosten als Industrienationen haben und häufig auch bessere meteorologische Bedingungen bieten.

Die Bereitstellung von Wechselstrom zur Versorgung üblicher Verbraucher mit erneuerbaren Energien in netzfernen Regionen, wie z. B. in Schwellen- und Entwicklungsländern, kann allerdings nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn die Eignung

dieser dezentralen Technik vor Ort eindrucksvoll demonstriert wird. Gemeinsam mit ausgewählten Zielländern sind Rahmenbedingungen zu schaffen (Infrastruktur, Ausbildung, Programme zur Markteinführung und Finanzierung sowie zur Auswertung gewonnener Erkenntnisse usw.), die auch den Hauptträgern dieser Technologie, den kleinen und mittelständischen Unternehmen, verlässliche Perspektiven eröffnen. Nachhaltige Entwicklungspolitik und die Akquisition zukunftsreicher Märkte für Energieanlagen ließen sich dann auf eindrucksvolle Weise miteinander verbinden.

3 Literatur

- [1] W. Kleinkauf, J. Sachau, H. Hempel, Modulare Energieaufbereitung - Strategische Ansätze zur Gestaltung PV-gerechter Systemtechnik, Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 92/93, Köln-Porz 1993
- [2] J. Schmid et. al., Photovoltaik - Strom aus der Sonne, C. F. Müller Verlag, 4. Auflage, Heidelberg 1999
- [3] Wissenschaftliches Meß- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zum Breitentest "250 MW -Wind", Jahresauswertung 1994, 1995, 1996, 1997 und 1998, ISET-Schriftenreihe, Kassel
- [4] S. Heier, Windkraftanlagen im Netzbetrieb, 2. Auflage, B. G. Teubner Stuttgart, Leipzig 1996
- [5] W. Kleinkauf, M. Hoppe-Kilpper, S. Heier, M. Durstewitz, Ausbaustrategien für die Windenergienutzung in Deutschland, Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 98/99, Köln-Porz 1999
- [6] J. Schmid, F. Raptis, H. A. Aulich; Rural Electrification with Photovoltaic Hybrid Plants - State of the Art and Future Trends, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, John Wiley & Sons, Ltd. 1998
- [7] W. Kleinkauf, F. Raptis, O. Haas; Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien - Hybridanlagentechnik zur dezentralen, netzkompatiblen Stromversorgung, Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 96/97, Köln-Porz 1997
- [8] A. Räuber, Weltweite Perspektiven der Photovoltaik, 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, OTTI e.V., Regensburg 1999
- [9] H. P. Sprau, Der deutsche Photovoltaikmarkt im internationalen Vergleich, 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, OTTI e.V., Regensburg 1999
- [10] Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 13, Bonn 31.03.2000
- [11] P. Caselitz, T. Krüger, J. Petschenka, M. Reichardt, Regelung von Großwindkraftanlagen für Standorte in Mittelgebirgsanlagen, BMBF/HMUEJFG-Abschlussbericht 0329665, ISET, Kassel, 1998
- [12] P. Caselitz, J. Giebardt, M. Mevenkamp, J. Petschenka, M. Reichardt, Fehlerfrüherkennung in Windkraftanlagen, BMBF-Abschlussbericht 0329304A, ISET, Kassel, 1999
- [13] K. Rohrig, Online-Erfassung und Prognose der Stromeinspeisung, Sonne, Wind & Wärme, Nr. 2, Bielefelder Verlagsanstalt, Bielefeld 2000

Klimaprobleme – Viele Fragen, wenige Antworten?

Dr. techn. Christian Holzapfel

Forschungszentrum Jülich, STE

Das Projekt IKARUS wurde ins Leben gerufen durch die Absicht, CO₂-Emissionen zu mindern, um die Auswirkungen des Treibhauseffektes abzumildern. Speziell ist es die Aufgabe des IKARUS-Projektes, die technischen Möglichkeiten, CO₂-Emissionen zu reduzieren, aufzuzeigen und deren volkswirtschaftliche Kosten zu ermitteln.

Daher ist der aktuelle Stand der Klimaforschung, insbesondere bezüglich des Treibhauseffektes, für das Projekt von grundlegender Bedeutung.

Durch den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre – bedingt durch die Verbrennung fossiler Energieträger – wird eine globale Erwärmung von einigen Grad Celsius vorhergesagt. Diese Vorhersage stützt sich auf die Ergebnisse der Klimamodellrechnungen, mit denen die beobachtete global gemittelte Temperaturerhöhung von etwa ½ °C im letzten Jahrhundert durch den ebenfalls beobachteten CO₂-Konzentrationsanstieg von etwa 300 ppm auf 330 ppm im selben Zeitraum erklärt wird.

Dieses grobe Bild zeigt nun bei genauerer Betrachtung viele Ungereimtheiten, die nur zum Teil durch Verbesserung und Verfeinerung der Klimamodelle erklärt werden. Speziell für den Laien zeigen sich widersprüchliche Bilder. Im folgenden soll versucht werden, einige dieser – scheinbaren oder echten – Widersprüche und die Versuche, diese Widersprüche aufzuklären, kurz aufzuzeigen.

- Zunächst laufen die beiden Kurven, CO₂-Konzentrationsanstieg und globaler Temperaturanstieg, nicht immer im gleichen Sinne. Obwohl die CO₂-Konzentration gleichmäßig ansteigt, zeigt die Temperaturkurve eine Abkühlung auf der Nordhemisphäre zwischen 1940 und 1970 um etwa 0.3 °C.

Durch Berücksichtigung einer erhöhten SO_2 -Emission und der damit verbundenen verstärkten Aerosolbildung in den oberen Atmosphärenschichten konnte dieser Effekt erklärt werden. Die Aerosole reflektieren das sichtbare Sonnenlicht zurück in den Weltraum, so daß weniger Energie zur Erdoberfläche gelangt (S.H.Schneider, 1989).

- Die Messung der Temperatur der unteren Atmosphäre durch Satelliten zeigte seit Anfang der Messung im Jahre 1979 einen negativen Trend. Die Temperatur der unteren Atmosphärenschichten schien abzunehmen.

Die Ursache dieses Trends wurde jedoch inzwischen identifiziert als ein Effekt, der auf die bislang vernachlässigte Bahnveränderung des Satelliten durch die Abberufung in der zwar dünnen aber immer noch vorhandenen Atmosphäre in der Höhe der Satellitenbahn zurückzuführen ist (F.J.Wentz, M.Schabel, 1998). Die korrigierten Meßdaten zeigen nun einen positiven Trend von 0.07 K pro Dekade.

- Die meisten Gletscher in den Alpen gehen zurück, schmelzen ab auf Grund der steigenden Temperatur. Die norwegischen Gletscher nehmen jedoch zu.

Nun haben die Niederschläge in West- und Nord-Europa vor allem in den Wintermonaten im letzten Jahrhundert zugenommen (Enquete-Kommission, 1995). Auch die Klimamodelle zeigen eine Zunahme der Niederschläge in diesen Regionen (M.C.MacCracken, F.M.Luther, 1985). Nun sind gerade die Niederschläge im Winter maßgebend für das Anwachsen der Gletscher, so daß die Zunahme der norwegischen Gletscher erklärbar ist.

Im übrigen zeigen die Alpen auch eine Zunahme in der Zeit von 1965 – 1980, als die durch SO_2 -Emissionen verursachte Abkühlung stattfand (G.Patzelt, 1998).

- Das Klima zeigte auch früher Schwankungen (H.H.Lamb, 1982, C.Schönwiese, 1995). Die wärmste Phase nach der letzten Vereisungsperiode erlebten die Menschen in Europa vor etwa 8000 – 4500 Jahren. Dann kamen etliche kühle Phasen, die sich wieder mit wärmeren Phasen abwechselten. Ab 1300 n.Chr. setzte eine deutliche Abkühlung auf der Nordhemisphäre ein, die als sogenannte „Kleine Eiszeit“ in die Geschichte einging. Die Gletscher der Alpen stießen vor und erreichten ihr Maximum um 1850. Danach setzte eine allgemeine Erwärmung ein, die bis heute bis auf die kurze Abkühlungsphase zwischen 1940 und 1970 anhält. Die erste Warmphase vor 8000 Jahren läßt sich noch durch den Einfluß der Erdbahnparameter auf die Insolation erklären (Milankovitch-Theorie, A.Berger, 1988); die schnelleren Schwankungen sind damit nicht erklärbar, da die Parameter der Erdbahn sich wesentlich langsamer ändern. Vor allem sind die Ursachen der Kleinen Eiszeit noch weitgehend ungeklärt. Versuche, diese

Schwankungen mit Hilfe der Variabilität der Sonnenaktivität zu erklären, sind bislang unbefriedigend geblieben. Es gibt zwar auffallende Korrelationen zwischen der mittleren Temperatur und der Sonnenfleckenhäufigkeit (P.M.Kelly, T.M.L.Wigley, 1992, M.E.Schlesinger, N.Ramankutty, 1992, E.Friis-Christensen, K.Lassen, 1991), aber die seit 1700 gemessene Schwankung der solaren Einstrahlung reicht nur aus, um einen Teil der gemessenen Temperaturschwankung zu erklären. Es gibt allerdings Parallelitäten zwischen den Schwankungen der Sommertemperatur und dem ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre, gemessen in Jahresringen von Bäumen, die darauf hinweisen, daß die Klimaschwankungen mindestens z.T. durch Schwankungen der Sonnenaktivität ausgelöst worden sind (B.Frenzel, 1998). Hinzu kommt, daß manche Anzeichen der heutigen Erwärmungsphase weit ins 19. Jahrhundert zurück reichen, so daß der bis dahin erfolgte CO_2 -Konzentrationsanstieg noch nicht zum Tragen gekommen sein kann (A.Wagner, 1940). Es sieht eher so aus, als überlagerten sich zwei Effekte, der Temperaturanstieg nach der Kleinen Eiszeit als Teil einer natürlichen, d.h. nicht anthropogenen Klimavariabilität und der anthropogene, d.h. durch die CO_2 -Emission verursachte Temperaturanstieg.

Aus paläoklimatischen Untersuchungen meinen wir erkennen zu können, daß sich mit dem Wechsel zwischen Glazialen und Interglazialen die Klimazonen auf der Erde verlagern. In den Warmzeiten breitet sich die tropische Regenwaldzone aus, die Sahara wandert nach Norden und wird zur Savanne, in den Kaltzeiten dagegen arbeitet sich die Wüstenzone von Norden gegen den Äquator vor, der tropische Regenwaldgürtel schrumpft (M.Schwarzbach, 1974, Rh.W.Fairbridge, 1964, R.Scherhag, W.Lauer, 1982, J.E.Kutzbach, Z.Liu, 1997, B.Messerli, 1980). Da speziell die Sahelzone in diesem Grenzgebiet zwischen dem tropischen Regenwaldgürtel und der Wüste der Sahara liegt, würde das ein Austrocknen der Sahelzone in den Kaltzeiten und eine Zunahme der Niederschläge in den Warmzeiten bedeuten. Im Augenblick diskutieren wir aber eine Erwärmung durch den Treibhauseffekt und sehen dabei trotzdem ein Austrocknen der Sahelzone - die Monsune aus den tropischen Atlantikgewässern bringen trotz der Erwärmung der Meeresoberfläche nicht genügend Regen nach Norden.

Sieht man sich die Variation des Niederschlages in dieser Region genauer an, erkennt man keinen langfristigen Trend. Vor 1950 schwankte die Niederschlagsanomalie um $+50 \text{ mm/a}$ (verglichen mit dem Mittelwert 1961 – 1990). Zwischen 1950 und 1985 nahm der Niederschlag deutlich ab. Nach 1985 bis heute steigt die Niederschlagsmenge jedoch wieder (J.T.Houghton u.a. (eds.), 1996).

Die auf Grund des Treibhauseffektes prognostizierte Erwärmung erfolgt vor allem im Winter in den hohen Breiten, d.h. der Unterschied zwischen Sommer und Winter wird geringer. Im Gegensatz dazu führt der Einfluß der Erdbahnparameter in den Warmzeiten zu einer höheren Insolation im Sommer, d.h. zu wärmeren Sommermonaten und kälteren Wintermonaten. Insofern liegt ein prinzipieller Unterschied zwischen der holozänen Warmzeit vor 8000 Jahren, die durch die Größe der Deklination der Erde verursacht wurde (J.E.Kutzbach, Z.Liu, 1997), und der jetzt zu erwartenden Erwärmung durch die CO₂-Konzentrationserhöhung in der Atmosphäre vor.

Unabhängig vom Treibhauseffekt müssen wir uns auch der Tatsache bewußt werden, daß unsere fossilen Energievorräte in den nächsten Jahrhunderten zur Neige gehen. Erdöl und Erdgas werden noch in diesem Jahrhundert aufgebraucht sein, also gerade die fossilen Energieträger, die eine geringere CO₂-Emission verursachen, während unsere Kohlevorräte noch einige Jahrhunderte reichen.

Dies hat für das Projekt IKARUS und für ähnliche Projekte die Auswirkung, daß sich das Motiv von CO₂-Emissionsminderung auf die Ressourcenschonung verlagern könnte, welches sich auch auf die berechneten Zukunftsszenarien auswirken würde. Während die Szenarien, die als Randbedingung die CO₂-Emissionsminderung haben, dazu neigen, Kohle durch Erdgas zu ersetzen, würden die Szenarien, die Ressourcenschonung als Randbedingung haben, eher Erdgas und Erdöl durch Kohle substituieren.

Die regenerativen Energiequellen werden zwar an Bedeutung zunehmen, aber, solange die fossilen Energiequellen noch reichen, nur eine sekundäre Rolle spielen. Die Zukunft der Kernenergie wird sehr unterschiedlich beurteilt.

Insgesamt ist daher allgemein und besonders für das IKARUS-Projekt der Erkenntnisstand der Klimaforschung, und wie dieser sich voraussichtlich entwickeln wird, von großer Bedeutung.

Im folgenden Beitrag wird Herr Prof. Schönwiese auf diese Fragen genauer eingehen.

Literatur:

1. A.Berger, Milankovitch Theory and Climate, *Reviews of Geophysics*, 26, (4), 624 - 657 (1988)
2. M.C.MacCracken, Carbon Dioxide and Climatic Change: Background and Overview, 1985, in M.C.MacCracken, F.M.Luther (ed.), pp.1 - 23
3. M.C.MacCracken, F.M.Luther (ed.), The Potential Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide, United States Department of Energy, DOE/ER-0237, Washington, D.C., December 1985
4. Enquete – Kommission (ed.) „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Mehr Zukunft für die Erde, Nachhaltige Energiepolitik für dauerhaften Klimaschutz, *Economia Verlag*, Bonn 1995
5. R.W.Fairbridge, African Ice-Age Aridity, 1964, in A.E.M.Nairn (ed.), pp.356 - 360
6. B.Frenzel, Dendroklimatologische Beiträge zur Kenntnis der jüngeren Klimageschichte, 1998, in J.L.Lozan u.a. (ed.), pp 78 - 81
7. E.Friis-Christensen, K.Lassen, Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate, *Science* Vol. 254, 1991, pp.698 - 700
8. J.T.Houghton, L.G.Meira Filho, B.A.Callander, N.Harris, A.Kattenberg, M.Maskell (eds.), IPCC WG I. Climate Change 1995 – The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press 1996
9. P.M.Kelly, T.M.L.Wigley, *Nature* Vol. 360, Nov.1992, pp.330 - 333
10. J.E.Kutzbach, Z.Liu, Response of the African Monsoon to the Orbital Forcing and Ocean Feedbacks in the Middle Holocene, *Science* Vol. 278, Oct. 1997, pp. 440 – 443
11. H.H.Lamb, Climate, history and the modern world, Methuen & Co., New York 1982
12. J.L.Lozan, H.Graßl, P.Hupfer (ed.), Warnsignal Klima, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg 1998
13. B.Messerli, Die afrikanischen Hochgebirge und die Klimageschichte Afrikas in den letzten 20.000 Jahren, 1980, in H.Oeschger, B.Messerli, M.Svilar (ed.), pp.64 – 90
14. A.E.M.Nairn, Problems in Palaeoclimatology, Interscience Publishers, London 1964
15. H.Oeschger, B.Messerli, M.Svilar (ed.), Das Klima, Analysen und Modelle, Geschichte und Zukunft, Springer-Verlag, 1980

16. G.Patzelt, Gletscherbericht 1996/97, Mitteilungen des Oesterreichischen Alpenvereins, Nr.2, 98, Jhg. 53 (123), pp. 6 - 12
17. R.Scherhag, W.Lauer, Klimatologie, G.Westermann Verlag, Braunschweig 1982
18. M.E.Schlesinger, N.Ramankutty, Nature Vol. 360, Nov.1992, pp.328 - 330
19. S.H.Schneider, Veränderungen des Klimas, Spektrum der Wissenschaft, November 1989
20. C.D.Schönwiese, Klimaänderungen, Springer-Verlag, 1995
21. M.Schwarzbach, Das Klima der Vorzeit, F.Enke Verlag, Stuttgart 1988
22. A.Wagner, Klimaänderungen und Klimaschwankungen, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1940
23. F.J. Wentz, M.Schabel, Effects of orbital decay on satellite-derived lower-troposphere temperature trends, Nature, Vol. 394, Aug. 1998, pp. 661 - 664

Wissenschaftlicher Stand der Klimaproblematik

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese

Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt a.M.

1 Einleitung: Klima in der Diskussion

Vielleicht hätte sich die Öffentlichkeit gar nicht um die Klimaproblematik gekümmert, wären da nicht zwei brisante, miteinander gekoppelte Fakten: (a) Der Mensch und mit ihm die gesamte Biosphäre ist hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig. (b) Die Menschheit ist mehr und mehr dazu übergegangen, das Klima auch selbst zu beeinflussen. – Allerdings unterscheiden sich die Art und Weise, wie die Klimadiskussion in der Öffentlichkeit oft geführt wird, erheblich von der wissenschaftlichen: Statt der wenig hilfreichen Extrempositionen „Klimakatastrophe“ bzw. „Klimaschwindel“ geht es wissenschaftlich vielmehr um die genaue Informationserfassung der überaus vielfältigen Klimaänderungen der Vergangenheit, das möglichst weitgehende Verständnis und die Modellierung der klimawirksamen Prozesse, aufgrund von Szenarien auch unter prognostischen Aspekten, und die Frage der ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von Klimaänderungen.

Bevor nun der wissenschaftliche Sachstand des Problemkreises der Klimaänderungen kurz erörtert wird (vgl. auch Schönwiese, 1995, 1999a, 1999b), ist es wichtig, sich zunächst den Unterschied zwischen Wetter und Klima zu vergegenwärtigen; denn unserer direkten Erfahrung sind eigentlich nur die Kurzfristphänomene (Stunden, Tage) des Wetters zugänglich, während Klima stets langfristig (Jahrzehnte, Jahrhunderte usw.) integrierend betrachtet wird (Schönwiese, 1994). Das hat eine Reihe von Konsequenzen. So sind die Ursache-Wirkung-Mechanismen unterschiedlich. Zudem sind Klimaänderungen im allgemeinen klein gegenüber Wetteränderungen, aber trotzdem häufig sehr wirksam: Beispielsweise reagieren Gletscher in ihrer Flächenausdehnung kaum auf Wettervariationen, selbst wenn sie sehr heftig sind, doch langfristig und somit klimatologisch hat ein Temperaturanstieg von etwa 0,5 K/Jahrhundert die Alpengletscher bisher etwa die Hälfte ihrer Masse gekostet. Schließlich ist Träger der Klimaprozesse nicht nur die Atmosphäre, sondern das gesamte Klimasystem, das außerdem noch die Hydrosphäre (Ozean und Süßwasser

der Kontinente), die Kryosphäre (Land- und Meereis), die Pedo-/Lithosphäre (Boden und Gesteine) sowie die Biosphäre (Leben, insbesondere Vegetation) umfaßt.

2 Vergangene Klimaänderungen: Variationen in Zeit und Raum

Seit die Erde existiert, gibt es Klimaänderungen, und das wird auch in Zukunft so bleiben. Allerdings ist nach dem Ende der letzten Kaltzeit („Eiszeit“) vor 11000 bis 10000 Jahren, verbunden mit einem Anstieg der bodennahen Weltmitteltemperatur von 4 - 5 K, vgl. **Bild 1**, ein bemerkenswert stabiler Klimazustand (heutige Warmzeit, „Nacheiszeit“, Holozän) eingetreten, der langfristig und global gemittelt nur noch Fluktuationen von etwa 1 K um den Mittelwert von ca. 15 °C zugelassen hat (trotzdem mit erheblichen Auswirkungen, vgl. obiges Gletscherbeispiel; Houghton et al., 1996; Schönwiese, 1995). Von den überaus abrupten Klimaänderungen der geologischen Vergangenheit, zuletzt für den genannten Kalt-/Warmzeit-Übergang nachgewiesen, sind wir seitdem glücklicherweise verschont geblieben.

Die jüngste globale Erwärmung, hinsichtlich der bodennahen Weltmitteltemperatur in der Größenordnung von 0,5 K/Jahrhundert, vgl. **Bild 2**, erscheint unter diesen Aspekten – so lange die Ursachen nicht diskutiert werden – als nicht besonders auffregend, weil ähnliches in der Vergangenheit immer wieder eingetreten ist (auch wenn die Erwärmung im letzten Jahrhundert für das letzte Jahrtausend einmalig ist; Schönwiese, 1999a). Zudem war der genannte säkulare Erwärmungstrend von diversen kürzerfristigen Fluktuationen und Anomalien überlagert. Bei mehr regionaler Betrachtung, z.B. der Deutschland-Mitteltemperatur, vgl. **Bild 2**, weisen diese Fluktuationen und Anomalien ein so großes Ausmaß auf, daß der langfristige Trend fast dahinter verschwindet, obwohl er mit 0,9 K/Jahrhundert (1891-1998) größer als im globalen Mittel gewesen ist (Rapp, 2000; Schönwiese, 1999b).

Zu dieser zeitlichen Vielfalt der Klimaänderungen der Vergangenheit tritt noch die räumliche: So stehen, wiederum säkular und rezent betrachtet (seit ca. 1890), den maximalen Erwärmungstrends von über 2,5 K im Winter Grönlands und Ostsibiriens sommerliche Abkühlungen (allerdings nur von wenigen zehntel Grad) in den gleichen Regionen gegenüber. Ohne dies hier alles näher ausführen zu können: Klima ist variabel in Raum und Zeit, wobei langfristige Erwärmungen durchaus mit relativ kurzzeitigen Abkühlungen verknüpft sein können bzw. großräumige Erwärmungen mit regional begrenzten Abkühlungen.

Das Erscheinungsbild der Klimaänderungen der Vergangenheit wird beim Übergang auf andere Klimaelemente noch erheblich vielfältiger. Erwähnt seien hier nur die Niederschlagsvariationen der Tropen, insbesondere der Sahelzone (Houghton et al.,

1996), der systematische Niederschlagsrückgang im Mittelmeergebiet gegenüber einer winterlichen Niederschlagszunahme in Mitteleuropa (in Skandinavien ganzjährig; Schönwiese und Rapp, 1997) oder die ebenfalls systematische Zunahme von Überschwemmungs- und Sturmkatastrophen in den letzten Jahrzehnten (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 1999; vgl. auch Schönwiese, 1999a).

3 Ursachen von Klimaänderungen: Mensch contra Natur?

Noch wesentlich komplizierter als das Erscheinungsbild der Klimaänderungen ist ihre Verursachung; denn in überaus komplizierter und noch keinesfalls vollständig verstandener Art und Weise wirken verschiedene Faktoren zusammen. Die Bühne dieser multiplen Steuerung des Klimas und seiner Änderungen hat der Mensch schon vor Jahrtausenden betreten, als er im Rahmen der neolithischen Revolution Natur- in Kulturlandschaften umwandelte und insbesondere als er begann, großräumige Waldrodungen durchzuführen (z.B. im Mittelmeergebiet während der Römerzeit). Mit Beginn des Industriezeitalters hat der menschliche Einfluß auf das Klima jedoch eine neue, globale Dimension erreicht. Dabei stehen mit Recht der anthropogene „Treibhauseffekt“, nämlich die zusätzliche Emission klimawirksamer Spurengase wie CO₂ (aufgrund der Nutzung fossiler Energie, Waldrodungen u.a.) usw., sowie der ebenfalls anthropogene Sulfataerosoleffekt in Zusammenhang mit der SO₂-Emission im Blickpunkt (Houghton et al., 1996, 2000). Auf der interannuären bis säkularen Zeitskala sind aber mindestens noch die folgenden natürlichen Konkurrenzmechanismen ins Kalkül zu ziehen: explosiver Vulkanismus, Sonnenaktivität, El Niño (episodische Erwärmungen der tropischen Ozeane) und – mit regional begrenzter Wirksamkeit – Nordatlantik-Oszillation (dortige Variationen der Luftdruckgegebenheiten, die sich auf das europäische Klima auswirken; Houghton et al., 1996; Schönwiese, 1995; Grieser et al., 2000).

Eine erste Orientierung über die Wirksamkeit dieser Einflüsse erlaubt ein Vergleich der sog. Strahlungsantriebe, die angeben, wie stark dadurch der atmosphärische Strahlungs- und Energiehaushalt gestört wird (allerdings nur bei sog. externen Einflüssen, nicht bei internen Wechselwirkungen innerhalb des Klimasystems angebar). Um auch die indirekten Effekte und Rückkopplungen erfassen zu können (so weit bekannt), sind jedoch Klimamodellrechnungen unumgänglich (Houghton et al., 1996). Diese reichen von den sehr aufwendigen (pro Simulation mehrere Monate Rechenzeit) physikalisch orientierten Zirkulationsmodellen der Atmosphäre und des Ozeans (engl. coupled atmosphere-ocean general circulation models AO-GCM) über vereinfachte Energiebilanzmodelle (EBM) bis hin zu empirisch- statistischen Modellen (multiple Regressionen MRM, neuronale Netze NNM). Letztere haben den

Nachteil, den physikalischen Hintergrund der Klimaprozesse zu umgehen, jedoch den Vorteil, von der beobachteten und somit realen Klimavariabilität auszugehen und wegen der kürzeren Rechenzeiten relativ viele Einflüsse simultan behandeln zu können (Schönwiese, 1994; Walter und Schönwiese, 1999; Grieser et al., 2000).

Im Anhang sind Tabellen zu finden, die einen Überblick sowohl der anthropogenen Treibhausgasemissionen, ihrer Ursachen und resultierenden atmosphärischen Konzentrationen (Tab. A-1) als auch der Strahlungsantriebe der verschiedenen klimawirksamen Prozesse und der statistisch geschätzten Wirkung auf die bodennahe global gemittelte Lufttemperatur (Tab. A-2) erlauben. Dabei bedeuten positiver Strahlungsantrieb Erwärmung, negativer Abkühlung (mit einheitlichem Vorzeichen pro Einfluß nur im globalen Mittel). Es ist erkennbar, daß im Industriezeitalter dem anthropogenen Treibhauseffekt sowohl der höchste Strahlungsantrieb (ca. $2,5 \text{ Wm}^{-2}$) als auch der stärkste Temperatureffekt (ca. 1 K seit ca. 1850/60) zukommen, letzteres in Form eines langfristigen Trends, während die natürlichen Ursachen – vielleicht mit Ausnahme der Sonnenaktivität – wahrscheinlich nur Fluktuationen um diesen Trend herum bewirkt haben. Auch die bisher vorliegenden, überaus aufwendigen AO-GCM-Klimamodellsimulationen kommen zu diesem Ergebnis (Houghton et al., 1996, 2000), wobei bei allen diesen Berechnungen recht einheitlich bei Abzug des anthropogenen Sulfateinflusses der tatsächlich beobachtete Trend der bodennahen Weltmitteltemperatur von 0,5 K/Jahrhundert (rund 0,7 K seit 1860) herauskommt; der anthropogene Treibhauseffekt hat demnach einen Trend von etwa 0,7 K/Jahrhundert (bzw. rund 1 K seit 1860) bewirkt; vgl. jeweils Bild 4.

Auch rein empirisch-statistische Methoden führen, unter simultaner Berücksichtigung der wichtigsten natürlichen Klimafaktoren, zu solchen Ergebnissen, beispielsweise unter Verwendung neuronaler Netze; vgl. Bild 5 und Tab. A-2. Eine kürzlich veröffentlichte, ebenfalls auf Beobachtungsdaten beruhende Studie führt mit Hilfe weiterentwickelter statistischer Methoden zu dem Ergebnis, daß der menschliche Einfluß auf die globale Mitteltemperatur bei rund 80% Gesamtvarianzerklärung zu rund 60% Varianz auf dem anthropogenen Treibhauseffekt beruht und das dabei gefundene Signal von 0,7 K Temperaturerhöhung auf einem Signifikanzniveau von 99,9 % gesichert ist (Grieser et al., 2000).

Beim Übergang von der Weltmitteltemperatur zu regional differenzierter Betrachtung und zu anderen Klimatelementen geht diese Wahrscheinlichkeit allerdings immer mehr zurück; und auch die AO-GCM-Berechnungen werden dann mehr und mehr zumindest quantitativ unsicher. Folgende Klimamodell (AO-GCM) - Befunde in Zusammenhang mit dem anthropogenen Treibhauseffekt seien trotzdem hier genannt (Houghton et al., 1996, 2000):

- Erwärmung der unteren Atmosphäre, dies jedoch regional-jahreszeitlich unterschiedlich mit Maxima im subarktischen Winter; Abkühlung der Stratosphäre; Niederschlagsumverteilungen (mit u.a. Niederschlagsrückgang im Mittelmeergebiet und Zunahme im subpolaren bis polaren Bereich; in Mitteleuropa Winter niederschlagsreicher und Sommer trockener); Meeresspiegelanstieg (überwiegend wegen der thermischen Expansion des oberen Ozeans); Extremereignisse wie Hitzewellen und Dürren, Überschwemmungen, Stürme/Orkane usw. möglicherweise häufiger, im einzelnen aber sehr unsicher.

4 Konsequenzen: Zukunftsszenarien und Risiken

Voraussetzungen jeglicher Vorhersage sind das vollständige oder zumindest weitgehende Verständnis der Ursache-Wirkung-Mechanismen der Vergangenheit sowie die Prognostizierbarkeit aller potentiellen Einflußgrößen. Dies ist beim Wetter approximativ der Fall, und zwar bei Nutzung atmosphärischer Zirkulationsmodelle (A-GCM) mit einer theoretischen Obergrenze der Vorhersagbarkeit von 2 - 4 Wochen. Beim Klima ist jedoch die erste Bedingung nur sehr eingeschränkt (u.a. fragliche Rückkopplungen) und die zweite Bedingung überhaupt nicht erfüllt; beispielsweise sind künftige Vulkanausbrüche gar nicht und der Verlauf von El-Niño-Ereignissen derzeit höchstens für einige Monate vorhersagbar.

Eine Vorhersagbarkeit des Klimas – ähnlich der Wettervorhersagbarkeit – kann es somit nicht geben. Wenn dennoch von Klimavorhersagen gesprochen wird, so handelt sich um eine ganz andere Art (sog. zweite Art) der Vorhersage: Aus dem Zusammenspiel der eigentlich multiplen Klimasteuerung wird ein dominanter Faktor, i.a. der anthropogene Treibhausgaseneffekt, ausgewählt, in alternativen Szenarien von Treibhausgasemissionen vorgegeben (z.B. für die nächsten 30 oder 100 Jahre) und daraus die Statistik der Klimareaktion darauf berechnet. Dabei bedeutet Statistik, daß man zwar nicht in Lage ist, abzuschätzen, wie Temperatur, Niederschlag, Wind usw. an einem bestimmten Tag und einem bestimmten Ort in irgendeinem Jahr der Zukunft wahrscheinlich aussehen werden, aber über z.B. die jahreszeitliche bzw. jährliche Mitteltemperatur oder die über das Jahr integrierte Sturmhäufigkeit Vermutungen anstellen kann, und dies nicht nur mit Hilfe eines AO-GCM, sondern einer ganzen Hierarchie von Klimamodellen (Schönwiese, 1994; 1995).

Auf diesem Weg ist nun extrapoliert worden (Houghton et al., 1996, 2000), daß die bodennahe Weltmitteltemperatur gegenüber 1990 aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes bis zum Jahr 2030 um weitere etwa 0,5 - 1 K und bis 2100 um ca. 1,5 bis 3,5 K ansteigen könnte (abzüglich des anthropogenen Sulfataerosoleffekts um ca. 1-3 K), die ebenfalls global gemittelte Meeresspiegelhöhe bis 2100 um etwa

0,2 - 1 m (abzüglich des anthropogenen Sulfataerosoleffekts 0,2 - 0,8 m). Qualitativ tauchen in diesen Berechnungen die gleichen Signale auf, wie sie am Ende von Abschnitt 3 zusammenfassend genannt worden sind. Wie beim Verständnis der Vergangenheit sind dabei leider die eigentlich risikoreichen Entwicklungen wie z.B. die Umverteilung der Niederschläge (einerseits Dürren, andererseits Überschwemmungen) oder die Sturmhäufigkeit sehr unsicher, insbesondere regional.

Zweifellos stellen solche möglichen anthropogenen Klimaänderungen, zumal sie das Ausmaß der letzten 10 000 Jahre deutlich überschreiten und zudem in relativ kurzer Zeit eintreten könnten, ein großes Risiko dar. Dabei darf angesichts der Unsicherheiten der Klimavorhersage nicht übersehen werden, daß die Klimadiagnostik so weit vorangekommen ist, daß eine erhebliche anthropogene Klimabeeinflussung in der Vergangenheit kaum mehr bezweifelt werden kann. Wissenschaftlich gesehen ist vor allem darauf die Forderung nach weltweiten, effektiven und baldigen Klimaschutzmaßnahmen zu begründen (Brauch, 1996), die über die sehr unverbindliche Formulierung der Klimarahmenkonvention (UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung, Rio de Janeiro, 1992) wesentlich hinaus kommen sollte. Diesem Ziel dienen, wenn auch mit bisher zaghaften Schritten, die derzeit im jährlichen Turnus stattfindenden sog. Vertragsstaatenkonferenzen (u.a. 1995 Berlin, 1997 Kyoto, 1999 Bonn; vgl. Umweltbundesamt, 1993ff; siehe auch Ergänzung unten).

Literaturhinweise

Brauch, H.G. (Hrsg.), 1996: Klimapolitik. Naturwissenschaftliche Grundlagen, internationale Regimebildung und Konflikte, ökonomische Analysen sowie nationale Problemerkennung und Politikumsetzung. Springer, Berlin, 450 S.

Deutscher Bundestag, Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ (Hrsg.), 1992: Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. *Economica* / C.F. Müller, Bonn, 238 S.

Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (eds.), 1996: *Climate Change 1995. The Science of Climate Change* (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Second Assessment Report). Univ. Press, Cambridge, 572pp..

Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P. (Hrsg.): *Warnsignal Klima. Wiss. Auswert. + GEO*, Hamburg, 464 S. (darin Beitrag Höper. H.: Klimaveränderungen durch Landnutzungsänderungen, S. 144ff.)

Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Redaktion Berz, G.), 1999: *Topics 2000. Naturkatastrophen - Stand der Dinge*. Eigenverlag, München, 124 S.

Rapp, J., 2000: *Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland*. Dissertation, Inst. Meteorol. Univ. Frankfurt a.M., 145 S.

Schönwiese, C.-D., 1994: *Klimatologie*. Ulmer (UTB), Stuttgart, 436 S.

Schönwiese, C.-D., 1995: *Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen*. Springer, Berlin, 224 S.

Schönwiese, C.-D., 1999a: Das Klima der jüngeren Vergangenheit. Physik uns. Zeit Jg. 30, 94-101.

Schönwiese, C.-D., 1999b: Weltklima im Wandel - Indizien der Vergangenheit, Modelle der Zukunft. Luft- und Kältetechnik, Heft 1/99, S. 10-17.

Schönwiese, C.-D., Rapp, J., 1997: Climate Trend Atlas of Europe - Based on Observations 1891-1990. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 228 pp.

Walter, A., Schönwiese, C.-D., 1998: Simulation of global and hemispheric temperature variations and signal detection studies using neural networks. Met. Z., N.F., Vol. 7, 171-180.

Umweltbundesamt, 1993 ff.: Jahresberichte; Schriftenreihe 'Umweltpolitik'. Eigenverlag, Berlin (wechselnde Themen und Umfänge).

INTERNET-Adresse des Autors: <http://www.rz.uni-frankfurt.de/IMGF/meteor/klima>

#

Ergänzung: Der Kerntext der UN-Klimarahmenkonvention (KRK, engl. Framework Convention on Climate Change, FCCC) lautet:

„Das Endziel dieses Übereinkommens ... ist es, ... die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraumes erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.“ (UN Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 1992)

Anmerkung dazu: Die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“ (1992) hat daraus allein beim CO₂ für die Industrieländer eine Emissionsreduktionsforderung gegenüber 1987 bis 2005 um mindestens 20% und bis 2050 um mindestens 80% abgeleitet. Derzeit (aufgrund der 3. Vertragsstaatenkonferenz zur KRK, Kyoto, 1997) wird weltweit gegenüber 1990 bis 2008/2012 lediglich eine Minderung um 5,2% angestrebt (CO₂ und weitere Treibhausgase), in Deutschland gegenüber früher 25% bis 2005 (1992, 1995) nunmehr 21% bis 2012.

Anhang

Tabelle A-1: Anthropogene Emissionen (pro Jahr, Bezug 1998), atmosphärische Konzentrationen (Bezug 1998, vorindustrielle Werte, ca. 1800, in Klammern) und relative Beiträge zum natürlichen bzw. anthropogenen (Zeithorizont 100 Jahre) "Treibhauseffekt" der wichtigsten klimawirksamen Spurengase (FCKW = Fluorchlorkohlenwasserstoffe, F12 = CF_2Cl_2 ; nach IPCC, Houghton et al., 1996, ergänzt).

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emissionen	Atmosphärische Konzentrationen	Treibh. natürlich	Treibh. anthrop.
Kohlendioxid, CO_2	29 Gt a ⁻¹	367 (280) ppm	26 %	61 %
Methan, CH_4	400 Mt a ⁻¹	1,7 (0,7) ppm	2 %	15 %
FCKW	0,4 Mt a ⁻¹	F12: 0,3 (0) ppb	-	11 %
Distickstoffoxid, N_2O	15 Mt a ⁻¹	0,31 (0,28) ppm	4 %	4 %
Ozon, O_3 **	0,5 Gt a ⁻¹ (?)	30 (?) ppb	8 % *	9 % *
Wasserdampf, H_2O **	relativ gering	2,6 (2,6) %	60 %	- (indirekt)

* mit weiteren Gasen ** räumlich-zeitlich stark variabel, hier bodennahe Mittelwerte

Gt = Milliarden Tonnen, Mt = Millionen Tonnen; ppm = 10⁻⁶, ppb = 10⁻⁹ Volumenanteile; a = Jahr

Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen (nach Höper, in Lozán et al., 1998, erg.):

CO_2 : 75% fossile Energie, 20% Waldrodungen, 5% Holznutzung (Entwicklungsländer)
CH_4 : 27% fossile Energie, 23% Viehhaltung, 17% Reisanbau, 16% Abfälle (Müllhalden, Abwässer), 11% Biomasse-Verbrennung, 6% Tierexkremete
FCKW: Treibgase in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
N_2O : 23-48% Bodenbearbeitung (einschl. Düngung), 15-38% chemische Industrie, 17-23% fossile Energie, 15-19% Biomasse - Verbrennung
O_3 : indirekt über Vorläufersubstanzen wie z.B. Stickoxide (u.a. aus dem Verkehr)

Tabelle A-2: Strahlungsantriebe (+: Erwärmung, -: Abkühlung; nach IPCC, Houghton et al., 1996), vorindustriell (ca. 1850) bis heute, und zugehörige mit Hilfe statistischer Klimamodelle (neuronaler Netze) geschätzte Effekte ("Signale") der Lufttemperatur, jeweils bodennah und global gemittelt, für die angegebenen anthropogenen und natürlichen Klimafaktoren (nach Schönwiese, 1999a, 1999b; Walter und Schönwiese, 1998).

Klimafaktor	Antrieb (Wm^{-2})	Signal ($^{\circ}C$)	Signalstruktur
Treibhausgase *, TR	+ 2,1 - 2,8	0,7 - 1,3	progressiver Trend
Sulfatpartikel *, SU	- 0,3 - 0,9	0,1 - 0,5	uneinheitlicher Trend **
Kombiniert *, TR + SU	+ (1,3 - 1,7)	0,5 - 0,7	uneinheitlicher Trend
Vulkanismus (explosiv)	- max. 3 ***	0,1 - 0,2	episodisch (1-3 Jahre)
Sonnenaktivität	+ 0,1 - 0,5	0,1 - 0,3	fluktuativ (und Trend?)
El Niño (ENSO****)	+ (intern)	0,2 - 0,3	episodisch (einige Monate)

*anthropogen **verstärkt ca. 1945-1970 *** Pinatubo, 1991: 2,4; 1992: 3,2; 1993: 0,9 Wm^{-2}

**** SO = Southern Oscillation (charakteristische Luftdruckoszillation der Südhemisphäre)

Abbildungen

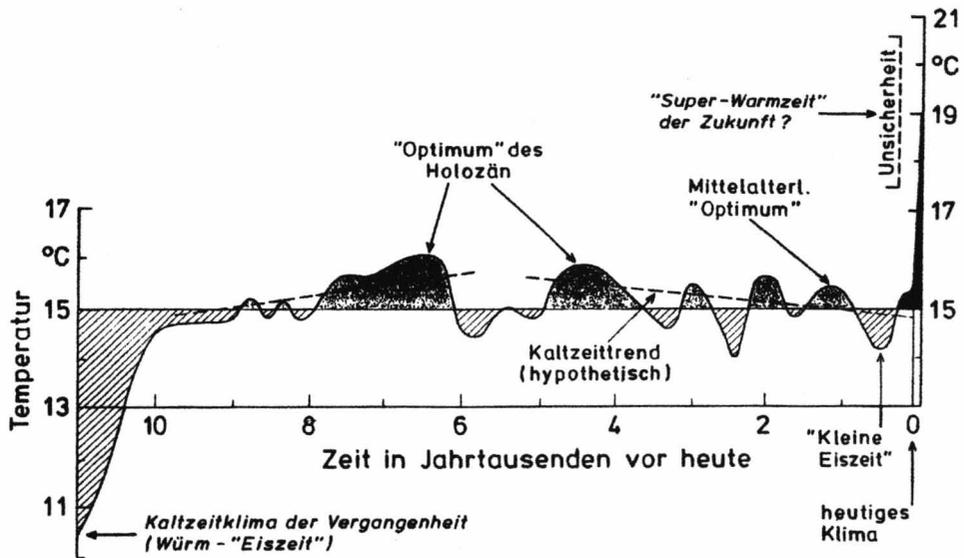


Bild 1: Rekonstruierte Variationen der nordhemisphärischen Mitteltemperatur (bodennahe Atmosphäre) seit 11000 Jahren vor heute, verglichen mit dem Szenario einer anthropogen bedingten Erwärmung innerhalb der nächsten 100 Jahre (Schönwiese, 1995).

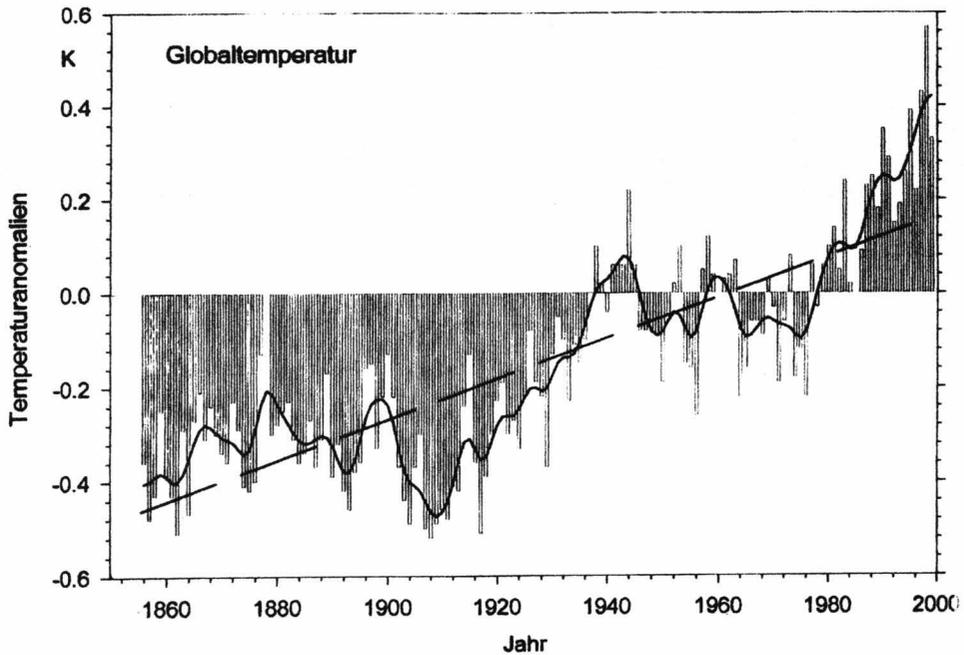


Bild 2: Jahresanomalien (Abweichungen gegenüber der Zeit 1961-1990, Säulen), zehnjährig geglättete Daten und linearer Trend (gestrichelt, 0.62 K) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur (Landgebiete und Ozeane, bodennah) 1856 - 1999. Das Jahr 1998 war nicht nur das bisher wärmste in dieser Zeit, sondern vermutlich sogar der letzten 1000 Jahre (P.D. Jones, Climatic Research Unit, University of Norwich, UK, INTERNET <http://www.cru.ac.uk>; ergänzt).

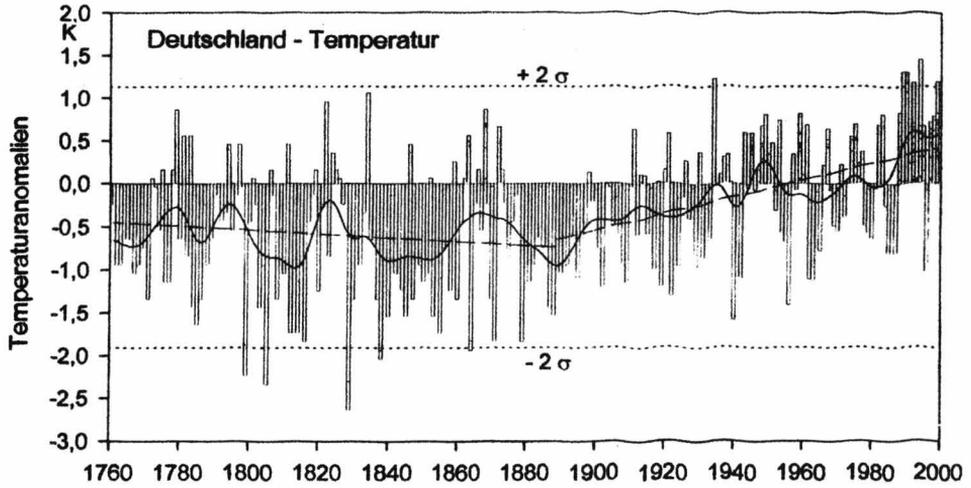


Bild 3: Ähnlich Bild 2, jedoch nur für Deutschland gemittelt, 1761 - 1999. Einem Abkühlungstrend 1761 - 1990 von 0,16 K steht ein Erwärmungstrend seit 1890 von 0,90 K gegenüber (Rapp, 2000).

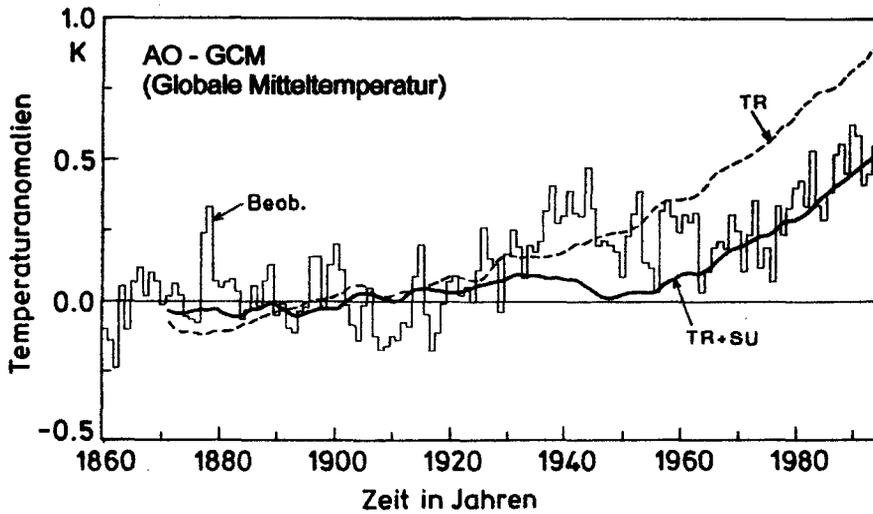


Bild 4: Klimamodellrechnung (AO-GCM, hier Hadley Center, UK) zum anthropogenen Treibhauseffekt (GHG), auch in der Kombination mit dem ebenfalls anthropogenen, aber abkühlenden Sulfateffekt (SU), globale Mitteltemperatur (bodennah), im Vergleich mit den Beobachtungsdaten (Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton et al., 1996).

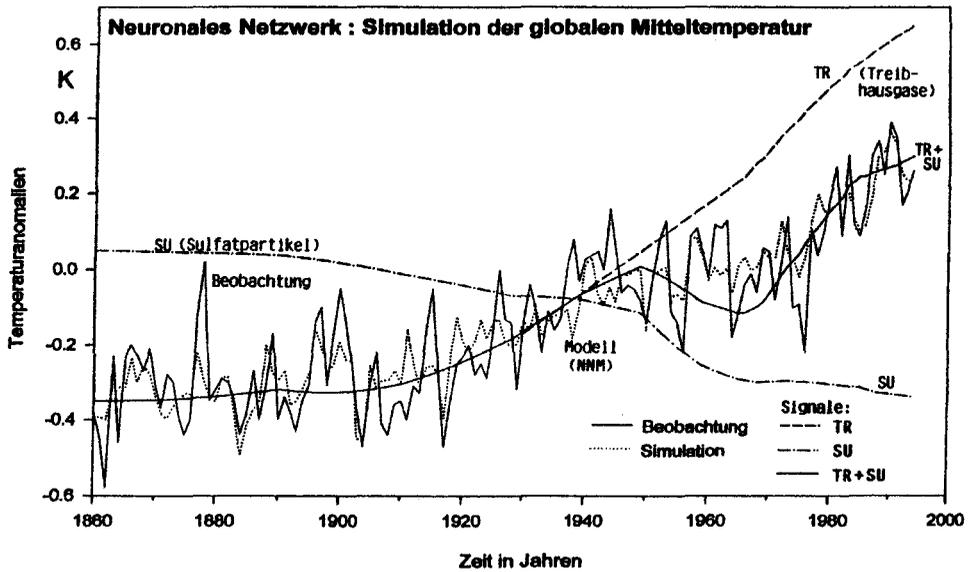


Bild 5: Ähnlich Bild 3, jedoch empirisch-statistische Abschätzung mit Hilfe neuronaler Netze (vgl. auch Tab. A-2; Walter und Schönwiese, 1998).

Querschnittstechniken

Dr.-Ing. W. Mauch, Dipl.-Ing. J. Lilleike, Dipl.-Ing. A. Saller
Forschungsstelle für Energiewirtschaft

Sektor- und branchenübergreifende Techniken zur Energieumwandlung werden als Querschnittstechniken bezeichnet. Sie werden unabhängig von der Art eines Fertigungsprozesses für Steuern, Regeln, Transportieren, Informationsvermittlung, Beleuchtung usw. in den Sektoren Industrie, Kleinverbrauch und Haushalt eingesetzt und lassen sich grundsätzlich in folgende Gruppen unterteilen:

- konventionelle Techniken, die seit sehr langer Zeit am Markt weit verbreitet sind. Darunter fallen z. B. Elektromotoren, Kompressoren, Pumpen, Ventilatoren, Heiz-, Dampfkessel, Brenner, Öfen, Trockner, Beleuchtung, Wärmetauscher, Fernseher, Radiogeräte und Telefone,
- konventionelle Techniken, die seit langer Zeit Stand der Technik sind, aber noch eine geringe Marktdurchdringung haben. Darunter fallen z. B. BHKWs, Wärmepumpen, Umrichter, Fotovoltaik- und Solaranlagen,
- neue Techniken, die erst seit kurzer Zeit den Markt erobern. Darunter fallen z.B. Handys, PCs, TFT-Monitore, DVD-Player, Router, Modems, Bildtelefone, Videokameras.
- Techniken, die in Zukunft eingesetzt werden, wie Brennstoffzellen, Hochtemperatur-supraleitende Motoren und Generatoren, Sorptionsspeicher, holographische Speicher, Spracherkennung mit ICs auf Basis neuronaler Netze, flexible LEP-Bildschirme auf Basis einer light-emitting-polymer-Technik, elektronisches Papier.

Diese Reihenfolge spiegelt auch die Entwicklung unserer Gesellschaft mit ihren Interessenschwerpunkten wider. Erst standen Techniken im Vordergrund, die für die industrielle Fertigung relevant waren, dann solche die der Komfortsteigerung dienten. Als Folge der Industrialisierung nahm im letzten Jahrhundert der Wohlstand breiter Bevölkerungsschichten immer mehr zu; die Arbeitszeit sank und das Bedürfnis nach Unterhaltung, Information und Kommunikation in der Freizeit stieg. Gleichzeitig damit rückten Fragen nach einem umweltgerechten Handeln in den Vordergrund und somit Techniken der Ressourcenschonung und des Umweltschutzes.

1 Konventionelle Techniken

Die Verbreitung der konventionellen Techniken, wie Dampfkessel und Pumpen begann mit der Industriellen Revolution um 1875. Diese Techniken werden seit Jahrzehnten optimiert und lassen somit keine signifikanten Verbesserungen mehr erwarten. In vielen Betrieben - vor allem in jenen in denen die Strukturen seit Jahrzehnten gewachsen sind - werden jedoch veraltete und oftmals fehlangepasste Techniken eingesetzt. Sie funktionieren häufig reibungslos und gemäß dem Motto „never touch a running system“ werden sie nicht ausgetauscht. Verbesserungen mit oftmals nennenswerten Energieeinsparungen könnten gerade hier durch Austausch, optimierte Auslegung und Regelung erzielt werden.

Die klassischen Informations- und Kommunikationstechniken, wie Telefon, Radio (in Deutschland ab 1923) und Fernsehen (ab 1952) existieren schon lange auf dem Markt. Aufgrund ihrer relativ kurzen Nutzungsdauer von normalerweise 10 Jahre und weniger wurde in vielen Bereichen die veraltete Analogtechnik durch neue, effizientere Techniken ersetzt.

Daneben gibt es Anlagen, die zwar seit langer Zeit Stand der Technik sind, sich aber aus Kostengründen nicht durchgesetzt haben. Dazu gehören z. B. BHKWs und Wärmepumpen, die vereinzelt schon seit mehr als 70 Jahren eingesetzt werden, aber erst in letzter Zeit eine größere Verbreitung erfahren. Umweltaspekte und staatliche Förderprogramme führen nach und nach zu einem breiteren Einsatz dieser Techniken. Hier sei die Fotovoltaik genannt, die ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt wurde, sie findet inzwischen vor allem aufgrund von Fördermaßnahmen eine großflächige Verbreitung.

Für die Vorschau auf das Jahr 2030 wird in Abschnitt 2 vor allem der Einfluss neuer Techniken diskutiert.

2 Neue Techniken

Entwicklung der Bestandszahlen

Die **Abbildungen 1 und 2** zeigen am Beispiel ausgewählter Geräte der Querschnittstechnik „Information und Kommunikation“ die Entwicklung der Bestandszahlen und der Gerätesättigung für den Sektor Haushalte ab 1985 bis zum Jahr 2010. Die Sprünge mancher Graphen in den beiden Diagrammen im Jahr 1990, also nach der Wiedervereinigung, resultieren aus der veränderten Anzahl der Haushalte und ihrer unterschiedlichen Ausstattung. /1/; /2/

Seit Ende der 80er Jahre hat sich die Informationstechnik immer rascher und in immer mehr Bereichen der Gesellschaft verbreitet. Befand sich noch 1985 in nur wenigen Büros ein Computer, so sind PCs aus dem heutigen Büroalltag kaum mehr

wegzudenken. Auch der private Bereich ist von dieser Entwicklung längst erfasst. Inzwischen gibt es in mindestens jedem zweiten Haushalt einen PC (mit Monitor). Gegen Ende 2000 ist damit zu rechnen, dass in zwei von drei Haushalten der Computer Einzug gehalten hat. In jedem fünften Haushalt wird es zusätzlich noch ein Faxgerät geben. Bei diesen Geräten ist zu erwarten, dass in den nächsten 10 Jahren eine Sättigung weit über 100 % in den Privathaushalten erreicht wird.

Bei Geräten aus der Unterhaltungsindustrie bewegen sich die Sättigungszahlen im Bereich zwischen 60 % und 100 %, bei den Fernsehern wurde die Schwelle von über 100 % schon vor mehr als 15 Jahren überschritten. Hier ist mit einer weiteren Zunahme an Geräten in den Haushalten zu rechnen, die Steigerungsraten sind jedoch bei weitem nicht so hoch wie bei den EDV-Geräten.

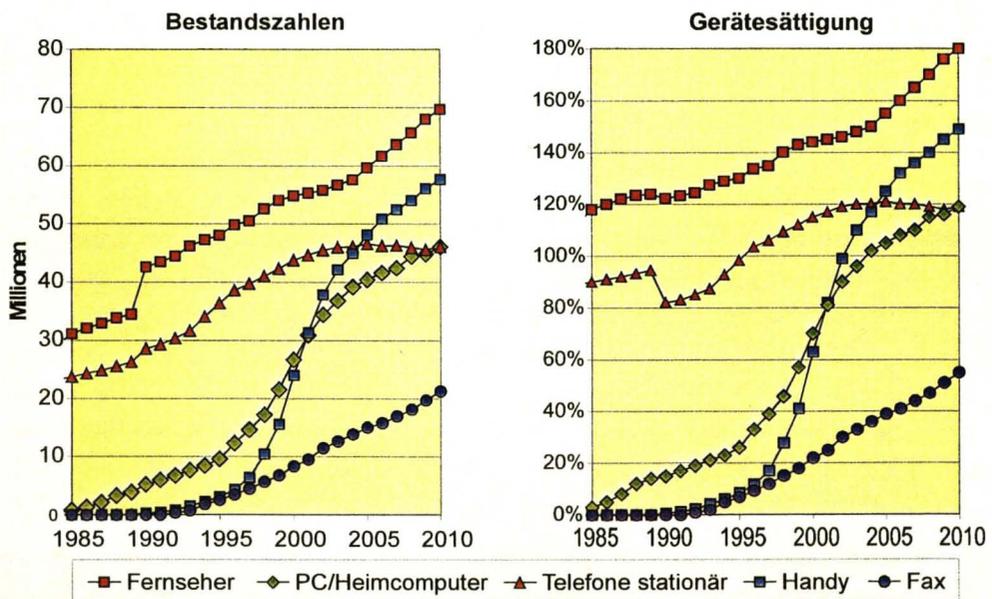


Abbildung 1 und 2: Gerätebestand und Gerätesättigung im Sektor Haushalte

Für die nächsten Jahre ist der größte Boom jedoch im Bereich der Telekommunikation zu erwarten, speziell auf dem Handy-Markt, aber auch bei den Anrufbeantwortern und Faxgeräten. Während die Sättigungsrate für Handys im Sektor Haushalte vor fünf Jahren noch unter 10 % lag ist gegen Ende 2000 mit einem Bestand von über 20 Millionen Geräten zu rechnen und damit ein Sättigungsgrad von mehr als 60 % erreicht. Es ist davon auszugehen, dass die Sättigungsrate bis 2010 weit über 100 % steigt, da bis zu diesem Zeitpunkt zwei von drei Deutschen ein Handy nutzen werden.

Einschneidende Veränderungen gibt es in der Computertechnologie auch im Bereich der Informationsspeicherung. War 1989 noch eine 20 MB Festplatte das Maß aller

Dinge, so gehört heute eine 20.000 MB Festplatte zur Minimalausstattung bei neu erworbenen Geräten. In Zukunft wird die heutige Festplatten-, CD-ROM- oder DVD-Technologie durch holographische Speicher abgelöst werden, deren Speicherkapazität beim 1600-fachen der CD-ROMs liegen wird. Auch die Prozessorleistung stieg rasant an. War 1989 noch ein PC mit 12 MHz Tactfrequenz und 640 kB Arbeitsspeicher Standard, so sind es heute 600 – 800 MHz. Ein heutiger PC hat in etwa die Rechenleistung eines Cray von 1990. Die Rechenleistung verdoppelte sich in der Vergangenheit alle 15 – 18 Monate und sie wird sich auch in den nächsten 20 Jahren in ähnlicher Weise weiterentwickeln.

Diese Aspekte sind Gründe für einen Fortgang dieser Entwicklung auf dem EDV-Sektor, so dass auch im Bereich der mobilen Kleincomputer (z.B. Handhelds, Organizer und Notebooks) mit großen Steigerungsraten zu rechnen ist.

Entwicklung des Energieverbrauchs

Bei den Geräten der Unterhaltungselektronik ist seit längerer Zeit ein Rückgang der Anschlussleistungen pro Gerät zu verzeichnen, auch die Leistungen im Stand-by-Betrieb gehen zurück. Die Problematik des Stand-by-Verbrauches ist erkannt und die Industrie reagiert darauf. Ob sich dadurch der Gesamtverbrauch im Sektor der Unterhaltungselektronik merklich reduzieren lässt, ist fraglich. **Abbildung 3** zeigt den abnehmenden Betriebs- und Leerbetriebsverbrauch für die Fernsehgeräte. Der Gesamtbedarf für diese Geräte wird eher wieder steigen, weil der Bestand an Geräten sich weiter erhöht und dadurch der geringe Verbrauch der einzelnen Geräte durch die größere Anzahl wieder kompensiert wird. Hier ist man von dem Ziel durch eine Senkung des Stromverbrauches den CO₂-Ausstoß um 25 % zu reduzieren noch weit entfernt.

Zudem kommen neue Gerätegruppen hinzu, beispielsweise in der EDV- und der Telekommunikationsbranche, so dass eher mit einem Anstieg des Stromverbrauchs in der Querschnittstechnik „Information und Kommunikation“ im Sektor Haushalt zu rechnen ist.

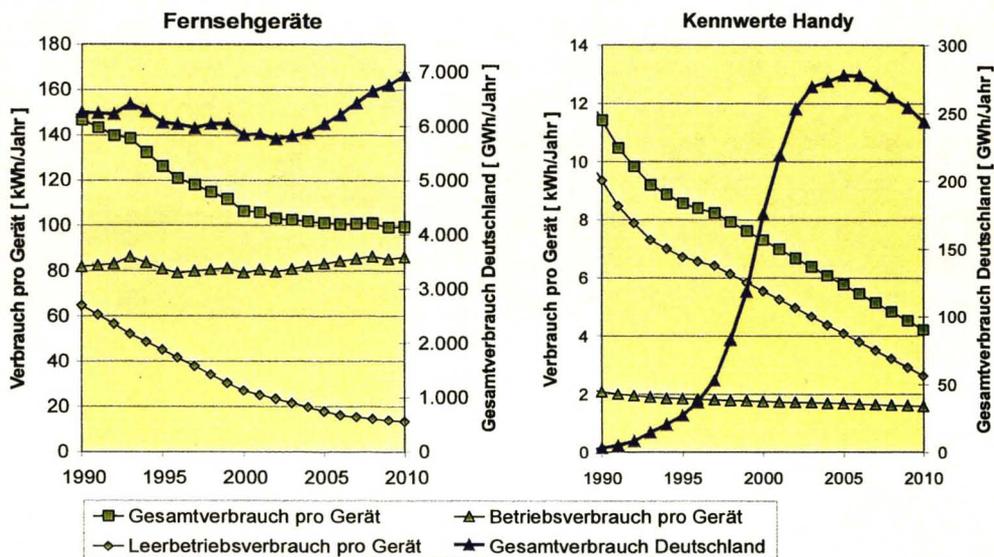


Abbildung 3 und 4: Verbrauchskennwerte von Fernsehgeräten und Handys im Sektor Haushalte

Aus **Abbildung 4** ist gut zu ersehen welche Entwicklung der Stromverbrauch im Bereich der mobilen Telekommunikation nimmt. Trotz abnehmendem Verbrauch der einzelnen Geräte (Handy inkl. Ladestation) steigt der Gesamtverbrauch für Deutschland beinahe exponentiell an. Dies ist auf die enorme Steigerung des Bestandes an Mobilfunktelefonen zurückzuführen. Der im Bild gezeigte Trend wird sicherlich noch einige Jahre anhalten. Ab 2005 könnte dann ein Rückgang des Gesamtverbrauchs im Handy-Sektor zu beobachten sein, da die Zahl der Geräte nicht mehr stärker ansteigt, der spezifische Verbrauch pro Gerät jedoch weiter abnimmt. Nicht berücksichtigt ist hier der Energieverbrauch für die ständig wachsende Zahl von Sende- und Empfangsstationen. /3/

Ähnliche Entwicklungen wie bei den Handys, jedoch mit anderen Steigerungsraten, sind auch im Bereich der PCs und anderer Geräte (Anrufbeantworter, Faxgeräte), deren Sättigungsrate sich noch unter 60 % bewegt, zu erwarten.

Die Diskussion um den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung darf jedoch nicht beim Energieverbrauch für die Gerätenutzung enden. Bei ganzheitlicher Beurteilung ist auch die Bestimmung des Kumulierten Energieaufwandes der Geräte nach der VDI Richtlinie 4600 /6/ ein wichtiges Kriterium. Die elektronischen Geräte sind Massenprodukte und können relativ kostengünstig gefertigt werden. Rasante Entwicklungen sowohl in der Kommunikations-, wie auch der EDV-Technik haben eine abnehmende Lebensdauer der Geräte zur Folge. Damit wird der Herstellungsaufwand eine Größe, die die Gesamtbilanz wesentlich beeinflusst. **Abbildung 5 und 6** zeigen sowohl den Kumulierten Energieaufwand für die Herstellung (KEA_H) als

auch den gesamten Kumulierten Energieaufwand (KEA_{ges}) eines Handys und eines Computers. Der Herstellungsaufwand liegt je nach Betriebsweise und Nutzungsdauer bei 30 bis 60 % für Computer und bei 8 bis 20 % für Handys. Hier ist vor allem das Nutzerverhalten während der Betriebsphase von entscheidender Bedeutung. Je sparsamer die Geräte in der Nutzungsphase werden und je mehr sich die Nutzungsdauer verkürzt, um so größer wird der Einfluss des KEA_H auf die Gesamtbilanz.

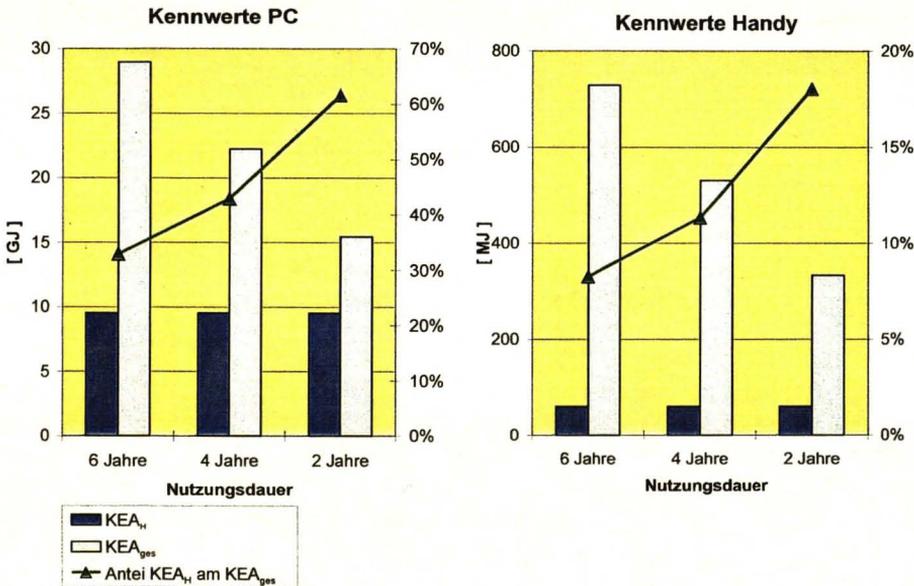


Abbildung 5 und 6: KEA Herstellung und Gesamtenergieaufwand von Handys und PCs [4]; [5]; [6]

3 Zukünftige Techniken

Die Einführung heute noch nicht verfügbarer Technologien wird ganz wesentlich die Entwicklung des Energieverbrauches der nächsten 30 Jahre beeinflussen. Im Energiesektor besitzt z. B. die Brennstoffzellentechnologie das Potential, sowohl den Verkehrssektor, als auch die stationäre, dezentrale Energieversorgung (z. B. BZ-BHKW) zu revolutionieren.

Vorteile der Brennstoffzellen sind deren hohe Stromkennzahlen, die Emissionsarmut und der modulare Aufbau. Anfangs werden die BZ-Anlagen auf reformierten fossilen Energieträgern (z. B. Erdgas) als Brenngas basieren. Langfristig ermöglicht diese Technologie jedoch die Umstellung auf regenerativ erzeugten Wasserstoff als Energieträger und somit den Eintritt in eine zukünftige Wasserstoff-Energiewirtschaft.

Eine weitere interessante Veränderung wird sich auf dem Sektor der Bildschirmtechnologie abspielen. Zunächst werden die konventionellen Monitore durch die TFT-

Querschnittstechnik Telematik

Trends für Technologien und Anwendungen

Bernd Groskopf
Deutsche Telekom AG
Informations- und Innovationsmanagement
Produkt- und Dienstestrategie
Bonn

1 Einleitung

Informations- und Kommunikationstechnologien sind in der Gesellschaft in alle Munde. Forscher und Ingenieure preisen die nahezu ins Grenzenlose wachsenden Möglichkeiten der Verbreitung und Verarbeitung von Informationen Daten und Informationen. Politiker verheißen Prosperität der Volkswirtschaften und neue Arbeitsplätze und legen Förderprogramme auf. Die Wirtschaft träumt von globalem Wachstum und die Soziologen diskutieren die gesellschaftlichen Veränderungen. In allen Bereichen finden wir ebenso die Skeptiker, die vor unübersehbaren Risiken einer Großtechnologie warnen.

Von Verheißungen, die Heinzelmännchen kämen zurück und füllten des Nachts die Kühlschränke per automatischer Bestellung im Internet auf bis zum unguuten Gefühl, daß alle Informationen überall präsent sind und uns überfluten, ist alles in der Diskussion. Wir schicken elektronische Agenten los, um genau das zu erfahren, was wir im Augenblick wissen wollen und wir haben Angst davor, daß diese Agenten überall digitale Spuren hinterlassen und unser Konsum- und Freizeitverhalten durchsichtig werden. Das Jahr 1984 ist zwar vergangen, ohne daß die bedrückende Vision von Orwell wahr geworden ist, doch vielleicht haben wir die Anfänge nur noch nicht erkannt?

Wenn wir uns mit der Entwicklung der Telematik, also der Verbindung von Telekommunikation und Informationsverarbeitung, befassen, stehen wir vor unzähligen denkbaren Zukünften. Wir tun gut daran, nicht etwa die wahrscheinlichste Zukunft zu prognostizieren, denn dann müssen wir später erklären, warum diese Vorhersage nicht eingetreten ist. Statt dessen betrachten wir die unterschiedlichen Trends aus den relevanten Einflußbereichen und entwickeln Strategien für die wichtigsten künftigen Gegebenheiten. Dazu gehört, daß wir Alternativen vordenken und die Trends in

ihren Entwicklungen beobachten, um zur richtigen Zeit die passende Verhaltensweise (Technikauswahl, Produktdesign, Portfolioentscheidung, ...) auszuwählen.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

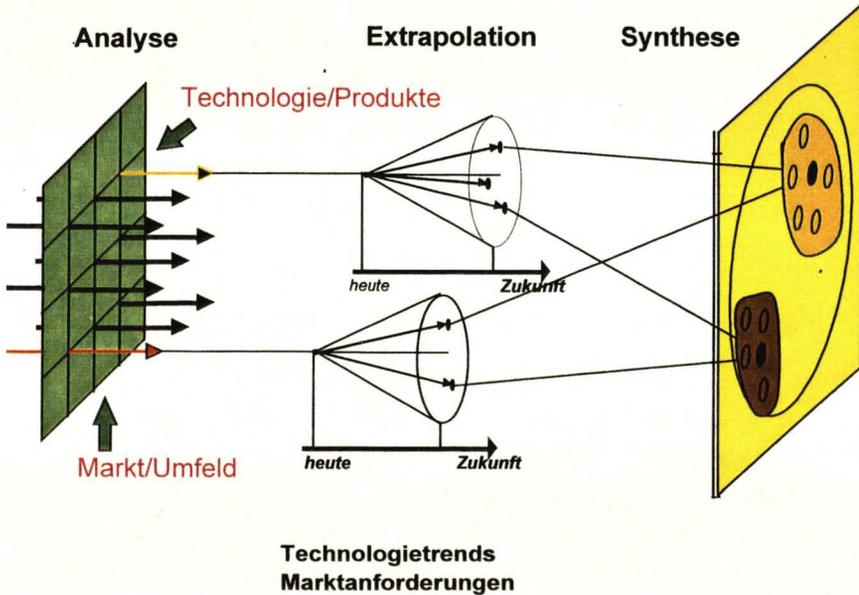


Bild 1

2 Beispiele für Anwendungsszenarien und Technologielinien in der Telematik

In den folgenden ausgewählten Beispielen wird folglich nicht die Zukunft der Telematik vorhergesagt, sondern es werden Entwicklungsmöglichkeiten aus den heute erkennbaren Trends gezeigt.

2.1 Konvergenz-Wellen in der Technologie

Das Zusammenwachsen von Telekommunikation und Informationstechnik, bezeichnet als Konvergenz, hat viele Beispiele in der Geschichte. Konvergenzen finden wir in etlichen anderen Technikbereichen und Märkten und die Entwicklungen der Zukunft werden von Konvergenzen geprägt sein.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

1. Konvergenz-Welle 2. Konvergenz-Welle 3. Konvergenz-Welle n. Konvergenz-Welle

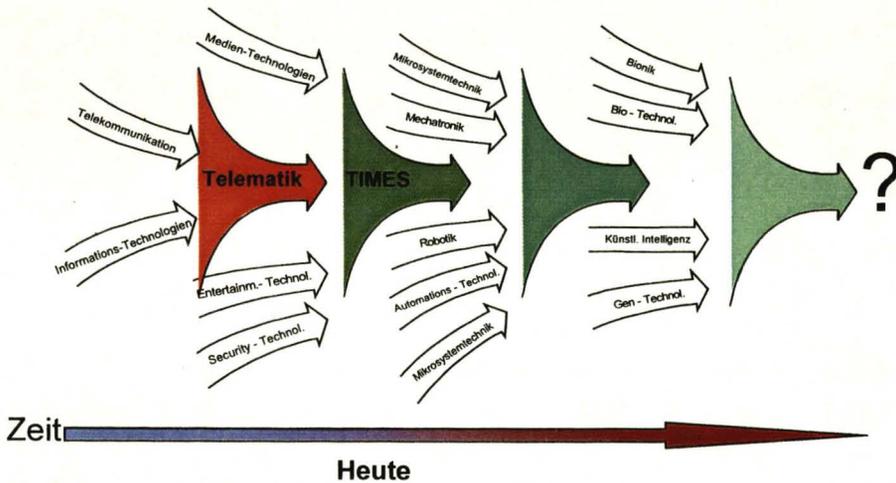


Bild 2

Ähnlich der Zyklen der industriellen Entwicklung finden wir in der Vergangenheit der Kommunikationstechnologie Abschnitte, in denen sie mit bis dahin „fremden“ Techniken zusammengewachsen ist. Daraus sind neue Anwendungen und neue Märkte entstanden. Die Zukunft wird aufgrund der Digitalisierung vieler Technik- und Wirtschaftsbereiche eher mehr Konvergenzwellen als bisher aufweisen. Je weiter die konvergierenden Techniken auseinanderliegen, um so innovativer sind die entstehenden Produkte und Dienstleistungen, um so riskanter ist aber auch die Platzierung auf den Märkten.

2.2 Das Internet hat keine Zukunft

Unsere derzeitige Computer-zentrierte Welt ist für viele Menschen eine Akzeptanzschwelle bei der Nutzung der Möglichkeiten des weltweiten Netzes.

Heute muß ich einen PC kaufen, anschließen, Programme installieren und mich dabei exakt an komplexe Prozeduren halten, die keinen Fehler verzeihen.

Wenn ich nach mühevollen Einstiegsszenarien drin bin im Internet, wühle ich mich wie eine Raupe durch einen Wust von Daten und scheinbar bedeutsamen Informationen.

Die Verpuppung des WWW steht an! Eine Puppe hat dann eine Zukunft, wenn sie ihr Puppenstadium verläßt und zum Schmetterling wird.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

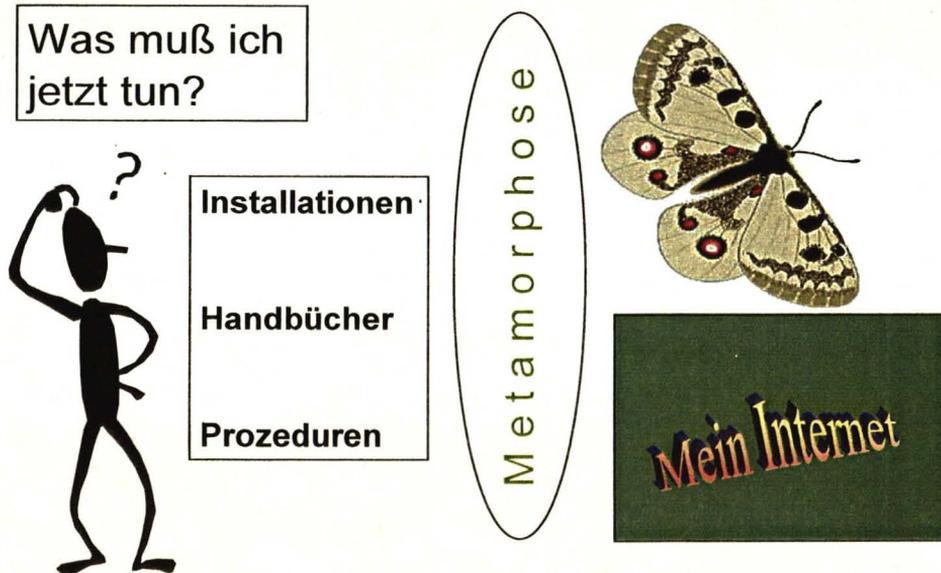


Bild 3

Der „Netzschmetterling“ ist mein Berater, meine Geschäftspartner, meine Freunde, mein Einkaufsexperte, mein ständiger Begleiter, meine Umgebung, meine Welt

Das Internet ist heute eine Zugriffsplattform für eCommerce, Informations-Brokering, Office-Anwendungen, Web-Games, Smart-Home. Der Mensch ist Mittelpunkt der Technologien. Künftig ist das Internet Teil meiner permanenten Umgebung, den ich besonderen Teil gar nicht mehr wahrnehme, weil ich ebenso Teil des Internets bin. Die Zugangsgaräte, wie sie dann auch immer aussehen, sind die dienstbaren Geister, die mich mit der Welt verbinden.

2.3 Kommunizieren mit allen Sinnen

Natürliche Kommunikation ist an die Reichweite der menschlichen Sinne gebunden. Je näher sich die Menschen sind, um so intensiver ist die Kommunikation, die außer dem gesprochenen Wort auch viele andere Eindrücke einschließt. Diese sind z.B. die sichtbare Körperhaltung und das Minenspiel, ein fester Händedruck oder der zarte

Kuß, die feine Knoblauch-Aura oder das betörende Parfum. Mit all diesen Kommunikationsbestandteile senden und empfangen Menschen Signale, die über den reinen Wortsinn hinausgehen, ja sogar die Wort-Mitteilung völlig umkehren oder ersetzen können. Wir alle wissen auch, wie schwierig es sein kann, Gefühle in Worten auszudrücken.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

- Bevorzugte Empfangskanäle der Menschen

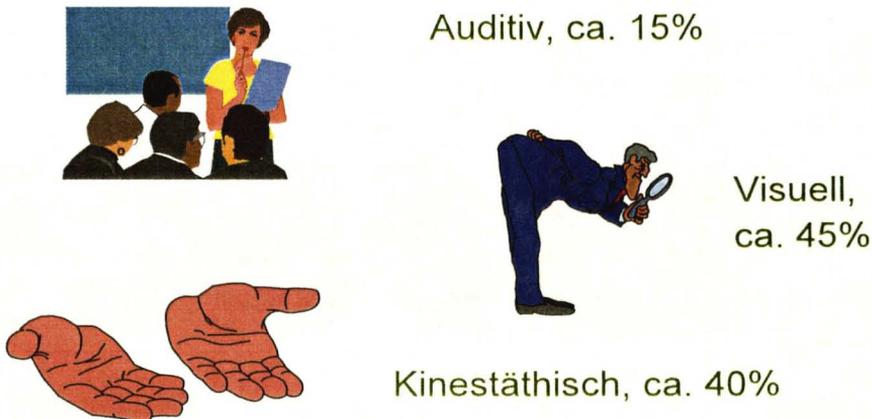


Bild 4

Technische Hilfsmittel haben die Reichweite der menschlichen Kommunikation erheblich ausweiten können, so entstand die Vorsilbe Tele- zur Kommunikation. Erkaufen mußten wir diese Verbesserung der Reichweite mit erheblichen Einschränkungen des Zeichenvorrats, dem Verzicht auf kommunikative Elemente, die nicht der reinen Buchstaben- und Ziffernübermittlung dienen. Schritt für Schritt wurden die Restriktionen weniger in dem Maße, wie mehr Bandbreite und Speichermöglichkeit für Kommunikationsinhalte preiswert bereitgestellt werden konnte.

Bereits heutige, vor allem aber künftige technologische Entwicklungen bieten uns die sprunghafte Erweiterung von Möglichkeiten in der Aufnahme, Übermittlung und Wiedergabe von Kommunikationsinhalten und von Steuerungsprozessen. Zunächst wird die in Internet-Anwendungen schon selbstverständlich Visualisierung von Kommunikationsinhalten weiter um sich greifen und die Steuerung der Prozesse durch Spra-

che üblich werden. In etwas fernerer Zukunft werden wir haptische (Fühlen) und olfaktorische (Schmecken, Riechen) Inhalte von Nachrichten auch technisch übermitteln können. Die neuen Disziplinen der (Tele-) Aktorik und Sensorik und die Nanotechnologie haben noch lange nicht alles erforscht, was möglich sein kann.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

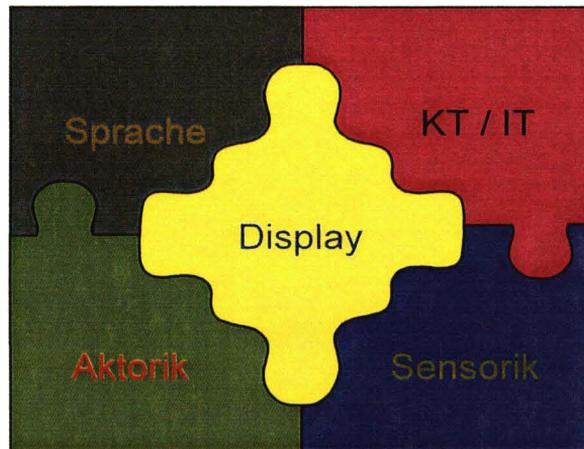


Bild 5

Sicherlich ist bei diesen denkbaren Anwendungen auch die Seite der Bedürfnisse zu sehen. Wo Menschen sich im natürlichen Umgang miteinander auch mal aus dem Weg gehen oder sich „nicht riechen“ können, dürfen und werden wir Distanzen in der Kommunikation nicht aufheben, nur weil es technisch möglich ist. Neue Anwendungsmöglichkeiten finden sich nicht nur im zwischenmenschlichen Bereich sondern in großem Umfang in Industrie- und Serviceprozessen; also die Maschine-Maschine-Kommunikation wird auch „sinnreicher“ werden.

2.4 Der Computer ist ein Telefon ist ein „Telemator“ ist viele Geräte

Ein Computer ist heute leicht zu erkennen an der Recheneinheit, der Tastatur und dem Bildschirm. Einige Computer, z.B. im Auto haben sich schon „aufgelöst“ und zeigen sich im Radiodisplay, einigen Tasten am Lenkrad und einem Chip im Zündschlüssel; wo die Recheneinheit sitzt, weiß nur noch der eingeweihte Fachmann.

Auch das Telefon hat heute noch eine typische Erscheinungsform mit Tastenfeld, Display, und Handapparat. In mobilen Geräten wachsen diese Elemente zusammen.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

Funktionen	Verbindung aufbauen	Gerät einstellen	Nachricht übermitteln	Nachrichteninhalt darstellen
Ausprägungen				
1	Durch Tasten	Menu-Aswahl	Zeitgleich	Akustisch
2	Sprach-Eingabe	Touchscreen	Zu bestimmten Zeitpunkten	Visuell
3	Cursor-Steuerung	Tasten-Code	Netzbestimmt (günstigster Preis)	Auf Datenträger

Bild 6

Bei künftigen Anwendungen werden wir eine freizügige Zuordnung von Bedienelementen und Funktionselementen haben können. Je nachdem, was wir gerade benötigen, nutzen wir die z.B. die Darstellungsart, die den angestrebten Zweck am besten erfüllt, entweder eine Diagramm-Grafik auf dem Schreibtisch-Display oder wir drehen uns im virtuellen 3-dimensionalen Spiegel im neuen Party-Outfit aus dem Katalog. Der Servicetechniker führt Arbeiten an einer komplizierten Maschine aus, wobei er die Kommunikation zum Konstrukteur über Spracheingabe steuert, denn Augen und Hände muß er ja frei haben.

Aus dem Kontext des Prozesses beim Anwender ergibt sich der Aufbau einer Kommunikationsverbindung, ohne daß er diese bewußt steuern oder gar Rufnummern suchen und mit einer Tastatur eingeben muß.

2.5 Der Punkt wird verschoben

Wie im Abschnitt 2.3 beschrieben verlangte die Technik große Einschränkungen in der Kommunikation und im gleichen Maße zwang sie den technisch kommunizierenden Menschen die Anpassung an die Maschinen und die Übermittlungsprozesse auf. Der Mensch konnte sich u.U. zum Mittel in der technisch dominierten Kommunikation degradiert fühlen.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

- *did da da did da da did da did da did da da*
- Die Einschränkungen der natürlichen Kommunikationsformen durch technische Mittel

Der Mensch ist Mittel.Punkt

Bild 7

Die bisherigen Überlegungen und Trends weisen auch auf diesem Gebiet in eine neue Richtung. Das Zauberwort heißt „Personalisierung“. Die Abhängigkeit von technischen Mitteln und Entwicklungen spielt dabei eine nicht sehr bedeutende Rolle. Aber die in den Trends beschriebenen technischen Möglichkeiten und vor allem die phantasievollen Ansätze der Dienstgestaltung rücken den Menschen als Anwender tatsächlich wieder in den Mittelpunkt. Auch im Massenmarkt kann jeder Nutzer das Gefühl der persönlich gestalteten Prozesse und Inhalte haben und damit einen realen persönlichen Nutzen erzeugen.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik

- *did da da did da da did da did da did da da*
- Die Einschränkungen der natürlichen Kommunikationsformen durch technische Mittel
künftig:
- *Sprachsteuerung: „Wähle: Telekom-Service“*
Der Trend zur naturähnlichen Kommunikation mit Hilfe innovativer Technologien

Der Mensch ist Mittelpunkt.com

Bild 8

Der Bezug ist dann nicht mehr die technische Bedienung sondern die Einbindung der Kommunikation in die Lebenswelt, den Lebensstil und die Lebenssituation. Die Kommunikationstechnologie der Zukunft versetzt auch Anbieter in die Lage, Ihr Publikum in der jeweiligen Lebenssituation zu bedienen, zu helfen, zu Diensten zu sein. Insofern dürfen wir auf eine Belebung des Dienstleistungsgedankens hoffen. Die technischen Möglichkeiten werden wir haben, die Bereitschaft zu Diensten zu sein und Dienstleistungen anzunehmen muß von den Nutzern beider Seiten kommen.

3 Zusammenfassung, Ausblick

Die ausgewählten Beispiele stehen in mehrfacher Beziehung zueinander. Andere Beispiele wären ebenso untereinander verbunden gewesen. Nicht alle dieser Beziehungen müssen in der künftigen Telematikwelt genutzt werden, auch wird es Verbindungen geben, an die wir heute noch nicht gedacht haben.

Jede der Anwendungen mit den zur Realisierung erforderlichen Technologien wird in der Zukunft dann Erfolg haben, wenn damit ein deutlicher Nutzen für die Anwender verbunden ist.

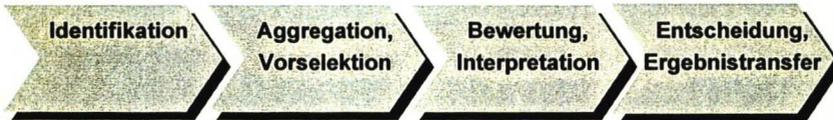
Die Treiber für neue Formen der Telematik sind veränderte und neue Bedürfnisse z. B. aus den Arbeitsprozessen in der Wirtschaft oder aus dem persönlichen Verhalten im Umgang der Menschen untereinander und bei der Gestaltung der Freizeit. Die Technologien sind dabei einerseits Mittel zur Realisierung von Funktionen, die diese Bedürfnisse erfüllen können, andererseits Befähiger von neuen Möglichkeiten, aus denen heraus Bedürfnisse geweckt werden.

Wie jede Technik, die Wirkung und Reichweite der menschlichen Sinne und Muskelkraft verstärkt, benötigt auch die Kommunikationstechnik Energie. Der technologische Fortschritt hat im Laufe der Jahre dazu geführt, daß heute weniger Energie benötigt wird, um 10.000 Gespräche zwischen Kontinenten zu übertragen als vor einigen Jahrzehnten noch die handvermittelte Zentrale eines Ortsnetzes verbrauchte. Andererseits haben die rasante Verbreitung und die explosionsartig gestiegene Vielfalt die Zahl der Energieverbraucher exponentiell ansteigen lassen. Der Wunsch nach Mobilität erfordert die Energieversorgung der Geräte mit Sekundär-Elementen, die zwar flexibel einsetzbar sind, aber schlechte Wirkungsgrade aufweisen. Das führt insgesamt dazu, daß der Energieverbrauch für die Kommunikation einen deutlichen Teil unseres Gesamtenergieverbrauchs erfordert. Geschickte technische Lösungen können die Geräte im Sinne des Energiebedarfs ökonomischer gestalten; die Einspareffekte werden sich jedoch vermutlich in derselben Größenordnung wie das weitere Wachstum der Anwendungsmöglichkeiten bewegen.

Über die Energiebilanz der Kommunikationstechnologie nachdenken heißt unbedingt außer dem Energiebedarf der Geräte auch die Wirkung der mit ihr gestalteten Anwendungen und Dienste ins Kalkül ziehen. Durch geschickten Einsatz der Technik und ihrer Möglichkeiten können wir energieaufwendigere Verfahren substituieren oder Prozesse energieökonomischer gestalten. Denkbar ist der Ersatz vieler Geschäftsreisen durch Telekonferenzen mit gleichzeitiger Dokumentenbearbeitung ebenso wie beim Internet-Einkauf die Optimierung logistischer Prozesse zur Reduzierung von Transportkilometern. Wir stellen uns die Telesteuerung von Maschinen und Anlagen vor, bei denen Servicetechniker schnell und wirksam Fehler beheben können und dabei nicht nach vielen Kilometern Anfahrt feststellen, daß das passende Werkzeug fehlt. Bereits heute können wir uns entscheiden, ob wir eine Nachricht „nur“ elektronisch anschauen und speichern möchten oder ob der Drucker in Betrieb gesetzt werden soll. Die technischen Möglichkeiten der künftigen Kommunikation erlauben uns nicht nur, den Energieverbrauch vieler Prozesse zu verringern, sondern ermöglichen uns selbst die Entscheidung über mehr oder weniger energieaufwendige Verfahren.

Um auf den Märkten der Zukunft nicht nur mitzuhalten, sondern gestaltend mitzuwirken, ist die Beobachtung der zukunftsweisenden Entwicklungen sowohl im sozialen und ökonomischen Umfeld als auch im Bereich der technologischen Forschung und Entwicklung unerlässlich.

Trends für Technologien und Anwendungen in der Telematik



Die Prozessschritte der Technologie-Frühaufklärung

Bild 9

Früherkennungs- und –aufklärungsverfahren auf dem Gebiet der Telematik helfen beim systematischen von Trends. Der „Blick über den Zaun“ ist Garant für Innovationen, indem neue Konvergenzen in das Blickfeld kommen. Diese Verfahren sind auch die Grundlage für die sorgfältige Abschätzung von Technologiefolgen und die Steuerung von nachhaltigen und ressourcenschonenden Entwicklungen.

Zukünftige industrielle Technologien

Dr.-Ing. Harald Bradke

Fraunhofer Gesellschaft

Institut Systemtechnik und Innovationsforschung – ISI

Karlsruhe

Die Industrie hat einen Anteil von etwa 25 % am Endenergieverbrauch von Deutschland; beim Stromverbrauch ist sie mit über 40 % beteiligt. Einschließlich der anteiligen CO₂ –Emissionen für ihren Stromverbrauch ist die Industrie für rund 40 % der deutschen CO₂ –Emissionen verantwortlich. Hauptenergieträger in der Industrie mit fast 40 % ist Erdgas, gefolgt von knapp 30 % Strom und knapp 20 % Kohle und 10 % Heizöl. Rund 70 % der Endenergie werden für Prozesswärme benötigt, davon etwa die Hälfte für Temperaturen oberhalb 800 °C. Etwa 20 % werden für mechanische Energie und 10 % für Raumwärme benötigt.

- Zwischen 1970 und 1995 ging der Endenergieverbrauch der *westdeutschen Industrie* um 18 % zurück, während die industrielle Nettoproduktion real um rund 49 % zunahm. Damit sank die Energieintensität, d.h. der auf die industrielle Nettoproduktion bezogene Energieverbrauch, in diesem Zeitraum um insgesamt rund 45 % oder knapp 2,4 % pro Jahr.
- Sind nun alle Potentiale zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs nahezu ausgeschöpft, oder wird es auch in Zukunft ähnliche Effizienzverbesserungen geben wie in der Vergangenheit?

Die Entwicklung der Energieintensität wird nicht nur durch technische Einflussfaktoren wie die effizientere Energienutzung, Verfahrenssubstitutionen oder Mechanisierung und Automatisierung bestimmt, sondern auch durch strukturelle Veränderungen innerhalb des Industriesektors. Der *interindustrielle Strukturwandel*, d. h. unterschiedliche Wachstumsmuster der einzelnen Industriebranchen, trug in den 70er und 80er Jahren mit zum Rückgang der Energieintensität in der westdeutschen Industrie bei, weil sich der Anteil der weniger energieintensiven Branchen, insbesondere vieler Industriezweige der Investitionsgüterindustrie, an der Produktion zu Lasten der über-

durchschnittlich energieintensiven Branchen erhöhte. Dieser Trend dürfte sich auch in der Zukunft fortsetzen, sei es aus Gründen der Sättigung materialintensiver Infrastruktur-Investitionen, Gebäuden und Produktionsanlagen, sei es aufgrund der weiter expandierenden Exporte von Branchen mit einem niedrigen spezifischen Energiebedarf. Hinzu kommen aber auch Strukturveränderungen innerhalb der meisten Industriebranchen zu weniger energieintensiven Produkten (mit höherer Wertschöpfung).

- Der überwiegende Teil des beobachteten Rückgangs der Endenergie- bzw. Brennstoffintensität der Industrie ist jedoch auf technische Einflussfaktoren zurückzuführen, die in einzelnen Branchen aufgrund unterschiedlicher Technologiepotentiale auch unterschiedlich ausfielen.

Die Energieeffizienzpotentiale in der Industrie sind kurz- bis mittelfristig **weiterhin groß**:

- Die **Abnahme der Fertigungstiefe** in den letzten zwei Jahrzehnten führte in vielen Fällen zu einer Über- und häufig noch nicht angepassten Fehldimensionierung energietechnischer Anlagen: Druckluft- und Dampfsysteme sind in vielen Betrieben noch weiträumig in Betrieb mit zu hohen Drücken, zu hohen Temperaturen und zu groß dimensionierten Erzeugungsanlagen und/oder verlustintensiven Regel- und Verteilanlagen. In vielen Betrieben liegen hier die Effizienzpotentiale bei mehr als 25 % für diese Anwendungsbereiche.
- Die Produktionsanlagen sind Gegenstand permanenter kleinerer Verbesserungen bei Re-Investitionen oder Kapazitätserweiterungen; und häufig verbessert man dadurch als Nebeneffekt ihren spezifischen Energiebedarf.

Längerfristig werden auch weiterhin noch beachtliche technologische Einsparpotentiale im Industriebereich gesehen. Zwar nähern sich die spezifischen Energieverbräuche der größten energieverbrauchenden Einzeltechniken wie z. B. der Eisen- und Nichteisenindustrie, der Steine- und Erdenindustrie und der Produktion chemischer Grundstoffe zunehmend dem theoretischen Minimum, aber

- **verbesserte Systemauslegungen und optimierte Betriebsweisen** mit Hilfe verbesserter Prozeßleittechnik (z. B. mittels neuer wissenschaftlich unterstützter Systeme, neuronaler Netze, „intelligenter“ Sensoren und Aktoren etc) können die Prozesse noch weiter an ihre physikalische Grenze führen und gleichzeitig Produktqualität erhöhen und den Ausschuss vermindern, was direkt den Energiebedarf pro verkaufsfähige Produkteinheit reduziert. Ebenfalls kann eine Konstruktion, die konsequent auf die rationelle Energienutzung ausgelegt ist,

nicht nur viel Energie einsparen, sondern da eine Reihe von Komponenten kleiner ausgelegt werden können oder überhaupt nicht mehr benötigt werden, sogar kostengünstiger sein, wie einige Beispiele zeigen (operative und konstruktive Systemoptimierung);

- die optimale Hintereinanderschaltung und Verknüpfung von Prozessschritten (z. B. mittels Pinch Analyse) kann über eine stufenweise Abarbeitung des Temperaturgefälles zu einer „Mehrfachnutzung“ der eingesetzten Energie und somit zu einer Maximierung der exergetischen Effizienz beitragen (**exergetische Systemoptimierung**).
- last but not least können **völlig neue Produktionsverfahren** zum Einsatz kommen, die aufgrund gänzlich anderer physikalisch oder chemischer Verfahrensweisen einen geringeren spezifischen Nutzenergiebedarf haben, d. h. bisherige Grenzen bei der Energieeffizienz völlig neu definieren.
- Aus vielen neuen technischen Potentialen, die in den Labors der technischen Universitäten, Fachhochschulen und sonstigen Forschungseinrichtungen (FhG, MPG und AiF) sowie der Maschinen- und Anlagenhersteller immer wieder entwickelt werden, entstehen über Lerneffekte und Mengenkostendegressionen neue wirtschaftliche Energieeffizienzpotentiale. Typische Kandidaten dieser Trends völlig neuer Produktionsverfahren sind für die kommenden zwei, drei Jahrzehnte u.a.:
- Brennstoffzellen mit verschiedenen Temperaturniveaus der Wärme als Energiewandler, der nicht an die Grenze des Carnot-Wirkungsgrades gebunden ist; die Stromkennzahl ist erhöht selbst gegenüber den heutigen KWK-Techniken (z. B. GuD-KWK-Anlagen und Blockheizkraftwerke) und infolge der höheren Temperaturen der Wärme die exergetischen Wirkungsgrade der Brennstoffnutzung,
- Verwendung von Sauerstoff anstelle Luft für Hochtemperatur-Verbrennungsprozesse, z. B. in der Stahl- oder Glasindustrie,
- Trocknungs- und thermische Trennverfahren werden zunehmend (teil)substituiert durch mechanische oder mechanisch-chemische Trocknung, durch Kontakt- oder Strahlungstrocknung anstelle der Konvektionstrocknung, Wechsel von Lösemitteln oder Wechsel zur Gasphase, durch Membrantechniken, Extraktion oder Absorption,
- heutige chemische, unter höheren Temperaturen und Drücken ablaufende Prozesse dürften durch verbesserte Katalysatoren, durch Enzyme, biotech-

nologische Prozesse in ihrem spezifischen Energiebedarf wesentlich profitieren,

- Fertigungsverfahren dürften sich aus Gründen der Leistungserhöhung auch verändern: kleben statt löten, schweißen oder nieten, spanlose anstelle spanabhebender Fertigungsverfahren,
- Drehzahlvariable Antriebssysteme werden heutige Verluste ungeregelter oder sehr verlustreicher Systeme erheblich effizienter machen als sie heute sind. Ungenutzte Antriebe und Beleuchtung werden automatisch abgestellt werden,
- Bewegte Maschinen- und Anlagenteile werden leichter gebaut werden, sei es durch optimierte Konstruktion, spezifisch leichtere Werkstoffe oder geschäumte Metalle. Bremsenergie wird zunehmend gespeichert oder ins Stromnetz zurückgeführt werden,
- Die Recyclingraten energieintensiver Abfallstoffe werden durch Prozessverbesserungen weiter gesteigert werden können,
- Ebenso ist es vorstellbar, daß durch Innovationen neue Prozesse entstehen, die vor- oder nachgelagerte Verfahrensschritte überflüssig machen und so beträchtlich Energie einsparen können. Prominente Beispiele aus der Vergangenheit sind hier z. B. die Verwendung von Steinkohle anstelle von Koks im Hochofen, was die energieintensive Koksproduktion substituiert, oder der Einsatz Endabmessungsnahe Gießens (Strangguss etc.), was ganze Warmwalzwerke überflüssig machte.

Methodisch ist es nicht einfach, diese Innovationspotentiale im einzelnen in ihrer zeitlichen und mit quantitativen Merkmalen abzubilden. Es gibt nur zu wenigen Technologien Zukunftsaussagen von Fachleuten über den Markteinführungszeitpunkt und die dann zu erwartenden Kosten, wie z. B. über die Delphi-Erhebung des ISI 1998. Dieser Mangel ist einmal damit begründet, daß die technologische Vielfalt in den industriellen Produktionsprozessen einen ungeheuren Aufwand für derartige Marktdiffusionsanalysen erforderlich machen würde; zum anderen halten die Technologieproduzenten aus Wettbewerbsgründen technologische und Kostendaten möglichst vertraulich, solange sie nicht erfolgreich mit dem Produkt am Markt sind. Eine systematische Auswertung von Patenten wäre eine immense Arbeit, hinzu kämen die Aufwendungen für Kostenschätzungen neuer Technologielinien.

- Diese Vielfalt und – daraus abgeleitet – die erforderlichen hohen Arbeitsaufwendungen führen zu vereinfachten technologischen Schätzungen anhand

vorliegender technisch-naturwissenschaftlicher Kenntnisse, statistischer Methoden und Angaben von Fachleuten in Forschung und den betroffenen Herstellerkreisen. Während die technologischen Merkmale zukünftiger Produktionsprozesse und Querschnittstechnologien häufig ingenieurwissenschaftlich ableitbar sind, bedarf es bei der Abschätzung der Kosten der neuen Technologien neuer und weniger abgesicherter Methoden, die für den Bereich der reinen Energiewandler ohne größere Schwierigkeiten anzuwenden sind, aber bei der Kostenschätzung von neuen Prozesstechnologien auf das Problem der Multifunktionalität stößt. Denn hier refinanzieren sich die neuen Techniken durch verschiedene Faktoren wie z. B. eine höhere Arbeits- und Kapitalproduktivität, durch geringeren Ausschuss oder deutliche Qualitätsveränderungen des Produktes.

Insgesamt stellt die wissenschaftlich fundierte Abschätzung zukünftiger industrieller Technologien aufgrund ihrer Vielfalt und Komplexität eine große Herausforderung an den Analytiker und Prognostiker dar. Da die technologischen Entwicklungen trotz aller regionaler Besonderheit aufgrund der zunehmend weltweiten Verknüpfung der Hersteller- und Anwenderindustrien international vergleichbar werden, findet ein reger Austausch mit internationalen Kollegen auf diesem Gebiet statt, um sich über neue technische und methodische Erkenntnisse und Entwicklungen auszutauschen bzw. diese weiterzuentwickeln.

The Challenge of Major Improvements in Industrial Energy Efficiency

Prof. dr. Kornelis Blok
Ecofys Energy and Environment / Utrecht University
Utrecht, The Netherlands

1 Industrial energy use remains growing worldwide

Industrial energy use is an important part of total world energy use and remains growing. This growth is small in OECD countries, but substantial in developing countries (Table 1).

If we want to limit primary energy demand, reduce greenhouse gas emissions and other negative effects of energy use, we need to harness the main options to limit or reduce energy use: energy efficiency and material efficiency.

In this short paper I will discuss important elements related to such options.

Table 1. Energy use in manufacturing industry in 1995 and annual growth rates in the preceding periods [1]. EIT = economies in transition; DCs = developing countries.

	Fuels			Electricity			Primary energy use		
	Annual growth rate '71-'90	Annual growth rate '90-'95	Cons. 1995 (EJ)	Annual growth rate '71-'90	Annual growth rate '90-'95	Cons. 1995 (EJ)	Annual growth rate '71-'90	Annual growth rate '90-'95	Cons. 1995 (EJ)
OECD countries	-0.7%	-0.1%	28.1	2.4%	2.0%	9.5	0.6%	0.9%	56.8
EITs	1.5%	-6.9%	17.2	3.1%	-8.0%	2.9	2.0%	-7.3%	26.0
DCs Asia-Pacific	5.2%	5.7%	24.4	8.0%	6.4%	3.4	5.9%	5.9%	34.8
Rest of the World	3.8%	3.6%	7.6	6.4%	3.4%	1.8	4.7%	3.5%	13.0
World	1.3%	-0.1%	77.4	3.5%	0.6%	17.6	2.1%	0.2%	130.8

2 There are limits with respect to the possibilities of technology forecasting ...

For a number of sectors an intensive analysis of future energy-efficiency improvement options was carried out [2]. This was done according to a structured method, including: (i) process and energy analysis; (ii) technology identification; (iii) technology characterisation. Despite the extended inventories that were made, all identified technologies could be commercialised well within 30 years, and most of them within 15 years.

This means that, up from about 15 years ahead, there is a gap in our knowledge about the total potential of energy efficiency improvement. This can partly be solved by carrying out a sensitivity analysis, based on an extrapolation of the continuous improvement of the performance of technologies.

3 ... but anyway the potential to improve the energy losses by major process modifications is very substantial

The results of this work [2] provide for an overview of the potential for energy efficiency improvement for selected sectors in manufacturing industry, see Table 1. We see that in all the cases it is possible to bridge about half of the gap between the present best technologies and the thermodynamic minimum with identified new technologies. Most of the new technologies can be commercialised within 15 years (assuming a continuous process of technology development).

Table 2. Overview of specific energy use (in GJ/tonne) for some industrial energy functions [2].

	Present best technology	Best identified future technology	Thermodynamic minimum energy use
Paper/board (paper drying)	2.3 – 8.6	0.6 – 4.3	0.0
Primary steel production	19.0	12.5	6.6
Secondary steel production	7.0	3.5	0.0
Ammonia production	33.0	28.6	24.1
Nitric acid production	26.8	15.3	3.2

If it really were possible to cut specific energy use of *new* equipment in half every fifteen years (which is equivalent to a reduction of about 5% per year) this would really lead to a substantial decline of industrial energy use in the long run.

4 Structural change cannot be taken for granted ...

The general expectation is that structural change within manufacturing industry is in the direction of lower energy-intensity. This was true in the seventies and the eighties of the past century. However, this no longer holds for most countries in the early nineties, see Table 3. This means that we must cautious in relying on an autonomous structural effect helping to limit the growth of industrial energy use.

Table 3. Average annual rates of change in manufacturing energy use, and the degree to which changes in volume, structure and energy intensity contribute to such change. The percentages in the last nine columns show how much each of these factors contributed to the growth (+) or decline (-) of energy use in the period mentioned [3].

Country	Energy Use			Industrial output			Structure			Energy Intensity		
	1973-1986	1986-1990	1990-1994	1973-1986	1986-1990	1990-1994	1973-1986	1986-1990	1990-1994	1973-1986	1986-1990	1990-1994
Australia	0.3%	3.3%	0.8%	1.1%	3.2%	1.9%	0.0%	0.6%	-0.4%	-1.2%	-2.1%	0.1%
Canada	N/A	0.7%	0.8%	2.0%	1.7%	1.4%	N/A	-0.1%	0.4%	N/A	-0.8%	-1.0%
Denmark	-1.1%	-3.3%	1.5%	2.1%	-0.6%	0.9%	-0.3%	-0.1%	0.0%	-2.9%	-2.6%	0.7%
Finland	1.7%	3.3%	1.8%	2.9%	3.2%	1.6%	-0.1%	0.3%	1.6%	-2.0%	-0.2%	-1.5%
France	-2.3%	1.3%	0.7%	1.2%	3.2%	-0.5%	-0.2%	0.1%	0.0%	-3.3%	-2.0%	1.2%
W. Germany	-1.8%	0.6%	-0.5%	1.1%	2.7%	-1.4%	-0.4%	-0.5%	1.0%	-2.6%	-1.6%	-0.1%
Italy	-1.8%	3.8%	-0.7%	3.4%	4.0%	0.2%	0.0%	0.2%	0.4%	-5.2%	-0.4%	-1.4%
Japan	-1.8%	3.5%	-0.1%	3.2%	6.3%	-0.4%	-2.0%	-0.2%	0.1%	-3.0%	-2.6%	0.2%
Netherlands	-4.0%	4.4%	0.0%	1.8%	2.8%	0.6%	1.1%	-0.4%	0.8%	-6.9%	2.0%	-1.5%
Norway	0.1%	-0.9%	1.5%	0.5%	-1.3%	2.0%	0.6%	2.2%	0.8%	-1.1%	-1.8%	-1.3%
Sweden	-1.4%	0.0%	0.0%	1.3%	1.5%	1.3%	-0.4%	0.3%	2.8%	-2.2%	-1.9%	-4.1%
UK	-3.6%	0.0%	-2.4%	-0.7%	3.9%	-0.2%	-0.4%	-0.3%	-0.5%	-2.6%	-3.6%	-1.6%
US	-1.9%	2.9%	1.9%	2.0%	3.0%	1.8%	-1.1%	-0.5%	0.1%	-2.8%	0.5%	1.6%

5 ... but material efficiency can be actively pursued

In heavy industry most of the energy is used to produce a limited number of primary materials, like steel, cement, plastic, paper, etc. Apart from process changes that directly reduce the CO₂ emissions of the processes, also the limitation of the use of these primary materials can help in reducing primary energy demand and CO₂ emissions related to these processes. A range of options is available: material efficient product design; material substitution; product recycling; material recycling; quality cascading; and good housekeeping. Realising such options will lead to structural change in manufacturing industry.

Potentials for improving material efficiency may be very substantial, see e.g. [5-7]. In selected cases, the energy use for a given material function may be reduced by 30 - 50%, on the basis of existing technology. A study for the UN [4] provides and

overview and estimates that the effect of material efficiency improvement in an “ecologically driven/advanced technology” scenario could make up a difference of 40 EJ in world primary energy demand in the year 2020 (approx. 7% of the business-as-usual total energy use).

Also in this case there is much room for further technological development through the development of, e.g.:

- tools for material-efficient product design;
- material recognition systems for better material separation and recycling;
- separation techniques;
- new logistic approaches for waste collection and waste processing.

6 Governments are main actors in the successful development of energy-efficient technologies

Many of these technologies need further research and development. These technologies often also belong to the core of industrial firms' activities and often serve more purposes than just more efficient use of energy and materials.

This makes it not easy for governments to positively intervene in such processes.

However, we see that the development trajectories of the new processes are slow and often stagnating [8, 9]. Furthermore, the risks are high for firms. In the beginning of the R&D trajectory costs for firms are fairly low, but chances of success are highly uncertain. These chances increase during the trajectory, but especially at the end high investments with still substantial risk are required.

This makes government stimulation more than necessary.

Keys for government intervention are:

- Maintain a good infrastructure for applied R&D, but try to focus this more on the targets of reducing energy use for a range of specified functions.
- Have a good knowledge of the industrial energy networks and take a concerted, long-term, international action to stimulate promising technology development trajectories.
- Try to come to agreements with industrial partners to attain ambitious goals.

References

1. L.K. Price, L.K., L. Michaelis, E. Worrell and M. Khrushch: Sectoral trends and driving forces of global energy use and greenhouse gas emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3(1998)261-319.
2. J. de Beer: Potential for Industrial Energy-Efficiency Improvement in the Long Term, Ph.D. Thesis, Utrecht University, 1998.
3. F. Unander, S. Karbuz, L.J. Schipper: Manufacturing Energy Use in OECD Countries: Decomposition of Long Term Trends, in: *New Equilibria in the Energy Markets*, Energy Policy (forthcoming).
4. Potentials and Policy Implications of Energy and Material Efficiency Improvement, United Nations, Dept. for Policy Coordination and Sustainable Development, New York, 1997.
5. M.P. Hekkert, L.A.J. Joosten, E. Worrell, W. Turkenburg: Reduction of CO₂ emissions by management of material and product use, the case of primary packaging, *Resources, Conservation and Recycling*, 2000 (forthcoming).
6. D. Gielen: Materialising dematerialisation, Ph.D. Thesis, Technical University Delft, 1999.
7. E. Worrell, B. Meuleman, K. Blok. Energy Savings by Efficient Application of Fertilizer, *Resources, Conservation and Recycling*, 13(1995)233-250.
8. E. Luiten, K. Blok: Strategies for Stimulating the Development of Energy Efficient Technologies in Industry, in: *Proceedings of the European Conference on Industrial Energy Efficiency "Success Stories"*, pp. 583-605, Energieverwertungsagentur (E.V.A.), Vienna, Austria, 1998.
9. L.M. Stratenus: The Historical Development of Strip Casting, Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, Report number 99023, 1999.

Innovative Konzepte im Gebäudebereich

Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Rouvel, IfE TU-München

Kern des IKARUS-Instrumentariums ist eine Datenbank, die technische und ökonomische Daten für alle energierelevanten Bereiche enthält. Zudem ist sie zumindest im Sektor "Raumwärme" eine aktive Datenbank. Durch ein in die Datenbank integriertes Berechnungs- und Bewertungstool lassen sich nahezu beliebig viele Kombinationen zwischen Typgebäuden, bauphysikalischen Standards, Heiztechniken, Raumlüftungstechniken und Nutzeranforderungen bilden.

Das IKARUS-Instrumentarium ist dabei kein Prognosetool, sondern gibt eine qualifizierte technische und ökonomische Basis zu Beantwortung von Fragen wie:

.... was ist derzeit ... ?

.... was wäre, wenn ... ?

Da der Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2030 ausgedehnt werden soll, stellt sich berechtigt die Frage, ob alle relevanten Techniken und Entwicklungen bereits berücksichtigt werden. Wir hoffen daher von den folgenden zwei Statements von Prof. Dr. Herzog für den Neubaubereich und Prof. Dr. Hausladen für den Gebäudebestand Anregungen und gegebenenfalls auch eine Bestätigung der bisherigen Datenlage.

Hinweise auf die zukünftige Entwicklung in den nächsten 30 Jahren können teilweise auch aus der Betrachtung der vergangenen 30 Jahre abgeleitet werden.

Im Neubaubereich ist als Folge der Energiekrisen der 70er und 80er Jahre eine zunehmende Verschärfung der Anforderungen an den wärmetechnischen Standard zu verzeichnen:

1976 Energieeinsparungsgesetz

1982 erste Wärmeschutzverordnung für beheizte Gebäude

1995 Wärmeschutzverordnung 1995

Parallel dazu gab es die Anlagenverordnungen. Als nächster Schritt wird Ende dieses Jahres oder Anfang nächsten Jahres die Energieeinsparverordnung folgen, die zum ersten Mal die Bautechnik und die Anlagentechnik integral bewertet – wie es auch beim IKARUS-Instrumentarium bereits seit den ersten Anfängen vorgenommen wird. Die Anforderung an das Niveau des Heizwärmebedarfs wird dabei gegenüber der Wärmeschutzverordnung 1995 nochmals um ca. 25-30% verschärft werden, wo-

durch zumindest für den Neubaubereich der "Niedrigenergiehausstandard" erreicht wird. Auf längere Sicht ist absehbar, daß der "Passivhausstandard" angestrebt wird.

Mit zunehmend verringerten Transmissionswärmeverlusten aufgrund der Verbesserung der Gebäudehülle gewinnen die Wärmeverluste durch Lüftung immer mehr an Bedeutung. Innovative Lüftungskonzepte könnten daher in Zukunft noch erhebliche Einspareffekte bewirken.

Aufgrund der zunehmenden Verschärfung an den baulichen Standard ergeben auch wachsende Anforderungen an die Qualität der baulichen Ausführung. Vor allem die notwendige Verzahnung von unterschiedlichen Gewerken führt in der Ausführungsphase oft zu Mängeln (beispielsweise fehlerhafte Anschlüsse im Bereich der Fenster, Loggien, Balkone, des Dachs oder der Kelleranbindung), so daß die ausgeführten Gebäude wesentlich mehr Heizwärme benötigen als vorher rechnerisch ermittelt wurde.

Für den Bestand im Wohngebäudebereich beträgt in Deutschland der mittlere Heizwärmebedarf derzeit rd. 150 kWh/(m² a). Vergleich man dies mit den Grenzwerten der Wärmeschutzverordnung 1995 (54 bis 100 kWh/(m² a) in Abhängigkeit des AV-Verhältnisses), läßt sich ein enormes Einsparpotential durch wärmetechnische Sanierungsmaßnahmen ersehen.

Was hat sich energetisch in der Sanierungstätigkeit in den letzten 30 Jahren getan? Bis auf wenige Pilotprojekte ist in der Regel recht wenig in diesem Bereich geschehen.

Mögliche Ursachen hierfür sind:

- Der Zustand eines Gebäudes wird vor allem am optischen Erscheinungsbild beurteilt. Sind keine offensichtlichen Mängel ersichtlich, wird auch die Notwendigkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen selten erkannt und verifiziert.
- Investor-Nutzer-Problem
Wärmetechnische Sanierungsmaßnahmen können im Mietwohnungsbau nur im geringen Umfang auf die Kaltmiete umgelegt werden. Es ergeben keine wesentlichen Verbesserungen, die mietpreisrelevant sind: auch vor der Sanierung wurden die gewünschten Raumtemperaturen erreicht, die Heizung hat eben nur mehr Wärme erzeugt. Die finanziellen Vorteile des verminderten Heizenergieverbrauchs ergeben sich beim Mieter (geringere Warmmiete) und nicht beim Investor.

- Auch bei leerstehenden Gebäuden ist es schwierig, die Sanierungskosten vollständig auf die kommende Miete umzulegen. Vor allem in den neuen Bundesländern ist angesichts des großen Leerstandes (rd. 1 Mio. WE) die Refinanzierung der sicherlich notwendigen energetischen Sanierungsmaßnahmen durch erhöhte Kaltmieten derzeit nicht möglich.
- Bei Eigenheimen dagegen kommt die Verminderung der Heizenergiekosten auch dem Nutzer zu gute. Jedoch werden der Zeitpunkt und Umfang der Sanierungsmaßnahmen meist nicht aus nur wärmetechnischen Gesichtspunkten gewählt. Der Umbau eines Eigenheims wird häufig nur vor dessen Neubezug durchgeführt oder bei Eintritt einer größeren Erbschaft.

Es sind aber auch positive Tendenzen ersichtlich. Beispielsweise geht der Anteil der einfach verglasten Fenster kontinuierlich zurück. Ebenso ist eine zunehmende Umstellung der Heizkessel auf effiziente Systeme zu verzeichnen. Hier haben die zahlreichen Fördermaßnahmen der Kommunen, Länder und Energieversorger positive Impulse gesetzt.

IKARUS als Instrumentarium für zukünftige Abschätzungen

Wie bereits erläutert, basiert das IKARUS-Instrumentarium auf einer Technikdatenbank. Diese kann beispielsweise eingesetzt werden, um den derzeitigen Energieverbrauch in Deutschland zu ermitteln, Möglichkeiten von Energieeinsparung aufzuzeigen und auch Szenarien für den zukünftigen Energieverbrauch zu entwickeln.

Als Beispiel für die vorhandenen Daten im Bereich "Raumwärme" für Wohn- und Nichtwohngebäude ist in Abb. 1, Abb. 2 und Abb. 3 die Effizienz von Sanierungsmaßnahmen für Mehrfamilienhäuser der Alten Bundesländer dargestellt. Wie auch andere Gebäudetypen wird der Bestand an Mehrfamilienhäusern in unterschiedliche Baualtersklassen unterteilt, welche die mittleren geometrischen und bauphysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Baustandards enthalten.

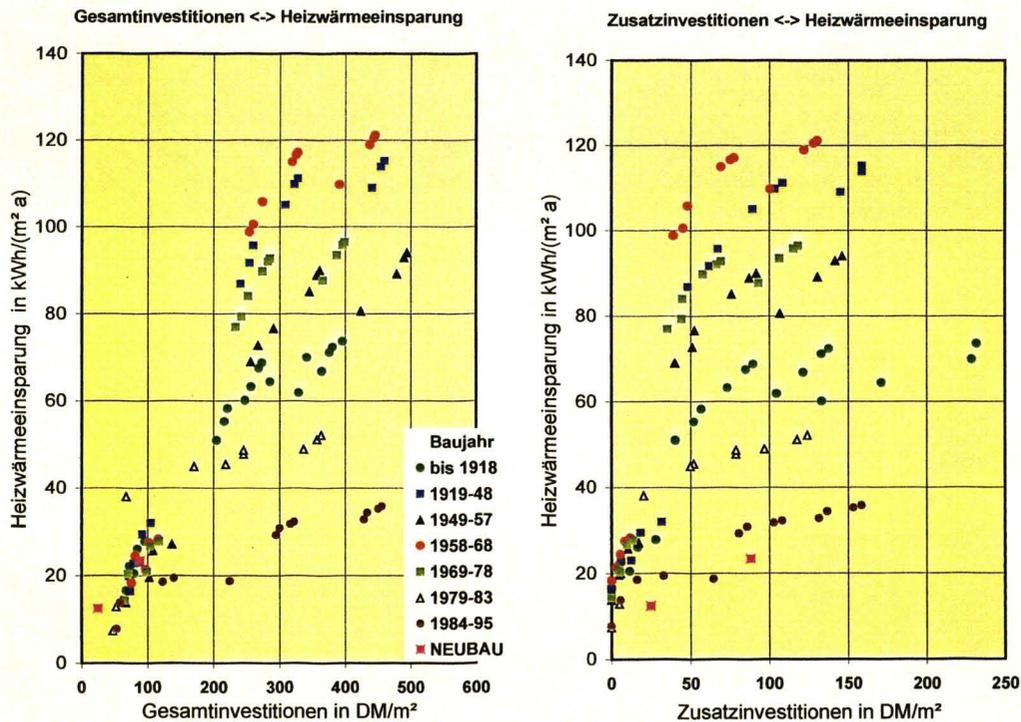


Abbildung 1: Gesamt- und Zusatzinvestitionen von wärmetechnischen Sanierungsmaßnahmen für das IKARUS-Typgebäude "Großes Mehrfamilienhaus, Alte Länder"

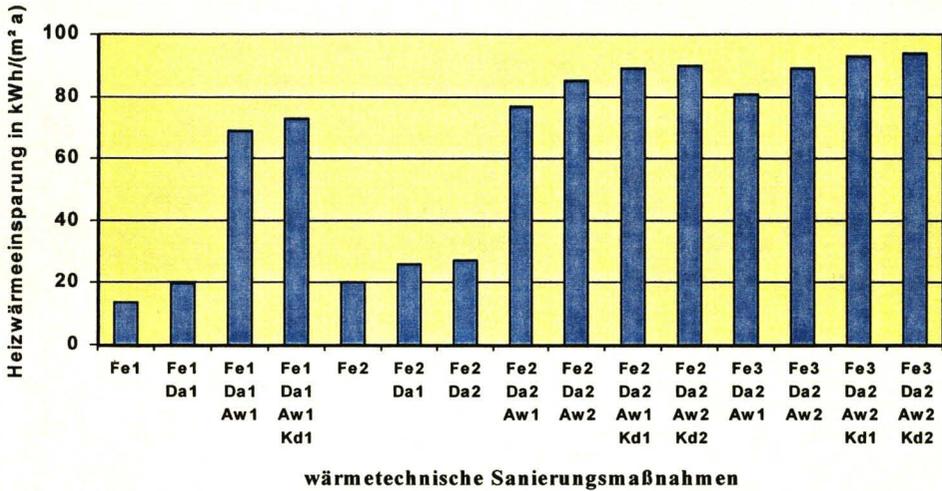


Abbildung 2: Heizwärmeeinsparung von wärmetechnischen Sanierungsmaßnahmen gemäß Tabelle 1 für das für das IKARUS-Typgebäude "Großes Mehrfamilienhaus, Alte Länder, Baualtersklasse 1949-57"

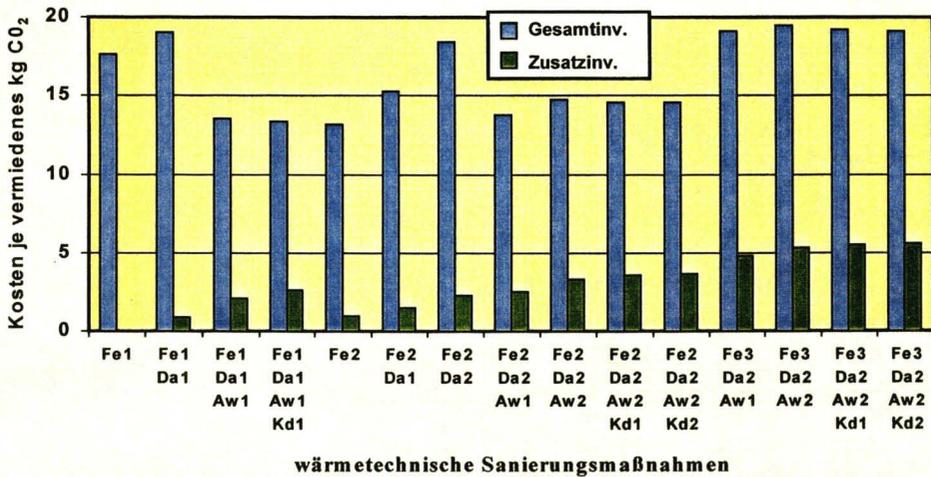


Abbildung 3: Kosteneffizienz von wärmetechnischen Sanierungsmaßnahmen gemäß Tab. 1 für das für das IKARUS-Typgebäude "Großes Mehrfamilienhaus, Alte Länder, Baualtersklasse"1949-57"

Maßnahme	Kurzbeschreibung
Fe1	Fensterglasaustausch gegen verbesserte Isolierverglasung ($k=2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Fe2	Fensterglasaustausch gegen Wärmeschutzverglasung ($k=1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Fe3	Fensteraustausch gegen "Superglasing"-Fenster ($k=0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$)
Da1	Dachdämmung mit 60 mm Dämmstoffdicke
Da2	Dachdämmung mit 120 mm Dämmstoffdicke
Aw1	Außenwanddämmung mit 80 mm Dämmstoffdicke
Aw2	Außenwanddämmung mit 120 mm Dämmstoffdicke
Kd1	Wärmedämmung der Kellerdecke mit 40 mm Dämmstoffdicke
Kd2	Wärmedämmung der Kellerdecke mit 80 mm Dämmstoffdicke

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Sanierungsmaßnahmen

Die Daten der IKARUS-Datenbank ermöglichen außerdem, Szenarien für die zukünftige Entwicklung aufzustellen. Dabei sind die Vorgaben eines Szenarios vom Anwender anzusetzen. Das IKARUS-System beantwortet die Frage "Was wäre wenn...?".

Als Beispiel zeigt Abb. 3 das Ergebnis von zwei extremen Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Heizwärmebedarfs in Deutschland.

Szenario I, geringe Sanierungstätigkeit im Altbaubestand

Gebäudebestand:

0,5 % des Altbaubestands (Stand 2000) wird jährlich auf das Niveau der WschVO 95 für Neubauten saniert

verstärkte Abrißstätigkeit etwa vom Jahr 2010 an

Neubau

bis 2005: Neubau entspricht der WschVO 95

ab etwa 2005: Neubau entspricht der EnspVO 2000

Szenario II, Komplettsanierung des Altbaubestands bis zum Jahr 2030

Gebäudebestand

bis etwa 2005: 2 % des Altbaubestands (Stand 2000) wird jährlich auf Niveau der WschVO 95 für Neubauten saniert

ab etwa 2005: 3 % des Altbaubestands (Stand 2000) wird jährlich auf Niveau der EnspVO 2000 für Neubauten saniert

verstärkte Abrißstätigkeit von etwa 2010 an

Neubau

bis 2005: Neubau entspricht der WschVO 95

ab etwa 2005: Neubau entspricht der EnspVO 2000

ab etwa 2015: Neubau um weitere 30% gegenüber der EnspVO 2000 verbessert

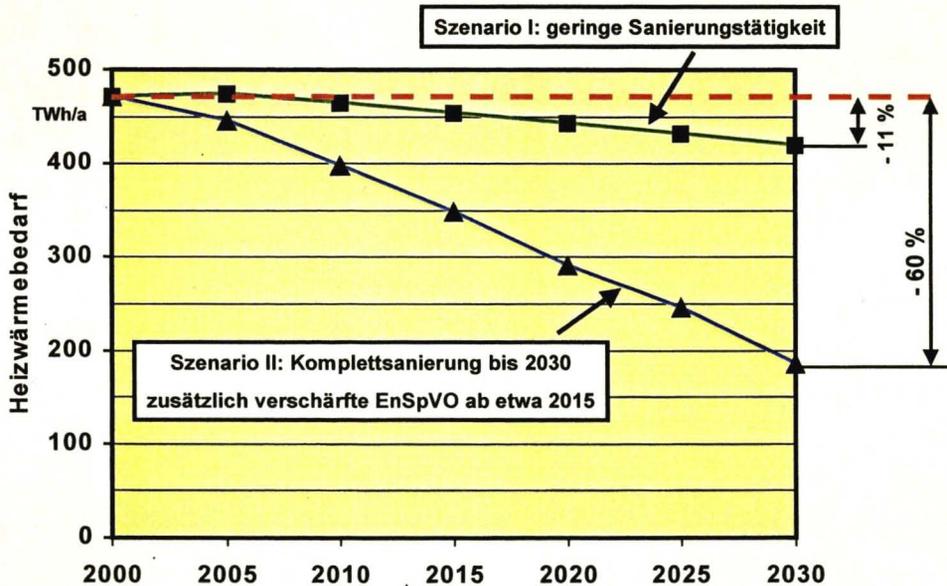


Abbildung 3: Ergebnisse von zwei Szenarien der Entwicklung des Heizwärmebedarfs in Deutschland mit Hilfe des IKARUS-Instrumentariums

Selbst bei Annahme einer geringen Sanierungstätigkeit (Szenario I) ergibt sich für das Jahr 2030 ein deutlicher Rückgang des Heizwärmebedarfs in Deutschland, etwa -11 % gegenüber 2000. Ursache hierfür ist vor allem das gute wärmetechnische Niveau des Neubaus und die verstärkte Abrißtätigkeit des Altbaubestands.

Wird in den kommenden 30 Jahren der gesamte Gebäudebestand intensiv wärmetechnisch saniert, ist – nach den o.a. Annahmen des Szenarios II - ein Rückgang von bis 60 % im Heizwärmebedarf möglich.

Die Realität wird dazwischen liegen, eher in der Nähe des Szenario I als bei Szenario II.

Innovative Konzepte für Gebäude im Neubau

**O. Prof. Dr. / Univ. Rom, Dipl.-Ing.
Thomas Herzog
Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie**

Orientiert am Motto der Weltausstellung EXPO 2000 in Hannover „Mensch, Natur, Technik“ wird am Beispiel eigener Planung auf dem Gelände der Deutschen Messe AG dargestellt, wie unmittelbar und intensiv der Zusammenhang zwischen einerseits der Konzeption und Strategie im energietechnischen Bereich und andererseits dem architektonischen Gesamtentwurf bei bedeutenden Neubauten sein kann.

Der Aktualität des Inhaltes wegen, ist nachfolgend ein übergreifender Text des Autors wiedergegeben, der Überlegungen enthält, welche über die Betrachtung des Einzelthemas noch hinausgehen.

„Die Sicht der Dinge hat sich gewandelt. Noch vor einigen Jahren waren wir der Meinung, es gehe vorrangig darum, solare Energie zu nutzen, um in den Wintermonaten Heizenergie einzusparen bzw. um warmes Brauchwasser zu erzeugen. Auf beiden Gebieten wurden seither auch Fortschritte gemacht, sowohl was die Entwicklung von Gebäudetypen angeht (Stichworte: große Südverglasungen, stark gedämmte und geschlossene Nordseiten, Grundrißzonierung nach Art der Thermischen Zwiebel, günstiges Verhältnis von Volumen zur Oberfläche, Gebäudeorientierung und vieles andere) als auch was die Verbesserung der Aktivechnik betrifft (höhere Effizienz und Zuverlässigkeit). Dies gilt für Heizungssysteme und für Warmwassererzeugung, wo inzwischen ein Stand der Technik erreicht ist, der es ermöglicht, bis zu 60 und mehr Prozent des Warmwasserbedarfs von Wohnbauten ausschließlich über thermische Kollektoren oder Speicherkollektoren aus Solarenergie zu gewinnen.

Zunächst hatte in den 80er Jahren ein Dissens bestanden bezüglich der Wertung des Anteils großer Glasflächen auf den Gebäudesüdseiten, weil seinerzeit noch nicht die Bereitschaft bestand, solare Gewinne in die Erfahrung des Energiehaushaltes

einzu beziehen. Fachleute, die sich im Bereich der Normung engagierten und ihr Ziel darin sahen, durch staatliche Vorschriften (nicht so in Bayern) den Verbrauch an fossilen Brennstoffen zu verringern, hatten zunächst die klare Prämisse der Reduzierung des k-Wertes, der den Wärmedurchgang durch die Außenwände eines Gebäudes charakterisiert. Es entstand die primitive Version vom Gebäude als Thermoskanne. Vom Methodischen her gesehen war dies letztlich eine Betrachtungsweise, die in die Reihe der monokausalen Erklärungen von Phänomenen gehört und die zu wenig berücksichtigt, daß Bauten im ganzen funktional und technisch und natürlich auch ästhetisch hochkomplexe Gebilde sind.

Man bedenke: Die Verbesserung der Wärmedämmung kann bewirken, daß das Problem der Kühlung von Gebäuden - dies gilt speziell für den Bereich von Verwaltungsbauten - im Sommerhalbjahr deutlich zunimmt. Heutzutage werden für die Heizung von Bürohäusern bereits Mittelwerte von unter 10 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs des Gebäudes erreicht, wogegen die Kühlung im Bereich zwischen 10 und 20 Prozent dessen liegt. Kühlung benötigt aber andererseits pro Kilowattstunde ungefähr die dreifache Menge an Primärenergie, verglichen mit der Heizung, so daß de facto der 5- bis 10-fache Energiebedarf für Kühlzwecke entstehen kann. Variable g-Werte (g-Wert = Gesamtenergiedurchlaßgrad) werden deshalb neuerdings bei Außenwandkonstruktionen als Möglichkeit, unterschiedlich auf Klimawechsel zu reagieren, angestrebt. Neue Techniken wie solare Kühlsysteme sind vielversprechend, weil dann die meiste Energie durch Einstrahlung zur Verfügung steht, wenn der Bedarf am größten ist. Reduziert man aber den Anteil der Verglasung, also der transparenten und der transluzenten Anteile der Gebäudehülle, so daß weniger Tageslicht ins Gebäude eindringt, so wird sich der Anteil der ergänzenden künstlichen Beleuchtung entsprechend erhöhen. Nach Untersuchungen von Prof. Nick Baker aus Cambridge (UK) liegt heute der Anteil, der für die Beleuchtung benötigt wird, bei Verwaltungsbauten durchschnittlich in der Gegend von 30 Prozent ihres Energieverbrauchs. Diese Konflikte beschreiben nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Gesamtzusammenhang der maßgeblichen Aspekte.

Da wir, bezogen auf den Betrieb von Gebäuden, Umweltenergien nutzen für ihre natürliche Belichtung, für ihre Ventilation - soweit dies physiologisch oder aus Gründen der Instandhaltung erforderlich ist - zur Gewinnung von Wärme und gegebenenfalls über Photovoltaik auch zur Gewinnung von Strom, ergeben sich häufig Situationen, bei denen diese Nutzungsmöglichkeiten zueinander in Widerspruch stehen:

Je nach Jahreszeit, Tageszeit und Wetterbedingungen, je nach Nutzungsart, Nutzungszeitraum und Nutzungsdauer im einzelnen Gebäude entstehen unterschiedliche Ansprüche an die genannten Funktionen. Es liegt deshalb nahe, die Lösung dieser sich ständig ändernden Bedingungen und Situationen vom sogenannten "Intelli-

genten Gebäude" zu erwarten - ein Modebegriff, der sich seit einem knappen Jahrzehnt auch bei uns etabliert hat. Es gibt inzwischen reihenweise Fachartikel, Zeitschriften, Bücher und selbst Kongresse, die unter dem Begriff des "Intelligent Building" firmieren. Folgendes möchte ich hierzu anmerken:

Die Gebäudeleittechnik, die gewissermaßen das Gehirn mit den Nerven in einem solchen System darstellt, übernimmt Regel- und Steuerungsfunktionen, die gekoppelt sind an sich verändernde Zustände sowohl im Bereich der Energieversorgung (Wärmeerzeugung/-verteilung/-abgabe) des Gebäudeinneren wie auch im Bereich der Manipulation an der Gebäudehülle (Jalousetten fahren auf und ab, verstellen ihre Neigungswinkel, Tageslicht-Ergänzungsbeleuchtung geht automatisch an und aus, Lüftungsklappen als Nachströmöffnungen werden geöffnet oder geschlossen, die Ventilatoren- und Befeuchterleistung variiert und derlei mehr.)

Natürlich sind weite Bereiche unseres alltäglichen Lebens von solchen, im wesentlichen elektronischen Steuerungsvorgängen und entsprechend selbständig auf Einzelsituationen reagierenden technischen Prozessen bestimmt, doch stellt sich aus meiner Sicht auch hier die Frage nach der richtigen Balance. Im Blick auf Gebäude scheinen mir Dinge wie der Blindanflug einer Passagiermaschine im Nebel oder ABS und elektronische Antriebsschlupfkontrolle von PKWs nicht die geeigneten Analogien zu sein. Denn weitgehende und oft unnötige Automation birgt erhebliche Risiken und bedenkliche Folgen wie: Störanfälligkeit der technischen Systeme und ihrer Komponenten, Erhöhung der Baukosten, Vermeidung der Ursachenwahrnehmung eigenen Fehlverhaltens, weiter steigende Abhängigkeit der Menschen von immer weiteren technischen Systemen und wachsende Abhängigkeit von Herstellern und Wartungsfirmen.

Damit aber, bezogen auf die Auswirkungen im Bereich von Bauen und Stadtplanung, überhaupt die richtigen Handlungsmuster entstehen können, ist es erforderlich, Dinge bewußt zu machen, und dies bedeutet, daß Phänomene verstanden sein müssen, damit sich richtiges Handeln anschließen kann. Ich möchte daraus folgern, daß die elektronischen Systeme in einem Gebäude der Orientierung der Menschen dienen müssen, daß sie aber allenfalls in geringem Umfang automatisch erfolgende Zustandsveränderungen im Bereich der Gebäudehülle veranlassen sollten.

Wenn wir nicht geistig und seelisch verkrüppeln wollen, wird es auch in Zukunft anzustreben sein, daß die Menschen ihre Umwelt, und dazu gehört auch die künstlich geschaffene, mit all ihren Sinnen wahrnehmen können, anstelle nur mit einigen Joy-Sticks den virtuellen Raum zu manipulieren. Der bewußte und richtige Umgang mit einem Gebäude hat aber zur Voraussetzung, daß man es versteht. Es wäre also wichtig, daß die "intelligenten Systeme" beispielsweise aufzeigen, ob jemand durch

sein Verhalten - wie das Kippen eines Fensters im Winter oberhalb eines durch Thermostat gesteuerten Heizkörpers - Wärmeenergie nutzlos vergeudet oder daß er durch den Betrieb bestimmter Geräte unnötig Strom verbraucht. Was nützt eine erst im Folgejahr eintreffende Heizkostenabrechnung in solchem Zusammenhang? Niemand kann mehr rekonstruieren, was zu ihrer Höhe geführt hat. Hier geeignete Systeme zu entwickeln, ist eine hochrangige Design-Aufgabe, die wir noch vor uns haben.

Längst Realität sind allerdings:

EDV Tools für Simulationen in unterschiedlichen Bereichen, z. B.

thermisch

- zur Verwaltung von Klimadaten
- zum Aufstellen von Nutzungsprofilen
- zur Bearbeitung bautechnischer
und geometrischer Variablen

lichttechnisch

mit Mehrfachreflexion, wobei aber
etliches in der Visualisierung noch irreführend ist.

Kombinationen aus beidem sind im Entstehen.

Neue Komponenten sind in Entwicklung oder bereits in Erprobung wie:

- Vakuum-Wärmedämmung
 - Gläser, reaktionsfähig auf wechselnde Solarstrahlung bzw. schaltbar, mit Edelgasfüllungen, mit k-Werten von ca. 1,0
 - elektrochrome und thermotrope Gläser
 - variable g-Werte ohne Verschattung
 - Lüftungskomponenten mit Vorwärmung durch Solarstrahlung
 - desintegrierte Systeme (Gesichtspunkt unterschiedlicher Lebensdauer, unterschiedliche technische Prozesse der Kombination)
- Nutzung (Aktivierung) interner Massen durch Bauteilheizung- und kühlung.

Wenn wir heute zum Beispiel wissen, daß rund ein Viertel der verbrauchten fossilen Energie in Verkehrsabläufe fließt, mit allerseits bekannten, negativen Auswirkungen, so muß es nicht nur darum gehen zu versuchen, fossile Brennstoffe zu ersetzen oder den auf den einzelnen Transportfall bezogenen Verbrauch zu reduzieren, sondern zuvorderst darum, die Ursachen für dieses Verkehrsaufkommen zu überdenken und zu korrigieren. Es geht dabei gar nicht um Extrem Lösungen, sondern darum, die städtischen Funktionen wo immer es möglich und vernünftig ist, miteinander zu verbinden. Ganz konkret: Die Mischung der Funktionen sollte sich in den baulichen Strukturen gut etablieren lassen. Exquisite Vorläufer gibt es beispielsweise in den Wohnungsbauten der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts, lange bevor man dem Irrtum vermeintlich optimaler Wohnungsgestaltung auf der Grundlage von Stellflächen-Normen, wie jahrzehntelang nach dem Zweiten Weltkrieg geschehen, aufgesessen war. Wir brauchen also bauliche Strukturen, die im Bereich ihrer inneren Erschließung und der Raumnutzung erheblich neutraler sind, als dies für die meisten Wohnungsbauten heutzutage charakteristisch ist.

Eine andere Konsequenz hieraus ist, Bebauungen nach Möglichkeit grundsätzlich zu verdichten. Nur wenn in einem Quartier sowohl genügend Kaufkraft vorhanden ist als auch die Distanzen zu Einrichtungen für den täglichen Bedarf für Fußgänger gering genug sind, läßt sich wirksame Funktionsmischung erreichen und auch motorisierter Verkehr in nennenswerter Größenordnung reduzieren. Damit geht natürlich auch eine Verringerung des Landverbrauchs und der Infrastruktur-Kosten einher, die sowohl im Investitionsbereich als auch im Bereich des Unterhalts für die Gemeinden große Bedeutung haben. Gerade hier bedarf es neuer Leitbilder, die gesellschaftlich akzeptiert werden. Das Ideal vom Wohnen im Grünen vermittelt ja den völlig falschen Eindruck, es würde sich dabei um eine ökologisch sinnvolle Strategie handeln. Das Eigenheim am Stadtrand bei niederer Dichte gibt zwar dem Einzelnen das Gefühl der Nähe zur Natur, macht aber abhängig von Verkehrsmitteln, erhöht den Treibstoffverbrauch und die Umweltbelastung und hat zum Teil verheerende soziale Auswirkungen. Auch dies ist im Grunde keine neue Erfahrung. Schließlich gibt es das Schlagwort von der „Grünen Witwe“ seit Jahrzehnten.

Weil aber die Städte in ihrem Innenbereich zu wenig an Wohnraum mit urbaner Qualität – nicht mit Siedlungsqualität – bieten, bewirkt dies täglich die millionenfache Fahrt von Berufspendlern, und weil die baulichen Strukturen zu wenig an Veränderungspotential eröffnen, haben wir gleichzeitig Millionen von Quadratmetern an Leerbeständen – gebundene, ineffiziente Energie- und Materialressourcen -, die zu dem opulenten Durchschnittsmaß von über 38 m² Wohnfläche, welche heute pro Bundesbürger zur Verfügung steht, als Aufwand noch hinzukommen (zum Vergleich: derzeit in Italien 15 m², in Moskau 5 m²).

Wer Sorge hat, erhöhte Dichte und räumliche Enge (die wir in den Straßen und Gassen südlicher Länder als Attraktion goutieren) gehe zwangsläufig einher mit den sozialen und hygienischen Fehlentwicklungen mancher Städte in der Vergangenheit – Stichwort „Zilles Milieu“ -, übersieht, daß sich die materiellen Bedingungen unserer Zivilisation in den maßgeblichen Kategorien grundlegend verbessert haben. Wer den einschlägigen gebäudetechnischen Stand der Dinge kennt – das betrifft Heizung, Lüftung, Sanitär, Tageslichttechnik und baukonstruktiv-bauphysikalische Systeme -, wird dies bestätigen.

Gesamtheitliche Problemsicht wird in Zukunft immer mehr an Bedeutung zunehmen. Erreicht werden kann sie nur, wenn es gelingt, die disziplinübergreifenden Denk- und Arbeitsansätze zwischen Natur- und Ingenieur-, Geistes-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern zu intensivieren und wenn Umweltgestaltung seriös betrieben als komplexe Kerndisziplin verstanden wird.“

Th. H.

Mobilität sichern, Ressourcen schonen: - Verkehrsdeterminanten des 21. Jahrhunderts

Dipl.-Ing. Josef Brosthaus

i.a. der TÜV Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH (TIE)

Dipl. -Wirt.-Ing. Ralf Kober,

TÜV Energie und Umwelt GmbH (TEU)

0 Vorbemerkung

In der derzeitigen Aktualisierungsphase des IKARUS-Projektes sollen u.a. Aussagen über neue Schlüsseltechnologien gemacht werden, von denen man ausgehen kann, dass sie im Laufe der nächsten drei Jahrzehnte und darüber hinaus die energiewirtschaftliche Entwicklung der jeweiligen Teilbereiche deutlich verändern werden.

Nicht erst seit dem die Vergabe der UMTS-Mobilfunklizenzen in die heiße Phase gegangen ist müßte jedem klar geworden sein, dass die Realisierung dieser Multimediakommunikation auch den gesamten Mobilitätsbereich revolutionieren wird. Somit liegt es nahe, für den Bereich Endenergie Verkehr die Konsequenzen dieser technischen Revolution auf die Mobilität im Sinne möglicher ressourcenbeeinflussender Auswirkungen hin zu untersuchen.

Während im IKARUS-Projekt die Verkehrsnachfrage aus einem makroökonomischen Gesamtsystem berechnet und deren klimagasrelevanten Auswirkungen mit Hilfe eines technikorientierten Modells „bottom up“ befriedigt werden, sollen mit diesem Beitrag die darüber hinaus gehenden Mobilitäts- und Verkehrsfragen diskutiert werden. Dabei nimmt der Teil Mobilitätsforschung einschließlich Telematik einen großen Raum ein. Dieser Themenkomplex wurde nahezu zeitgleich mit dem IKARUS-Workshop am 04./05. Mai 2000 in Göttingen anlässlich der Tagung „Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert“ abgehandelt /1/. Was lag unter Synergiegesichtspunkten näher, als die Erkenntnisse aus den dortigen Einzelvorträgen der Zielsetzung der Schlierseetagung entsprechend zusammenzufassen. Dazu wurde der in druckfähiger Fassung vorliegende Tagungsband der Göttinger Veranstaltung vom Organisator zur Verfügung gestellt. An dieser Stelle noch einmal herzlichen Dank.

1 Einleitung

Mobilität ist nicht nur ein Grundbedürfnis der Menschen und ein Ausdruck von Freiheit, sondern auch der Motor unserer Wirtschaft. Somit ist im Zeitalter der Globalisierung davon auszugehen, dass dem Verkehr und der Mobilität weiter steigende Bedeutung zukommen wird, und zusammen mit anderen Faktoren wird die Mobilität zum wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Wohlstand beitragen. Dabei muß der Grundsatz gelten, die Mobilität zu erhalten und zugleich dafür zu sorgen, dass unser augenblickliches Mobilitätsbedürfnis nicht auf Kosten zukünftiger Generationen befriedigt wird. Dieser Zusammenhang lässt sich in Bezug auf das IKARUS - Vorhaben auf den ganz einfachen Nenner bringen:

„Ohne Energie keine Mobilität“.

Hiermit sind auch bereits die beiden Schwerpunkte dieses Beitrags umrissen, und es lassen sich daraus die konkreten Herausforderungen für die Verkehrs- und Mobilitätsforschung wie folgt definieren:

- Lösungen erarbeiten zur nachhaltigen Gestaltung der Mobilität.
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit, Sicherheit, Effizienz und Benutzerfreundlichkeit der einzelnen Verkehrsträger
- Optimierte Zusammenführung zu einem integrierten Verkehrsgesamtsystem .

Neben der zukünftigen Entwicklung energieoptimierter Techniken - über die bereits in vielen IKARUS - Veröffentlichungen /2/ berichtet wurde - können vor allem die neuen und vielfältigen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnologien zur Lösung effizienter Mobilität beitragen. Allerdings kann dabei die Telekommunikation nicht als Wunder- und Allheilmittel angesehen werden; sicherlich aber ist es die zwingende Voraussetzung für leistungsfähige Transportketten und für eine bessere Vernetzung der Verkehrsträger. Dabei liegen die besonderen Schwerpunkte der Telematik in der verkehrsträgerübergreifenden Organisation, und hier z.B. beim Güterverkehr im Bereich der Betriebsführungs-, der Signal- und Leitsysteme oder in neuen Ansätzen bei der Logistik, deren Bedeutung im Zeitalter verstärkten E-Commerce rasant zunehmen dürfte.

Auch wenn davon auszugehen ist, dass der Strassenverkehr zukünftig seinen festen Platz behalten wird, kommt es entscheidend darauf an, den Straßenverkehr durch die Verknüpfung der Straße mit anderen Verkehrsträgern weiter zu optimieren vor allem hinsichtlich Umweltverträglichkeit, Sicherheit und insbesondere ressourcen-

schonend. In effizienteren Fahr- und Betriebskonzepten, der weiteren Verbesserung konventioneller Fahrzeugantriebe und der Entwicklung alternativer Antriebe steckt ein Energieeinsparpotential, das ausgeschöpft werden muss. Hierzu werden aus den Forschungsergebnissen ableitbare Perspektiven für eine nachhaltige Mobilitätssicherung aufgezeigt.

An dieser Stelle soll der **leise Verkehr** nicht unerwähnt bleiben: die deutliche Verringerung des Lärms ist eine wichtige Herausforderung der Verkehrsentwicklung in der Zukunft, und zwar die Lärmreduzierung an der Quelle, dem Fahrzeug. Dieser Aspekt wird hier jedoch wegen der Zielsetzung des IKARUS – Vorhabens nicht weiter betrachtet.

2 Mobilitätsforschung

Die kompletten Ursache – Wirkung - Zusammenhänge zwischen Mobilität und Verkehr und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die vom Verkehr ausgehenden Umweltprobleme sind ein ständiger Forschungsgegenstand. Eines der wesentlichen Ziele muß sein, den Energieverbrauch und die Abgasmengen im 21. Jahrhundert deutlich zu verringern, um auf Dauer eine tragfähige, nachhaltige Entwicklung des Verkehrssystems zu erhalten. Daraus können die Zielgrößen der Mobilitätsforschung wie folgt zusammengefaßt werden:

- Nachhaltigkeit
- Effizienz
- Beschäftigung.

Die Ziele bedingen sich wechselseitig. So wird man Nachhaltigkeit nur mit effizienten Verkehrsträgern und deren optimaler Verknüpfung erreichen. Eine nachhaltige Mobilitätsforschung wiederum ist einer der Schlüssel für die Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und einer damit einhergehenden Beschäftigungssicherung.

Verkehrstechnologien und die damit verbundenen Dienstleistungen für eine nachhaltige Entwicklung können durch folgende Handlungsfelder beschrieben werden:

- Das intelligente Verkehrsnetz
- Mehr Güter für Bahn und Schiff
- Schneller, bequemer und umweltfreundlicher mit Bahn und Bus

- Verantwortungsvoller Umgang mit Gesundheit, Umwelt und Ressourcen
- Verkehrssicherheit
- Verständnis für Mobilität verbessern
- Stärkung der Verkehrsforschung

Welche Antworten haben wir auf die Forderungen der Gesellschaft, die Mobilität unter den o.a. Zielgrößen in den Handlungsfeldern zu erreichen?

Der klassische Ansatz, Mobilität zu ermöglichen ist die Schaffung von Mobilitätshard- und -software, d.h., der Bau von Straßen- und Schienenwegen, die Herstellung von Fahrzeugen für alle Verkehrsträger (Hardware) sowie die optimale Vernetzung durch die Entwicklung und Nutzung neuer High-Tech-Produkte auf dem Gebiet der Informationstechnologie (Software).

2.1 Städte der Zukunft

Von jeher bilden die Städte mit ihren Raumstrukturen einen wichtigen Rahmen für die Ausgestaltung von Mobilität und Verkehr. Das Nachdenken über die Städte der Zukunft resp. die Zukunft der Städte führt zwangsläufig auch zu den Raum-Zeit-Strukturen im Modernisierungsprozess. Mobilität und Verkehr sind wichtige Elemente und Handlungsfelder der Raum- und Stadtentwicklung; ihre Entwicklung ist Ausdruck des tief greifenden Wandels unserer Lebenswelt.

Als ein Beispiel soll hier die sogenannte „Auflösung der Städte“ genannt werden, bei der kleinräumige Beziehungen durch grobmaschige Netze ersetzt werden. Dieser, vielfach exogen vorgegebene Suburbanisierungstypus, geht aus von der Ansiedlung großflächigen Einzelhandels, Gewerbetreibender und Dienstleister, Multiplexkinos und Fitness-Center an den Stadtrand und im Umland. Mit der sich daraus ergebenden Zunahme der Distanzen verändern sich die Raum-Zeit-Muster und die Verkehrsmittelwahl. Mit Blick auf die Entstehungsbedingungen von Verkehr wird dadurch eine verhängnisvolle Spiralendynamik in Gang gesetzt: neue Flächennutzungen, die erweiterte Verkehrsinfrastruktur und neue Mobilitätsmuster führen selbstverstärkend zum gegenseitigen Wachstum. Mit den sich herausbildenden neuen Raum-Zeit-Strukturen von Haushalten und Unternehmen, die sowohl Ausdruck als auch Voraussetzung der urbanen Form sind, werden die Ziele der gegenwärtigen Stadtpolitik wie auch der Verkehrsentwicklungsplanung konterkariert. Pkw und Lkw können in diesen Räumen ihre systembedingten Vorteile nahezu idealtypisch ausspielen, und der öffentliche Nahverkehr hat in der sich

auflösenden, dispersen Stadtlandschaft kaum eine Chance auf steigende Verkehrsanteile.

Als ein zweites Beispiel für die Erklärung des weiter steigenden Verkehrs kann die sogenannte „Verflüssigung der Lebensstile“ herangezogen werden. Veränderte Lebensweisen (Familienorganisationen, Wohnformen), neue Arbeitsmuster und Arbeitszeiten, Erwerbslosigkeit oder eine stark veränderte Freizeitorganisation tragen bei zu veränderten Handlungsmustern. Die Folge ist, daß sich die persönlichen Aktionsräume weiter ausdehnen, viele Beziehungen werden über größere Distanzen organisiert mit den Konsequenzen: exzessives Fernpendeln und steigender Wohnraumbedarf an unterschiedlichen Orten. Wo flexible Arbeit an mehreren Teilzeit-Orten an die Stelle der traditionellen, früher standortgebundenen Arbeit getreten ist, muß mit einem weiteren Anstieg von Wegehäufigkeiten und Verkehrsaufwand gerechnet werden.

Welche Stadtentwicklung zeichnet sich nun ab und welcher Forschungsbedarf ist notwendig?

Sieht man die Stadt- und Verkehrsentwicklung im Zusammenhang, so sprechen alle Anzeichen für eine weitere Dynamik in der Verkehrsspirale: Stadtentwicklung scheint zunehmend auf Mobilität, Verkehr und Erreichbarkeit gebaut zu sein, und mehr Verkehr schafft die Bedingungen für weitere Dispersion, mit der Option auf neuen Verkehrszuwachs. Eine der Ursachen für die bisherige Begrenztheit unserer Handlungsansätze und Strategien besteht zweifellos darin, dass ihnen eine weitgehend auf technische Parameter reduziertes Bild von Mobilität zugrunde liegt. Grundmerkmal und zugleich Grundproblem von Mobilität und Verkehr ist hingegen ihre enge Verknüpfung mit sozialen und ökonomischen Prozessen und deren räumlicher Ausprägung in Form von Lebensweise, Arbeitsteilung usw. Um diese Komplexität angemessen behandeln zu können scheint es notwendig zu sein, neben den auf technischen Parametern ausgelegten Untersuchungen gesellschaftspolitische Modernisierungsansätze zu wählen, mit deren Hilfe aktuelle Raum-Zeit-Strukturen möglicherweise besser als bisher erklärt werden können. Vielleicht gelingt dies, wenn im Kontext der Interaktionen von Verkehrssystem und Siedlungsstruktur eine dritte Kategorie hinzugefügt wird, die mit dem Begriffspaar „Lebensstile/Milieus“ gekennzeichnet sind. Damit könnten eine enge Verbindung und gegenseitige Durchdringung von raum- und sozialwissenschaftlicher Forschung zum Nutzen ressourcenschonender Mobilität erreicht werden.

2.2 Telematik

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Verkehrstelematik hat in Europa inzwischen zwar einen hohen technischen Standard erreicht, allerdings nur für spezielle monomodale Anwendungen. Intermodale und multimodale Telematikdienste stehen derzeit zwar im Mittelpunkt der verkehrspolitischen Diskussion, sie entwickeln sich aber aufgrund von Markthemmnissen erst langsam und sind häufig nur als Inselösungen erkennbar. Eine Schlüsselrolle für die zögerliche Marktentwicklung ist, dass das Nutzenpotential noch nicht hinreichend verdeutlicht werden konnte, was entsprechend den Marktgesetzen zur Zurückhaltung bei Kunden und Anbietern geführt hat. Dies ist als ein typisches Problem des Auseinanderfallens betriebswirtschaftlicher und gesamtwirtschaftlicher Wirkungen anzusehen. Dies kann auch ein Grund dafür sein, dass sich derzeit eine Vielfalt von telematischen Einzelsystemen zu etablieren versucht. Es wird deutlich, dass jetzt der Punkt gekommen ist, einheitliche Standards und Schnittstellen zu verwirklichen. Dieser Sachverhalt hat von Seiten des Deutschen Verkehrsforums zu Standardisierungsforderungen geführt, wobei nach technisch-physikalischer Ebene (Datenkommunikation) und der Ebene der eigentlichen Informationsinhalte in Form und Umfang unterschieden wird.

Um die wünschenswerten Ziele insbesondere hinsichtlich ressourcenschonender Auswirkungen der Telematik auch nachhaltig sichern zu können, müssen vorrangig die auf den Weg gebrachten Telematik-Konzepte und -Techniken weiter untersucht und vorangebracht werden, wie da sind:

- Dezentrale Architektur
- Neue Dienste wie: Lokale Gefahrenwarnung, Parkassistenz, intermodaler Reiseplaner
- Erzeugung von Verkehrsdaten hoher Qualität
- Standardisierte Schnittstellen zwischen den Gliedern der Wertschöpfungskette
- Auswahl nachhaltiger Übertragungssysteme und -protokolle (Internet, GMS)
- Entlastung der Reisenden bei der Nutzung der Telematik-Dienste (PTA Softwareagenten)

Dazu ist es notwendig, die begonnenen technologischen Arbeiten abzuschließen und folgende, im Rahmen der Forschungsarbeiten erkannten Lücken zu schließen:

- Tiefendigitalisierte und lernende Karten

- Erschließung zukünftiger Kommunikationssysteme wie GPRS und UMTS
- Nutzung von Werkzeugen für die persönliche Reiseassistentz, Softwareagenten und Dienstleistung
- Informationsarchitekturen im Fahrzeug für erhöhte Anforderungen bezüglich Datenvolumen, Modularität, Update- und Upgradefähigkeit.

Hier ist u.a. die Politik gefordert, mit Hilfe überregionaler Ansätze die lokalen Insellösungen zu überwinden um so den Telematik-Unternehmern einen Anreiz zu geben, flächendeckende Dienste anzubieten, die immer und überall zur Verfügung stehen. Dies betrifft auch und insbesondere die sogenannte „intelligente Trasse“ unter dem besonderen Gesichtspunkt der Kopplung Schiene-Straße. Eine intelligente Trasse (im Schienenverkehr) hat für die hochkomplexe Kommunikation im täglichen Verkehrsgeschehen ein höheres Optimierungspotential als ein intelligentes Fahrzeug. Die menschaunomen Fahrzeuge stehen am Scheideweg. Was im Luftverkehr schon lange diskutiert wird - ob zum Beispiel ein Pilot den Autopiloten abschalten darf, um z.B. einen Sturzflug einzuleiten - stellt sich jetzt auch schmerzlich bei den Hochgeschwindigkeitszügen und sogar bei den Individualfahrzeugen des Straßenverkehrs. Die Automatisierungstechnik ist bereit, dem Menschen die Steuerung und die Entscheidung aus der Hand zu nehmen, allein die Disposition seines Mobilitätswunsches bleibt ihm noch länger erhalten. Es sei die Frage gestattet: *Wollen wir das? Und wenn nicht, warum geschieht es dennoch?* Insbesondere mit der Erkenntnis aus laufenden Forschungsvorhaben, dass der Beitrag der Verkehrstelematik an der Emissionsminderung lediglich zwischen 2% und 3% liegt.

2.3 Herausforderung an die Verkehrsträger

Grundsätzlich kann man sagen, dass die Systemgeschwindigkeit eines Verkehrssystems entscheidend ist für die Nachfrage und die Produktivität. Läßt man bei der Umweltbilanz den nichtmotorisierten Verkehr außer Acht, stellt sich neben dem Schiffsverkehr der Schienenverkehr transportleistungsbezogen als umweltverträglichster Verkehrsträger dar. Dies vorausgesetzt, ist jede Förderung zur Nutzung von Entwicklungspotentialen des Schienen- und des Schiffsverkehrs eine Investition in eine ressourcenschonende Mobilität. Das unternehmerische Denken mit konsequenter Marktorientierung und hinsichtlich Leistung und Effizienz muß verbessert werden. Dazu erforderliche Erfolgsfaktoren lassen sich in einem Katalog zusammenfassen. Sie reichen von möglichen Vereinfachungen und Erleichterungen beim Zugang zum System (ohne Bahnhöfe, Güterterminals) über Verbesserung der

Umlaufproduktivität bis hin zur Senkung der Lebenszykluskosten. So zielen z.B. die Innovationen der Bahn zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit auf neue Dimensionen an Qualität und Produktivität, mit unterschiedlichen Schwerpunkten im Bereich des Personenverkehrs und des Güterverkehrs. Dabei sind strategisch von ausschlaggebender Bedeutung die Innovationen im Fahrweg. Ausgehend von der heutigen Betriebsleittechnik (BLT) - bestehend oft noch aus Signal + Draht - über neue BLT als funkbasierte Leittechnik bis hin zum automatischen Fahren. Technische Innovationen im Schienenverkehr mit flexiblen, an die Nachfrage schnell anpassbaren automatischen Zugsystemen für schwache Räume und Relationen.

Klar ist jedoch, dass die eigentliche Herausforderung des Schienenverkehrs im Güterverkehr besteht. Hier entwickeln sich die Marktstrukturen in Richtung wachsender kleiner Relationsaufkommen und somit nicht „systemgerecht“ für die Bahn. Die Flexibilisierung der Zugeinheiten ist ein wesentlicher Ansatz, den veränderten Marktbedingungen gerecht zu werden. Unumgänglich ist eine volle Integration in die Logistikprozesse. Dazu ist ein elektronisches Kommunikations- und Brems - Steuersystem im Güterverkehr eine Grundvoraussetzung.

Zusammengefasst läßt sich z.B. der *Schienenverkehr der Zukunft* wie folgt beschreiben:

- IT-getrieben in jeder Faser und Phase
- Volle Ausnutzung vorhandenen Laderaumangebotes
- 100%-ige Verfügbarkeit im Betrieb
- Instandhaltungsfrei zwischen den Wartungsintervallen
- Extrem verschleißarm
- Selbstüberwachung im Betrieb
- Volle Nutzung der Bremsenergie
- Produktivitätsverdoppelung innerhalb von 10 Jahren

Diese, für den Schienenverkehr im Detail beschriebenen „Ziel-Visionen“ kann man hinsichtlich der Optimierungsziele getrost auch auf die anderen Verkehrsträger übertragen. Entscheidend im Sinn einer verstärkten Ressourcenschonung wird aber sein - und das sind die zentralen Ziele der Forschung im Bereich flexibler Transportketten – die Fahrleistungen des Lkw-Verkehrs zu vermindern durch bessere Auslastung und Leerfahrtenvermeidung sowie die Integration der Verkehrsträger in durchgehenden Transportketten mit verstärktem Einsatz von Bahn

und Binnenschifffahrt. In ersten Ansätzen ist es gelungen, die Wettbewerbsposition der Binnenschifffahrt zu stärken und den Schienenverkehr in durchgehende Logistikketten zu integrieren /1/.

Das positive Potential des **kombinierten Verkehrs** wird in Deutschland noch nicht in ausreichendem Maße genutzt. Hier würde sich vielleicht mal ein Blick über die Landesgrenzen lohnen. So sind - nicht zuletzt durch die positive Entwicklung des Kombi-Verkehrs in England - die britischen Eisenbahnen die einzigen Bahngesellschaften in Europa, die ihren Marktanteil in den letzten Jahren haben steigern können. Eine vergleichbare Entwicklung zeigt sich bei dem Blick über den großen Teich. In den USA ist die Entwicklung des Bahnverkehrs expandiert. Hierzu hat insbesondere der kombinierte Verkehr durch einen besseren Zuschnitt auf die Kundenbedürfnisse beigetragen. Der oftmals ins Feld geführte Vorteil der größeren mittleren Transportweite in den USA (ca. 1.400 km) im Vergleich zu Deutschland (ca. 250 km) ist so gesehen kein Naturgesetz, wären da nicht in Europa die Behinderungen durch die nationalen Grenzen. Die mittleren Transportweiten können im Zuge einer gründlichen Reorganisation des Bahnwesens erheblich nach oben verschoben werden.

Bezieht man die Erfahrungen aus dem Ausland in die nationalen Überlegungen mit ein, so ist der Markterfolg des Kombinierten Verkehrs in Deutschland unter den folgenden Voraussetzungen möglich:

- Fortsetzung der Bahnreform mit unternehmerischer Eigenständigkeit der DB Cargo
- Erhöhung der Produktivität durch Personaloptimierung
- Einsatz moderner Umschlagtechniken
- Verbesserung der Kundenorientierung, Pünktlichkeit, Einbindung des Transports in die Betriebsabläufe, dafür Verfügbarkeit der notwendigen Trassen.
- Europaweite Organisation kombinierter Verkehre aus einer Hand ohne technisch/organisatorisch bedingte Grenzaufenthalte.
- Bis zur Erreichung des angestrebten Ziels Optimierung des Finanzierungssystems zur Erstellung von Umschlaganlagen und Trassenkosten.

2.4 Ganzheitliches Mobilitätskonzept

Sieht man den Verkehr als notwendiges Mittel zum Zweck, d.h. als die Summe der erforderlichen Ortsveränderungen zur Wahrnehmung bestimmter Aktivitäten, so ist natürlich auch der nichtmotorisierte Individualverkehr „zu Fuß“ und „mit dem Fahrrad“

in die Mobilitätsbetrachtung mit einzubeziehen. Wenn man bedenkt, dass fast die Hälfte aller Pkw-Fahrten in einem Entfernungsbereich liegt, der auch zu Fuß und mit dem Fahrrad abgedeckt werden kann, dann heißt das aber auch, dass eine „Stadt der kurzen Wege“ alleine nicht ausreicht, das Verkehrsaufkommen zu reduzieren; denn auch in kurzen Entfernungsbereichen werden erhebliche Anteile mit dem Auto zurückgelegt.

Analysen zeigten, dass im Vergleich zum ÖPNV der nichtmotorisierte Individualverkehr das höchste Substitutionspotential aufweist /1/. Um dieses Potential zu heben ist es notwendig, dass ein Umdenkprozeß bei den Verkehrsteilnehmern stattfindet. Um dies zu erreichen, sind sogenannte „soft policies“ notwendig. Hierunter versteht man die Vermittlung von Kenntnissen über Verhaltensoptionen, die Förderung des Verständnisses bestimmter Verhaltensmuster sowie die Beeinflussung persönlicher Überzeugungen bzw. Einstellungen. Soft-policies beeinflussen die Realisation von Tätigkeitsmustern durch Ortsveränderungen und damit auch das Ortsveränderungs-/Verkehrsverhalten und so die Verkehrsmittelwahl. Um dies zu erreichen, bieten sich sogenannte Public-Awareness-Konzepte an. Darunter versteht man alle Möglichkeiten, subjektive Wahrnehmung zu verändern, in diesem Fall zielgerichtet hinsichtlich ressourcenschonender Mobilität. Die hierzu erforderlichen Werbekampagnen unter Einbeziehung von Multiplikatoren zur freiwilligen Verhaltensveränderung können den Verkehrsteilnehmer ihr eigenes Verkehrsverhalten bewußt werden lassen, denn *zukunftsfähiges, umweltgerechtes und ressourcenschonendes Verkehrsverhalten beginnt in den Köpfen.*

3 Nachhaltige Energiewirtschaftsperspektiven

3.1 Ausgangslage

Die Sicherstellung umweltverträglicher Energie wird als eine der größten Herausforderungen der Menschheit angesehen. Welche Anforderungen stellt dies an die zukünftigen Antriebstechniken und Energieträger, und wie kann dieser Herausforderung begegnet werden? Denn: die heutigen Verfahren zur Energiegewinnung haben alle die Spezifika, dass beim Verbrennen fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle diese unwiederbringlich verloren gehen und dabei steigt der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre.

Was die heutige Antriebstechnik betrifft, so werden hier mittelfristig der Otto- und der Dieselmotor weiterhin dominieren. Durch Optimierung der konventionellen Motorentechnik werden sich die Schadstoffemissionen und der Energieverbrauch

kontinuierlich weiter vermindern. In Verbindung mit der Herstellung massereduzierter Fahrzeuge und der Serienreife direkteinspritzender Benzinmotoren werden neue, ständig effizientere Fahrzeuge den Fahrzeugpark bestimmen. Es ist davon auszugehen, dass die schadstoffarmen, direkteinspritzenden Dieselfahrzeuge bei der Pkw-Zulassung einen vergleichsweise höheren Bestandsanteil haben werden, und dass sich der Energieverbrauch bei den Pkw kontinuierlich bis auf etwa die Hälfte des heutigen Flottenverbrauchs verringern könnte /2/, /3/. Im Güterverkehr bleibt der Dieselmotor die nahezu ausschließliche Antriebstechnik. Optimierungen des Antriebsstrangs und des Verbrennungsprozesses bewirken auch hier eine weiterhin kontinuierliche, wenn auch im Vergleich zum Personenverkehr geringere Absenkung des mittleren Energieverbrauchs. Bedeutungsvoller sind hier die Energiereduktionspotentiale der gesamten Transportkette (Energieeinsatz je tkm) durch eine bessere Auslastung, Logistik und durch kombinierte Verkehre.

Unter Zugrundelegung der gesetzlich vorgeschriebenen Absenkung des Schwefelgehalts im Dieselkraftstoff ist davon auszugehen, dass die Abgasqualität der Dieselmotoren weiter deutlich verbessert wird.

3.2 Alternative Antriebstechnologien

Ausgelöst durch die Klimaschutzdiskussionen und die Bestrebungen, die Luftbelastung immer weiter zu senken, hat in den zurückliegenden Jahren parallel zur Weiterentwicklung der konventionellen Verbrennungsmotoren die Erforschung und Entwicklung alternativer Antriebstechnologien und Kraftstoffe stark zugenommen, mit dem Ziel des emissionsfreien Fahrzeugs. Die Bandbreite der erforschten Kraftstoffe reichte dabei von Wasserstoff, Erdgas in flüssiger oder komprimierter Form sowie den Flüssiggasen Propan und Butan über Alkohole bis hin zu Pflanzenölen respektive ihren Derivaten. Die technische Machbarkeit dieser Konzepte konnte grundsätzlich demonstriert werden. Bis heute haben jedoch lediglich Rapsölmethylester (Biodiesel), komprimiertes Erdgas und Flüssiggas eine Nischenanwendung in Deutschland gefunden. Viele Entwicklungen konnten sich auf Grund ihres vergleichsweise unwirtschaftlichen Einsatzes am Markt nicht durchsetzen. Als Fazit dieser intensiven Forschungen kann angenommen werden, dass der Einsatz von Biodiesel und komprimiertem Erdgas auch künftig beibehalten und auf die Bereiche beschränkt sein wird, bei denen die Vorteile dieser Technologien – niedrige Emissionen beim Erdgas und gute biologische Abbaubarkeit beim Biodiesel – von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Das Ziel der verkehrswirtschaftlichen Verkehrsstrategie muß es sein, sich zukünftig auf einen, maximal zwei, den technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien

genügenden alternativen Kraftstoffe für Personen- und Güterfahrzeuge zu verständigen. Diese(r) Kraftstoff(e) sollte(n) unabhängig vom Erdöl sein, aus erneuerbaren Rohstoffen hergestellt werden können, die Schadstoffemissionen und das CO₂ in der gesamten Energiekette weiter reduzieren und für ein breites Spektrum von Antriebssystemen einsetzbar sein. Aus dieser Sicht ist unter der Zielsetzung des emissionsfreien Fahrzeugs Wasserstoff der Energieträger der Zukunft. Kohlenstofffrei verbrennt er ohne Freisetzung von Kohlendioxid und zudem äußerst schadstoffarm.

Für den Wasserstoffeinsatz in Fahrzeugen werden zur Zeit zwei unterschiedliche Strategien verfolgt. Ein Entwicklungspfad besteht darin, den Wasserstoff im Ottomotor anstelle von Benzin zu verwenden. Diese Technologie wurde inzwischen in einer Anzahl von Pilotprojekten auf ihre Serienreife hin untersucht. Als Ergebnisse konnten Abgasreduktionen gegenüber konventionellen Fahrzeugen um mehr als 95 % erzielt werden.

Ein zweiter, vielversprechender neuer Weg wird mit dem **Brennstoffzellenfahrzeug** beschritten. In der Brennstoffzelle wird Wasserstoff mit Luftsauerstoff in Gegenwart eines Katalysators zu Wasserdampf umgesetzt. Der bei der Reaktion von Wasserstoff mit Luftsauerstoff entstehende Strom speist die Elektromotoren für den Fahrzeugantrieb. Die wesentlichen Vorzüge dieser Technologie sind ein hoher Fahrzeug- Wirkungsgrad von ca. 35% (ca. 10% höher als bei einem modernen Dieselmotorantrieb) und es entstehen bei der „kalten“ Verbrennung von Wasserstoff keine Schadstoffe.

3.2 Wasserstoffspeicherung und -infrastruktur

Neben der Fahrzeugtechnik ist die Kraftstoffspeicherung und -infrastruktur entscheidend für die erfolgreiche Einführung eines neuen Antriebs- und Kraftstoffkonzeptes. Sie muß effizient, bedienerfreundlich, möglichst in das bestehende System integrierbar sein und kostengünstig. Dies vorausgesetzt, stehen dem flächendeckenden Einsatz von Wasserstoff generell zwei Probleme entgegen: Zum einen müßte eine flächendeckende Infrastruktur aufgebaut werden, die alle Stufen von der Herstellung über den Transport bis hin zur Verteilung umfaßt. Dies setzt ein hohes Investitionsbudget voraus und wird sicherlich bis zur geplanten Einführung der Brennstoffzellenfahrzeuge im Jahre 2005 nicht verwirklicht werden können. Außerdem ist die Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug bisher noch nicht befriedigend gelöst. So erfordert komprimierter gasförmiger Wasserstoff voluminöse Druckgastanks, die das zum einen das Platzangebot im Fahrzeug verringern und zum anderen nur eine eingeschränkte Reichweite von rund 200 km erlauben.

Bei der Verwendung von flüssigem Wasserstoff kann eine deutlich höhere Speicherkapazität und damit verbunden eine größere Reichweite der Fahrzeuge erzielt werden. Allerdings ist dafür eine technisch aufwendige und somit teure Kältetechnik zur Speicherung des -250° Celsius kalten Gases notwendig. Es gibt jedoch die Möglichkeit, durch die Verwendung von flüssigen Kohlenwasserstoffen wie Benzin oder Methanol sowohl das Problem der noch nicht vorhandenen, sehr teuren Infrastruktur als auch die bisher ungelösten Speicherungsprobleme zu umgehen. Als Wasserstoffquelle in einem konventionellen Fahrzeugtank mitgeführt werden die flüssigen Wasserstoffe in einem der Brennstoffzelle vorgelagerten Reformier in Wasserstoff und Kohlendioxid gespalten, wobei danach der Wasserstoff der Brennstoffzelle zugeführt wird.

Da eine Reihe von Kraftfahrzeugherstellern intensiv an der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen arbeiten /4/, scheint die Annahme nicht unrealistisch, dass ab dem Jahre 2005 die ersten Serienfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb vom Band laufen.

4 Schlußfolgerungen

Ressourcen zu schonen und das Grundrecht auf Mobilität auch für künftige Generationen zu sichern, ist eine der großen Herausforderungen unseres Zeitalters. Für die heutige Gesellschaft stellt sich nicht die Frage, *was passieren wird*, sondern *was passieren kann* unter zielgerichteter Einbeziehung der vielfältigen Möglichkeiten der hier angesprochenen innovativen Technologien der Mobilitätsforschung. Die Politik ist gefordert, die Rahmenbedingungen für die Gesellschaft zu schaffen, die es ermöglichen, dass die, die in der Gesellschaft Verantwortung tragen, „Hand in Hand“ diese Menschheitsaufgabe zu lösen in der Lage sind. *Soft policies*, hier insbesondere *public-Awareness-Konzepte* müssen Umdenkprozesse bei den Verkehrsteilnehmern bewirken und das Bewußtsein für ressourcenschonende Mobilität nachhaltig schaffen.

Wasserstoff ist der Energieträger der Zukunft. Forschungsergebnisse zeigen, dass der Verbrennungsmotor im Prinzip technisch für die Wasserstoffanwendung einsatzbereit ist. Beim Brennstoffzellenantriebe besteht weiterer Forschungsbedarf. Jedoch zeigen die Erfolge der vergangenen Jahre, dass die angekündigten Zeit- und Zielvorstellungen realistisch sind, wenn die Eigendynamik eines sich neu formierenden Marktes einsetzt. Hierfür sprechen die aktuellsten Veröffentlichungen u.a. im Internet /4/. Danach werden zunächst brennstoffzellenbetriebene Busse mit Wasserstoff als Energieträger fast lautlos durch unsere Städte fahren, kurze Zeit später dann auch die ersten Pkw.

Fazit: Die Welt sollte sich möglichst auf den hoffnungsvollsten alternativen Antrieb konzentrieren, die Brennstoffzelle. Sie hat einen weitaus höheren Wirkungsgrad als der Verbrennungsmotor. Sie ist sauber und sie hat den Vorteil, dass sie sowohl mobil als auch stationär einsetzbar ist. Klärungsbedarf besteht hinsichtlich der Frage, mit welchem Treibstoff die Brennstoffzelle gespeist wird: Methanol, Wasserstoff, Benzin oder etwas anderem?

Im gesamten Feld der Mobilitätsdiskussion darf hier aber auch ein übergreifender Steuermechanismus für eine langfristig gesicherte Mobilität nicht unerwähnt bleiben: die Steuerung über Angebot und Nachfrage hinsichtlich der Benutzung vorhandener Straßen und Parkplätze unter marktüblichen Gesichtspunkten.

Zur Zeit überlassen die Gebietskörperschaften von Bund, Ländern und Gemeinden eines ihrer größten wirtschaftlichen Vermögen kostenlos unterschiedlichem, teilweise willkürlichem Interessentenzugriff. Somit haben die, die das System sparsamer nutzen möchten, dazu kaum eine Chance. Im Sinne einer möglichst gerechten Kostenverteilung wäre eine Verkehrsreform denkbar, die unter Berücksichtigung der Nachfrage und der Zahlungsbereitschaft der Verbraucher die Preise nach Kosten und Knappheit nach marktwirtschaftlichen Regeln sich entwickeln ließe. Nach dem Motto: *Strasse finanziert Strasse* könnte einer der Schlüssel das Road-Pricing-System sein, satelliten- und mobilfunkgestützt, datengeschützt und flächendeckend für alle Strassen und Parkplätze.

Würden sich alle Verkehrsträger dieser technisch-wirtschaftlichen Effizienzreform unterziehen, könnte es unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten zu einer realistischeren Bewertung des allgemeingültigen Ausspruchs kommen: *Entfernung ist teuer*. Und machen wir es uns noch einmal bewusst:

„Zukunftsfähiges, umweltgerechtes und ressourcenschonendes Verkehrsverhalten beginnt in den Köpfen“.

5 Literatur

- /1/ Mobilitätsforschung für das 21. Jahrhundert
Verkehrsprobleme und Lösungsansätze
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Und
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
Tagung in Göttingen am 04. U. 05. Mai 2000
(z. Zt. in der Veröffentlichung)
zu beziehen über:
Projekträger Mobilität und Verkehr, Bauen und Wohnen des BMBF
TÜV Rheinland, Köln**
- /2/ Diverse Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt
Konferenzen
Monographien
IKARUS-Berichte**
- /3/ Shell Pkw-Szenarien
Mehr Autos – weniger Emissionen
Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen
in Deutschland bis zum Jahr 2020
Deutsche Shell Aktiengesellschaft
Im September 1999**
- /4/ Internet-Auszug:
HyWeb: Neuigkeiten – HyWeb-Gazette
29.07.00**

Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Umwelt/Environment:

1. **Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung**
IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996
herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten
ISBN 3-89336-205-3

2. **Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft**
Ein Beitrag zum Klimaschutz
Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze (1997), 138 Seiten
ISBN 3-89336-206-1

3. **Modellinstrumente für CO₂-Minderungsstrategien**
IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997
herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten
ISBN 3-89336-207-X

4. **IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken**
IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“
H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten
ISBN 3-89336-214-2

5. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten
ISBN 3-89336-215-0

6. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO₂
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten
ISBN 3-89336-216-9

7. **Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien**
 IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
 Abschlußbericht Teilprojekt 1 „Modelle“
 P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen,
 M. Walbeck, J.-Fr. Hake (1998), VI, 276 Seiten
 ISBN 3-89336-220-7

8. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
 Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 3. Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung
 herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1998), VIII, 95 Seiten
 ISBN 3-89336-222-3

9. **Horizonte 2000**
 6. Wolfgang-Ostwald-Kolloquium der Kolloid-Gesellschaft
 3. Nachwuchstage der Kolloid- und Grenzflächenforschung
 Kurzfassungen der Vorträge und Poster
 zusammengestellt von F.-H. Haegel, H. Lewandowski, B. Krahl-Urban (1998),
 150 Seiten
 ISBN 3-89336-223-1

10. **Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung**
 von M. Kleemann, F. van Erp, R. Kehrbaum (1998), 59 Seiten
 ISBN 3-89336-224-X

11. **Policy Scenarios for Climate Protection**
 Study on Behalf of the Federal Environmental Agency
Volume 4. Methodological Guideline for Assessing the Impact of Measures for Emission Mitigation
 edited by G. Stein, B. Strobel (1998), 103 pages
 ISBN 3-89336-232-0

12. **Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe**
 Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen
 Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
 Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 1.
 von R. Kunkel, F. Wendland (1998), 110 Seiten
 ISBN 3-89336-233-9

13. **Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im
Flußeeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 2.
von F. Wendland, R. Kunkel (1999), 166 Seiten
ISBN 3-89336-236-3

14. **Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und
internationalen Verpflichtungen**
IKARUS-Workshop am 27.05.1998, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad
Godesberg. Proceedings
herausgegeben von E. Läge, P. Schaumann, U. Fahl (1999), ii, VI, 146 Seiten
ISBN 3-89336-237-1

15. **Satellitenbilddauswertung mit künstlichen Neuronalen Netzen zur
Umweltüberwachung**
Vergleichende Bewertung konventioneller und Neuronaler Netzwerkalgorithmen
und Entwicklung eines integrierten Verfahrens
von D. Klaus, M. J. Canty, A. Poth, M. Voß, I. Niemeyer und G. Stein (1999),
VI, 160 Seiten
ISBN 3-89336-242-8

16. **Volatile Organic Compounds in the Troposphere**
Proceedings of the Workshop on Volatile Organic Compounds in the
Troposphere held in Jülich (Germany) from 27 – 31 October 1997
edited by R. Koppmann, D. H. Ehhalt (1999), 208 pages
ISBN 3-89336-243-6

17. **CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das
CO₂-Minderungsprogramm der KfW**
Eine modellgestützte Wirkungsanalyse
von M. Kleemann, W. Kuckshinrichs, R. Heckler (1999), 29 Seiten
ISBN 3-89336-244-4

18. **Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und
Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben**
Symposium und Podiumsdiskussion, Izmir, Türkei, 28.-30.05.1998.
Konferenzbericht
herausgegeben von A. Özdamar, H.-G. Groehn, K. Ülgen (1999), IX, 245 Seiten
ISBN 3-89336-247-9

19. **Das Weg-, Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 3.
von R. Kunkel, F. Wendland (1999), 122 Seiten
ISBN 3-89336-249-5

20. **Politiksznarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2020
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1999), XII, 201 Seiten
ISBN 3-89336-251-7

21. **Klimaschutz durch energetische Sanierung von Gebäuden. Band 1**
von J.-F. Hake, M. Kleemann, G. Kolb (1999), 216 Seiten
ISBN 3-89336-252-2

22. **Electroanalysis**
Abstracts of the 8th International Conference held from 11 to 15 June 2000 at the University of Bonn, Germany
edited by H. Emons, P. Ostapczuk (2000), ca. 300 Seiten
ISBN 3-89336-261-4

23. **Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050**
von M. Kleemann, R. Heckler, G. Kolb, M. Hille (2000), ii, 94 Seiten
ISBN 3-89336-262-2

24. **Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums**
von H.-G. Schwarz (2000), XIV, 127 Seiten
ISBN 3-89336-264-9

25. **Klimawirkungsforschung auf dem Prüfstand**
Beiträge zur Formulierung eines Förderprogramms des BMBF
Tagungsband des Workshop „Klimaforschung“, Jülich, vom 02. bis 03.12.1999
von J.-Fr. Hake, W. Fischer (2000), 150 Seiten
ISBN 3-89336-270-3

26. **Energiezukunft 2030**

Schlüsseltechnologien und Techniklinien

Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000 am 2./3. Mai 2000

herausgegeben von U. Wagner, G. Stein (2000), 201 Seiten

ISBN 3-89336-271-1

Forschungszentrum Jülich



Band / Volume 26
ISBN 3-89336-271-1

Umwelt
Environment